

# Određivanje parametara uzbudnoga sustava generatora višeciljnom optimizacijom i pronalaženje skupa rješenja minimalnih oscilacija

---

Špoljarić, Tomislav

Doctoral thesis / Disertacija

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:517204>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Tomislav Špoljarić

**ODREĐIVANJE PARAMETARA UZBUDNOGA  
SUSTAVA GENERATORA VIŠECILJNOM  
OPTIMIZACIJOM I PRONALAZENJE SKUPA  
RJEŠENJA MINIMALNIH OSCILACIJA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Tomislav Špoljarić

**ODREĐIVANJE PARAMETARA UZBUĐNOGA  
SUSTAVA GENERATORA VIŠECILJNOM  
OPTIMIZACIJOM I PRONALAZENJE SKUPA  
RJEŠENJA MINIMALNIH OSCILACIJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Pavić

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Tomislav Špoljarić

**DETERMINATION OF GENERATOR EXCITATION  
SYSTEM PARAMETERS BY MULTIOBJECTIVE  
OPTIMIZATION AND FINDING MINIMAL  
OSCILLATION SOLUTIONS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Ivica Pavić, PhD

Zagreb, 2022

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Pavić, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

Doktorski rad ima: 227 stranica

Doktorski rad br.: \_\_\_\_\_

## *Životopis mentora*

Ivica Pavić rođen je u Slavonskom Brodu 1962. godine. Diplomirao je i magistrirao u polju elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu 1987., odnosno 1992. god., a doktorat znanosti stekao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu u polju elektrotehnike 1999. godine. Početkom 1987. godine počeo je raditi u tvornici Rade Končar-Elektrouređaji, a u listopadu iste godine zaposlio se kao asistent na Zavodu za visoki napon i energetiku Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu. Trenutno je zaposlen na radnom mjestu redovitog profesora na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Sudjelovao je u 7 znanstveno-istraživačkih projekata financiranih od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH, te jednom međunarodnom projektu. Objavio je preko 100 radova u znanstvenim i stručnim časopisima, te zbornicima međunarodnih i domaćih konferencija iz područja analize i vođenja pogona, te planiranja razvoja elektroenergetskog sustava. Autor je dva sveučilišna priručnika, te recenzent većeg broja znanstvenih članaka u inozemnim i domaćim časopisima. Član je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), stručnih udruga IEEE i HRO CIGRÉ, te dva Tehnička odbora Hrvatskog zavoda za norme.

## *About supervisor*

Ivica Pavić was born in Slavonski Brod in 1962. He received B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering (ETF), Croatia, in 1987 and 1992, respectively and Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Croatia in 1999. In the beginning of 1987, he started working in Rade Končar - Electric Systems and from October of the same year he is working at the Department of High Voltage and Power Systems at ETF, Zagreb. Currently he is a Full Professor at FER Zagreb. He participated in 7 scientific projects financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia and in one international scientific project. He published more than 100 scientific and professional papers in journals and international and domestic conference proceedings in power system analysis, control, and planning. He is an author of two university manuals and reviewer of many scientific articles in international and domestic journals. He is a member of Croatian Academy of Engineering (HATZ), IEEE society, Croatian Committee of CIGRÉ and two technical committees of Croatian Standards Institute.

## *Posveta*

*dedi Mirku (2020+) i unuku Noi*



*„Had we but world enough and time...“*

*Andrew Marvell, 17.st*

## ***Zahvala***

*Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivici Paviću na pomoći, sugestijama i velikom prijateljstvu stvorenom za vrijeme studija. A najviše na strpljenju.*

*Zahvaljujem se obitelji na ljubavi i podršci.*



## ***Sažetak***

U doktorskom radu obrađena je problematika vezana za optimizaciju parametara PSS stabilizatora (engl. *Power System Stabilizer*) i AVR regulatora (eng. *Automatic Voltage Regulator*) kroz upotrebu modeliranja elektroenergetskog sustava (EES-a) i simuliranja rada sustava u specifičnim operativnim stanjima. Operativna stanja su vezana za ispitivanje kutne stabilnosti i uključuju realne pogonske situacije kao što su privremeni ispad interkonekcijskog voda, kratkotrajni ispad opterećenja, trolni kratki spoj ili uklop dodatnog tereta. Kroz simulaciju se koristi višeciljna metaheuristička optimizacija sa svrhom nalaženja optimalnih parametara za koje sustav treba reagirati sa što manjim oscilacijama odziva. Predviđeni algoritmi su algoritmi starije i novije generacije metaheurističke inteligencije: VRPSO (eng. *Velocity Relaxed Particle Swarm Optimization*), ALO (eng. *Ant Lion Optimizer*), SSA (eng. *Salp Swarm Algorithm*) i SA (eng. *Simulated Annealing*). Ciljne funkcije su vezane za integral umnoška vremena i odstupanja promatranih veličina, te pokazatelje kvalitete prijelaznog procesa. U višeciljnoj optimizaciji tih dviju funkcija koristi se analiza Pareto optimalnosti dva stanja.

**Ključne riječi:** stabilnost elektroenergetskog sustava, kutna stabilnost, višeciljna optimizacija, AVR regulator, PSS stabilizator

# **DETERMINATION OF GENERATOR EXCITATION SYSTEM PARAMETERS BY MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION AND FINDING MINIMAL OSCILLATION SOLUTIONS**

Power system stability observation is a complex term in which several types of dynamic and stationary processes are being observed and maintained. It is defined as an ability of a power system to maintain certain stable operating point. This is sometimes hard to tackle since power systems are largest and most complex physical systems built by humanity. In problems regarding dynamic transitions from one operating point to other observations include monitoring fast transients caused by abnormal perturbations. These disturbances include changes in load, short circuit appearances and disconnection/reconnection of significant elements caused by protection devices.

Fast transients and disturbances are defined by a branch of stability called angle stability in which rotor electrical angles of synchronous machines are of primary concern. Machines' angular speeds and voltages are also the points of interest since they play significant roles in stability of rotor inertia of the generator and thus a stability of a whole electric power system. Small signal stability and transient stability were also defined by a group of experts in field as subcategories of angle stability problem. Corresponding oscillations of these values are being damped by using excitation control devices: automatic voltage regulators (AVR) and power system stabilizers (PSS). The former regulates the voltage output connected to field windings placed on rotor, while the latter helps in damping the oscillations by using auxiliary output signal connected to excitation system. Adequate parameter settings therefore ensure good reaction and suppressed oscillations of mentioned values.

In this thesis a method of acquiring parameter setting by multi-objective metaheuristic intelligence is proposed, tested, and discussed as a solution to tackle the problems of simultaneous parameter selection, minimizing the effect of post disturbance swings, and helping the power system to restore or acquire new stable operating points. This method uses the observation of angular speed deviances, terminal voltages and critical transmission lines divided into two objective functions. First objective observes sum of time weighted integral absolute errors (ITAE) of rotor angular speed differences, terminal voltages, and tie line transmission powers, while the second objective observes mean quality of time response indicators: overshoot, undershoot and transient times of rotor angular speed differences. These two functions are used as objectives in attaining minimal oscillations in system through several

single and multi-objective optimization tests. These tests include observation of effectiveness and comparison of several algorithms and methods.

In first part of a thesis power system stability is briefly introduced. Description of its categories and subcategories is explained, as well as operating conditions and perturbations which are inherent to them. Further focus is on description of rotor angle stability and possible oscillatory instabilities that may occur as a result of different types of disturbances in such a system. With these instabilities in mind oscillatory modes are categorically described, putting focus on low frequency oscillations such as inter-area (between areas), intra-plant (between machines in an area) and local modes (between machine and a system). In previous research provided by different authors these oscillations are proven to be most significant in rotor angle stability observations. These oscillations are then observed and handled by careful parametrization of excitation control devices.

Theoretical background continues in chapter 3 by describing used mathematical MATLAB models of synchronous generators, excitation system, PSS (MB-PSS, generic delta-omega PSS), AVR and power system models. First tested power system model has three areas and three machines (WSCC), and the second tested model has two areas and four machines (TAFM). Definition and detailed description of synchronous machine model is given since the dynamic oscillatory behavior of significant physical values in a power system depends very much on a behavior of machines and their electrical and mechanical interconnection. Also, excitation control system is defined in detail as a system that consists of a synchronous machine, excitation system with exciter and synchronous machine regulator, as is described in IEEE standard 421.1 for excitation systems for synchronous machines. Model of the AVR regulator is defined for the purpose of research as a PT1 transfer function block with transient gain reduction block. This model is used in each of the tests with two described power system models. Power system stabilizers include: a) multi-band PSS type that relies on a simplified version of IEEE PSS4b model and is used in tests of a WSCC model, and b) delta-omega (generic) PSS that is used in tests of a TAFM model of a power system. Through models of excitation control devices parameters of interest are extracted and presented as variables that are to be optimized for achieving oscillations as minimal as possible.

Theoretical introduction (chapter 4) further continues in description of a metaheuristic optimization paradigm, single-objective optimization, and multi-objective optimization. Pareto optimality is explained through mathematical background, and definition of objective functions is proposed. These objectives are suggested for single and multi-objective testing in multi-

machine environment of two proposed power system models. Additionally, two different decision-making methods are described and used in tests for multi-objective algorithm variants: *no-preference* method (in which normalized objectives are not prioritized, but equal in importance) and *linear scalarization* method (which uses weighted factors across normalized search space of two objective functions for *a priori* decision making on importance of each of two objective functions). Theoretical part concludes with detailed descriptions of several metaheuristic optimization algorithms (chapter 5) which includes mathematical descriptions, flow-charts, and pseudo-codes. Metaheuristic algorithms used for simulations and testing are Ant-Lion Optimizer (ALO), Salp Swarm Algorithm (SSA), Velocity-Relaxed Particle Swarm Optimization (VRPSO; a variant of standard PSO algorithm) and Simulated Annealing (SA) – in single and multi-objective form. This information is used as an underlying layer in developing MATLAB workspace code for calculation, optimization and interaction with Simulink graphical interface and its correspondent power system models.

Testing section starts by introducing starting conditions for calculation: algorithms' parameters, disturbance descriptions (test cases), limits for AVR/PSS parameter search space and equations for calculation of algorithm evaluation factors. These equations are proposed as a method for calculation of algorithm's convergence power in each of the testing trial. Also, best, mean, and relative values of algorithm evaluation factors are proposed and used in comparison across variety of tested algorithms and methods. Along with these new proposed factors standard evaluation methods are also shown: best value in objective function, mean value of objective function across fixed number of trials and its corresponding standard deviation.

In the case of WSCC model test cases include disturbances such as: automatic reclosure of tie-line after short circuit, self-clearing short circuit fault on tie-line and temporary load outage. In the case of TAFM model test cases include disturbances such as: automatic reclosure of tie-line after short circuit, self-clearing short circuit fault on tie-line, load injection and temporary load outage. Testing results are divided into two subsections: single-objective and multi-objective tests on two power system models described in chapter 3. Every subsection has the visual part with time responses of rotor speeds, rotor speed differences, terminal voltages and tie line power flow which are shown for every test case. Convergence curves and Pareto sets/fronts are also added. Numerical analysis is done by tables which include best results, Pareto fronts, parameter setting and algorithm evaluation factors.

The purpose of testing is explained by conclusion of results: in both types of optimization (single and multi-objective optimization) time responses of rotor angular speeds, voltages and tie-line power show satisfactory oscillation suppression with rare exclusions in single-objective tests (mainly) and in no-preference method (very small number of tests). On these rare occasions time responses show weakly damped low-frequency modes. Linear scalarization methods in multi-objective optimization show excellent results in damping every oscillatory mode of interest. Also, the additional benefit of multi-objective optimization methods is a Pareto set of solutions. While single-objective methods produce single solution, Pareto set gives a set of solutions according to the definition of Pareto dominance and thus gives a choice to the decision maker to choose a solution according to preference that may be towards first or second objective function.

An algorithm comparison in single objective optimization tests on both power system models concludes that novel algorithms SSA and ALO are dominant in acquiring best objective values with better performance in converging to its optimum. Classic SA algorithm shows good results on some occasions, and VRPSO algorithm has proven to be the least effective in obtaining satisfactory results for minimizing the system's observed oscillations. Also, a comparison of each of the single objective optimization methods is made, in terms of observing the other objective when optimizing by a certain function. Both optimization methods show effective results according to their objective functions. On rare occasions single objective optimization by first objective function (ITAE function) proved to have slight advantage in obtaining the second objective, over the optimization by second objective function (time response quality indicators).

Evaluation of multi-objective optimization tests are done in three cases: no preference method, linear scalarization method with higher importance toward first objective function and linear scalarization method with higher importance toward second objective function. Method comparison shows that linear scalarization shows better overall performance in numerical results (when obtaining better objective values) and time responses of observed angular speeds, voltages, and power. In the case of first objective function linear scalarization methods are exclusively dominant in obtaining best results and minimal system oscillations. In the case of second objective function no preference method shows better performance in most of the test cases according to numerical analysis, with some exclusions regarding linear scalarization methods. When breaking down the results across tested algorithms in both tested power system models novel algorithms (SSA, ALO) in very large portions of tests produce best results with

satisfying convergence quality. Classical SA algorithm shows some potential in performance, but VRPSO algorithm (as is also the case in single objective optimization) shows least satisfying results.

Additional analysis (chapter 7) is done by numerical and graphical comparison of best single-objective and multi-objective optimization test results. Results are being compared in two ways: by best value of first or by best value of second objective function. Visual part includes comparison of responses of values of interest (angular speeds, terminal voltages, and tie line transmission power flow), while adding a Pareto view of a multi-objective front and single-objective result's placement on Pareto view, thus making it comparable for dominance evaluation. Graphical and numerical results show that according to the time-weighted integral error (first function) multi-objective linear scalarization methods show best results exclusively and according to second objective no preference method is mostly better, with some inclusion of linear scalarization and single objective methods. Pareto views show that in most cases single objective results are dominated by Pareto front of multi-objective results. On some occasions best single objective result can be viewed as a Pareto set member, but never is completely dominant over Pareto set obtained by best multi-objective optimization algorithm.

In accordance to overall numerical and graphical analysis it can be concluded that linear scalarization methods give the best results in fast acquiring a stable operating point after the disturbance. Also, from the perspective of algorithm observation (with tests done across the spectrum of two power system models with seven disturbance scenarios and five tested single and multi-objective methods for each scenario) novel algorithms (SSA first, ALO second) show better results in most of test cases, whether it is single or multi-objective variant of an algorithm. In general, when selecting the appropriate method combined with an algorithm, test case results shown in this thesis suggest that effective choice involves a MOSSA or MOALO algorithm combined with linear scalarization methods for correct parameter selection of AVR and PSS devices in a disturbed system.

The further research of this topic is very broad and may include several different aspects or their combination. Analysis may include other type of PSS or AVR regulators and/or different and more complex power system models. In terms of multi-objective optimization penalty functions for search space limitation seem to be a good choice for a next step to improve given results. A wide variety of optimizing algorithms is also available for testing and can be used to perform oscillation minimization by changing the excitation control parameters.

Also, other type of AI paradigms may be included for faster acquiring of results. Multi-objective optimization is a heuristic process that may take much of the processing power. Subsequently, the time consumed for this calculation process may be large. A research that combines multi-objective optimizers used for acquiring initial data sets and machine/deep learning techniques used for learning from these initial data sets could provide faster and thus more efficient results when suggesting the best synchronous machines' excitation control parameters for effective suppression of oscillatory modes in a perturbed power system.

**Keywords:** power system stability, rotor angle stability, multi-objective optimization, automatic voltage regulator (AVR), power system stabilizer (PSS)

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Uvodna razmatranja .....	1
1.2 Motivacija .....	2
1.3 Pregled literature .....	3
2. Stabilnost elektroenergetskog sustava.....	7
2.1 Općenito o stabilnosti EES-a .....	7
2.2 Klasifikacija stabilnosti EES-a.....	8
2.3 Kutna stabilnost.....	10
2.3.1 Kutna stabilnost malih poremećaja.....	14
2.3.2 Prijelazna stabilnost.....	16
3. Modeliranje elektroenergetskog sustava .....	19
3.1 Matematički model sinkronog generatora.....	19
3.2 Matematički model uzbuđenog sustava sa AVR-om.....	24
3.3 Matematički model PSS uređaja .....	27
3.3.1 Delta-omega PSS (Generički PSS).....	28
3.3.2 Multi-band PSS (MB-PSS).....	29
3.4 Trostrojni tropodručni model EES-a (WSCC, IEEE 9bus).....	31
3.5 Četverostrojni dvopodručni model EES-a (TAFM).....	33
4. Metaheuristička optimizacija .....	37
4.1 Jednociljna optimizacija.....	37
4.2 Višeciljna optimizacija.....	39
4.2.1 Neutralna metoda odlučivanja (no-preference method) .....	41
4.2.2 Metoda linearne skalarizacije težinskim faktorima (weighted sum method) ...	43
5. Metaheuristički algoritmi u primjeni testiranja stabilnosti EES-a .....	45
5.1 Ant-lion optimizer.....	45
5.2 Salp Swarm Algorithm.....	50
5.3 Velocity Relaxed Particle Swarm Algorithm.....	52
5.4 Simulated Annealing.....	54
6. Primjena metaheurističke optimizacije u parametranju uzbuđenih sustava generatora ...	59
6.1 Ispitni slučajevi – scenariji pogonskih poremećaja.....	59
6.1.1 Scenariji pogonskih poremećaja u EES-u – WSCC model .....	59
6.1.2 Scenariji pogonskih poremećaja u EES-u – TAFM model .....	59
6.2 Inicijalni parametri ciljnih funkcija i algoritama .....	60
6.3 Granice parametara regulacijskih uređaja uzbuđenih sustava .....	61
6.4 Analitički pokazatelji kvalitete konvergencije optimizacijskih algoritama .....	62
6.5 Parametranje uzbuđenih upravljačkih sustava jednociljnom optimizacijom .....	64
6.5.1 WSCC model - rezultati ispitivanja, jednociljna optimizacija .....	65
6.5.2 TAFM model - rezultati ispitivanja, jednociljna optimizacija .....	82
6.6 Parametranje uzbuđenih upravljačkih sustava višeciljnom optimizacijom.....	103
6.6.1 WSCC model - rezultati ispitivanja, višeciljna optimizacija.....	104
6.6.2 TAFM model - rezultati ispitivanja, višeciljna optimizacija .....	128
7. Usporedba učinkovitosti jednociljne i višeciljne optimizacije.....	159
7.1 Usporedba učinkovitosti – WSCC model .....	159
7.2 Usporedba učinkovitosti – TAFM model .....	174
8. Zaključak.....	193
Literatura .....	197
Popis slika .....	203
Popis tablica .....	215



Popis oznaka i kratica.....	217
Oznake (elektrotehnika, stabilnost EES-a).....	217
Oznake (računarstvo, metaheuristika) .....	219
Kratice .....	221
Životopis.....	223
Popis objavljenih radova .....	223
Curriculum Vitae.....	227

# 1. Uvod

## 1.1 Uvodna razmatranja

Elektroenergetski sustav je fizički najsloženiji sustav koji je napravljen od strane čovjeka i zato njegovo modeliranje predstavlja izazov za potrebe ispitivanja stabilnosti i robusnosti. Sama stabilnost elektroenergetskog sustava je širok pojam čije definicije se vremenom i pojavom novih problema sve više granaju od strane adekvatnih svjetskih stručnjaka. Kako je EES kao fizički sustav podložan i raznim vrstama poremećaja, pojavljuje se i potreba za raspoznavanjem i definiranjem raznih vrsta stabilnosti obzirom na veličine sustava, odnosno na dinamiku oporavka sustava. Glavne tri vrste stabilnosti se pritom dijele na kutnu, naponsku i frekvencijsku stabilnost. U slučajevima kada je prisutna brza dinamika sustava uglavnom se radi o kutnoj stabilnosti, odnosno kada novo stacionarno stanje nastupa ovisno o sposobnosti zadržavanja sinkronizma kroz ravnotežu momenata sinkronih generatora. Kod kutne stabilnosti novo stacionarno stanje može biti jednako pretporemećajnom i tada se takav slučaj promatra kroz prizmu stabilnosti malih poremećaja. Takve situacije su karakteristične za kratke spojeve u mreži ili kratkotrajne ispade elemenata, kada je sustav dovoljno robusan da kroz kratki vremenski period može izdržati pojavu poremećaja. U slučaju kada dolazi do nove radne točke, što je karakteristično za uklope ili trajni ispad proizvodne, potrošačke ili prijenosne jedinice, tada je riječ o prijelaznoj stabilnosti. Promjene koje se u tom slučaju javljaju mogu biti oscilatornog ili neoscilatornog tipa. Ukoliko je promjena prilikom malih poremećaja neoscilatorna u sustavu postoji problem nedovoljnog momenta sinkronizma, dok je u slučaju oscilatorne promjene riječ o nešto kompleksnijem definiranju problema stabilnosti.

Dosadašnja istraživanja raznih metoda upravljanja sa svrhom smanjivanja oscilacija uključuju dva općenita pristupa: metodu ispitivanja svojstvenih vrijednosti sustava i metodu analize simulacijom dobivenih oscilacija. Metodom ispitivanja svojstvenih vrijednosti mogu se klasificirati tipovi oscilacija, definirati participacije proizvodnih jedinica u jačini oscilacija i prepoznati upravljivost i nadzor nad određenim veličinama sustava. Međutim sama definicija jednadžbi stanja sustava postaje bitno kompleksnija već sa manjim proširenjima elektroenergetskog sustava. Metodom analize simulacijom nije moguće direktno izvući navedene podatke, ali predstavlja jednostavniji način inicijalizacije i promatranja dinamike elektroenergetskog sustava. U današnje vrijeme sa eksponencijalnim rastom kompleksnosti

računala i odgovarajućih softverskih alata za simulaciju dovoljno je modelirati sustav sa svojim početnim vrijednostima nakon čega se simulacijom može dobiti odziv sustava. Iz dobivenog odziva moguće je potom napraviti daljnje korake pri namještanju parametara regulatora koji su zaduženi za smanjenje oscilacija u sustavu.

Pojavom raznih algoritama umjetne inteligencije i njihovim razvojem dolaze u fokus i mogućnosti rješavanja raznih nelinearnih problema, pa tako i problema stabilnosti elektroenergetskih sustava. Daljnji razvoji i ispitivanja takvih algoritama u rješavanju osnovnih matematičkih i inženjerskih problema omogućili su i širinu pristupa u rješavanju kompleksnih nelinearnih problema u kakve se ubrajaju i razne promatrane situacije za razne tipove stabilnosti elektroenergetskih sustava.

## **1.2 Motivacija**

Krajem 80-ih godina i prepoznavanjem problematike međupodručnih oscilacija sve više u fokus dolazi ispitivanje stabilnosti sustava pri malim poremećajima. Kroz definiciju stabilnosti sustava pri malim poremećajima klasificirani su i različiti tipovi oscilacija koji se pojavljuju u sustavima s više proizvodnih jedinica. Početna ispitivanja prijelazne i stabilnosti malih poremećaja su se orijentirala na prepoznavanje karaktera oscilacija promatranjem svojstvenih vektora i jediničnih vrijednosti sustava. Takav pristup je rezultirao boljim poznavanjem karaktera oscilacija, međutim povećanjem računalnih mogućnosti, većom kompleksnošću modela, i metodama simulacije utvrđeni su i uvjeti za direktniji pristup problematici. Raznim AI algoritmima u računalnim modelima koji, uz osnovne elemente EES-a, sadrže i detaljne strukture regulatora moguće je promjenom varijabilnih parametara kod regulatora utjecati na smanjenje oscilacija.

Dosadašnja istraživanja vezana uz namještanje regulatora AI metodama su najčešće vezana za jednostavniji model EES-a, odnosno model generatora na krutoj mreži (engl. *Single Machine Infinite Bus – SMIB*). Kasnijim unaprjeđenjem kompleksnosti modela istraživanja se fokusiraju i na trostrojni tropodručni model (engl. *IEEE 9-bus system model*) te četverostrojni dvopodručni model (engl. *Two-Area-Four-Machine model – TAFM*) sa raznim tipovima PSS regulatora i ostalih promjenjivih jedinica kao što su kompenzacijski uređaji. Uključivanjem čestične optimizacije u parametriranje PSS regulatora istraživanja su krenula u smjeru određivanja ciljnih funkcija iz vremenske i frekvencijske domene. Pritom korištene veličine su uključivale primjerice razne odnose brzina vrtnje rotora proizvodnih jedinica, njihovih

devijacija, napona, djelatnih i jalovih snaga, te pripadajuće pokazatelje kvalitete prijelaznih procesa. Izbor takvih ciljnih funkcija je bio vezan čisto uz iskustvene podatke prethodnih istraživanja i promatranja ponašanja sustava kroz navedene metode simuliranja modela i/ili ispitivanja svojsvenih vrijednosti sustava.

Primjenom višeciljne optimizacije (engl. *Multi-objective optimization – MOO*), metoda višeciljnih pristupa (*a priori, a posteriori*, hibridne, interaktivne) i povećanjem broja vrsti algoritama u fokus dolazi i mogućnost ispitivanja nelinearnih sustava, a tako i definiranje participiranja pojedinih ciljnih funkcija u rješavanju problema minimiziranja oscilacija.

Pretpostavka provedenih istraživanja u ovom radu je da se upotrebom višeciljne optimizacije uz promatranje brzine vrtnje rotora, napona i djelatne snage kroz interkonekcijske vodove između područja unutar sustava može riješiti problem minimizacije oscilacija, odnosno postići osnovni cilj istraživanja.

Motivacija izrade ovog rada je ispitivanje mogućnosti višeciljne optimizacije kod promatranja stabilnosti pri malim poremećajima i prijelazne stabilnosti upotrebom ciljnih funkcija koje uzimaju u obzir generatorske prilike (brzina vrtnje rotora, napon na sabirnicama) i snage interkonekcijskih vodova, a sa svrhom adekvatnog i simultanog podešavanja parametara upravljačkih uređaja uzбудnih sustava više generatora kako bi oscilacije u sustavu bile što manje. Korištenjem algoritama čestične inteligencije novije generacije (ALO i SSA) i starije generacije (SA, PSO) potrebno je simulacijski ispitati dinamiku pogonskih stanja i podesiti parametre sa svrhom što većeg smanjenja oscilacija promatranih veličina sustava.

Osnovni cilj za postizanje rezultata i potvrdu hipoteze kroz istraživanja u ovom radu je pronalaženje zadovoljavajućih odziva veličina u sustavu kroz djelovanje višeciljnih optimizacijskih metoda na upravljačku sekciju uzbudnih sustava generatora u EES-u.

### ***1.3 Pregled literature***

Temelj istraživanja čini literatura iz dva odvojena područja: stabilnosti elektroenergetskog sustava i čestične inteligencije. Knjige [1] – [4] iz područja stabilnosti EES-a su bazni dio kroz koji se definira i klasificira stabilnost EES-a, uz potporu modeliranju elemenata i cjeline elektroenergetskog sustava kroz teoriju i proračunske primjere. U članku [5] detaljno je prikazana raspodjela raznih vrsta stabilnosti elektroenergetskog sustava, koja je rezultirala egzaktnom kategorizacijom kroz trajanje dinamike stanja sustava nakon određenog poremećaja. Stabilnost malih poremećaja i prijelazna stabilnost kao podskup problematike

kutne stabilnosti su ispitane kroz knjige [6] i [7]. Također, u navedenoj literaturi je prikazano i modeliranje AVR i PSS regulatora. Pojava oscilatornih odziva, prepoznavanje različitih vrsta oscilacija, definiranje participiranja proizvodnih jedinica u oscilacijama je definirano u literaturi [8] i [9]. Navedena literatura se također bavi i metodama regulacije za smanjivanje oscilacija u sustavu, odnosno matematičko modeliranje regulacijskih elemenata u jednostrojnom i višestrojnom okruženju elektroenergetskog sustava. U zborniku [10] predstavljena su istraživanja vezana za međupodručne oscilacije, pripadajuće matematičke transformacije (*Prony* metoda, *Hilbert-Huang* transformacija) i estimaciju stanja sustava kroz dobivene podatke iz mjerenja dobivenih iz WAMS/PMU stanica. Za potrebe prepoznavanja međupodručnih oscilacija izveden je i matematički model sustava sa dva područja i četiri proizvodne jedinice (TAFM), ispitan i predstavljen u članku [11] koji je nastao kao rezultat truda skupine autora iz Kanade, tzv. *Hydro-Quebec task force*. Članci [12] – [18] koji se nadovezuju na tu tematiku se uglavnom bave pristupom proračuna kroz model stanja sustava i opisivanje dinamike rada sustava kroz lineariziranje modela u blizini radne točke, što i čini temelj stabilnosti pri malim poremećajima elektroenergetskog sustava, uz poneki praktični pristup kroz mjerenja putem PMU jedinica. Što se tiče WAMS sustava i primjene u analizi stabilnosti EES-a knjige [19] i [20] predstavljaju kvalitetan resurs. Matematičko modeliranje pojedinih elemenata EES-a, gdje proizvodne jedinice predstavljaju pravi izazov, je u hrvatskom govornom području opisano kroz literaturu [21] – [24].

Upoznavanje s problematikom čestične inteligencije je izvršeno kroz proučavanje literature iz tog područja u knjigama [25] – [30], u kojima su opisane razne metode optimizacije čestičnom inteligencijom i navedeni su primjeri iz matematičkog i inženjerskog područja. Naglasak na višeciljnu optimizaciju u opisu i primjeni algoritama čestične inteligencije se stavlja kroz literaturu [31] – [33]. Kratak pregled velikog broja algoritama čestične optimizacije, njihova inspiracija iz prirode i primjena u razne svrhe može se naći u članku [34].

Algoritmi koji su korišteni u radu i njihova primjena detaljno su razrađeni kroz slijedeću literaturu (uključujući i inicijalne *white paper* članke): ALO algoritam je opisan u jednociljnoj i višeciljnoj metodi kroz razne varijante u [35] – [38], PSO algoritam i VRPSO varijanta u [39] – [41], SSA u oba načina optimizacije zajedno sa raznim primjenama u [42], dok je SA algoritam opisan u [43] i [44].

Knjiga [45] predstavlja iscrpan izvor korištenja metaheuristike sa svrhom optimizacije rješavanja raznih problema unutar EES-a, a kratak pregled korištenja umjetne inteligencije u optimizaciji rada EES-a je prikazan u članku [46].

Početak istraživanja je uključivao pregled literature i testiranja raznih algoritama na najjednostavnijem regulacijskom krugu sinkronog generatora koji se sastoji od regulatora, uzbudnika i pojednostavljenog PT1 modela sinkronog generatora. Takav model je posebno zgodan za testiranje novijih algoritama i usporedbu sa starim algoritmima, što je vidljivo i iz literature [47] – [56].

Daljnji tijek postojećih istraživanja i sinergiju područja čestične inteligencije i stabilnosti EES-a upotpunjavaju članci iz područja primjene raznih metoda umjetne inteligencije (eng. *Artificial Intelligence*, AI) za parametrisiranje pojedinih regulacijskih elemenata sustava. Na jednostrojnog modelu generatora priključenog na krutu mrežu (SMIB) tako su ispitani i verificirani slijedeći algoritmi: neuronske mreže sa hibridnim  $H_\infty$  regulatorom kao zamjenom za AVR-PSS kombinaciju [57], VRPSO algoritam za parametrisiranje PSS-a [58], te genetski algoritam za parametrisiranje FOPID regulatora kao zamjene za klasični PSS [59]. Klasični PSO algoritam kombiniran sa LMI metodom za parametrisiranje PSS-a se koristi u [60] i [61], dok se ispitivanja za isti u AVR-PSS kombinaciji mogu naći u [62].

Kod višestrojnog okruženja istraživanja se baziraju na različitim metodama kod dvostrojnog modela, TAFM modela, trostrojnog tropodručnog *IEEE 9bus* modela, te raznih kompleksnijih višestrojnih modela. Istraživanja koja daju izvrstan uvid u ponašanje modela EES-a pri raznim poremećajima i uključuju same algoritme čestične inteligencije mogu se naći u slijedećoj literaturi:

- jednociljna optimizacija pri parametrisiranju PSS-a modificiranim PSO algoritmom [63],
- primjena genetičkih algoritama na PSS parametrisiranju za TAFM i *New England 39-bus model* primjenom MATLAB-a [64],
- PSO optimizacija AVR-a bazirana na jednociljnoj optimizaciji oscilacija u TAFM modelu [65],
- jednociljna PSO optimizacija bazirana na dvije ciljne funkcije iz područja jediničnih vrijednosti kod *IEEE 9bus* modela [66],
- višeciljna optimizacija PSS parametara SPEA algoritmom i ciljnim funkcijama iz područja frekvencijske analize [67] na TAFM i *New England* modelima,
- IPSO metoda jednociljne optimizacije iz područja vremenske domene na PID tipu PSS-a [68],
- jednociljna optimizacija genetičkim algoritmom i PSO algoritmom na TAFM modelu pri parametrisiranju TCSC kontrolera [69],

- višeciljna optimizacija SOA algoritmom i ciljnim funkcijama vremenske domene pri parametriranju PSS i SSSC regulatora na modelima SMIB i TAFM [70],
- jednociljna optimizacija PSS parametara dvjema hibridnim metodama kombiniranim sa PSO, GA i TS algoritmima na *IEEE 9bus* modelu [71],
- jednociljna optimizacija AGC regulatora DE, GA i BSOA algoritmima [72], te
- jednociljna optimizacija MB-PSS uređaja ciljnim funkcijama iz područja S-domene raznim metaheurističkim algoritmima na *New England* modelu [73].

Uvidi u razne AI metode (osim čestične metaheuristike) korištene u stabilnosti malih poremećaja koji su na razne načine pomogli pri izradi ovog rada mogu se naći u slijedećoj literaturi:

- podešavanje PSS uređaja modeliranjem koherentnih grupa proizvodnih jedinica na dvostrojnom i *EAST10* modelu [74],
- klasifikacijska metoda za procjenu stabilnosti malih poremećaja potpomognuta neuronskim mrežama [75] korištena na *New England* modelu,
- adaptivno upravljanje strojnim učenjem bazirano na AIS metodologiji testirano na PSS uređajima *New England* modela [76],
- primjena  $H_\infty$  robusnih regulacijskih metoda za smanjenje oscilacija u EESu sa znatnim utjecajem vjetroturbina [77], testirana na proširenom TAFM modelu sa vjetroatregatima i SVC kompenzatorom,
- GMVSS metodologija korištena za parametriranje PSS-a na TAFM modelu [78],
- *neuro-fuzzy* PSS uređaji za smanjenje oscilacija testirani na *IEEE 9bus* modelu [79], te
- algoritam za podešavanje PSS uređaja baziran na kvalitativnosti pokazatelja vremenske i S-domene [80].

Posljednje, a vjerojatno i najvažnije što je bitno napomenuti za popis literature je knjiga [81] u kojoj je kreiran početak matematičke podloge koja je definirala stabilnost kao matematički pojam sa čime je otvorena mogućnost vrlo široke lepeze istraživanja fizikalnih dinamičkih sustava i njihovog ponašanja. Ta se mogućnost iscrpno i danas iskorištava u otkrivanju novih pogleda na dinamiku fizičkog svijeta, a time i dinamiku EES-a.

## **2. Stabilnost elektroenergetskog sustava**

### **2.1 Općenito o stabilnosti EES-a**

Definicija pojma i klasifikacija stabilnosti elektroenergetskog sustava su dugi niz godina predstavljale izazov stručnjacima i istraživačima dinamike ponašanja elektroenergetskih sustava. Kao rezultat zajedničkog napora stručnjaka iz područja stabilnosti [5] producirana je jasna definicija stabilnosti EES-a: „*Stabilnost EES-a je sposobnost EES-a da za definirane početne pogonske uvjete dođe u stanje operativne ravnoteže nakon što je podvrgnut nekom fizikalnom poremećaju i to na način da većina varijabli elemenata EES-a ostane nepromijenjena*“.

EES je vrlo kompleksan i nelinearan sustav čiji pogonski uvjeti su kontinuirano podložni raznim tipovima promjena u okolini koja uključuje razne elemente proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje. Promjena, odnosno poremećaj kojem je sustav podvrgnut uzrokuje ponašanje sustava takvo da, ovisno o početnim uvjetima sustava i prirodi samoga poremećaja, može doći do lakših i/ili težih posljedica po sam sustav. Gore navedena definicija stabilnosti EES-a se uobičajeno odnosi na EES kao cjelinu sa svim promatranim elementima, međutim može se promatrati i dinamička stabilnost pojedinih elemenata kao što su proizvodni generatori ili motorski potrošači. No, generalno gledano stabilnost je svojstvo cijeloga sustava da ostane u ravnoteži za početne pogonske uvjete zadane prije pojave samoga poremećaja.

Poremećaji se mogu klasificirati kao lakši ili teži. Lakši poremećaji se uglavnom promatraju kroz prizmu kontinuirane promjene opterećenja (potrošnje/gubitaka u mreži) u sustavu. S tog stajališta, adekvatno izveden EES je sustav koji je planiranjem, projektiranjem i izvođenjem napravljen tako da takvi lakši poremećaji ne stvaraju značajne probleme sa aspekta stabilnosti. Takav EES se kontinuirano prilagođava novim pogonskim uvjetima i može se reći da zadovoljavajuće funkcionira. Što se tiče težih poremećaja (kratki spojevi, permanentni ili privremeni ispadi značajnijih elemenata mreže, uklopi/isklopi velikih opterećenja) oni mogu utjecati na ponašanje sustava na način da se zadrži ili izgubi stabilnost sustava. EES može za razne tipove težih poremećaja rezultirati različitim ishodima: novim ili istim stabilnim pogonskim stanjem ili nestabilnošću i ispadom. Zato se stabilnost velikih poremećaja za promatrani sustav ispituje isključivo za određeni poremećaj u tom sustavu, dok se EES planira i izvodi prema vjerojatnosti pojave određenih poremećaja. Dakle, kod planiranja EES-a se uzimaju u obzir poremećaji čija pojava je vjerojatnija, te se pritom uzima u obzir i moguća



izolacija/ispad dijela sustava koju EES mora moći izdržati, kao što bi planom trebalo predvidjeti i cijeli set ozbiljnijih poremećaja te mogućnost zadržavanja stabilnosti nakon njihove pojave.

Veliki broj zaštitne opreme može sudjelovati u postporemećajnim djelovanjima. Primjerice, teži poremećaj na kritičnom dijelu mreže može dovesti do izolacije dijela sustava proradom relejne zaštite, a kao posljedica se mogu pojaviti oscilacije u tokovima snaga, napona na sabirnicama i brzinâ vrtnje rotora proizvodnih jedinica. Oscilacije u brzinama mogu uzrokovati dodatno djelovanje turbinskih regulatora, dok promjene napona mogu utjecati na kvalitetu rada potrošača. Osim toga, zaštita pojedinih uređaja može početi djelovati u takvim uvjetima i izbacivati pojedine elemente sustava. Navedeni scenariji utječu na sustav na način da se narušava stabilnost cjeline i otvara se mogućnost pojave nestabilnosti.

Nakon poremećaja, ako sustav ostane stabilan, on postiže novo ravnotežno stanje sa sačuvanim integritetom: uglavnom svi generatori i opterećenja ostaju povezani kroz prienosne elemente. U nekim slučajevima može se desiti odvajanje pojedinih generatora ili potrošača s mreže koji su značajnije pogođeni poremećajem. Djelovanje automatske regulacije ili ljudskog faktora (operateri vođenja sustava) omogućava pritom sustavno vraćanje EES-a u normalni pogon. S druge strane, ukoliko sustav padne u nestabilnost to rezultira kaskadnim ispadima elemenata, a s time i konačnim ispadom velikog dijela mreže. Stoga, bez obzira na dinamičku prirodu ponašanja sustava pri malim poremećajima, svrsishodno je za pretpostaviti da se prilikom ispitivanja ponašanja sustava podvrgnutog određenom poremećaju sustav nalazi u stacionarnom stanju.

U postporemećajnim uvjetima stabilan sustav može zadržati pretporemećajno stanje (ukoliko nema topoloških promjena mreže) ili postići novo stanje ravnoteže. Ti uvjeti direktno koreliraju sa matematičkim opisom asimptotske stabilnosti prema Lyapunovu [81] koji nalaže da za sve početne uvjete u nekoj okolini trajektorija dinamičkog sustava ima ograničeno područje kretanja za promatrano vrijeme  $t \geq t_0$  (gdje je  $t_0$  početno vrijeme koje odgovara početnim uvjetima) i da za  $t \rightarrow \infty$  trajektorija sustava teži ravnotežnoj točki. Navedena analitička definicija je sa svoja dva opisana uvjeta direktno vezana za očekivano ponašanje i stabilnog fizikalnog sustava, pa je primjenjiva i u slučaju ispitivanja stabilnosti EES-a.

## **2.2 Klasifikacija stabilnosti EES-a**

Iako je stabilnost EES-a pojam koji obuhvaća EES kao cjelinu, različiti tipovi poremećaja koji narušavaju stabilnost, a kojima je EES podvrgnut, bi morali biti kvalitativno

opisani kako bi se mogli efektivno rješavati. Zbog kompleksnosti strukture EES-a potrebno je uvesti i određena pojednostavljenja u matematičkom opisu elemenata i poremećaja, ali je potrebno pripaziti da se određen nivo složenosti ipak zadrži kako bi se adekvatno moglo opisati dinamičku situaciju koja se ispituje u EES-u. Analitički gledano, potrebno je prepoznati ključne faktore koji doprinose nestabilnosti i posljedično razviti metodologiju rješavanja promatranog problema. Pritom je od velike pomoći adekvatno razvijena kategorizacija stabilnosti EES-a koja omogućuje analitički pristup u prepoznavanju problematike stabilnosti EES.

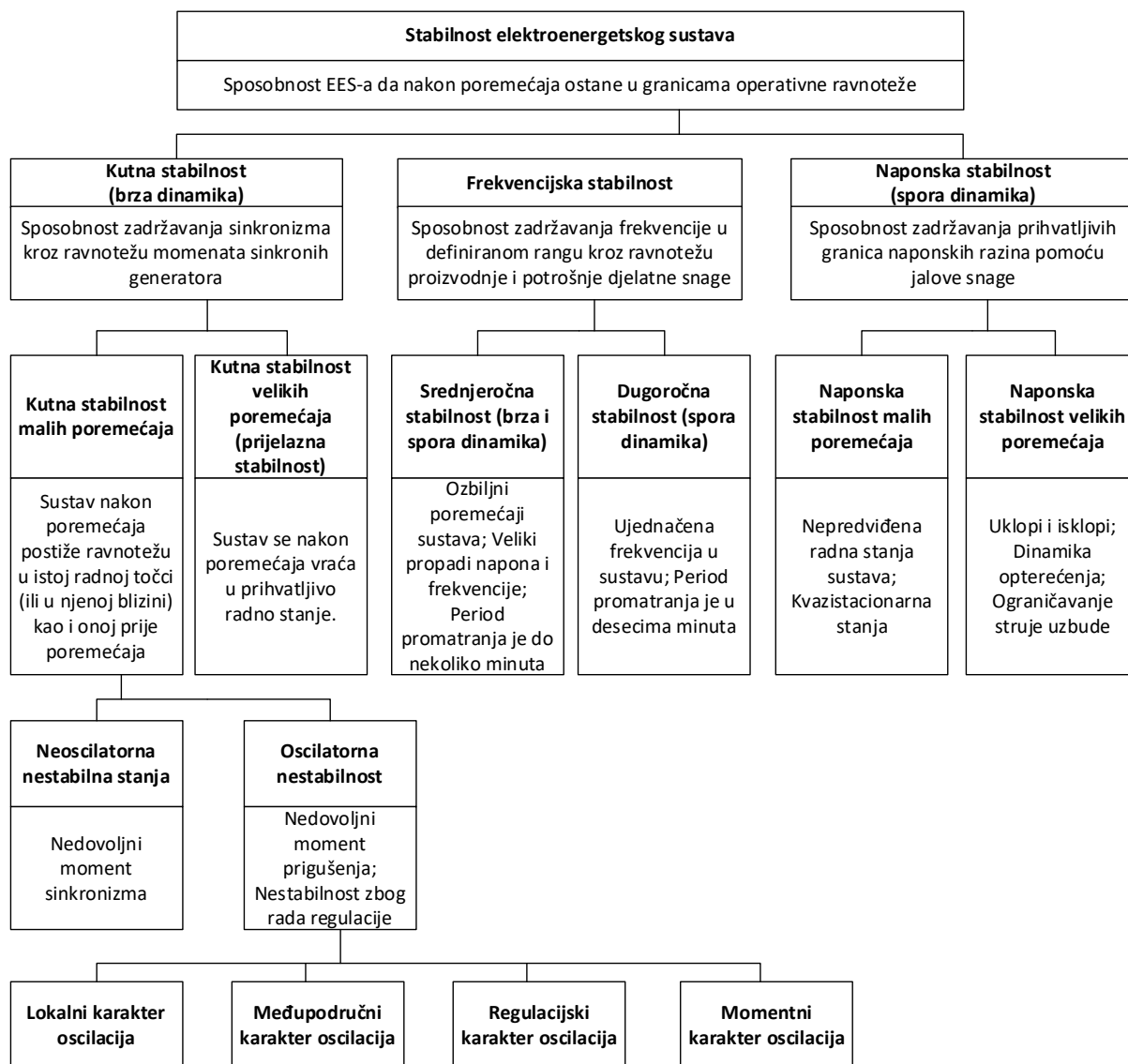
Posljednja službena kategorizacija stabilnosti [5] polazi od slijedećih promatranja:

- promatranje fizikalne prirode rezultirajuće nestabilnosti kroz glavnu varijablu sustava kroz koju se nestabilnost može promatrati,
- promatranje veličine specifičnog poremećaja, koje utječe na metodu proračuna i estimacije stabilnosti,
- promatranje elemenata EES-a i vremenskog raspona koje se uzima u obzir pri procjeni stabilnosti.

Tri su glavne kategorije stabilnosti EES-a obzirom na glavnu varijablu sustava i dinamiku poremećaja:

- **kutna stabilnost** – sposobnost sinkronih strojeva u mreži da nakon poremećaja ostanu u sinkronizmu; karakteristična za brzu dinamiku,
- **frekvencijska stabilnost** – sposobnost EES-a da zadrži stacionarnu vrijednost frekvencije unutar prihvatljivih granica nakon poremećaja ravnoteže između proizvodnje i potrošnje uz minimalna rasterećenja sustava; karakteristična za srednjoročnu stabilnost,
- **naponska stabilnost** – sposobnost EES-a da zadrži stabilne vrijednosti napona na svim sabirnicama unutar dozvoljenih granica nakon poremećaja, ovisi o sposobnosti održavanja ravnoteže tokova snaga između potrošača i proizvodnih jedinica; karakteristična za sporu dinamiku: stacionarna i kvazi stacionarna stanja.

Slika 2.1. prikazuje glavne i sporedne kategorije stabilnosti EES-a.



Slika 2.1. Kategorizacija stabilnosti EES-a [5]

U ovome radu fokus je na stanjima i poremećajima koji su karakteristični za brzu dinamiku, dakle za kutnu stabilnost.

### 2.3 Kutna stabilnost

Prema definiciji kutna stabilnost je sposobnost proizvodnih jedinica EES-a da za definirano početno pogonsko stanje ostanu u sinkronizmu nakon perturbacije. Kutna stabilnost EES-a ovisi o ravnoteži između elektromagnetskog i mehaničkog momenta svakog sinkronog stroja u međusobno povezanoj elektroenergetskoj mreži pogođenoj promatranim poremećajem. Nestabilnost koja pritom može nastati kao rezultat poremećaja se manifestira kroz velike promjene u kutu opterećenja generatora koje mogu rezultirati gubitkom sinkronizma [5].

Kutna stabilnost se kao pojam referira na varijablu kuta poremećaja i esencijalno se prikazuje kroz *per-unit* jednadžbe njihanja proizvodnih jedinica, koje definiraju i oscilatorno ponašanje rotora. Te jednadžbe su definirane kao:

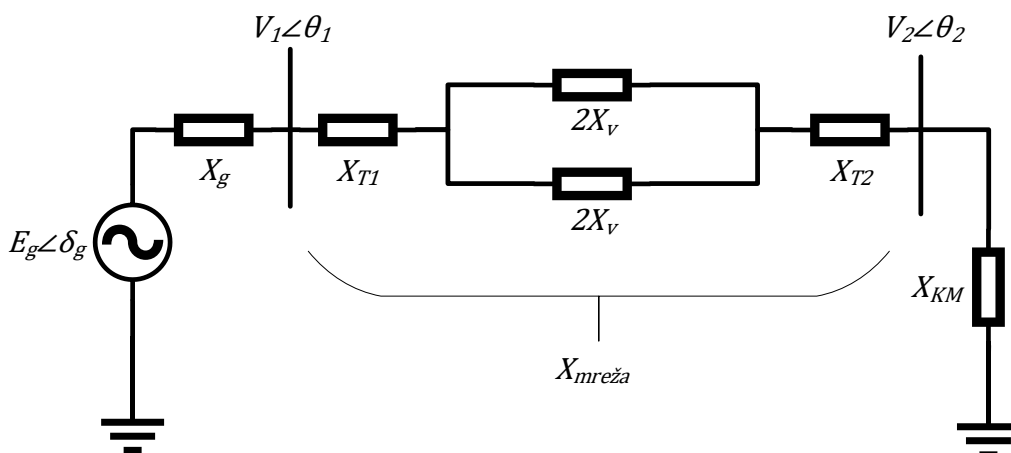
$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega_b(\omega - \omega_0) \quad (2.1)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)) \quad (2.2)$$

gdje je:

- $\delta$  – kut opterećenja generatora [°]
- $\omega$  – brzina vrtnje rotora generatora [p.u.]
- $\omega_b$  – bazna brzina vrtnje [rad/s]
- $\omega_0$  – sinkrona brzina vrtnje generatora [p.u.]
- $H$  – inercijska konstanta generatora [MWs/MVA]
- $T_m$  – mehanički moment na osovini generatora, turbinski moment [p.u.]
- $T_e$  – elektromagnetski moment generatora [p.u.]
- $D$  – konstanta prigušnog momenta

Iz jednadžbi (1) i (2) je vidljivo da stacionarno stanje nastupa kada su momenti jednaki, odnosno kada su u ravnoteži. U stacionarnom stanju nema promjene na kutu opterećenja generatora kao ni promjene brzine vrtnje. Dođe li do poremećaja na elementu EES-a, dolazi i do neravnoteže između mehaničkog i elektromagnetskog momenta, odnosno do ubrzavanja ili usporavanja vrtnje osovine a time i povećanja ili smanjenja kuta opterećenja rotora generatora.



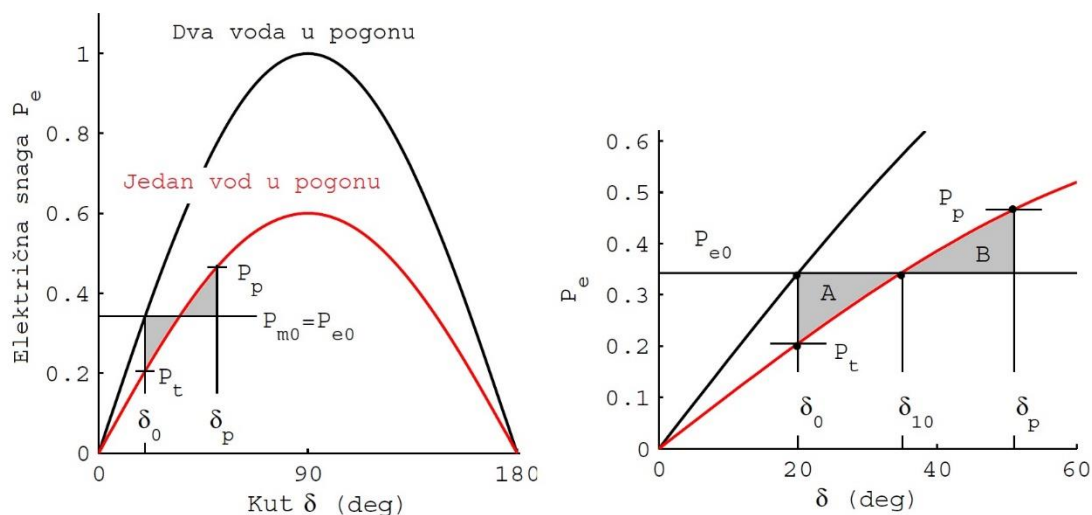
Slika 2.2. SMIB model EES-a za testiranje kutne stabilnosti (jedna faza)

Kutnu stabilnost u EES-u najlakše je opisati i pojednostavljenim modelom generatora priključenim na krutu mrežu (*SMIB* model) preko dva paralelna prijenosna voda. Takav model mreže se sastoji od generatora, uzlaznog transformatora, prijenosne mreže, silaznog transformatora i krute mreže, prikazanom na slici 2.2.

U pojednostavljenom izrazu za električnu snagu koja je od generatora prenesena krutoj mreži vrijedi:

$$P_e = \frac{E_g V_2}{X_g + X_{mreža}} \sin \delta \quad (2.3)$$

gdje je  $X_{mreža} = X_{T1} + X_v + X_{T2}$ . Jednadžba (1) prikazuje nelinearnu ovisnost snage u kutu opterećenja  $\delta$ , odnosno faznom pomaku između napona generatora  $\dot{E}_g$  i napona na sabirnicama krute mreže  $\dot{V}_2$ . Dodatno pojednostavljenje vrijedi ako se uzme da je  $\theta_2 = 0$ , odnosno da je  $\delta = \delta_g$ . Pri kutu  $\delta = 90^\circ$  snaga je maksimalna ( $P_{em}$ ) i pritom se ta snaga naziva prekretnom snagom. Ukoliko primjerice dođe do ispada jednog voda, pada i električna snaga i pogonska točka ( $\delta_0, P_{e0}$ ) se seli na drugu krivulju snage i tada kreću oscilacije zbog promjene odnosa snaga u sustavu – nelinearne električne snage  $P_e$  i konstantne mehaničke snage turbine  $P_m$ , na način kako je prikazano na slici 2.3. Pritom vrijedi da je sustav stabilan ukoliko je zadovoljena jednakost površina između površina A i B, odnosno ukoliko dođe do ispada voda sustav oscilira između točaka ( $\delta_0, P_t$ ) i ( $\delta_p, P_p$ ), dok se ne ustabili u novom pogonskom stanju u točki ( $\delta_{10}, P_{e0}$ ).



Slika 2.3. Krivulja  $P - \delta$  (lijevo), proširena verzija krivulje (desno) [6]

Dakle sustav je stabilan ukoliko je zadovoljen površinski stavak za koji vrijedi:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_p} \Delta P_e \cdot d\delta = 0 \quad (2.4)$$

Dakle pogonska slika dinamike opisanog SMIB sustava tokom poremećaja opisuje slijedeću situaciju: ako uz početne pogonske uvjete:

- 1)  $P_{e0} = P_{m0}$  (električna snaga predana mreži je jednaka mehaničkoj snazi turbine),
- 2) kut opterećenja je jednak  $\delta_0$  pri sinkronoj brzini vrtnje  $\omega_0$ ,
- 3) mehanička snaga  $P_{m0}$  turbine bude konstantna i nakon poremećaja,

dođe u trenutku  $t_0 = 0$  do poremećaja zbog kojeg ispada jedan prijenosni vod u paraleli, reaktancija prijenosnog sustava se povećava na  $2X_v$  čime se povećavaju gubici i prenesena snaga prema mreži se smanjuje. Snaga  $P_e$  pada na vrijednost  $P_t$  pri kutu  $\delta_0$  na novoj mjerodavnoj krivulji prijenosa snage za samo jedan vod (crvena krivulja na slici 2.3). Moment tereta koji mreža i prijenosni sustav zahtijevaju se povećava i utječe na ubrzanje osovine generatora, time stvarajući moment ubrzanja. Pritom se povećava kut opterećenja  $\delta$ . Dolazi do povećanja električne snage prijenosa iz točke  $P_t$ . Ubrzanje traje do snage ravnoteže  $P_e = P_{m0}$  nakon čega osovina počinje usporavati do točke  $P_p$ , kada staje i počinje se vraćati prema ravnotežnoj snazi, usput smanjujući kut opterećenja. Zbog inercije generatora sustav opet ubrzava u suprotnom smjeru promjene kuta opterećenja i prebacuje preko ravnotežne snage nakon čega slijedi ponovno usporavanje vrtnje osovine do točke na krivulji  $P_e > P_t$ . Sustav tako oscilira u području  $\langle (\delta_0, P_t), (\delta_p, P_p) \rangle$  dok se ne nađe u ravnoteži prenesene električne i turbinske mehaničke snage i stabilizira na sinkronoj brzini vrtnje osovine generatora, odnosno dok se moment ubrzanja ne smanji na nulu, a kut opterećenja poveća na  $\delta_{10}$ .

Da bi se oscilacije mogle prigušiti potreban je adekvatan prigušni moment na rotoru generatora, čime obično upravlja PSS uređaj. Takav osovinski prigušni moment je povezan sa vrtložnim strujama u jezgri i prigušnim namotima rotora generatora, kao i sa drugim veličinama koje su povezane uz gubitke kao što su trenje ili gubici snage u namotima. Uvjet postizanja stabilnosti u vremenu nakon poremećaja povezanog sa kutnom stabilnošću je osiguravanje adekvatnog momenta sinkronizma i prigušnog momenta na osovini generatora, za koje vrijedi slijedeće:

- 1) moment sinkronizma: komponenta promjene momenta  $T_S \Delta \delta$  koja je u fazi sa promjenom kuta opterećenja,

- 2) prigušni moment: komponenta promjene momenta  $T_D\Delta\omega$  koja je u fazi sa promjenom brzine vrtnje,

odnosno vrijedi [4]:

$$\Delta T_e = T_S\Delta\delta + T_D\Delta\omega \quad (2.5)$$

gdje je:

- $T_S$  – koeficijent momenta sinkronizma,
- $T_D$  – koeficijent prigušnog momenta.

Površinski stavak pokazuje da je sustav stabilan ukoliko je prisutna pozitivna vrijednost komponente prigušnog momenta, odnosno ako je ukupna energija njihanja proporcionalna površini A jednaka energiji njihanja proporcionalnoj površini B (slika 2.3.) [6].

Stabilnost sustava pritom ovisi o obje komponente elektromagnetskog momenta svih generatora u sustavu. Nedostatak komponente momenta sinkronizma rezultira aperiodskim pobjegom kuta opterećenja, dok nedostatak komponente prigušnog momenta dovodi do oscilatorne nestabilnosti u sustavu.

Zbog jednostavnije analize i konciznijeg uvida u razne probleme i prirodu kutne stabilnosti uobičajena je podjela kutne stabilnosti u dvije kategorije [4], [5]:

- 1) Kutna stabilnost malih poremećaja
- 2) Prijelazna stabilnost

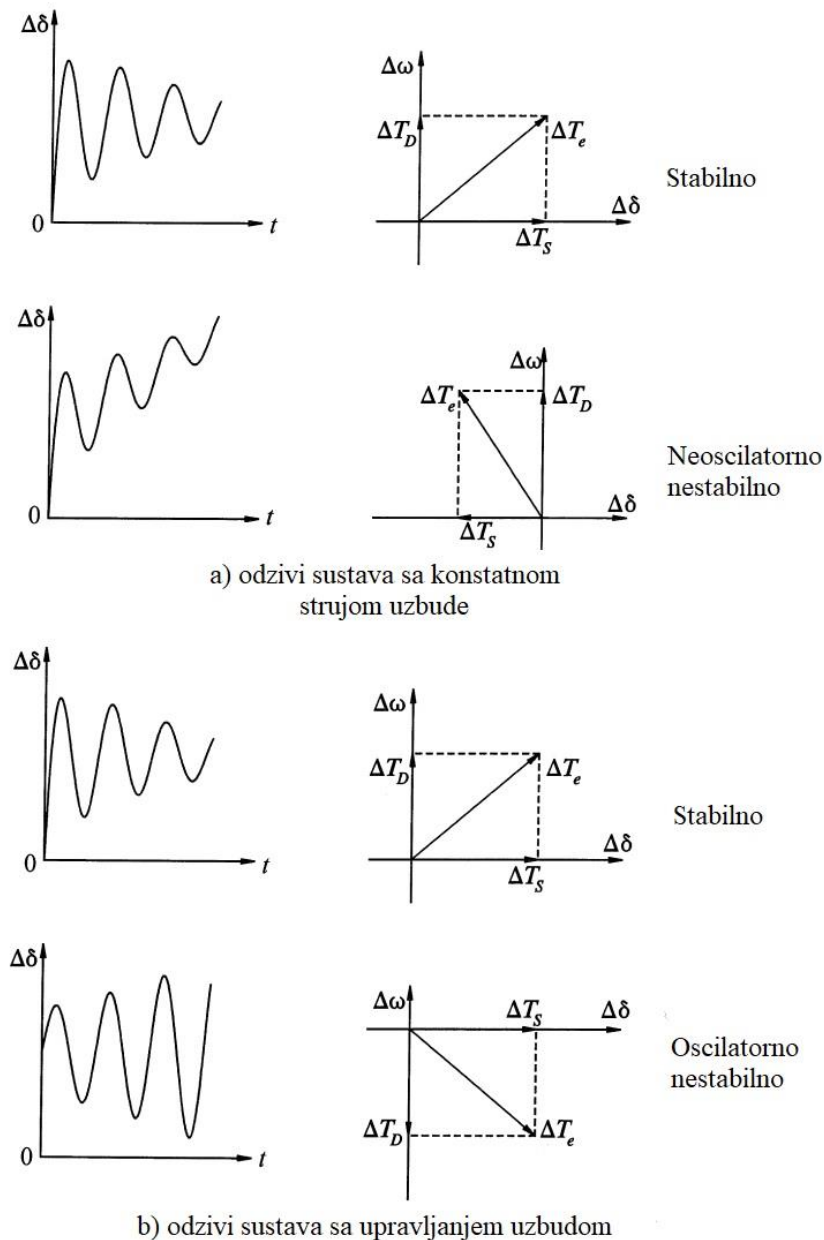
### **2.3.1 Kutna stabilnost malih poremećaja**

Kutna stabilnost malih poremećaja definira se kao sposobnost sustava da zadrži stanje sinkronizma pri perturbaciji malim poremećajima [1]-[7]. Takvi poremećaji se obično promatraju kroz prizmu malih varijacija u proizvodnji i/ili potrošnji i mogu se smatrati matematički dovoljno malenima kako bi se primijenila linearizacija diferencijalnih jednadžbi stanja sustava. Nestabilnost koju takvi poremećaji mogu uzrokovati u EES-u obično dolazi u dvije kategorije:

- 1) polagani porast (neoscilatorno stanje) zbog manjka momenta sinkronizma u sustavu,
- 2) oscilatorni porast brzine vrtnje rotora i kuta opterećenja zbog manjka komponente prigušnog momenta u EES-u.

Odziv sustava pritom ovisi o nekoliko faktora: početni uvjeti vođenja, robusnost prijenosnog sustava i tipu upravljanja uzbudama sinkronih generatora u sustavu. Ukoliko generator nema

mogućnost upravljanja uzbuđom putem odgovarajućeg AVR-a (konstantna struja uzbuđe), nestabilnost može nastati zbog manjka momenta sinkronizma, dajući sliku odziva koja je neoscilatornog porasta. Ukoliko postoje AVR regulatori koji mogu djelovati na uzbuđu tada eventualna nestabilnost koja nastupa obično bude rezultat manjka prigušnog momenta u sustavu i ima oscilatornu sliku porasta odziva. Poopćena slika odziva takvih nestabilnih i pripadnih stabilnih postporemećajnih stanja je prikazana na slici 2.4. [1]



Slika 2.4. Karakteristični odzivi sustava na male poremećaje [1]

Današnja istraživanja kutne stabilnosti malih poremećaja obično promatraju kao uzrok nestabilnosti nedovoljno prigušenje oscilacija, zbog čega je nastala slijedeća kategorizacija tipova elektro-mehaničkih oscilacija [6]:

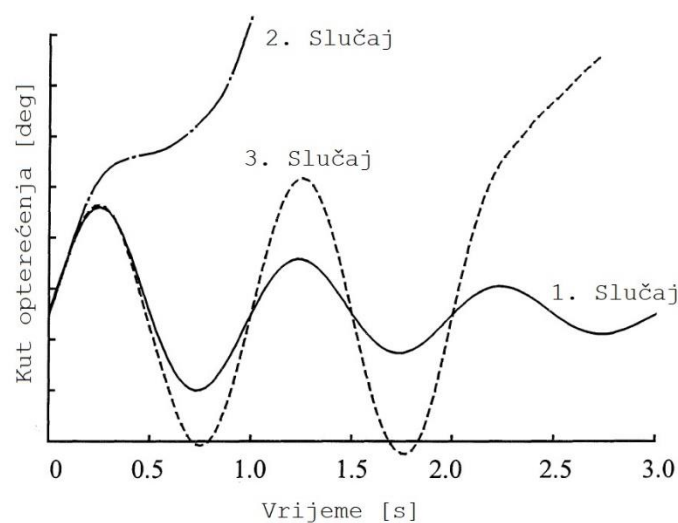


- a) Globalni tip oscilacija (eng. *global mode*) – niskofrekventni tip oscilacija u kojem se sinkroni strojevi njišu unisono. Obično se dešava u izoliranim sustavima koji su na izmjeničnu mrežu spojeni putem HVDC vodova. Frekvencija oscilacija obično iznosi  $0.05 \div 0.2$  Hz.
- b) Niskofrekventni tip oscilacija (eng. *low-frequency mode*) – lokalizirani tip oscilacija povezan sa hidroturbinskim generatorima, nastaje zbog interakcije vode i vodne turbine. Frekvencija oscilacija obično iznosi  $0.01 \div 0.05$  Hz.
- c) Lokalni tip oscilacija (eng. *local-area mode*) – povezan sa njihanjem sinkronog generatora u odnosu na ostatak EES-a. Takve oscilacije su lokalizirane na samom sinkronom stroju ili u neposrednoj okolini stroja. Frekvencija oscilacija obično iznosi  $1 \div 2$  Hz.
- d) Unutarpodručni tip oscilacija (eng. *intra-plant mode*) – vezan uz međusobno njihanje proizvodnih jedinica unutar područja ili elektrane. Frekvencija oscilacija obično iznosi  $1.5 \div 2.5$  Hz.
- e) Međupodručni tip oscilacija (eng. *inter-area mode*) – vezan uz oscilirajuće međudjelovanje proizvodnih jedinica između različitih područja u sustavu. Vezane su i uz slabe interkonekcijske veze među područjima, odnosno nedostatno robusni prijenosni sustav. Frekvencija oscilacija obično iznosi  $1.5 \div 6$  Hz.
- f) Torzijski tip oscilacija (eng. *torsional mode*) – vezan uz oscilacije mehaničkih veza turbina – generator. Frekvencije ovih oscilacija su obično oko 8 Hz za nuklearne elektrane i veće od 15 Hz za ostale proizvodne jedinice.
- g) Kontrolni tip oscilacija (eng. *control mode*) – vezan uz djelovanje upravljačkih uređaja (slabo podešena regulacija, HVDC upravljanje, TCSC i SVC uređaji).

### **2.3.2 Prijelazna stabilnost**

Prijelazna stabilnost se definira kao sposobnost EES-a da zadrži sinkronizam rada nakon što je podvrgnut nekom ozbiljnijem prijelaznom poremećaju. Pritom se odzivi kutova opterećenja generatora manifestiraju kroz velike promjene ili pobjege zbog nelinearnih karakteristika  $P - \delta$  sinkronih strojeva/prijenosnih elemenata u sustavu. Stabilnost sustava pritom, osim o robusnosti ovisi i o početnim pogonskim uvjetima kao i o veličini poremećaja koji uzrokuje takvu prijelaznu perturbaciju. Analitički gledano, sustav se prebacuje u novo pogonsko postporemećajno stacionarno stanje koje se u većini slučajeva razlikuje od početnog pogonskog stanja.

Prilikom planiranja EES-a u obzir se uzimaju razni veliki poremećaji koji mogu utjecati na EES i uzrokovati prijelazne promjene pogonskih stanja, pa se može reći i da je EES planiran i izveden da ostane stabilan za određen skup nepredviđenih situacija koji se razmatra i ispituje prilikom planiranja [1]. Takve situacije obično uključuju jednopolne, dvopolne i trole polne kratke spojeve na raznim elementima EES-a kao što su transformatori, generatori, distribucijske stanice i (najčešće uzeti u obzir kod planiranja) prijenosni vodovi. U takvim ispitivanjima se smatra da je otklon kvara nastupio u trenutku kada izbace predviđeni prekidači za taj element EES-a, kako bi se izolirao element iz sustava. Na slici 2.5. su prikazani karakteristični općeniti odzivi kuta opterećenja rotora sinkronog generatora za tri slučaja stabilnosti i nestabilnosti.



Slika 2.5. Karakteristični odzivi sustava na velike poremećaje [1]

U prvom slučaju na slici 2.5. kut opterećenja postiže maksimum u prvoj poluperiodi oscilacija nakon čega se amplituda oscilacija smanjuje i postiže stabilno stacionarno stanje nakon određenog vremena. U drugom slučaju se kut opterećenja povećava kontinuirano bez oscilacija do gubitka sinkronizma. Takav modus ponašanja sustava se naziva nestabilnost prvog njihaja, a njen uzrok je nedostatan moment sinkronizma u sustavu. U trećem slučaju sustav ostaje stabilan nakon prvog njihaja, ali je u konačnici oscilatorno nestabilan jer se amplituda kuta opterećenja povećava. Smatra se da takav slučaj nestabilnosti obično nastupa kada je novo postporemećajno stanje ranjivije na nestabilnost malih poremećaja, a ne nužno kao rezultat prijelaznog poremećaja.

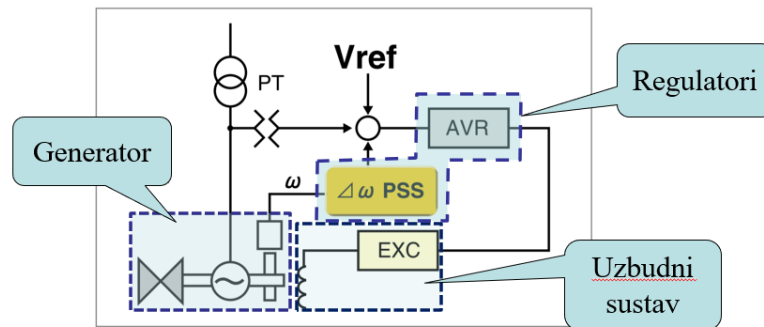
U velikim EES-ima prijelazna nestabilnost ne mora nužno nastupiti kroz nestabilnost prvog njihaja, ona također može nastupiti kao ukupni utjecaj nekoliko tipova oscilacija koje mogu dovesti do prekreta kuta opterećenja rotora iza prvog ekstrema periodičkih oscilacija. Prijelaznu stabilnost sustava uobičajeno se u praksi promatra kroz prvih 3 do 5 sekundi nakon

poremećaja, ali se period promatranja može protegnuti i na dulje vrijeme, posebno u velikim sustavima sa dominantnim međupodručnim oscilacijama. U ovom radu se zbog što finijeg podešenja ispitivanih regulatora taj period proteže na maksimalno 25 sekundi.

U literaturi se dosta koristi i termin „dinamička stabilnost“ kao podvrsta kutne stabilnosti. Međutim, kod raznih istraživača ona se promatra kroz različite aspekte kutne stabilnosti. Primjerice u Sjeverno-američkoj literaturi autori koriste taj izraz za definiciju kutne stabilnosti malih poremećaja u sustavima u kojima je prisutna regulacija uzbude, većinom sa AVR sustavima za razliku od kutne stabilnosti malih poremećaja klasičnih sustava sa fiksno podešenom uzbudom koju promatraju kroz aspekt kvazistacionarne stabilnosti. U europskoj literaturi taj termin je predstavljao prijelaznu stabilnost. Stoga su nadležna tijela CIGRÉ i IEEE došla do suglasja da se termin „dinamička stabilnost“ izbací iz upotrebe [1], [5].

### 3. Modeliranje elektroenergetskog sustava

Regulatori uzбудnih sustava sinkronih generatora imaju važnu primjenu u smanjivanju oscilacija kod prijelazne stabilnosti i stabilnosti malih poremećaja elektroenergetskog sustava. AVR regulatori (engl. *Automatic Voltage Regulator*) u kombinaciji sa PSS uređajima (engl. *Power System Stabilizer*) mogu značajno utjecati na oscilacije raznih frekvencija koje se javljaju prilikom različitih poremećaja u elektroenergetskom sustavu. Slika 3.1 prikazuje općenitu blok shemu regulacije generatora.



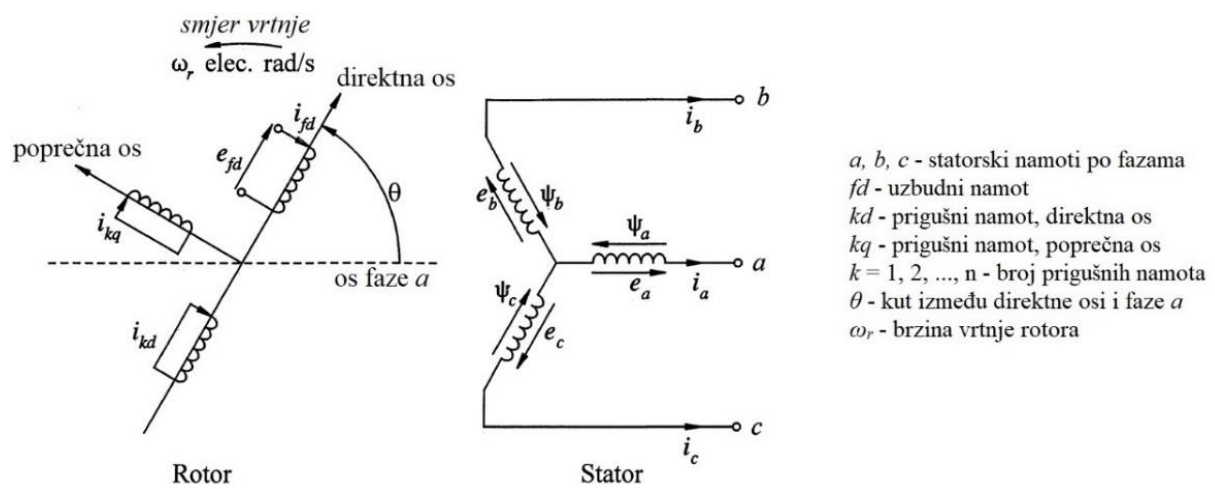
Slika 3.1. Blok shema regulacije uzbudnoga sustava generatora

Za modeliranje EES-a u ovom radu koristi se Simulink<sup>®</sup> paket za grafičko programiranje, u sklopu programskog paketa MATLAB<sup>®</sup> tvrtke Mathworks<sup>®</sup>. Za korištenje izrade konkretnih modela upotrijebljeni su gotovi modeli elemenata u Simscape<sup>™</sup> modulu Simulink sučelja koji predstavljaju kompleksne modele pravog EES-a, kao što su vodovi, transformatori, potrošači, generatori i sustavi upravljanja (AVR sa uzбудom, PSS, ...). Budući je u fokusu kutne stabilnosti sinkroni generator kao element, zajedno sa upravljačkim elementima uzbuđe, zato su u narednim potpoglavljima opisani navedeni elementi, a potom i sami modeli EES-a korišteni u ispitivanju stabilnosti.

#### 3.1 Matematički model sinkronog generatora

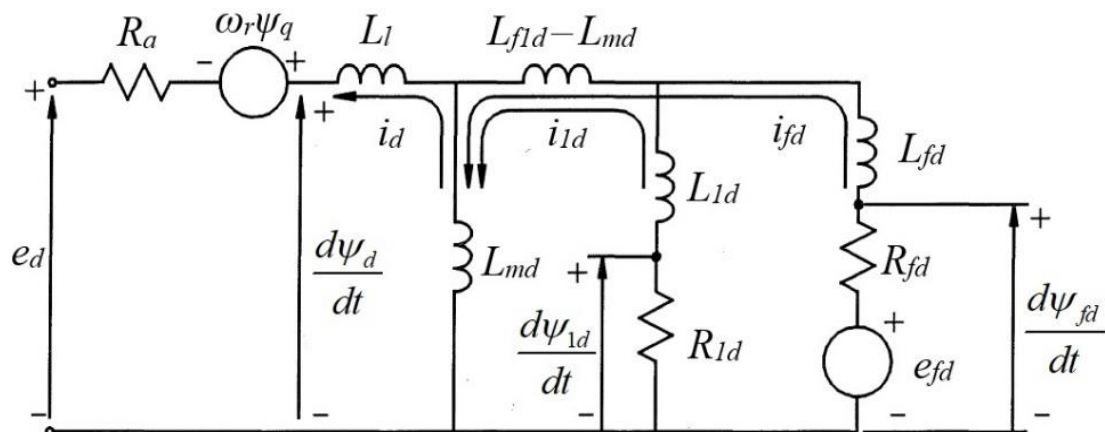
Sinkroni stroj (eng. *Synchronous Machine pu Standard*) u Simulink sučelju je modeliran kao model stanja sustava šestog reda. Sadrži mogućnost odabira generatorskog i motorskog načina rada (putem odabira predznaka za signal mehaničke snage  $P_m$ ), te koristi standardne parametre prikazane u *per-unit* sustavu jedinica. Osim nazivnih parametara stroja kao što su snaga, frekvencija, broj pari polova i inercijska konstanta, u spomenutom modelu sinkronog generatora se uzimaju u obzir dinamički parametri vezani uz statorske namote, te uzbudne i

prigušne namote na rotoru. Svi parametri i električne veličine rotora se promatraju u sustavu direktne i poprečne osi ( $dq0$  sustav), i svedeni su na *per-unit* veličine statorskog sustava. Statorske veličine i parametri se također definiraju i računaju kroz  $dq0$  sustav, nakon čega se naponski izlazi prebacuju u trofazni RST prikaz i definiraju kao izlazne točke modela generatora. IEEE standard 1110-2002 [82] definira sheme direktne i poprečne osi dinamičkog modela sinkronog stroja prikazane na slici 3.3., te izraze za stacionarne, prijelazne i sinkrone reaktancije, te odgovarajućih vremenskih konstanti za stacionarno, prijelazno i početno stanje dinamičkog sustava sinkronog stroja.

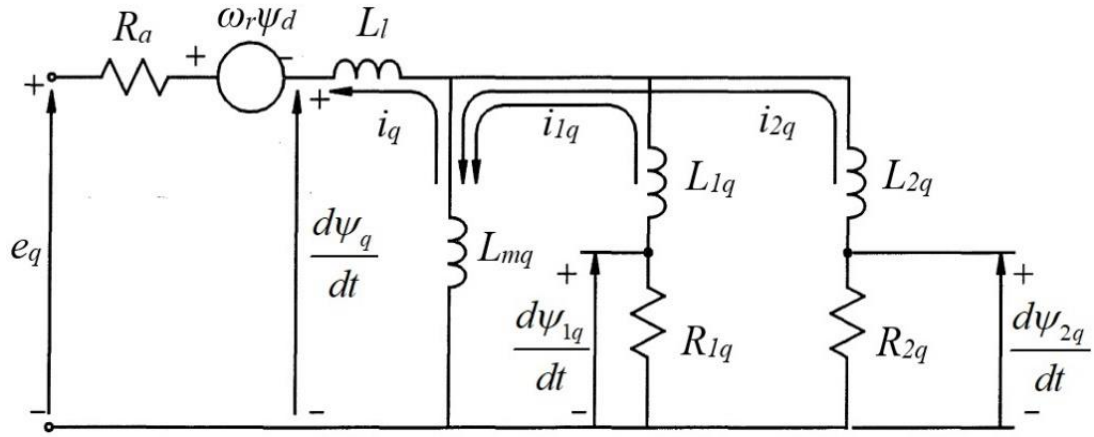


Slika 3.2. Električni krugovi rotora i statora sinkronog stroja [1]

Nadomjesne sheme uzimaju u obzir model generatora sa cilindričnim rotorom koji na rotoru ima dva prigušna namota u poprečnoj osi i po jedan uzbuđni i prigušni namot u direktnoj osi [1], [82].



Slika 3.3. Nadomjesna shema direktne osi sinkronog stroja [1]



Slika 3.4. Nadomjesna shema poprečne osi sinkronog stroja [1]

Matematički opis modela sinkronog stroja je definiran kroz slijedeće naponske jednačbe:

$$e_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q - i_d R_a \quad (3.1)$$

$$e_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d - i_q R_a \quad (3.2)$$

$$e_0 = -i_0 R_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (3.3)$$

$$e_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (3.4)$$

$$0 = R_{1d} i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} \quad (3.5)$$

$$0 = R_{1q} i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} \quad (3.6)$$

$$0 = R_{2q} i_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt} \quad (3.7)$$

gdje su odgovarajuće veličine vezane za direktnu os označene indeksom  $d$ , a za poprečnu sa  $q$ . Indeks  $f$  označava uzбудni namot, dok broj u indeksu veličine označava broj prigušnog namota u pojedinoj osi. Tako označeni ulančani magnetski tokovi se opisuju slijedećim jednažbama:

$$\psi_d = -(L_{md} + L_l) i_d + L_{md} i_{fd} + L_{md} i_{1d} \quad (3.8)$$

$$\psi_q = -(L_{mq} + L_l) i_q + L_{mq} i_{1q} + L_{mq} i_{2q} \quad (3.9)$$

$$\psi_d = -(L_{md} + L_l) i_d + L_{md} i_{fd} + L_{md} i_{1d} \quad (3.10)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (3.11)$$

$$\psi_{fd} = -L_{md} i_d + (L_{f1d} + L_{fd}) i_{fd} + (L_{f1d} + L_{1d}) i_{1d} \quad (3.12)$$

$$\psi_{1d} = -L_{md}i_d + (L_{f1d} + L_{fd})i_{fd} + L_{f1d}i_{1d} \quad (3.13)$$

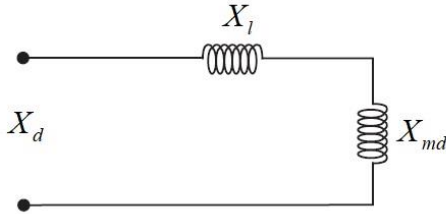
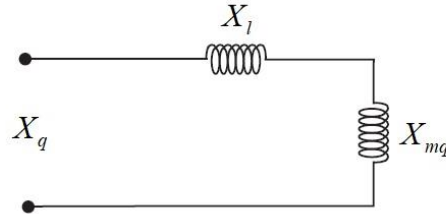
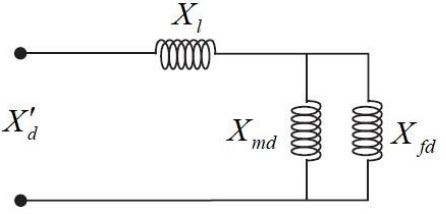
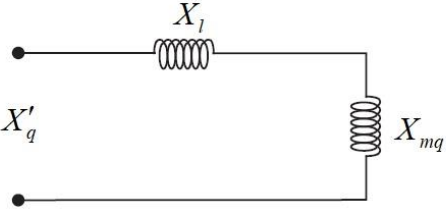
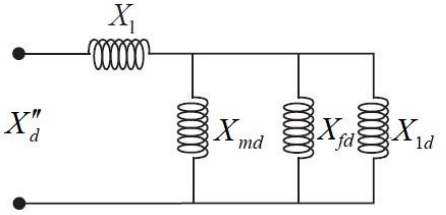
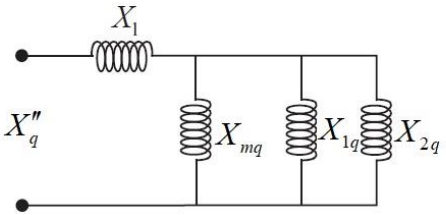
$$\psi_{1q} = -L_{mq}i_q + (L_{1q} + L_{mq})i_{1q} + L_{mq}i_{2q} \quad (3.14)$$

$$\psi_{2q} = -L_{mq}i_q + L_{mq}i_{1q} + (L_{2q} + L_{mq})i_{2q} \quad (3.15)$$

gdje su induktiviteti definirani kao:

- $L_{md}$  - induktivitet magnetiziranja, direktna os
- $L_l$  - rasipni induktivitet statorskog namota
- $L_{1d}$  - rasipni induktivitet prigušnog namota, direktna os
- $L_{f1d}$  - rasipni induktivitet uzbuđenog i prigušnog namota, direktna os
- $L_{fd}$  - rasipni induktivitet uzbuđenog namota, direktna os
- $L_{mq}$  - induktivitet magnetiziranja, poprečna os
- $L_{1q}$  - rasipni induktivitet 1. prigušnog namota, poprečna os
- $L_{2q}$  - rasipni induktivitet 2. prigušnog namota, poprečna os

Matematički model sinkronog generatora u Simulink sučelju uzima u obzir karakteristične reaktancije i vremenske konstante otvorenog statorskog kruga koje su specifične za početno, prijelazno i stacionarno stanje, kao dinamičke parametre. Topološka i proračunska formulacija karakterističnih reaktancija je prikazana na slici 3.5. Početna reaktancija ( $X_d'', X_q''$ ) je karakteristična za stanje netom nakon poremećaja i vezana je za rasipne reaktancije i ulančane tokove koji prelaze zračni raspor, odnosno zatvaraju se i oko rotorskih namota. Prijelazna reaktancija ( $X_d', X_q'$ ) je karakteristična za prijelazno stanje, te je vezana za tokove koji se zatvaraju kroz statorske i uzbuđne namote. Sinkrona reaktancija ( $X_d, X_q$ ) se promatra u stacionarnom operativnom stanju u kojem se generator nalazi dugoročno, te je vezana uz magnetizirajuće tokove i rasipne tokove statora. Rasipna reaktancija  $X_l$  se pritom definira kao parametar vezan uz ulančani rasipni tok statorskih namota, koji silnicama ne prelazi zračni raspor između rotora i statora. Početna, prijelazna i sinkrona reaktancija u poprečnoj osi ( $X_q, X_q', X_q''$ ) se definiraju uglavnom za rotore sa istaknutim polovima zbog same konstrukcije takvih rotora.

	<i>direktna os</i>	<i>poprečna os</i>
<i>Stacionarno stanje</i>	 $X_d = X_l + X_{md}$	 $X_q = X_l + X_{mq}$
<i>Prijelazno stanje</i>	 $X'_d = X_l + \frac{X_{md} X_{fd}}{X_{fd} + X_{md}}$	 $X'_q = X_l + X_{mq}$
<i>Početno stanje</i>	 $X''_d = X_l + \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{fd}} + \frac{1}{X_{1d}}}$	 $X''_q = X_l + \frac{1}{\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{1q}} + \frac{1}{X_{2q}}}$

Slika 3.5. Pojednostavljene nadomjesne reaktancije za stacionarno, prijelazno i početno stanje [4]

Vremenske konstante sinkronog stroja su kako slijedi:

- $T''_{d0}, T''_{q0}$  - početne vremenske konstante za otvoreni krug: opisuju inicijalno prigušenje tranzijenata direktne i poprečne osi, kada je statorski krug u praznom hodu. Vezane su uz početni period nakon poremećaja, kada je značajan efekt utjecaja prigušnih namota, dok je uzbudni namot nešto manje utjecajan.
- $T'_{d0}, T'_{q0}$  - prijelazne vremenske konstante za otvoreni krug: opisuje prigušenje tranzijenata direktne i poprečne osi, kada je statorski krug u praznom hodu. Vezana je uz početni period nakon poremećaja, kada je utjecaj prigušnih namota zanemariv.



- $T''_d, T''_q$  - početne kratkospojne vremenske konstante: opisuju prigušenje početne komponentne struje armature, kada su tri faze statora (priključnice generatora) kratko spojene.
- $T'_d, T'_q$  - prijelazne kratkospojne vremenske konstante: opisuju prigušenje prijelazne komponente struje armature, kada su tri faze statora kratko spojene.

Za navedene vremenske konstante vrijede slijedeće jednadžbe:

$$T''_{d0} = \frac{1}{R_{1d}} \left( L_{1d} + \frac{L_{fd}L_{f1d}}{L_{fd} + L_{f1d}} \right) \quad (3.16)$$

$$T''_{q0} = \frac{1}{R_{2q}} \left( L_{2q} + \frac{L_{mq}L_{1q}}{L_{mq} + L_{1q}} \right) \quad (3.17)$$

$$T'_{d0} = \frac{L_{fd} + L_{f1d}}{R_{fd}} \quad (3.18)$$

$$T'_{q0} = \frac{L_{mq} + L_{1q}}{R_{1q}} \quad (3.19)$$

$$T''_d = \frac{1}{R_{1d}} \left( L_{1d} + \frac{L_{md}L_{fd}(L_{f1d} - L_{md}) + L_lL_{fd}L_{md} + L_lL_{fd}(L_{f1d} - L_{md})}{L_{fd}L_{md} + L_lL_{fd} + L_lL_{md} + (L_l + L_{md})(L_{f1d} - L_{md})} \right) \quad (3.20)$$

$$T''_q = \frac{1}{R_{2q}} \left( L_{2q} + \frac{L_{1q}L_{mq}L_l}{L_{1q}L_{mq} + L_{1q}L_l + L_{mq}L_l} \right) \quad (3.21)$$

$$T'_d = \frac{1}{R_{fd}} \left( L_{fd} + (L_{f1d} - L_{md}) + \frac{L_{md}L_l}{L_{md} + L_l} \right) \quad (3.22)$$

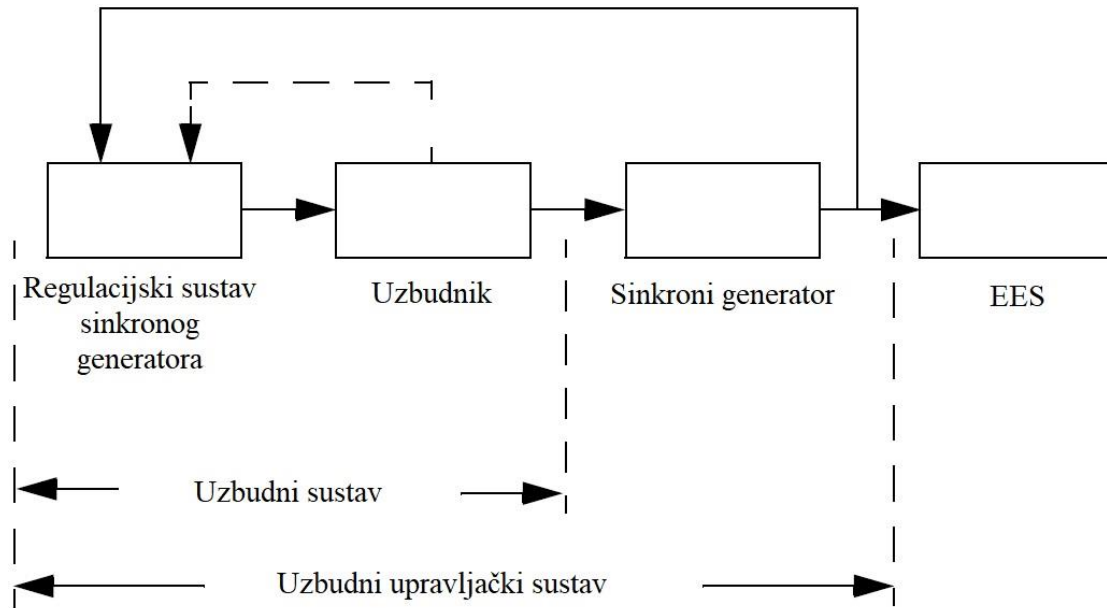
$$T'_q = \frac{1}{R_{1q}} \left( L_{1q} + \frac{L_{mq}L_l}{L_{mq} + L_l} \right) \quad (3.23)$$

Model uzima u obzir i zasićenje jezgre rotora i statora unošenjem matrice parametara krivulje zasićenja  $E_t = e_q = f(i_{fd})$ .

### 3.2 Matematički model uzbudnog sustava sa AVR-om

IEEE standard definira *uzbudni upravljački sustav* kao sustav sa povratnom vezom u koji su uključeni sinkroni generator i uzbudni sustav. Uzbudni sustav upravlja strujom uzbude generatora i uključuje sve zaštitne, upravljačke i energetske uređaje uključene u krug uzbude generatora. Glavni energetski element je uzбудnik, dok se upravljački i zaštitni uređaji

definiiraju terminom *regulacijski sustav sinkronog stroja* [6]. Općenita blok shema takvog sustava je prikazana na slici 3.6.

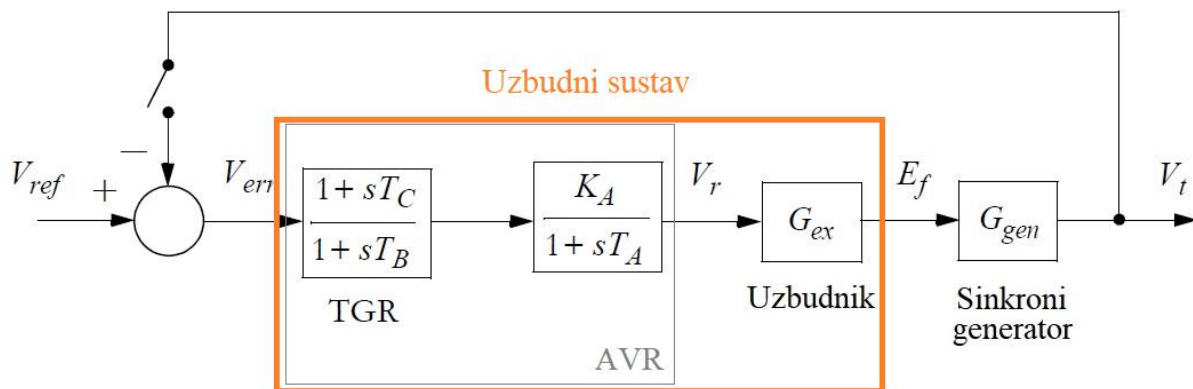


Slika 3.6. Blok dijagram uzbuđnog upravljačkog sustava sinkronog generatora [6]

Pojam regulacijskog sustava sinkronog generatora podrazumijeva uređaj za automatsku regulaciju napona sinkronog generatora (eng. *Automatic Voltage Regulator - AVR*). AVR obuhvaća sve upravljačke elemente, kao i izvršne članove (uređaje učinske elektronike) koji prosljeđuju naponski signal na uzbudnik. Glavni cilj podešavanja AVR uređaja je adekvatna promjena parametara prijenosne funkcije kompenzacijskog bloka i regulatora kako bi izlaz napona iz generatora bio zadovoljavajući.

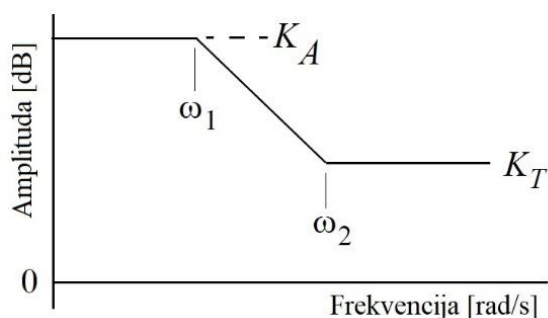
Uobičajeni prikaz centralnog dijela regulatora je preko prijenosne funkcije PT1 elementa, sa pojačanjem  $K_A$  i vremenskom konstantom  $T_A$ . Također, kompenzacijski element se najčešće opisuje prijenosnom funkcijom karakterističnom za kompenzaciju redukcijom prijelaznog pojačanja (eng. *Transient Gain Reduction - TGR*). U klasičnoj terminologiji teorije automatske regulacije radi se o kaskadnom članu 1. reda koji sadrži vremenske konstante prethođenja i kašnjenja (eng. *lead-lag compensator*). Takav kompenzator je ugrađen u upravljački sustav AVR-a. Blok shema jednog takvog sustava je prikazana na slici 3.7. Za TGR element vrijedi:

$$G_{TGR}(s) = \frac{1 + sT_C}{1 + sT_B} = \frac{1 + sT}{1 + s\alpha T}, T_B > T_C, \alpha > 1 \quad (3.24)$$



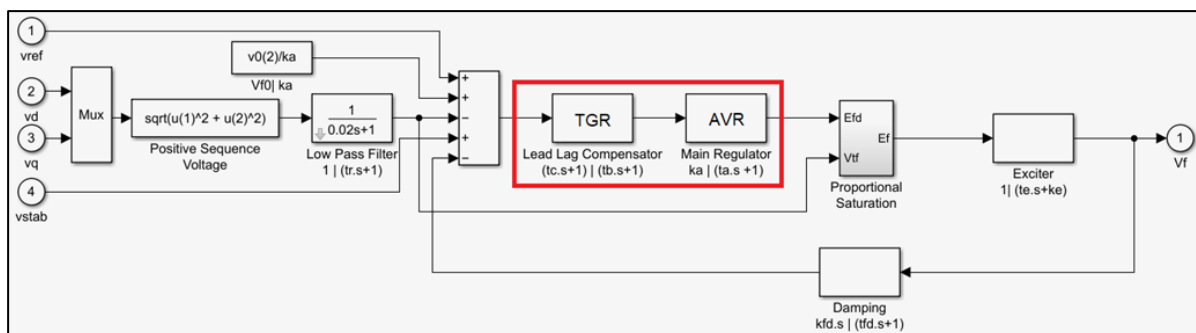
Slika 3.7. Blok dijagram uzbudnog upravljačkog sustava sa TGR kompenzacijom [6]

Ukoliko je  $\omega_f$  frekvencija uzbudnog signala, na višim frekvencijama ( $\omega_f T \gg 1$ ) prijenosna funkcija se reducira na vrijednost  $T_C/T_B$ , odnosno  $1/\alpha$ . U tom području pojačanje AVR regulatora je  $K_A \cdot \frac{T_C}{T_B} = K_T$ , gdje se veličina  $K_T$  naziva prijelaznim pojačanjem. TGR element stoga reducira pojačanje faktorom  $\frac{K_T}{K_A} = \frac{T_C}{T_B}$ . Koncept redukcije TGR kompenzacijom je prikazan na slici 2.8, gdje su odgovarajuće granice prijelaznog dijela prikazane frekvencijama  $\omega_1 = 1/T_B$  i  $\omega_2 = 1/T_C$ .



Slika 3.8. Aproximacijska krivulja amplitudne karakteristike za AVR sa TGR-om [6]

Prikaz AVR sustava u Simulink sučelju je prikazan na slici 3.9. Slika prikazuje kompletan uzbudni sustav i adekvatne ulazno-izlazne signale. Crvenim je naznačen AVR kao regulacijski sustav sinkronog generatora sa regulatorom i kompenzatorom. Predmet istraživanja u radu je podešavanje parametara centralnog dijela regulatora (pojačanje  $K_A$  i vremenska konstanta  $T_A$ ), dok su parametri kompenzatora fiksno odabrani, odnosno nisu predmet podešavanja optimizacijskim algoritmima.



Slika 3.9. Prikaz uzbuđnog sustava u Simulink sučelju

### 3.3 Matematički model PSS uređaja

PSS (eng. *Power System Stabilizer*) je regulacijski uređaj koji osigurava dodatni ulazni signal u uzbuđni regulacijski sustav, sa ciljem da smanji oscilacije promatranih veličina u EES-u zbog malih poremećaja. Sa povećanjem opsega rada elektroenergetskih mreža i uvođenjem dugačkih interkonekcijskih prijenosnih vodova, povećana je i opasnost od nestabilnosti nakon poremećaja. Takva nestabilnost je obično rezultat neželjenog pogona generatora zbog nedostatka sinkronizirajućih momenata koji drže generatore sustava u sinkronizmu. Upotreba PSS uređaja u današnjim EES-ima je dvoznačna: stabiliziranje sustava kod eventualnih nestabilnih pogonskih slučajeva i osiguravanje adekvatnog područja (granica) stabilnosti sustava u kojima se može desiti određen broj predviđenih slučajeva perturbacija, a koje mogu dovesti sustav u nestabilnost. Pritom PSS osigurava da se elektromehaničke oscilacije promatranih veličina dovoljno priguše, prvenstveno nakon poremećaja karakterističnih za stabilnost malih poremećaja.

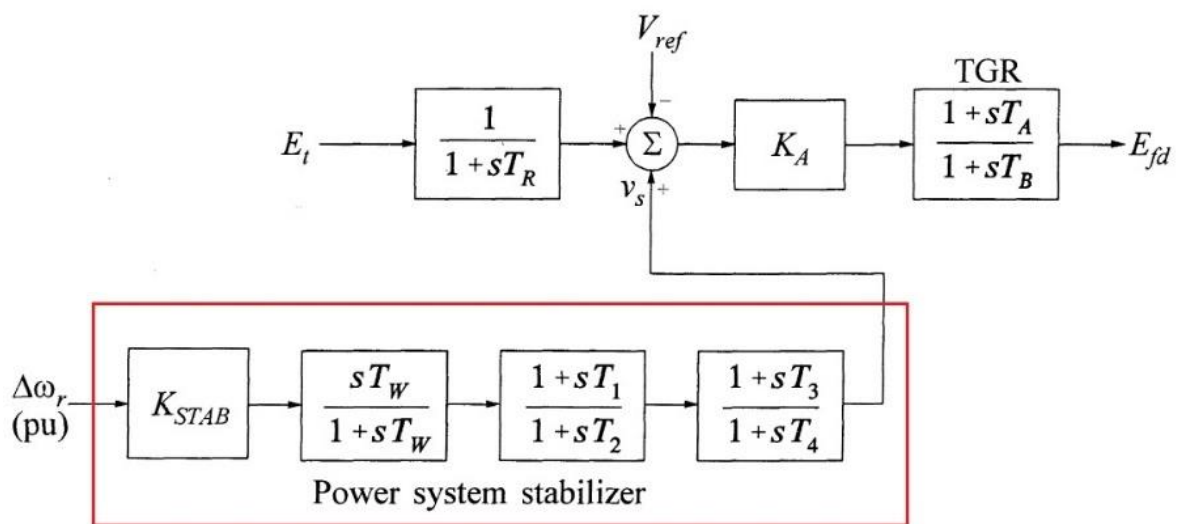
AVR sustav, koji doprinosi stabilnosti EES-a u stacionarnim stanjima, može biti nedovoljan stabilizacijski element u slučajevima nakon poremećaja karakterističnih za prijelaznu stabilnost. Njegov utjecaj na moment sinkronog generatora nije nužno uvijek dovoljan u smanjenju oscilacija u EES-u kod prijelaznih stanja, posebno u mrežama sa dugačkim interkonekcijskim vodovima, čiji ispadi mogu doprinijeti značajnom smanjenju stabilnosti.

Kako bi se osigurala stabilnost u regulacijski krug uzbuđnog upravljačkog sustava može se dodati i petlja sa PSS-om kao dodatna korekcijska petlja. Takav dodatni regulacijski element je konstruiran na način da osigura dodatni moment koji djeluje na smanjenje oscilacija koje se pojavljuju na rotorskim veličinama generatora. Uobičajeno je da se za ulazni signal u PSS koristi devijacija brzina vrtnje rotora  $\Delta\omega$ , snage ubrzanja  $\Delta P_a$ , promjena frekvencije  $\Delta f$  ili

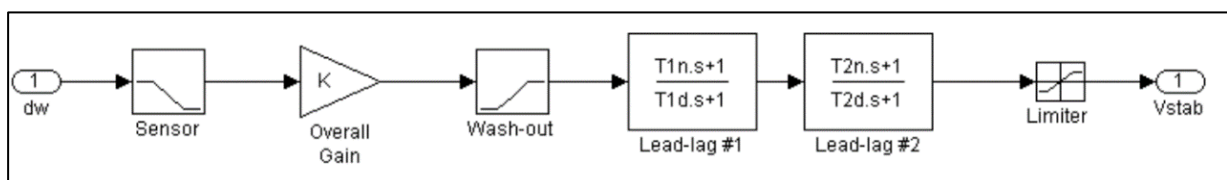
promjena napona armature  $\Delta V_t$  [1], [4], [83]. Kod stabilnog stacionarnog stanja, korekcijski izlaz PSS-a je jednak nuli, sa čime je metoda korištenjem PSS-a efektivna u slučaju promatranja i osiguravanja stabilnosti kod malih poremećaja. Prijenosna funkcija PSS-a mora kompenzirati postojeće fazno kašnjenje između uzbuđnog napona i električnog momenta stroja.

### 3.3.1 Delta-omega PSS (Generički PSS)

Model PSS-a korišten u ispitivanju stabilnosti na TAFM modelu u ovom radu je *delta-omega PSS* ili *generički PSS* čija prijenosna funkcija uključuje pojačanje stabilizatora, ulazni visokopropusni filter (eng. *washout*), te dva kaskadna bloka sa faznim kašnjenjem i faznim prethođenjem. Na slici 3.10 je prikazana pojednostavljena blok shema generičkog PSS uređaja, dok je na slici 3.11 prikazan model generičkog PSS-a u Simulink sučelju.



Slika 3.10. Pojednostavljena blok shema generičkog PSS-a u uzbuđnom upravljačkom sustavu [1]



Slika 3.11. Model generičkog PSS-a u Simulink sučelju

Na primjeru sa slike vidljivo je da je prijenosna funkcija generičkog PSS-a:

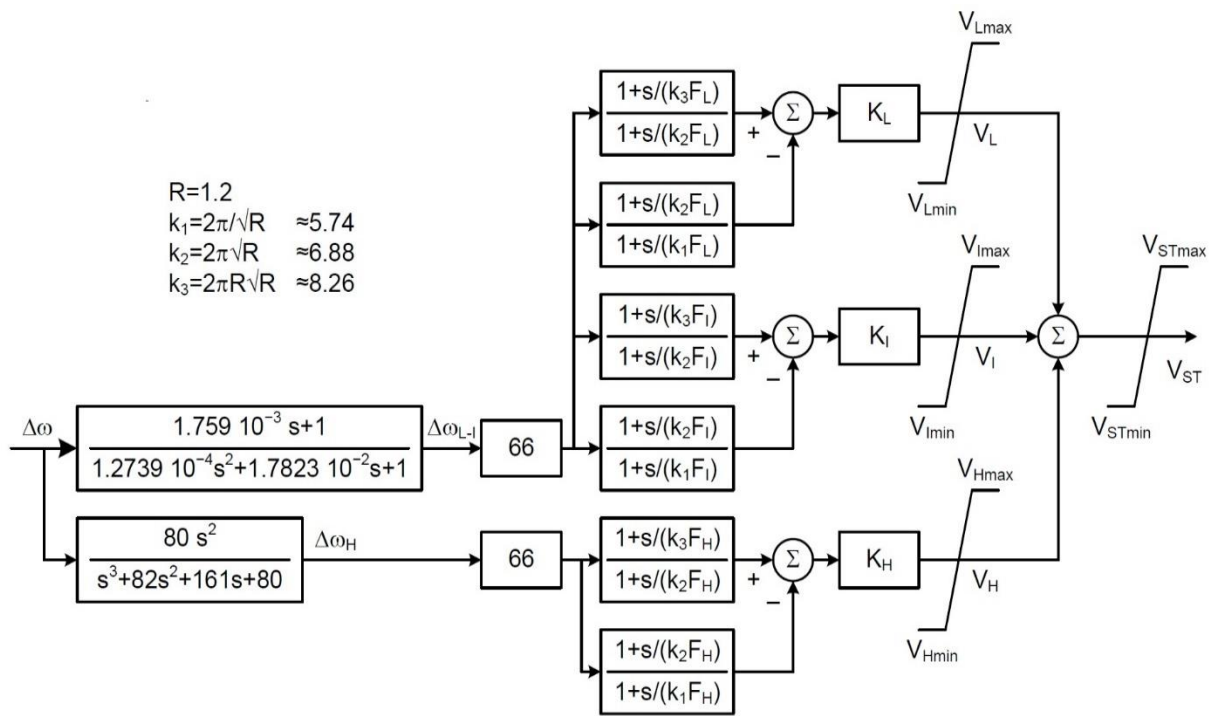
$$G_{PSS}(s) = \frac{v_s(s)}{\Delta\omega_r(s)} = K_{PSS} \cdot \frac{sT_W}{1+sT_W} \cdot \frac{1+sT_{1n}}{1+sT_{1d}} \cdot \frac{1+sT_{2n}}{1+sT_{2d}} \quad (3.25)$$

U Simulink modelu generičkog PSS-a navedeni su slijedeći parametri: vremenska konstanta prvog bloka senzora, pojačanje PSS-a  $K_{STAB}$  (definira prigušenje signala PSS-a, također se označava i kao  $K_{PSS}$ ), vremenska konstanta ulaznog *washout* filtera  $T_W$  (eliminira niske frekvencije signala devijacije brzine) te vremenske konstante prvog i drugog kaskadnog bloka  $T_{1n}, T_{1d}, T_{2n}, T_{2d}$  (koje odgovaraju konstantama  $T_1, \dots, T_4$  sa slike 3.10, služe kompenzaciji faznog kašnjenja napona uzbude i električnog momenta stroja). Osim standardnih prijenosnih funkcija dodaje se i blok za ograničavanje izlaznog signala  $v_s$ , koje je postavljen između granica  $-V_{s,min}$  i  $V_{s,max}$ . Predmet istraživanja u radu je podešavanje parametara pojačanja PSS-a  $K_{PSS}$  i vremenskih konstanti kaskadnih blokova regulatora  $T_{1n}, T_{1d}, T_{2n}, T_{2d}$ , dok su ostali parametri fiksni, odnosno nisu predmet podešavanja optimizacijskim algoritmima.

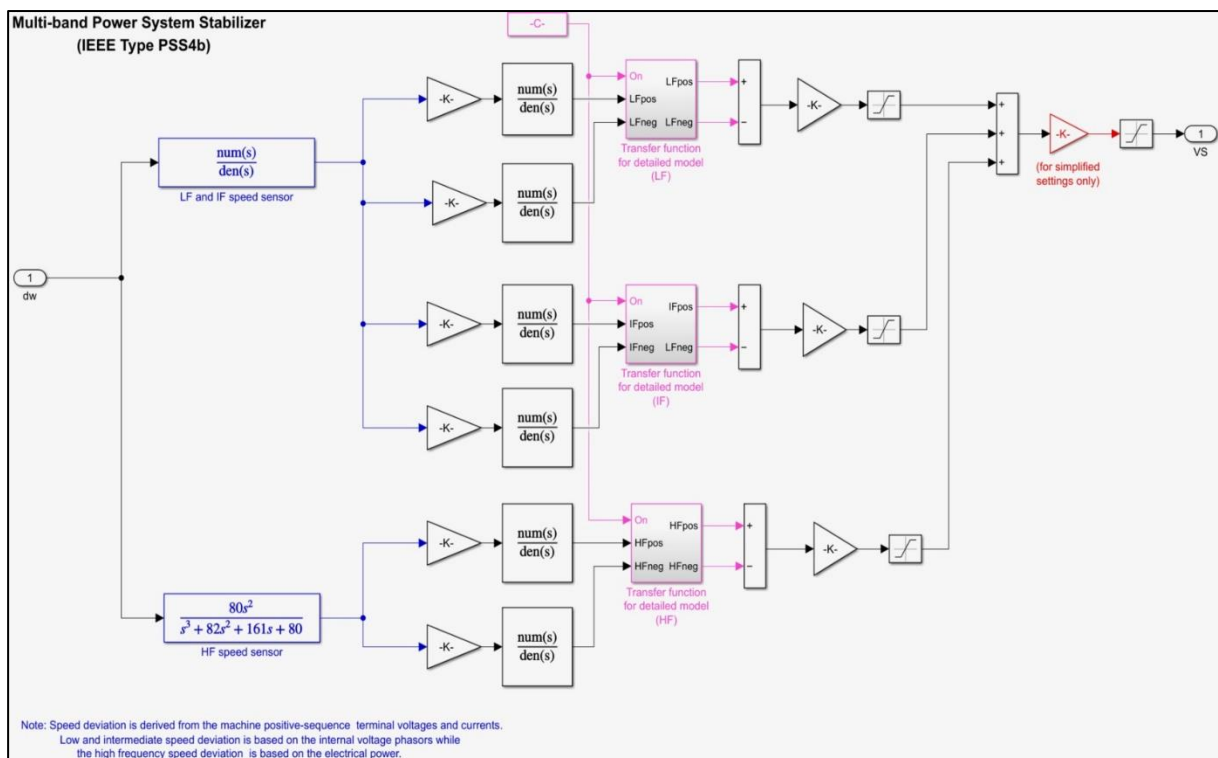
### 3.3.2 Multi-band PSS (MB-PSS)

Na IEEE 9bus modelu EES-a je ispitan PSS uređaj tipa PSS4b, odnosno njegova pojednostavljena varijanta [83], čija regulacija se bazira na promatranju i djelovanju u više pojaseva frekvencija. MB-PSS razlikuje djelovanje u tri različita pojasa: niske, srednje i više frekvencije, koristeći kao ulazni podatak devijaciju brzine vrtnje rotora generatora. Uobičajeno je da niski pojas djeluje na globalne, srednji na međupodručne i viši pojas na lokalne oscilacije. Svaki od tri pojasa ima propusni filter, pojačanje i ograničenje pojasnog signala. Svi pojasi signali se potom sumiraju na izlazu i, uz dodatno ograničenje sumiranog signala, daju stabilizacijski naponski signal  $V_{STAB}$ . MB-PSS uređaj također ima i dva pretvarača signala devijacije brzine za visoke ( $\Delta\omega_H$ ), te niske i srednje frekvencije ( $\Delta\omega_{L-I}$ ). Novija varijanta PSS4b uređaja je označena sa PSS4c i uključuje uz tri navedena i pojas vrlo niskih frekvencija, čime radi sa ukupno četiri različita pojasa frekvencija. IEEE standard pritom razlikuje PSS4c kao detaljnu i PSS5c kao pojednostavljenu verziju. MB-PSS koji je ispitan u radu je po posljednjem standardu klasificiran kao PSS5c, sa pojačanjem vrlo niskog pojasa jednakim nuli.

Pojednostavljeni model PSS4b uređaja u Simulink sučelju ima slijedeće parametre: pojačanja niskog, srednjeg i višeg pojasa  $K_L, K_I, K_H$ ; frekvencije za svaki od navedenih pojaseva  $F_L, F_I, F_H$ ; ograničenja niskopojasnog signala  $V_{Lmin}, V_{Lmax}$ , srednjepojasnog signala  $V_{Imin}, V_{Imax}$  i visokopojasnog signala  $V_{Hmin}, V_{Hmax}$ ; generalno pojačanje PSS-a  $K_G$  i ukupno ograničenje stabilizacijskog signala  $V_{Smin}, V_{Smax}$ . Predmet istraživanja u radu je podešavanje parametara generalnog pojačanja, pojasnih pojačanja i pojasnih frekvencija, dok blokovi za ograničenje imaju fiksno podešene parametre i nisu predmet podešavanja optimizacijskim metodama.



Slika 3.12. Pojednostavljena blok shema MB-PSS-a [83]

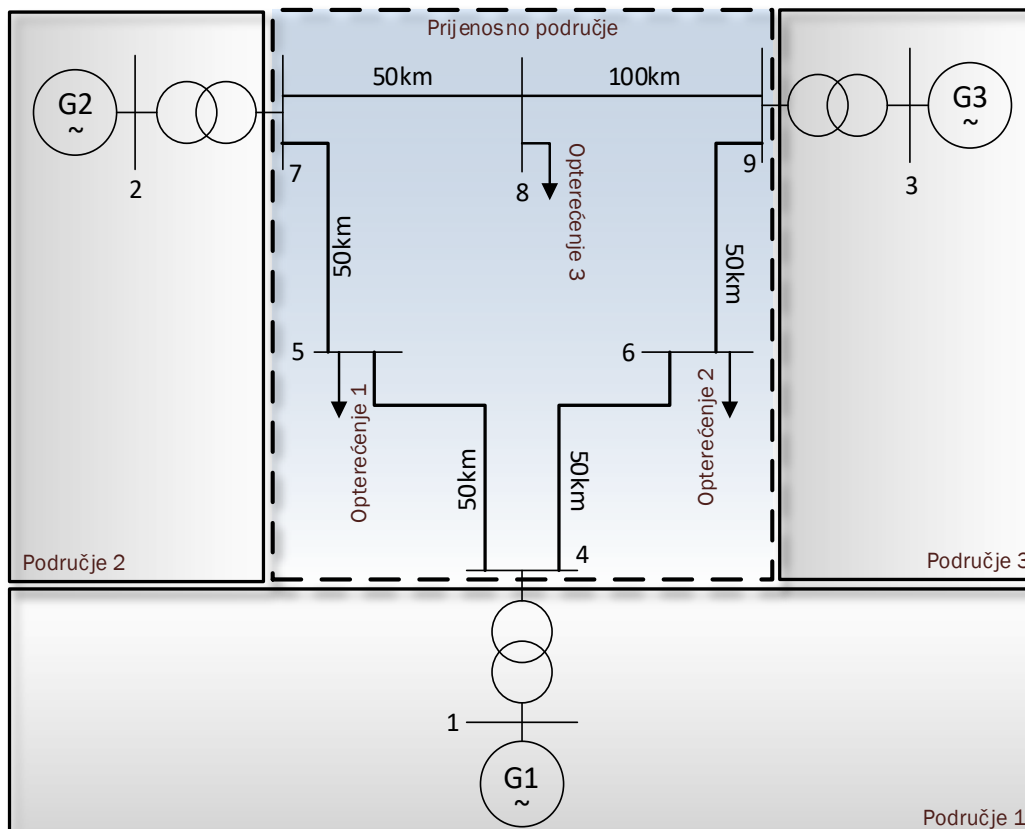


Slika 3.13. Model MB-PSS-a u Simulink sučelju

### 3.4 Trostrojni tropodručni model EES-a (WSCC, IEEE 9bus)

Prvi ispitni model EES-a korišten u radu je model sa tri sinkrona generatora i tri dislocirana radno-induktivna opterećenja. Navedeni model je prvotno razvijen u literaturi [2]. Često se koristi za proračune tokova snaga i ispitivanje stabilnosti sustava kao *IEEE Benchmark* testni model [85]. Model se bazira na pojednostavljenoj aproksimaciji WSCC (eng. *Western Standard Coordinated Council*) elektroenergetske mreže, te se u literaturi (i u ovom radu) često i navodi kraticom WSCC.

Svaki generator u modelu predstavlja zasebno područje, koje je interkonektivnim vodovima duljine 50 i 100 km povezano sa opterećenjima. Svako proizvodno područje osim generatora sadrži i pripadajući blok transformator i upravljačke sustave turbinskog i uzbudnog sustava. Sustav je prikazan na slici 3.14, dok je podsustav proizvodnog područja prikazan na slici 3.15. Tehničke karakteristike elemenata sustava su opisane u tablici 3.1. Predmet simultanog parametriranja metaheurističkim algoritmima u ovom radu su regulatori izvedeni u uzbudnom sustavu, dok je turbinski upravljački sustav fiksno podešen.

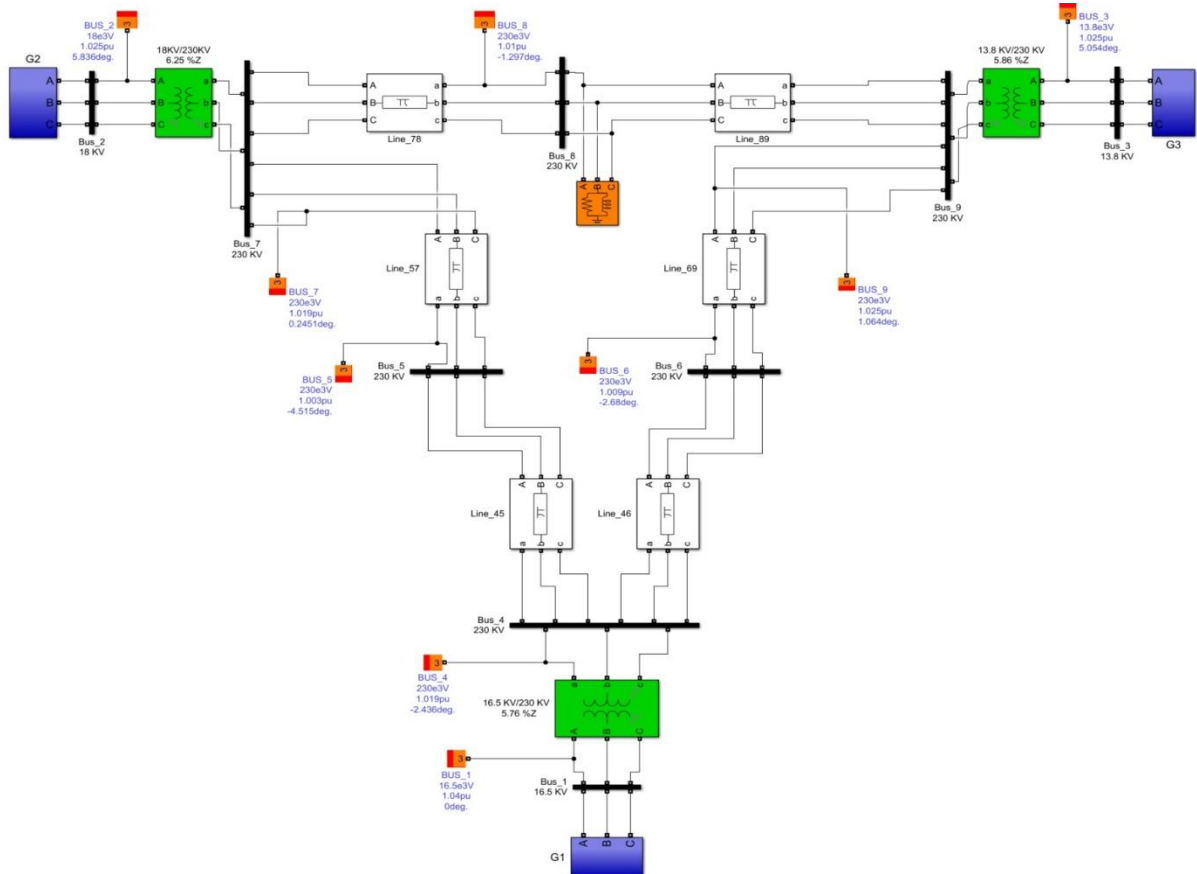


Slika 3.14. IEEE 9bus model

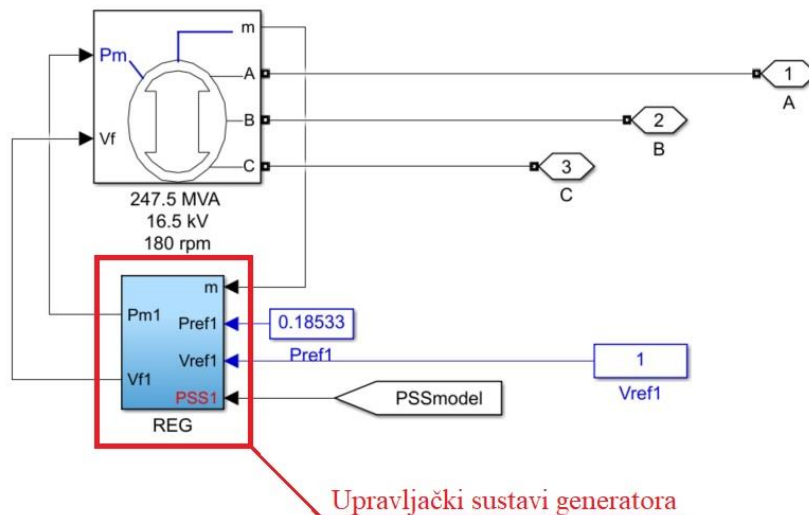
Tablica 3.1 Tehničke karakteristike elemenata IEEE 9bus modela



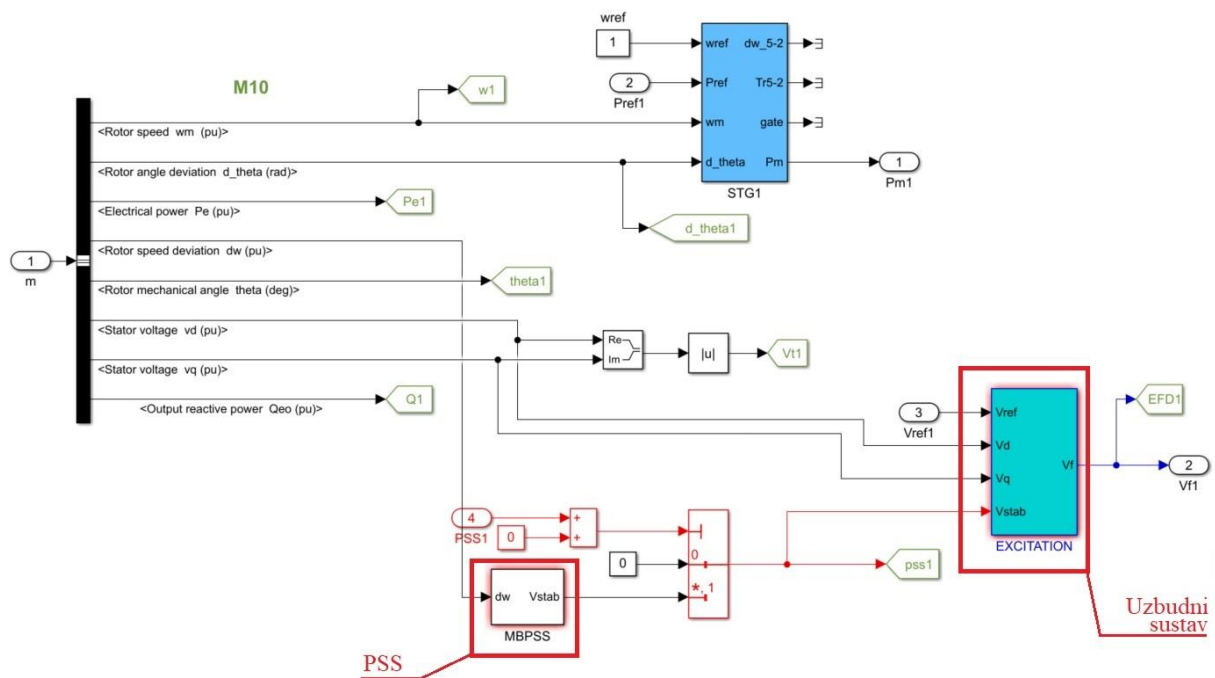
Element	Područje	Tehničke karakteristike
Generator 1 (swing)	1	16.5 kV, 247.5 MVA, 60 Hz, $p^* = 20$ , $H = 23.64$ , $T'_{d0} = 8.96$ s, $T''_{d0} = 0.001$ s, $T''_{q0} = 0.001$ s, $R_a = 0.0002$ p. u., $X_d = 0.361$ p. u., $X'_d = 0.1504$ p. u., $X''_d = 0.099$ p. u., $X_q = 0.2398$ p. u., $X'_q = 0.099$ p. u., $X''_q = 0.062$ p. u.
Generator 2	2	18 kV, 192 MVA, 60 Hz, $p^* = 1$ , $H = 6$ , $T'_{d0} = 6$ s, $T''_{d0} = 0.01$ s, $T''_{q0} = 0.535$ s, $T''_{q0} = 0.001$ s, $R_a = 0.0002$ p. u., $X_d = 0.896$ p. u., $X'_d = 0.12$ p. u., $X''_d = 0.005$ p. u., $X_q = 0.865$ p. u., $X'_q = 0.197$ p. u., $X''_q = 0.005$ p. u., $X_l = 0.05$ p. u.
Generator 3	3	13.8 kV, 128 MVA, 60 Hz, $p^* = 1$ , $H = 3.01$ , $T'_{d0} = 5.89$ s, $T''_{d0} = 0.01$ s, $T''_{q0} = 0.6$ s, $T''_{q0} = 0.001$ s, $R_a = 0.0002$ p. u., $X_d = 1.313$ p. u., $X'_d = 0.181$ p. u., $X''_d = 0.005$ p. u., $X_q = 1.258$ p. u., $X'_q = 0.25$ p. u., $X''_q = 0.005$ p. u., $X_l = 0.05$ p. u.
Opterećenje 1	PP	$P_{load1} = 120$ MW, $Q_{L,load1} = 50$ MVAR
Opterećenje 2	PP	$P_{load2} = 90$ MW, $Q_{L,load2} = 30$ MVAR
Opterećenje 3	PP	$P_{load3} = 100$ MW, $Q_{load3} = 35$ MVAR
Prijenosni vod 4-5	PP	$l = 50$ km, $R_l = 0.0529$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.13225$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.59$ mH/km, $L_{0l} = 2.38$ mH/km, $C_l = 8.82$ nF/km, $C_{0l} = 5.188$ nF/km
Prijenosni vod 4-6	PP	$l = 50$ km, $R_l = 0.09$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.2248$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.59$ mH/km, $L_{0l} = 3.22$ mH/km, $C_l = 7.92$ nF/km, $C_{0l} = 4.7$ nF/km
Prijenosni vod 5-7	PP	$l = 50$ km, $R_l = 0.1692$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.4232$ $\Omega$ /km, $L_l = 2.26$ mH/km, $L_{0l} = 5.64$ mH/km, $C_l = 15.34$ nF/km, $C_{0l} = 9.03$ nF/km
Prijenosni vod 6-9	PP	$l = 50$ km, $R_l = 0.2063$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.5157$ $\Omega$ /km, $L_l = 2.38$ mH/km, $L_{0l} = 6.09$ mH/km, $C_l = 17.95$ nF/km, $C_{0l} = 10.55$ nF/km
Prijenosni vod 7-8	PP	$l = 50$ km, $R_l = 0.0629$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.1573$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.41$ mH/km, $L_{0l} = 3.53$ mH/km, $C_l = 10.47$ nF/km, $C_{0l} = 6.15$ nF/km
Prijenosni vod 8-9	PP	$l = 100$ km, $R_l = 0.0629$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 0.1573$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.41$ mH/km, $L_{0l} = 3.53$ mH/km, $C_l = 10.47$ nF/km, $C_{0l} = 6.15$ nF/km
Transformator 1	1	100 MVA, 16.5 kV/230 kV, 60 Hz, YYg $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $L_1 = 0$ p. u., $L_2 = 0.0576$ p. u., $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $R_1 = R_2 = 500$ p. u.
Transformator 2	2	100 MVA, 18 kV/230 kV, 60 Hz, YYg $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $L_1 = 0$ p. u., $L_2 = 0.0625$ p. u., $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $R_1 = R_2 = 500$ p. u.
Transformator 3	3	100 MVA, 13.8 kV/230 kV, 60 Hz, YYg $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $L_1 = 0$ p. u., $L_2 = 0.0586$ p. u., $R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p. u., $R_1 = R_2 = 500$ p. u.



Slika 3.15. IEEE 9bus sustav u Simulink sučelju



Slika 3.16. Podsustav područja 1 sa naznačenim upravljačkim podsustavom



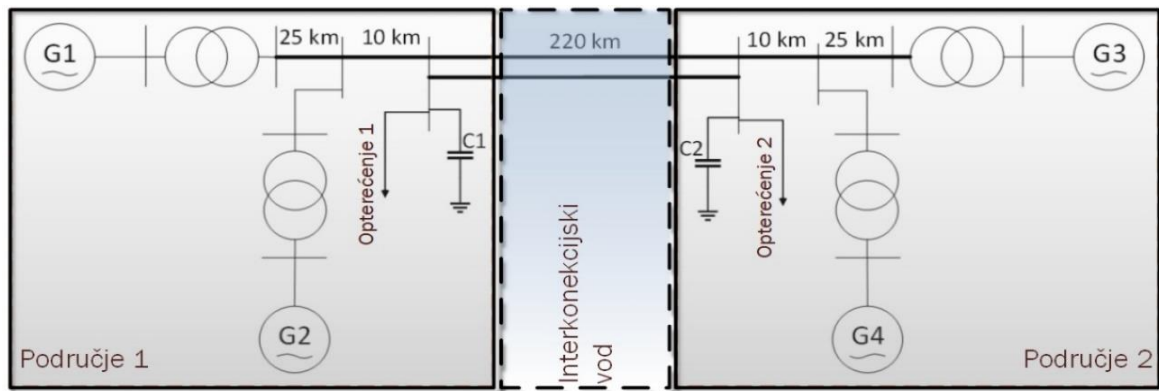
Slika 3.17. Podsustav upravljačkih sustava generatora

### 3.5 Četverostrojni dvopodručni model EES-a (TAFM)

Drugi ispitni model EES-a korišten u ovom radu je model sa dva područja i četiri generatora. Navedeni ispitni model je razvijen i opisan u literaturi [11], te je predviđen za ispitivanje stabilnosti sustava prilikom malih poremećaja, posebno zbog pojave međupodručnih oscilacija. Svako područje ima dvije proizvodne jedinice opremljene sa sustavima regulacije

turbinskog i uzbuđnog dijela. Područja su povezana sa 220 km dugačkim paralelnim interkonekcijskim vodom kojim se osigurava prijenos snage od 430 MW iz područja 1 u područje 2. Svako područje osim generatora sadrži i pripadajuće transformatore, opterećenja i prijenosne vodove.

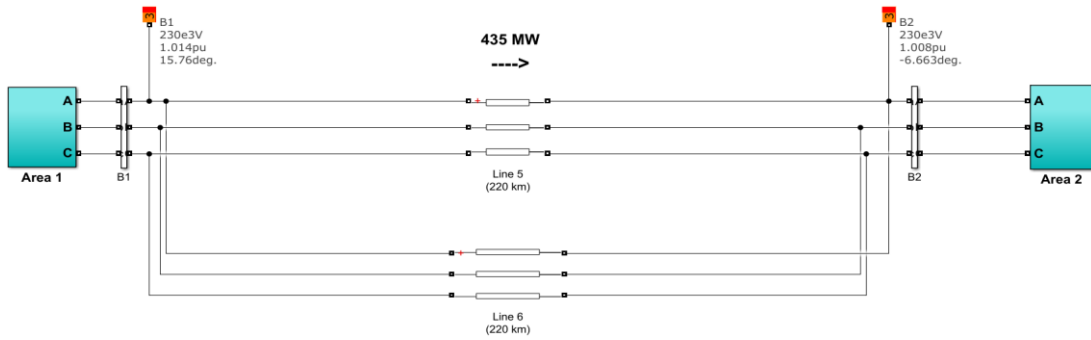
Sustav je prikazan na slici 3.18, dok su tehničke karakteristike elemenata sustava prikazane u tablici 3.1. Prikaz TAFM modela u Simulink sučelju se nalazi na slici 3.19., dok se podsustavi modela koji prikazuju područje, odnosno generatorske upravljačke uređaje nalaze na slikama 3.20 i 3.21. Iako upravljački sustav generatora uključuje uzbuđni i turbinski upravljački sustav, predmet istraživanja je isključivo parametriranje elemenata AVR i PSS u uzbuđnom upravljačkom sustavu.



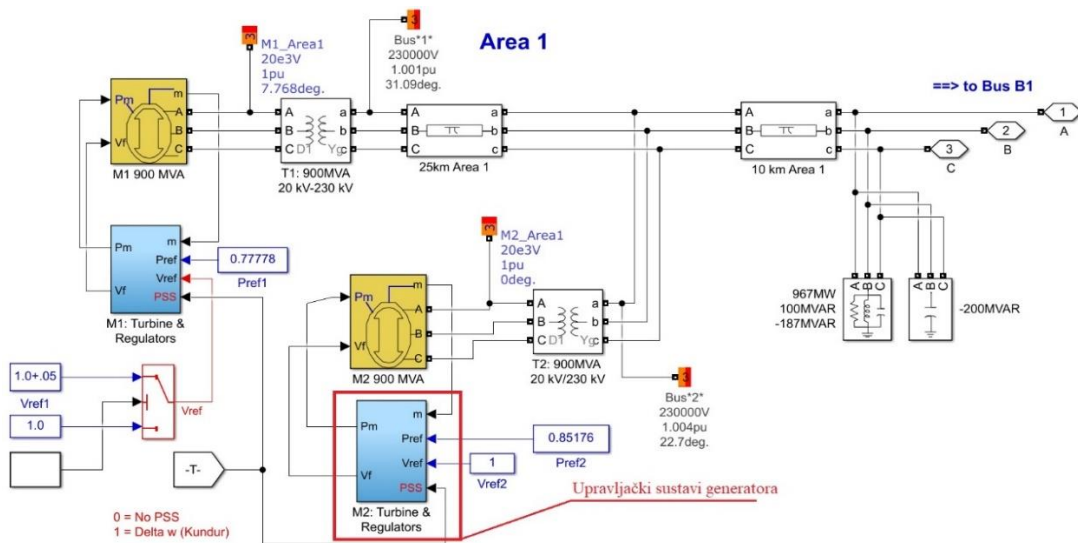
Slika 3.18. TAFM model

Tablica 3.2 Tehničke karakteristike elemenata TAFM modela

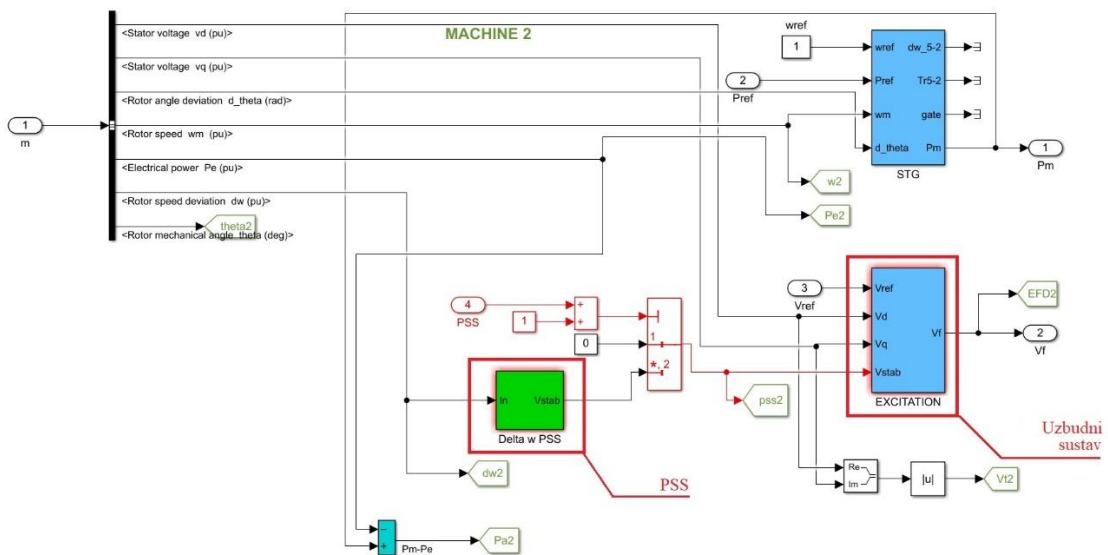
Element	Područje	Tehničke karakteristike
Generator 1	1	20 kV, 900 MVA, 50 Hz
Generator 2 (swing)	1	$X_d = 1.8$ p.u., $X'_d = 0.3$ p.u., $X''_d = 0.25$ p.u., $R_a = 0.0025$ p.u.
Generator 3	2	$X_q = 1.7$ p.u., $X'_q = 0.55$ p.u., $X''_q = 0.25$ p.u., $X_l = 0.2$ p.u.
Generator 4	2	$T'_{d0} = 8$ s, $T''_{d0} = 0.03$ s, $T'_{q0} = 0.4$ s, $T''_{q0} = 0.05$ s
Opterećenje 1	1	$H_{G1} = H_{G2} = 6.5$ , $H_{G3} = H_{G4} = 6.175$ , $K_D = 0$
Opterećenje 2	2	$P_{load1} = 967$ MW, $Q_{L,load1} = 100$ MVar, $Q_{C,load1} = 187$ MVar
Prijenosni vod 1	1	$l = 10$ km, $R_l = 0.0529$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 1.6$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.403$ mH/km,
Prijenosni vod 3	2	$L_{0l} = 6.1$ mH/km, $C_l = 8.775$ nF/km, $C_{0l} = 5.249$ nF/km
Prijenosni vod 2	1	$l = 25$ km, $R_l = 0.0529$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 1.6$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.403$ mH/km
Prijenosni vod 4	2	$L_{0l} = 6.1$ mH/km, $C_l = 8.775$ nF/km, $C_{0l} = 5.249$ nF/km
Prijenosni vod 5	1-2	$l = 220$ km, $R_l = 0.0529$ $\Omega$ /km, $R_{0l} = 1.6$ $\Omega$ /km, $L_l = 1.403$ mH/km
Prijenosni vod 6	1-2	$L_{0l} = 6.1$ mH/km, $C_l = 8.775$ nF/km, $C_{0l} = 5.249$ nF/km
Transformator 1	1	900 MVA, 20 kV/230 kV, 50Hz, D1Yg
Transformator 2	1	$R_1 = R_2 = 10^{-6}$ p.u.
Transformator 3	2	$L_1 = 0$ p.u., $L_2 = 0.15$ p.u.
Transformator 4	2	$R_m = L_m = 500$ p.u.
Baterija 1	1	$Q_{C1} = 200$ MVar
Baterija 2	2	$Q_{C2} = 250$ MVar



Slika 3.19. TAFM model u Simulink sučelju



Slika 3.20. Podsustav područja 1 sa naznačenim upravljačkim podsustavom



Slika 3.21. Podsustav upravljačkih sustava generatora



## 4. Metaheuristička optimizacija

Pojam metaheurističke optimizacije podrazumijeva samostalni algoritamski pristup rješavanju kontinuiranih i diskretnih problema u matematici, računarstvu i inženjerstvu. Takav pristup predstavlja računalni dizajn koji definira strategiju, odnosno skup smjernica za razvoj iskustvenog (heurističkog) algoritma. Također, termin metaheuristike podrazumijeva i problemski orijentiranu implementaciju nekog algoritma koji je razvijen prema heurističkoj strategiji razvoja. Dakle, dvosmislenost pojma metaheuristike definira:

- 1) algoritamski dizajn visoke razine definiran heurističkim smjernicama razvoja rješavanja optimizacijskog problema i
- 2) konkretnu implementaciju algoritma koji je razvijen prema tim istim smjernicama.

Metaheuristička optimizacija je način rješavanja određenog optimizacijskog problema. Pod pojmom optimizacijskog problema misli se na problem pronalaska najboljeg ili najboljih rješenja iz skupa svih praktično prihvatljivih rješenja. Optimizacijski problem se dijeli na dvije kategorije, a obzirom na skup varijabli sa kojima algoritam mora raditi: *diskretni* ili *kontinuirani*. Kod diskretnih optimizacijskih problema rješenje se algoritmom pronalazi iz ponuđenog skupa koji je konačan (prebrojiv). U tom slučaju ciljni objekt je cjelobrojnog ili permutacijskog tipa. Kontinuirani optimizacijski problem daje rješenje koje je vrijednost neke kontinuirane funkcije (minimum ili maksimum), a koje može biti podložno određenim funkcijama ograničenja koje su također kontinuiranog tipa. U ovom radu je, općenito gledano predstavljen optimizacijski problem kontinuiranog tipa kao način pronalaženja zadovoljavajuće niskih oscilacija u EES-u.

### 4.1 Jednociljna optimizacija

Jednociljna optimizacija je metoda kontinuiranog optimizacijskog problema kojom se nastoji postići optimum tražene ciljne funkcije (najčešće minimum) pretraživanjem prostora stanja rješenja, koji može biti ograničen, poluograničen ili neograničen. Kod ograničenih i poluograničenih problema uvodi se i pojam funkcija ograničenih jednakosti i ograničenih nejednakosti. Forma jednociljne optimizacije je:

$$\min_x f(\vec{x}), \begin{cases} g_i(\vec{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m \\ h_j(\vec{x}) = 0, j = 1, \dots, p \end{cases} \quad (4.1)$$

koja definira pronalazak minimuma ciljne funkcije za ulazne parametre (rješenja) prikazane

vektorom  $\vec{x}$  uz uvažavanje  $m$  funkcija ograničenih nejednakosti  $g_i(\vec{x})$  i  $p$  funkcija ograničenih jednakosti. Ciljna funkcija  $f(\vec{x})$  se definira kao preslikavanje  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . Ukoliko je  $m = p = 0$ , onda se radi o neograničenom kontinuiranom optimizacijskom problemu kod kojega je prostor rješenja sustava  $\vec{x} \in \langle -\infty, +\infty \rangle$ . Kontinuirani optimizacijski problem se uobičajeno promatra kao problem minimiziranja ciljne funkcije, odnosno traženja minimuma. Ukoliko se traži maksimum optimizacijskom metodom onda se umjesto  $f(\vec{x})$  u izrazu 4.1 može pisati  $-f(\vec{x})$ .

U radu su ispitane dvije funkcije jednociljnom optimizacijom. Prva funkcija obuhvaća devijacije brzine vrtnje generatora, promjene napona armature generatora i promjene tokova radnih snaga na interkonektivnim vodovima. Jednadžba prve ciljne funkcije glasi:

$$f_1(t) = \int_{t=t_1}^{t_2} t \cdot (|\Delta\omega(t)| + w_V |\Delta V_t(t)| + w_P |\Delta P_{tie}(t)|) \cdot dt \quad (4.2)$$

gdje je:

- $\Delta\omega(t)$  – zbroj devijacija brzine vrtnje sinkronih generatora
- $\Delta V_t(t)$  – zbroj promjena napona u odnosu na početno stanje na sinkronim generatorima
- $\Delta P_{tie}(t)$  – zbroj promjene tokova radnih snaga na interkonekcijskim vodovima u odnosu na stacionarno stanje
- $w_V$  – korekcijski faktor za promjene napona generatora
- $w_P$  – korekcijski faktor za promjene tokova radnih snaga

Korekcijski faktori za veličine napona se unose kako bi se veći prioritet dao brzinama vrtnje generatora, odnosno kako bi se prostor rješenja orijentirao više prema brzinama vrtnje, budući u teoriji stabilnosti malih poremećaja brzine vrtnje imaju direktan odnos sa iznosom prigušnog momenta generatora. Shodno tome korekcijski faktori su puno manji od 1, i određuju se iskustveno. U radu su korištene vrijednosti  $w_V = 0.005$  i  $w_P = 10^{-5}$ . Devijacije brzine vrtnje i promjene napona se prikazuju u *p.u.* vrijednostima, dok se promjene tokova snaga prikazuju u MW.

Druga ciljna funkcija se orijentira isključivo na pokazatelje kvalitete prijelaznog procesa kod devijacija brzina vrtnje sinkronog generatora. Ona uključuje nadvišenje, podvišenje i vrijeme smirivanja tranzijenta. Jednadžba druge ciljne funkcije glasi:

$$f_2(t) = w_{OS} \cdot os \left( \Delta\omega_{ij}(t) \right)^2 + w_{US} \cdot us \left( \Delta\omega_{ij}(t) \right)^2 + ts \left( \Delta\omega_{ij}(t) \right)^2 \quad (4.3)$$

gdje je:

- $\overline{os(\Delta\omega_{ij}(t))}$  – srednja vrijednost svih nadvišenja devijacija brzine vrtnje
- $\overline{us(\Delta\omega_{ij}(t))}$  – srednja vrijednost svih podvišenja devijacija brzine vrtnje
- $\overline{ts(\Delta\omega_{ij}(t))}$  – srednja vrijednost svih vremena smirivanja devijacija brzine vrtnje
- $w_{OS}$  – faktor korekcije elementa nadvišenja
- $w_{US}$  – faktor korekcije elementa podvišenja

Kao i u slučaju prve ciljne funkcije, faktori korekcije se definiraju iskustveno prema prilagodbi vrijednosti svakog od elemenata unutar prihvatljivog algebarskog iznosa, odnosno davanju prioriteta pojedinom pokazatelju kvalitete. Prilikom ispitivanja odabrane su slijedeće vrijednosti:  $w_{OS} = 4000$  za faktor korekcije nadvišenja i  $w_{US} = 1000$  za faktor podvišenja. Vrijednosti nadvišenja i podvišenja su relativne u odnosu na stacionarno stanje uvećano za 1 p.u., dok je vrijeme smirivanja u sekundama i definira se kao vrijeme kada amplituda oscilacija nije veća od 5% stacionarne vrijednosti devijacije brzine vrtnje pojedinog generatora.

## 4.2 Višeciljna optimizacija

Višeciljna optimizacija je paradigma rješavanja optimizacijskog problema u kojoj se simultanom optimizacijom dvije ili više ciljnih funkcija dolazi do seta nedominatnih rješenja putem sustava odlučivanja. Budući da umjesto jedne ciljne funkcije u ovom slučaju postoji više ciljnih funkcija u većini slučajeva je nemoguće postići da jedno rješenje zadovoljava minimum (ili maksimum) kod obje funkcije istovremeno, pa se umjesto jednog konačnog rješenja postiče kompromisni set rješenja koja u većini slučajeva nisu međusobno dominantna. Dominantnost jednog vektora rješenja  $\vec{x}_a$  nad drugim vektorom  $\vec{x}_b$  ukoliko je u pitanju ispitivanje  $k$  ciljnih funkcija, se može definirati slijedećim jednadžbama:

$$\forall i = \{1, 2, \dots, k\}: f_i(\vec{x}_a) \leq f_i(\vec{x}_b) \quad (4.4)$$

$$\exists i = \{1, 2, \dots, k\}: f_i(\vec{x}_a) < f_i(\vec{x}_b) \quad (4.5)$$

odnosno za svaku ciljnu funkciju  $f_i(\vec{x})$  postoji rješenje  $\vec{x}_a$  takvo da je njegova ciljna funkcija  $f_i(\vec{x}_a)$  manja ili jednaka funkciji  $f_i(\vec{x}_b)$  vektora rješenja  $\vec{x}_b$ . Osim tog uvjeta, postoji i uvjet stroge nejednakosti koji kaže da postoji bar jedna ciljna funkcija  $f_i(\vec{x}_a)$  rješenja  $\vec{x}_a$  koja je, uz prvi uvjet, strogo manja od iste ciljne funkcije  $f_i(\vec{x}_b)$  za rješenje  $\vec{x}_b$ . U konačnici ukoliko postoji takav slučaj kada je dominantnost nekog rješenja zadovoljena onda postoji globalni optimum, odnosno globalno rješenje višeciljnog optimizacijskog problema. Kako je to vrlo rijetko slučaj,



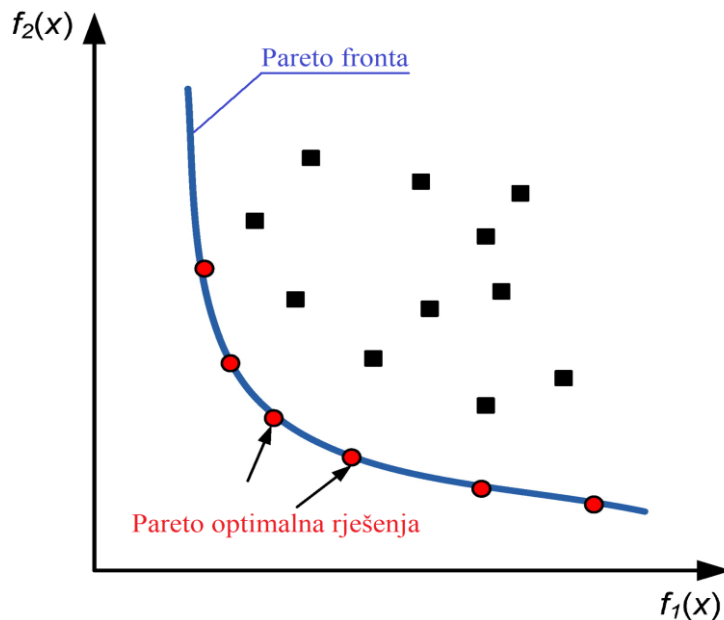
posebno u nelinearnim sustavima, onda postoji set rješenja koji mogu zadovoljavati parcijalno uvjete, odnosno postoji rješenje za koje vrijedi da je jedna ciljna funkcija manja, dok je neka druga veća. Tu se radi o međusobno kompromisnim rješenjima koja formiraju skup koji se naziva *Pareto skup rješenja*. Takav skup nedominantnih rješenja se naziva *Pareto optimalnim rješenjima* i za njega vrijedi:

$$P_s := \{\vec{x}_a, \vec{x}_b \in X | \nexists \vec{x}_b < \vec{x}_a\} \quad (4.6)$$

Ciljne funkcije tih rješenja pritom tvore skup koji se naziva *Pareto fronta* rješenja, za koju u slučaju dvije ciljne funkcije vrijedi:

$$P_f := \{f_1(\vec{x}_a), f_2(\vec{x}_a) | \vec{x}_a \in P_s\} \quad (4.7)$$

Na slici 4.1 je prikazan općenit prikaz Pareto skupa i Pareto fronte na primjeru sa dvije ciljne funkcije za slučaj optimizacijskog problema minimizacije.



Slika 4.1. Primjer Pareto skupa i Pareto fronte za dvije ciljne funkcije

Kako u višeciljnoj metodi izlazno rješenje nije jednoznačno već je predstavljeno skupom rješenja, tako se definiraju koncepti odlučivanja za najbolje rješenje kroz tri osnovne metodologije: *neutralna metoda* (eng. *no-preference method*), *a priori metode* i *a posteriori metode*. Postoji također i posebna disciplina koja se bavi spomenutim konceptima odlučivanja u višeciljnoj optimizaciji i naziva se metodologija višeciljnog odlučivanja (eng. *Multi-objective criteria decision making – MCDM*), koja se bavi razradom matematičkih metoda za *a priori* i *a posteriori* metodiku odlučivanja. MCDM filozofija definira i termin *donositelja odluka* (eng. *Decision Maker - DM*), koji može biti ljudski ili autonomni računalni element. Razlika između

navedenih metodologija je u načinu pristupa DM-a kod odlučivanja. Neutralna metodologija ne predviđa posebnu ulogu DM-a u odlučivanju, već se najbolje rješenje pronalazi bez preferencija prema određenoj ciljnoj funkciji, odnosno sve ciljne funkcije imaju jednak prioritet. U *a priori* metodologiji DM prvo odlučuje koja ciljna funkcija ima prioritet, nakon čega algoritam optimizira problem i nalazi rješenje prema već predviđenim preferencijama. U *a posteriori* metodologiji prvo se pronalazi Pareto skup rješenja nakon čega DM djeluje u odlučivanju o najboljem rješenju. Postoje još i *interaktivne metode* u kojima nakon inicijalnog skupa rješenja, prije svake iteracije DM odlučuje o prihvatu ponuđenih rješenja i nakon svake iteracije i generiranja novog Pareto skupa rješenja odlučuje o najboljem rješenju iz skupa. Sa tom metodom se interaktivno pristupa sa *a priori* i *a posteriori* filozofijom kod svake iteracije optimizacije nakon inicijalnog postavljanja algoritma.

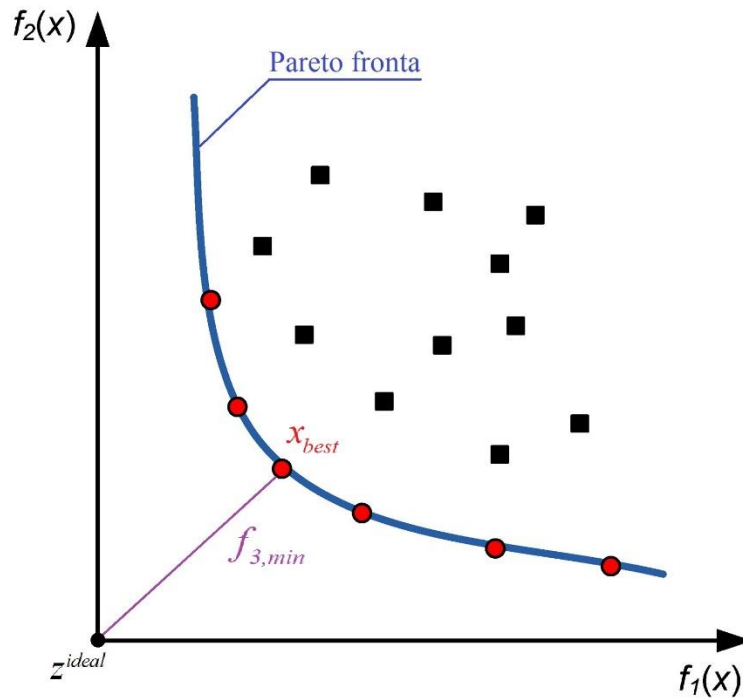
U ovom radu su, sa svrhom pronalaženja najboljeg rješenja i pripadajućeg Pareto skupa rješenja, korištene neutralna metoda i *a priori* metoda skalarizacije (težinska metoda).

#### **4.2.1 Neutralna metoda odlučivanja (*no-preference method*)**

Neutralna metoda odlučivanja ne specificira isključivo koja od ponuđenih ciljnih funkcija ima veći prioritet, već se sve ciljne funkcije minimiziraju i unutar prostora rješenja se traži element koji je najbliži ishodištu koordinatnog sustava čije osi su ciljne funkcije [84]. Jednadžba neutralne forme u općenitoj skalarnoj formi glasi:

$$\min_x \|f(\vec{x}) - \vec{z}^{ideal}\| \quad (4.8)$$

gdje je  $\vec{z}^{ideal}$  vektor idealnih iznosa ciljnih funkcija.



Slika 4.2. Primjer određivanja najboljeg rješenja  $x_{best}$  kod neutralne metode

U slučajevima kada su intervali prostora rješenja pojedinih ciljnih funkcija vrlo različiti (ukoliko je prostor rješenja jedne ciljne funkcije poželjno je uvesti funkciju normalizacije, odnosno preslikavanje  $f_{norm}: [0, f_{max}] \rightarrow [0, n]$  u numerički prihvatljiv prostor takav da sve tražene ciljne funkcije budu normirane unutar tog prostora  $[0, n]$ ). Najčešće se to provodi inicijalnim ispitivanjem sustava te iskustvenim približnim odabirom najgoreg slučaja. U slučaju dvociljne optimizacije jednadžba treće ciljne funkcije u  $i$ -toj iteraciji optimizacije glasi:

$$f_{3,NP}(\vec{x}) = \sqrt{\left(\frac{f_1(\vec{x})}{f_{1,max}}\right)^2 + \left(\frac{f_2(\vec{x})}{f_{2,max}}\right)^2} \quad (4.9)$$

čime se višeciljna optimizacija praktički svodi na jednociljnu optimizaciju trećom funkcijom  $f_{3,NP}(\vec{x})$  koja kao parametre uzima dvije preslikane ciljne funkcije koje su normirane na prostore  $[0,1]$ . Prednost neutralne metode je manje korištenje iskustvenih podataka, odnosno ekstenzivnog pred-testiranja sa svrhom iskustvenog određivanja pojedinih faktora višeciljne optimizacije. Jedini iskustveni podaci koje korisnik mora odrediti su rasponi pojedinih prostora rješenja, odnosno koeficijenti  $f_{1,max}$  i  $f_{2,max}$ , u slučaju dvociljne optimizacije. Koristan način određivanja tih faktora je pred-testiranje ispitnog problema jednociljnom optimizacijom definiranim ciljnim funkcijama i promatranje kretanja rješenja, iz čega je lako odrediti najgora ili neka druga neprihvatljiva rješenja preko kojih se lako mogu definirati faktori  $f_{i,max}$ .

#### 4.2.2 Metoda linearne skalarizacije težinskim faktorima (weighted sum method)

*A priori* metoda linearne skalarizacije je metoda koja koristi prethodno odabrane preferencije prema određenim ciljnim funkcijama. Korištenje *a priori* odlučivanja kao računskog elementa se definira na način da se svakoj ciljnoj funkciji dodijeli određeni težinski faktor, sa kojime se povećava ili smanjuje preferencija prema određenoj ciljnoj funkciji. Zbroj produkata težinskih faktora i ciljnih funkcija daje treću ciljnu funkciju čime se postiže svođenje  $k$ -višeciljnog optimizacijskog postupka na jednociljnu optimizaciju jednom parametarskom ciljnom funkcijom:

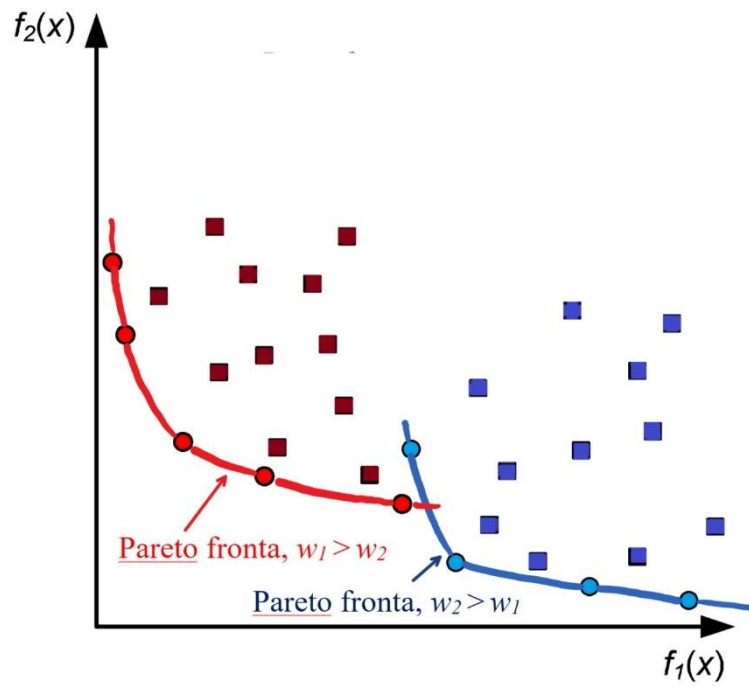
$$\min_x \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \quad (4.10)$$

gdje su  $w_i$  težinski faktori za koje vrijedi  $w_i > 0$ . Iako je rezultat skalarizacijske višeciljne optimizacije jedno rješenje, takav postupak daje i Pareto skup rješenja iz kojeg je moguće *a posteriori* izvući rješenje koje najviše odgovara DM-u.

Praktičan pristup definiciji težinskih faktora kod dvociljne optimizacije je svođenje jedne od ciljnih funkcija na približne vrijednosti druge tako da se ukupni zbroj težinskih faktora može podesiti da bude jednak 1. Time težinski faktori dobivaju relativnu dimenziju obzirom na broj 1, odnosno mogu se i prikazati u postotcima u odnosu na 100%. Takva optimizacija se definira kao:

$$f_{3,WS}(\vec{x}) = w_1 \cdot K_1 \cdot f_1(\vec{x}) + w_2 \cdot K_2 \cdot f_2(\vec{x}) \quad (4.11)$$

gdje su  $w_1$  i  $w_2$  težinski faktori manji od 1, i za koje vrijedi  $w_1 + w_2 = 1$ , dok su  $K_1$  i  $K_2$  faktori korekcije ciljne funkcije, koji se određuju tako da prostor druge ciljne funkcije svedu unutar granica prostora prve ciljne funkcije kako bi zbroj produkata težinskih faktora i ciljnih funkcija imao vjerodostojan iznos. Promjenom faktora kroz nekoliko opetovanih optimizacija moguće je, osim najboljeg rješenja dobiti i različite Pareto skupove, odnosno Pareto fronte rješenja, temeljem kojih se DM može odlučiti za jedno od ponuđenih rješenja, ovisno o *a posteriori* preferencijama. Kada se govori o samom odlučivanju o rješenju iz posljednjeg Pareto skupa, DM može biti i računalno definiran algoritam, ali u slučaju *a priori* optimizacije uglavnom se radi o ljudskom faktoru. Primjer dvije Pareto fronte za dvije optimizacije linearnom skalarizacijskom metodom (dva različita odnosa težinskih faktora) je prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3. *Primjeri Pareto skupova i Pareto fronti za dvije optimizacije linearnom skalarizacijom i različitim težinskim faktorima*

## **5. Metaheuristički algoritmi u primjeni testiranja stabilnosti EES-a**

U ovom poglavlju opisani su metaheuristički algoritmi koji su korišteni u testiranju modela. Uz opise algoritama pridodani su i pojednostavljeni pseudokodovi i dijagrami tokova. Opisi algoritama se vežu uz literaturu kroz koju su algoritmi predstavljani, uglavnom u jednociljnim varijantama.

Višeciljna paradigma kod ispitanih algoritama u ovom radu se primjenjuje na način da se na jednociljni način promatra odnos dviju ciljnih funkcija kroz neutralnu i skalarizacijsku metodu. Kroz dvije ciljne funkcije se u toj paradigmi pokušava doći do najboljeg rješenja koje objedinjuje kvalitete optimizacije objiju ciljnih funkcija i uz takvo rješenje ponuditi DM-u set okolnih rješenja koja DM može odabrati ovisno o preferencijama.

### **5.1 Ant-lion optimizer**

ALO je metaheuristički algoritam [35] koji se bazira na ponašanju insekata *Distoleon tetragramicus* iz porodice *Myrmeleontidae*, reda *Neuroptera* (kukci sa mrežastim krilima). Radi se o insektima čiji su glavni izvor hrane drugi manji insekti, posebno mravi (otkuda i ime insekata). Životni ciklus im traje do 3 godine i sastoji se od dvije glavne faze: faze ličinke i odrasle faze. Odrasla faza je obično izuzetno kratka i traje do 3-5 tjedana, čime najveći dio životnog ciklusa otpada na fazu ličinke, kada je dominantno hranjenje. Nakon toga prolaze metamorfozu u leteće insekte i fazu odraslosti kada je dominantna reprodukcija.

ALO algoritam inspiraciju nalazi u fazi ličinke i matematičkom opisu raznih faza ulova i prehrane spomenutih insekata. Ličinke iskopavaju zamke (obično u pijesku) u obliku stošca, nakon čega se skrivaju na dnu zamke i čekaju ulov. Kada predator uoči ulov pokušava ga uhvatiti svojim čeljustima, međutim lovina pokušava pobjeći i pritom slijedi druga faza hvatanja gdje predatori izbacuju pijesak prema vrhu zamke čime se lovina otklizuje prema predatoru. Kada je ulovljen, plijen se hvata čeljustima i konzumira. Nakon toga predator priprema zamku za slijedeći plijen.

U samoj fazi hranjenja postoji i povezanost veličine zamke sa razinom gladi kod predatora koja je proporcionalna: predatori imaju tendenciju iskopavati veće zamke kada su gladniji, čime je pokazana evolucijska razina kod insekata. Osim toga imaju interni lunarni biološki sat, koji također povezuje veličinu zamke sa lunarnom osvjetljenošću Zemlje.

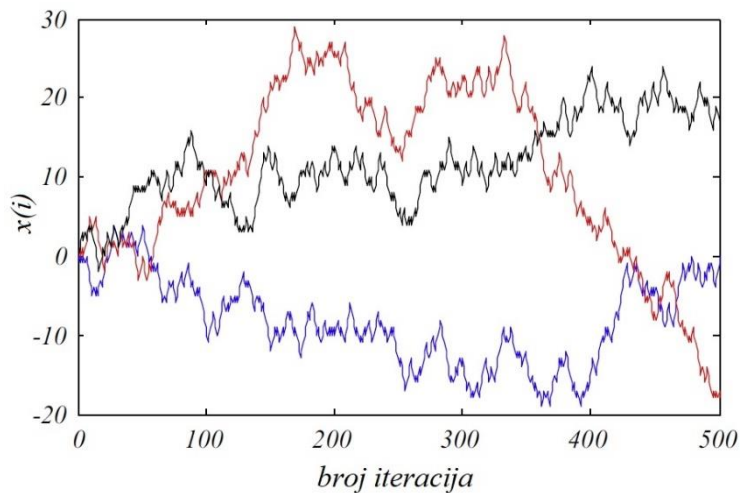
ALO algoritam matematički oponaša fazu hranjenja odnosno interakciju predatora i plijena. Kod matematičkog modeliranja faze hranjenja bitno je definirati početne pretpostavke, kao što je primjerice stohastičko kretanje plijena kroz definirani prostor funkcijom kumulativnih suma povezanih sa iteracijama algoritma i generatorom nasumičnim brojeva:

$$R(i) = [0, \text{cumsum}(2r(1) - 1), \dots, \text{cumsum}(2r(n) - 1)] \quad (5.1)$$

gdje je *cumsum* funkcija kumulativnog zbroja, *n* je maksimalan broj iteracija, *i* je korak nasumičnog kretanja, dok je *r(i)* stohastička funkcija koja ovisi o nasumičnom generiranju broja u intervalu [0, 1] opisanog funkcijom *rand*:

$$r(i) = \begin{cases} 1, & \text{rand} > 0.5 \\ 0, & \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (5.2)$$

Pritom je *i* broj tekuće iteracije. Primjer takvih kretanja za tri slučaja po 500 iteracija je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. Primjeri tri slučaja nasumičnih kretanja plijena [35]

Pozicije plijena se potom snimaju i koriste tijekom optimizacije. Za pozicije plijena vrijedi sljedeće:

$$M_{ant} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} & \cdots & A_{n,d} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

gdje su: *d* broj varijable (dimenzije) i *n* broj plijena (mrava). Sličan koncept definiranja pozicije preko dvije navedene veličine se nalazi i u drugim čestičnim algoritmima i naziva se *dimenzija čestice* i *broj čestica*. Pozicija mrava, kao i pozicija nekog drugog tipa agenta (čestice kod PSO, plijena kod SSA ili stanja kod SA) definira potencijalna rješenja optimizacijskog problema.

Procjena iskoristivosti rješenja (plijena) se definira i kroz matricu ciljnih funkcija za svaku poziciju:

$$M_{OA} = \begin{bmatrix} f(A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,d}) \\ f(A_{2,1}, A_{2,2}, \dots, A_{2,d}) \\ \vdots \\ f(A_{n,1}, A_{n,2}, \dots, A_{n,d}) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Uz matricu pozicija plijena, definira se i matrica pozicija predatora za koje se pretpostavlja da su također smješteni negdje u prostoru rješenja:

$$M_{antlion} = \begin{bmatrix} AL_{1,1} & \cdots & AL_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{n,1} & \cdots & AL_{n,d} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

kao i njihovih ciljnih funkcija:

$$M_{OAL} = \begin{bmatrix} f(AL_{1,1}, AL_{1,2}, \dots, AL_{1,d}) \\ f(AL_{2,1}, AL_{2,2}, \dots, AL_{2,d}) \\ \vdots \\ f(AL_{n,1}, AL_{n,2}, \dots, AL_{n,d}) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Kroz iterativni tijek optimizacije vrijede sljedeći uvjeti:

- plijen se kreće kroz prostor rješenja nasumičnim kretanjem, te vrijedi za svaku dimenziju cjelokupne populacije plijena,
- pozicije zamki predatora utječu na nasumično kretanje plijena,
- veličina zamki ovisi o sposobnosti predatora (bolja ciljna funkcija – veća zamka),
- bilo koji plijen u tekućoj iteraciji mogu uhvatiti lokalni ili najjači predator,
- granice nasumičnog kretanja se adaptivno smanjuju (ekvivalentno proklizavanju plijena unutar zamke),
- Ukoliko plijen ima bolju ciljnu funkciju od predatora onda je uhvaćen,
- Predator se razmješta na poziciju posljednjeg uhvaćenog plijena, čime se povećava šansa ulova sljedećeg plijena.

Iako su nasumična kretanja plijena opisana jednadžbom (5.1) populacija plijena ažurira svoje pozicije svakim sljedećim korakom optimizacije, budući se granice prostora rješenja adaptivno sužavaju na isti način. Kako bi se pozicije plijena zadržale unutar granica definiranih svakim novim korakom (iteracijom) one se normiraju unutar novog prostora rješenja [36]:

$$x_j(i) = \frac{(x_j(i-1) - a_j) \cdot (d_j(i) - c_j(i))}{b_j - a_j} + c_j(i) \quad (5.7)$$



gdje su  $c_j(i)$  i  $d_j(i)$  minimum i maksimum  $j$ -te varijable u  $i$ -toj iteraciji,  $a_j$  i  $b_j$  minimum i maksimum pozicija  $j$ -te varijable u nasumičnom kretanju i direktno su vezane za slijedeću fazu. Faza padanja plijena u zamku se definira kroz promjenu nasumičnog kretanja plijena i opisuje se slijedećim jednadžbama:

$$c_j(i) = antlion_j(i) + c(i) \quad (5.8)$$

$$d_j(i) = antlion_j(i) + d(i) \quad (5.9)$$

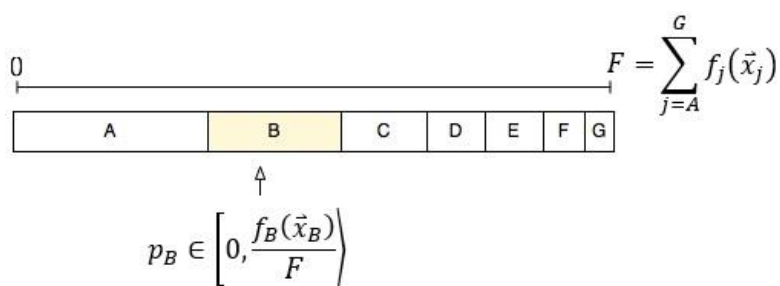
gdje su  $c(i)$  i  $d(i)$  vektori minimuma i maksimuma svih varijabli u  $i$ -toj iteraciji, dok je  $antlion_j(i)$  pozicija  $j$ -tog agenta (predatora) u  $i$ -toj iteraciji.

Faza izrade zamki opisuje veličinu zamke koja je proporcionalna jačini predatora. Bolja rješenja imaju veće šanse u slijedećoj iteraciji optimizacije doći do bolje ciljne funkcije, kao što jači predatori imaju veće šanse uloviti plijen. ALO algoritam implementira ovu fazu kroz stohastičku funkciju jednostavnog generacijskog odabira (eng. *roulette wheel selection*). Formula vjerojatnosti odabira  $i$ -tog pojedinca za  $n$  pojedinaca u populaciji pritom glasi:

$$p_i = \frac{f_i(\vec{x}_i)}{F} \quad (5.10)$$

gdje je:

$$F = \sum_{j=1}^n f_j(\vec{x}_j) \quad (5.11)$$



Slika 5.2. Odabir pojedinca kroz funkciju jednostavnog generacijskog odabira

Faza dohvaćanja (klizanja) plijena se matematički modelira kroz adaptivno smanjivanje granica prostora rješenja, odnosno sužavanje prostora nasumičnog kretanja plijena. Tu fazu opisuju slijedeće relacije:

$$c(i) = \frac{c(i-1)}{I} \quad (5.12)$$

$$d(i) = \frac{d(i-1)}{I} \quad (5.13)$$

gdje je  $I$  faktor za koji vrijedi ( $N$  je ukupni broj iteracija u optimizaciji):

$$I = \begin{cases} 1, & i \leq N/3 \\ 1 + 10^{\frac{i}{N}}, & i > N/3 \\ 1 + 10^{\frac{2i}{N}}, & i > 0.5N \\ 1 + 10^{\frac{3i}{N}}, & i > 0.75N \\ 1 + 10^{\frac{4i}{N}}, & i > 0.9N \\ 1 + 10^{\frac{5i}{N}}, & i > 0.95N \end{cases} \quad (5.14)$$

Faza dohvata plijena i obnove zamke se opisuje jednadžbom koja je karakteristična za čestične algoritme i opisuje pridodavanje nove bolje ciljne funkcije istoj čestici (predatoru):

$$f(\text{ant}_j(i)) < f(\text{antlion}_j(i)) \rightarrow \text{antlion}_j(i) = \text{ant}_j(i) \quad (5.15)$$

Zadnja faza algoritma je pravilo elitizma kroz koje se definira najbolji predator i temeljem njegove pozicije se definiraju nove pozicije plijena:

$$\text{ant}_j(i+1) = \frac{R_A(i) + R_E(i)}{2} \quad (5.16)$$

gdje je  $R_A(i)$  funkcija nasumičnog kretanja plijena oko elitnog predatora u  $i$ -toj iteraciji, a  $R_E(i)$  funkcija nasumičnog kretanja plijena oko predatora odabranog funkcijom jednostavnog generičkog odabira koja je opisana jednadžbom (5.10).

---

### Pseudokod ALO algoritam

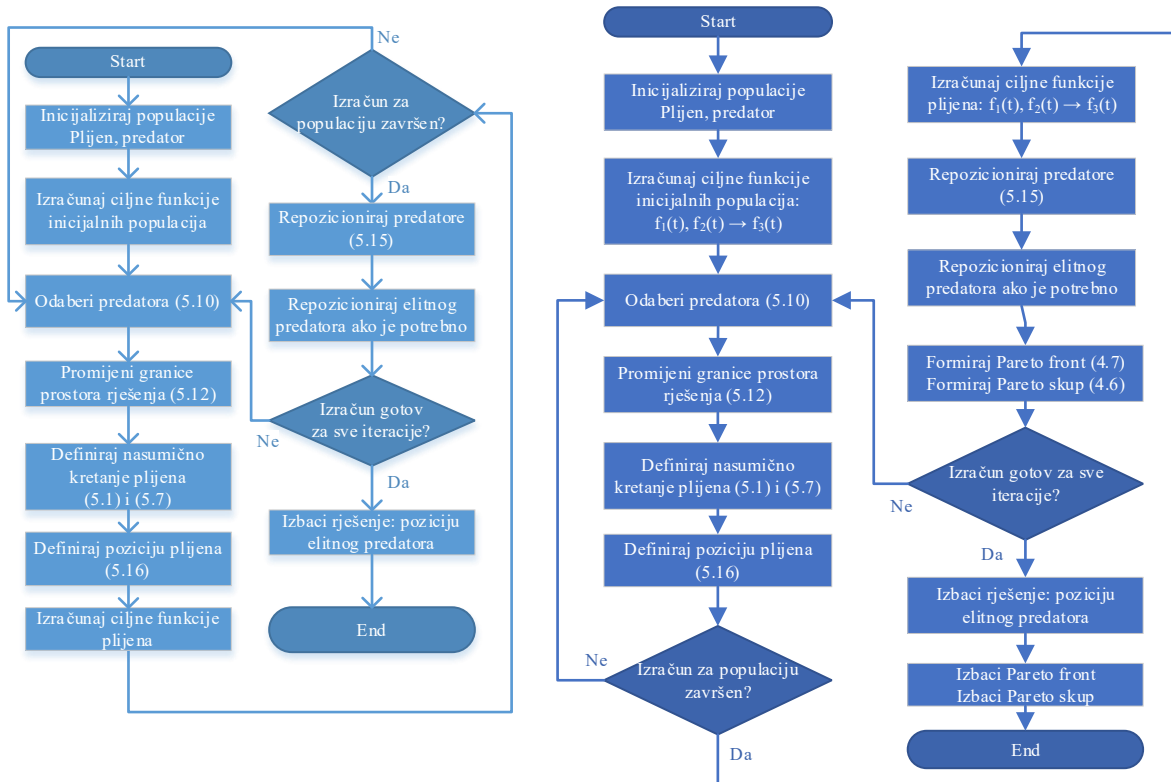
---

```

1: inicijalizacija nasumične populacije plijena/predatora
2: izračun ciljnih vrijednosti inicijalnih populacija
3: nalaženje najjačeg grabežljivca (prvi optimum)
4: while kriterij završetka nije ispunjen (broj iteracija)
5:   for svaki plijen
6:     odabir predatora nasumično (5.10)
7:     izračun granica klopke grabežljivca (5.12), (5.13)
8:     izračun nasumičnog kretanja plijena unutar klopke (5.7)
9:     repozicioniranje plijena (5.16)
10:  end for
11:  izračun ciljnih vrijednosti plijena
12:  repozicioniranje predatora ako plijen ima bolju ciljnu funkciju
13:  repozicioniranje elitnog predatora ako postoji jači u iteraciji
14: end while
15: return elitni predator

```

---



Slika 5.3. Dijagrami toka za ALO (lijevo) i MOALO (desno)

## 5.2 Salp Swarm Algorithm

Salpidi su morske životinje karakterističnog prozirnog cilindričnog tijela, koje se međusobno formiraju u zajednice koje su poznate kao lanci salpida. Tijela su im slične prozirne konstitucije kao i kod meduza, kao i način kretanja. Inspiraciju za matematičko modeliranje autori algoritma [42] pronalaze u načinu formiranja rojeva lanaca salpida, koje se postiže s razlogom boljeg kretanja kroz okoliš, hranjenja i razmnožavanja. Iako su biološka istraživanja na tom području prilično recentna, autori su uspjeli formirati neke osnovne pretpostavke: lanac salpida se dijeli u dvije grupe: jednu koja čini vodiča i ostatak koji čini sljedbenike. Vodič je na čelu lanca, dok su sljedbenici kaskadno povezani uz vodiča i jedni uz druge, formirajući lanac. Slično kao i u drugim čestičnim algoritmima, pozicije salpida u lancu se formiraju kroz  $d$ -dimenzionalni prostor rješenja, gdje je  $d$  broj varijabli rješenja optimizacijskog problema (dimenzija). Pozicije svih salpida se spremaju u dvodimenzionalnu matricu rješenja. Slijedeća pretpostavka je da postoji i pozicija hrane (plijena)  $F$  koja je cilj ulova roja salpida. Ažuriranje pozicije vodiča se pritom vrši kroz slijedeće jednadžbe:

$$x_1(k) = \begin{cases} F(i, k) + c_1((ub(k) - lb(k))c_2 + lb(k)) \leftarrow c_3 \geq 0 \\ F(i, k) - c_1((ub(k) - lb(k))c_2 + lb(k)) \leftarrow c_3 < 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

gdje je  $x_1(k)$  položaj vodiča (prvog salpida) za  $k$ -tu dimenziju,  $F(k)$  pozicija izvora hrane za  $k$ -tu dimenziju,  $ub(k)$  i  $lb(k)$  gornja i donja granica prostora rješenja za  $k$ -tu dimenziju,  $c_1$  je faktor iskorištavanja prostora rješenja, a  $c_2$  i  $c_3$  su nasumično generirani brojevi uniformnom distribucijom (funkcija *rand*) u intervalima  $[0,1]$ , odnosno  $[-1,1]$ . Faktor  $c_1$  se definira jednadžbom:

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4i}{N}\right)^2} \quad (5.18)$$

i predstavlja glavnu računsku jezgru SSA algoritma. U jednadžbi (5.18)  $i$  predstavlja trenutnu iteraciju, dok je  $N$  ukupni broj iteracija. Faktori  $c_2$  i  $c_3$  pritom kroz jednadžbu (5.17) definiraju smjer kretanja vodiča, a time i lanca. Pozicije sljedbenih salpida ( $j \geq 2$ ) se definiraju potom kroz Newton zakon gibanja u diskretnom području (jer iteracija predstavlja vrijeme):

$$x_j(k) = \frac{x_j(k) + x_{j-1}(k)}{2} \quad (5.19)$$

Najboljem rješenju se pritom pridružuje pozicija hrane  $F$ , te se postupak potom iterativno ponavlja.

---

### Pseudokod SSA algoritam

---

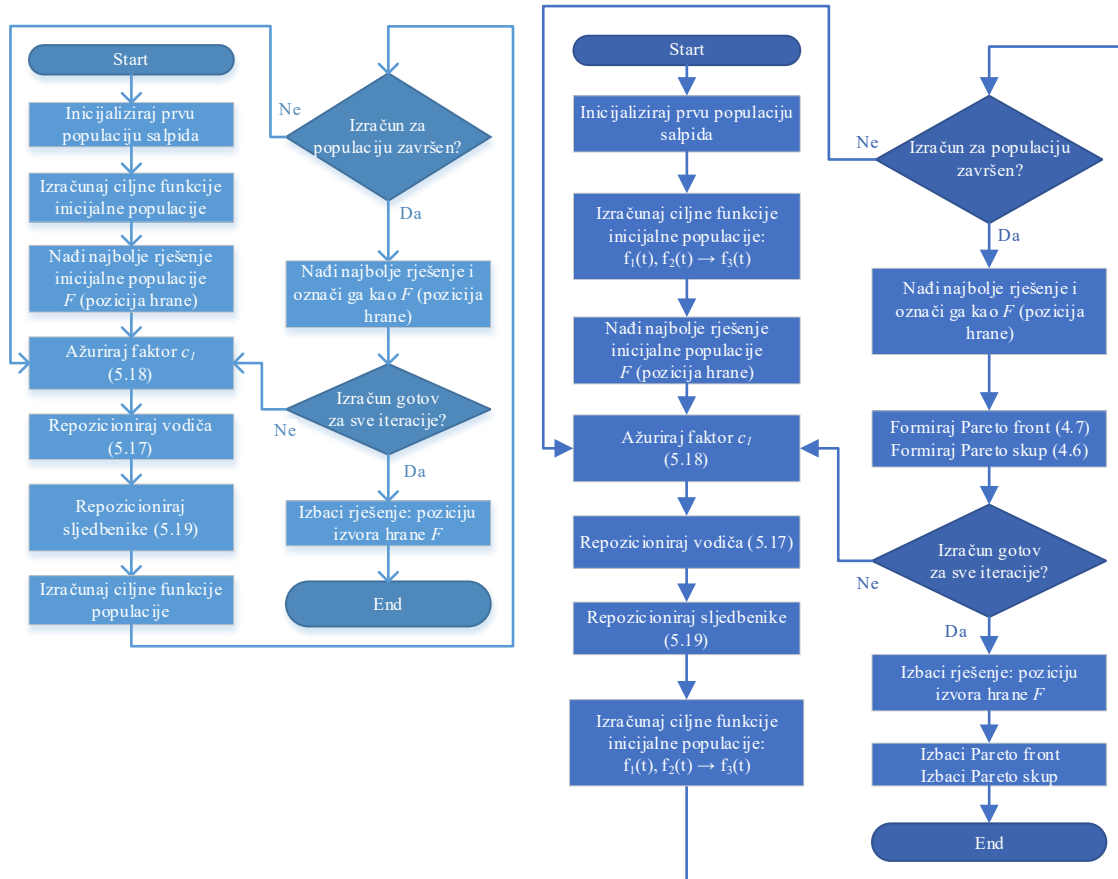
```

1: inicijalizacija nasumične populacije jedinki salpida
2: izračun ciljnih vrijednosti inicijalne populacije
3: nalaženje hrani najbliže jedinke (prvi optimum)
3: while kriterij završetka nije ispunjen (broj iteracija)
5:   for svaka jedinka
6:     if broj jedinke == 1
7:       repozicioniranje vodeće jedinke
8:     else
9:       repozicioniranje slijedne jedinke
10:    end if
11:  end for
12:  repozicioniranje jedinke u prostoru stanja
13:  izračun ciljnih funkcija populacije
14:  repozicioniranje izvora hrane
13: end while
14: return pozicija izvora hrane

```

---

SSA algoritam je prilično jednostavan u izvedbi jer ima samo jedan kontrolni parametar ( $c_1$ ). To ga čini programski jednostavnim za implementaciju kod raznih optimizacijskih problema.



Slika 5.4. Dijagrami toka za SSA (lijevo) i MOSSA (desno)

### 5.3 Velocity Relaxed Particle Swarm Algorithm

PSO algoritam je čestični metaheuristički optimizacijski algoritam razvijen 1994. godine [39] u kojemu je za matematičko modeliranje poslužila inspiracija formiranja i kretanja jata ptica/riba u prirodi. Čestice algoritma se promatraju kao jedinke jata, krećući se kroz prostor određenom brzinom i bez kolizije. U tom smislu pozicija i brzina jedinki jata su glavni kontrolni parametri algoritma. Bazični PSO algoritam je jednostavnog koncepta i može se lako implementirati kroz kôdiranje i primijeniti na razne kontinuirane nelinearne probleme. Kroz razvoj raznih metaheurističkih algoritama PSO je postao i ostao svojevrsni standard iz kojega su proizašle razne varijante, prilagođene određenim optimizacijskim problemima [41] i koji se često koristi za usporedbu uspješnosti performansi novih algoritama. Jedna od tih varijanti je i varijanta VRPSO, odnosno PSO algoritam koji ima adaptivne promjene faktora brzine kod repositioniranja čestica (eng. *velocity relaxed*) [40]. Promjene brzine i pozicije (kontrolni parametri algoritma) kroz iteracije definiraju se slijedećim jednadžbama:

$$v_j(i+1) = w(i) \cdot v_j(i) + c_1 \cdot rand \cdot (pbest(i) - x_j(i)) + c_2 \cdot rand \cdot (gbest - x_j(i)) \quad (5.20)$$

$$x_j(i+1) = x_j(i) + v_j(i+1) \quad (5.21)$$

gdje su  $v_j(i)$  brzine čestica,  $x_j(i)$  pozicije čestica,  $pbest(i)$  najbolja pozicija čestica u iteraciji,  $gbest$  najbolja globalna pozicija čestica u svim dosadašnjim iteracijama,  $c_1$  i  $c_2$  koeficijenti učenja i  $w(i)$  adaptivni faktor promjene brzine ovisan o iteraciji. U terminologiji PSO optimizacije faktor  $c_1$  se naziva faktorom kognitivnog učenja i predstavlja orijentaciju brzine čestice prema najboljoj čestici unutar tekuće iteracije  $pbest(i)$ , faktor  $c_2$  se naziva faktorom socijalnog učenja i predstavlja orijentaciju brzine čestice prema najboljem rješenju unutar optimizacije  $gbest$ , dok se faktor  $w(i)$  naziva još i adaptivnim inercijskim težinskim koeficijentom. Brzina je također podložna granicama  $[v_{min}, v_{max}]$  koje se definiraju na slijedeći način:

$$[v_{min}, v_{max}] = \mp \frac{(x_{max} - x_{min})}{2} \quad (5.22)$$

kako bi se utjecalo na promjenu pozicije unutar samog prostora rješenja. Osim držanja brzina unutar prostora rješenja osnovno osiguranje je uvjet ograničenih nejednakosti iz (4.1) kojima se definiraju  $x_{max}$  i  $x_{min}$  koji su vektori gornje i donje granice svih elemenata (dimenzija) čestice. Inicijalna brzina se definira nasumičnim generiranjem:

$$v_j(1) = rand \cdot (x_{max} - x_{min}) \quad (5.23)$$

Faktori  $c_1$  i  $c_2$  su faktori koji predstavljaju brzinu kognitivnog učenja i brzinu socijalnog učenja čestica. Oni mogu biti adaptivni ili fiksni. Kako je u ovoj metodi korišten globalni adaptivni faktor  $w(i)$  koji ovisi o samoj iteraciji, tako su u radu prema prethodnim testiranjima modela odabrani fiksni faktori za koje vrijedi:  $c_1 = 0.9$  i  $c_2 = 1.2$ , čime u maloj relativnoj mjeri prednjači faktor socijalnog učenja, odnosno daje se prednost skretanju čestica prema iterativnom najboljem rješenju  $pbest$  u mjeri koja ne zanemaruje skretanje čestica prema kognitivnom najboljem rješenju same čestice  $gbest$ .

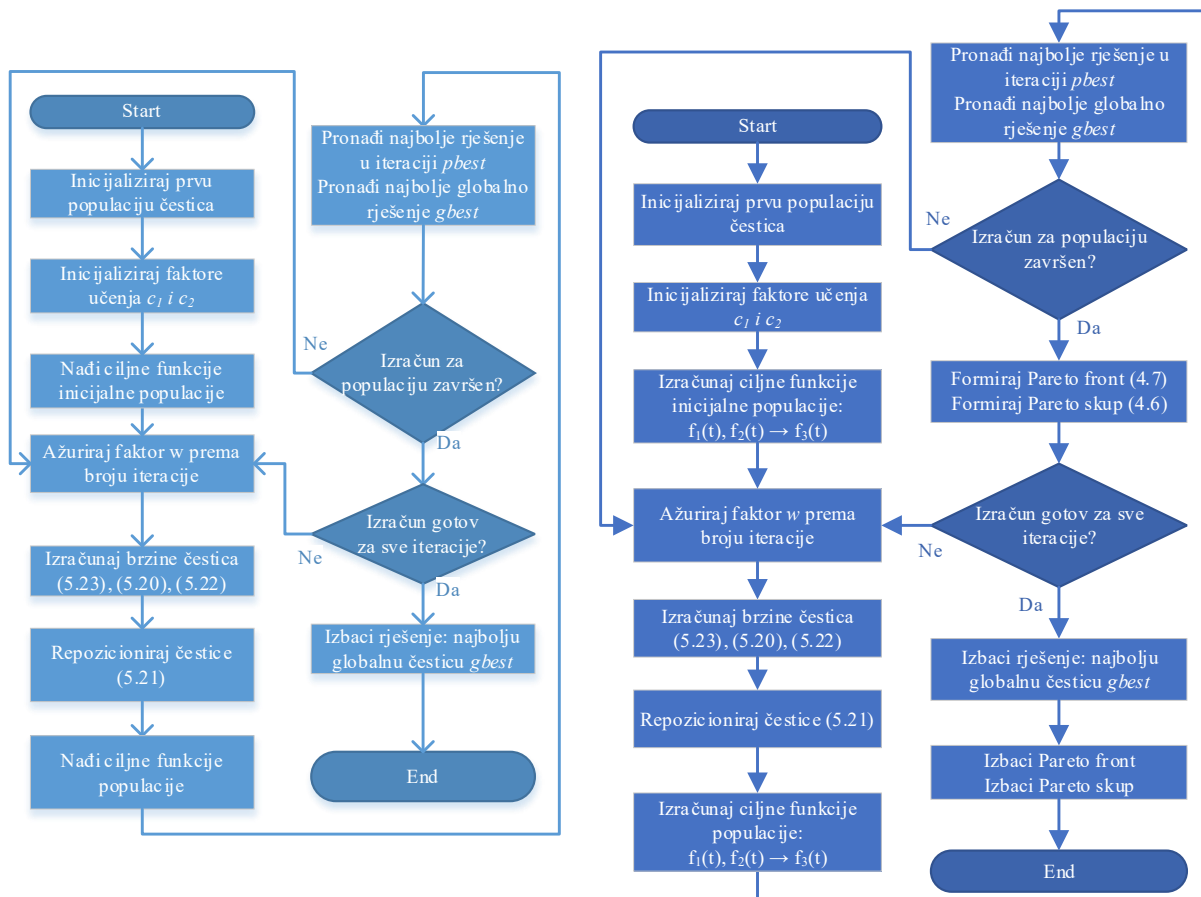
---

### Pseudokod VRPSO algoritam

---

- 1: inicijalizacija nasumične populacije čestica
- 2: inicijalizacija početnih brzina i faktora učenja
- 3: izračun ciljnih funkcija čestica početne populacije
- 4: **while** kriterij završetka nije ispunjen (broj iteracija)
- 5:     izračun adaptivnog faktora brzine
- 6:     izračun brzina čestica

- 7: repositioniranje čestica
  - 8: izračun ciljnih vrijednosti populacije
  - 9: pozicioniranje iterativnih i globalne najbolje čestice
  - 13: **end while**
  - 14: **return globalno** najbolja čestica
- 



Slika 5.5. Dijagrami toka za VRPSO (lijevo) i MOVRPSO (desno)

## 5.4 Simulated Annealing

SA je vjerojatnosni metaheuristički algoritam koji se bazira na modeliranju promjene fizičkih svojstava i temperature materijala kod obrade u metalurškoj industriji (eng. *annealing* - prekaljivanje). Prekaljivanje je tehnika koja objedinjuje kontrolirano zagrijavanje i hlađenje materijala sa svrhom promjene fizikalnih svojstava. Algoritam je razvijen i opisan u literaturi [43], [44] i koristi se u raznim matematičkim i inženjerskim problemima.

Optimizacijska tehnika kod SA se bazira na ispitivanju susjednih stanja trenutnog stanja na sličan način kako se u termodinamici energija i temperatura iz jednog strukturnog dijela

materijala prenose u drugi dio. Za razliku od ostalih algoritama prezentiranih u radu koji za inspiraciju uzimaju prirodu (ponašanje životinja), SA je algoritam sa fizikalnom inspiracijom: ulazni podaci se nazivaju "stanjima", za razliku od primjerice PSO algoritma čiji ulazni podaci su „čestice“ ili "salpida" kod SSA.

Postupci zagrijavanja i hlađenja prilikom obrade utječu na temperaturu i termodinamičku energiju materijala. Ta dva parametra se uzimaju kao kontrolni parametri algoritma SA. Optimizacija se vrši ispitivanjem susjednih stanja od stanja  $s$  koje je proizašlo u prethodnoj iteraciji algoritma. SA koristi nekoliko inicijalnih postavki: početnu temperaturu  $T_0$ , faktor smanjivanja temperature  $\alpha$ , broj ispitivanih susjednih stanja  $n_n$  i faktore promjene (mutacije) susjednog stanja  $\mu$  i  $\sigma$ . Prihvaćanje novog stanja kao boljeg rješenja (ili ostajanje u istom stanju prethodne iteracije) pritom ovisi o funkciji vjerojatnosti  $P(e, e_{new}, T)$  koja se oslanja na funkciju energije prethodnog  $e = E(s)$  i trenutnog stanja  $e_{new} = E_{new}(s)$  i temperaturi  $T$ . Stanja sa manjom energijom su pritom bolja rješenja.

Funkcija vjerojatnosti  $P$  mora imati pozitivnu vrijednost u svim slučajevima, pa i u onima kada je  $e_{new} > e$ , čime se proširuje prostor istraživanja rješenja i smanjuje mogućnost da se globalno rješenje zaglavi u lokalnom minimumu. Povećanjem trenutne iteracije, temperatura  $T$  teži prema nuli, a s njom i vjerojatnost  $P$  ukoliko je  $e_{new} > e$ . Pri malim vrijednostima temperature  $T$  algoritam će sve više favorizirati rješenja za koja vrijedi  $e_{new} < e$ . Za  $T \leq 0$  algoritam odbacuje rješenja/stanja za koje vrijedi  $e_{new} > e$  i samo prihvaća nova stanja za koja je  $e_{new} < e$ . Vjerojatnost prihvata slabijeg rješenja  $P$  se u pojedinoj iteraciji za  $T > 0$  smanjuje kako raste razlika između novog i prethodnog stanja  $e_{new} - e$ , odnosno prilikom istraživanja prostora rješenja vjerojatnije je da će algoritam odabrati stanja sa manjom razlikom u energiji. Naravno, pritom temperatura  $T$  koja definira trenutnu iteraciju igra važnu ulogu u iznosu funkcije vjerojatnosti i prihvatu novog slabijeg stanja veće energije zbog osjetljivosti na varijacije između stanja i njihovih energija. Generalno, sa većom temperaturom  $T$  (i početnim iteracijama), algoritam je osjetljiviji na veće razlike u energijama stanja. Kako se algoritam bliži kraju sa iteracijama (temperatura se smanjuje) osjetljivost prema razlikama stanja je manja i u toj fazi kreće finije podešavanje rješenja.

Funkcija vjerojatnosti prihvata stanja za  $i$ -tu iteraciju se definira jednadžbom:

$$P(i) = e^{-\frac{1}{T(i)} \frac{e_{new}(i) - e(i)}{e(i)}} \quad (5.24)$$



Procesu promjene/mutacije stanja podložne su sve dimenzije/varijable  $k$  pojedinog stanja. Promjena  $k$ -te varijable u  $i$ -toj iteraciji  $j$ -tog stanja ovisi o faktorima  $\mu$  i  $\sigma$  i definirana je kao:

$$\begin{aligned} \mu \geq rand &\rightarrow s_{new,j,k}(i) = s_{j,k}(i) + \sigma \cdot rand \\ \mu \leq rand &\rightarrow s_{new,j,k}(i) = s_{j,k}(i) \end{aligned} \quad (5.25)$$

Faktor  $\mu$  je faktor vjerojatnosti mutacije koji se određuje za svaku dimenziju unutar stanja/rješenja, dok je  $\sigma$  faktor ranga mutacije kojim se definira područje u kojem se dešava promjena pojedine dimenzije unutar stanja/rješenja. Faktor  $\sigma$  može biti fiksni ili adaptivan (ovisan o broju iteracije ili temperaturi). U ovom radu odabrani su fiksni faktori:  $T_0 = 0.1$ , broj susjednih stanja jednak je 2, faktor mutacije  $\mu = 0.7$ . Za adaptivne faktore vrijedi:

$$\sigma = 0.98^i (s_{max} - s_{min}) \quad (5.26)$$

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2n} \rightarrow T(i) = \alpha \cdot T(i - 1) \quad (5.27)$$

---

### Pseudokod SA algoritam

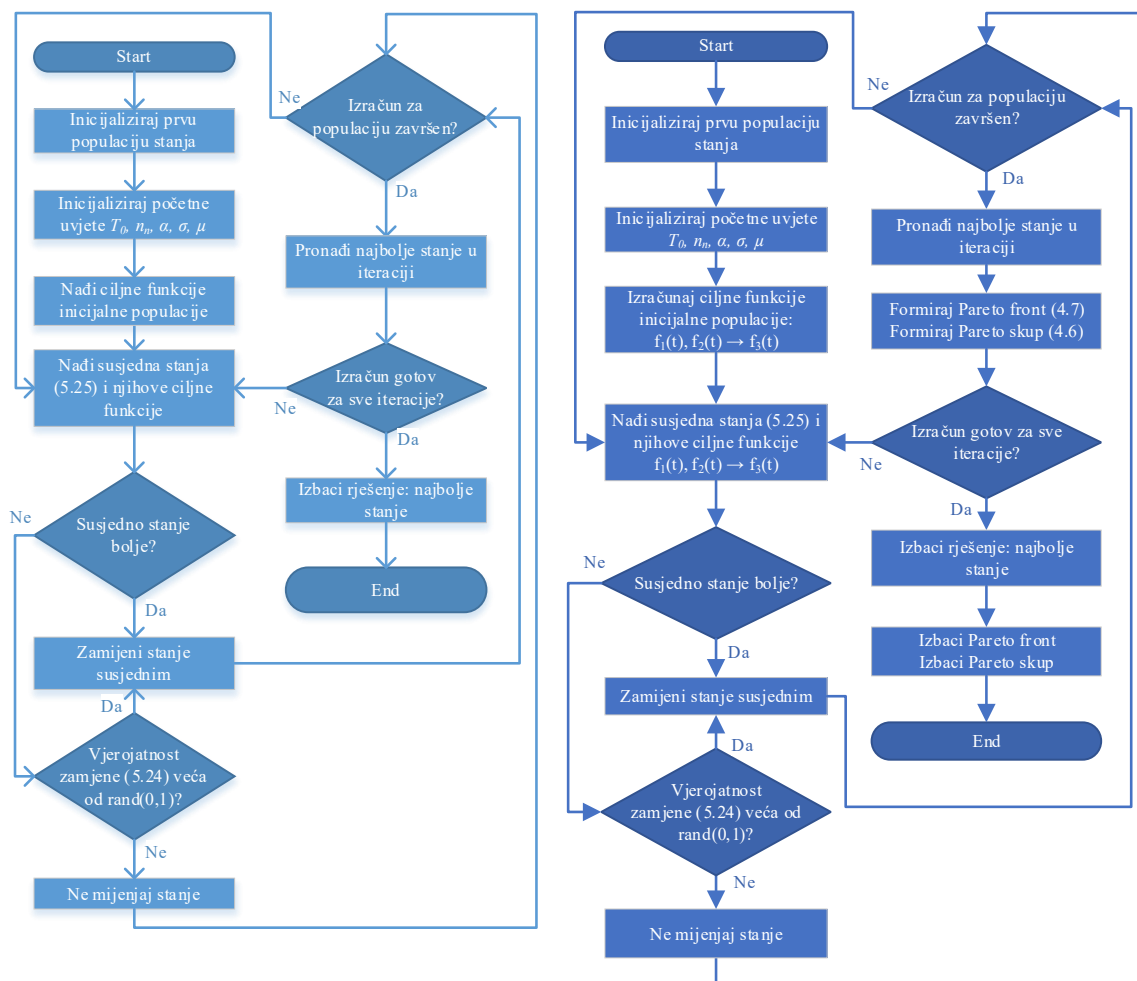
---

```

1: inicijalizacija nasumične populacije stanja
2: inicijalizacija početnih uvjeta: temperatura, faktori promjene/mutacije
3: inicijalizacija broja susjednih stanja
4: izračun ciljnih funkcija početnog stanja
5: while kriterij završetka nije ispunjen (broj iteracija)
6:   for svako stanje
7:     izračun susjednih stanja (mutacija) i ciljnih funkcija (E)
8:     for svako susjedno stanje
9:       if E(susjedno stanje) < E(stanje)
10:        zamjena stanja susjednim stanjem
11:       else
12:        izračunaj vjerojatnost zamjene P
13:        if P >= rand
14:          zamjena stanja susjednim stanjem
15:        else
16:          nema zamjene stanja
17:        end if
18:      end if
19:    end for
20:  end for
21:  sortiranje najboljih stanja
22:  ažuriranje temperature
23:  ažuriranje faktora ranga mutacije
13: end while
14: return najbolje stanje

```

---



Slika 5.6. Dijagrami toka za SA (lijevo) i MOSA (desno)



## **6. Primjena metaheurističke optimizacije u parametriranju uzbudnih sustava generatora**

### **6.1 Ispitni slučajevi – scenariji pogonskih poremećaja**

U ovom radu se iterativnim simuliranjem realnih mogućih pogonskih scenarija vrši parametriranje AVR i PSS uređaja uz pomoć različitih algoritama čestične inteligencije sa svrhom pronalaska zadovoljavajućeg jednog (jednociljno) ili cijelog seta rješenja (višeciljno), odnosno AVR/PSS parametara. Takva optimizacijom dobivena rješenja za rezultat daju prihvatljive oscilacije generatorskih veličina brzine vrtnje i napona armature, kao i što manje njihanje tokova radnih snaga na paralelnom interkonekcijskom vodu (TAFM) ili prijenosnom području. Varijabilni parametri obuhvaćeni optimizacijskim metodama su definirani u blokovima koji su označeni na slici 3.15 crvenom bojom.

#### **6.1.1 Scenariji pogonskih poremećaja u EES-u – WSCC model**

Poremećaji pomoću kojih se ispituje stabilnost WSCC sustava uključuju 3 različita scenarija:

1. *Scenarij 1:* Kratki spoj na prijenosnom vodu 8-9 sa automatskim ponovnim uklopom (APU) – kratki spoj se dešava u 3. sekundi simulacije na 50 km udaljenosti od proizvodnog područja 3, ispad voda nastupa za 3.05 s, APU nastupa u jednoj sekundi nakon ispada (4.05 s)
2. *Scenarij 2:* Trofazni kratki spoj na prijenosnom vodu 4-6 na 40 km udaljenosti od proizvodnog područja 1 koji počinje u 3. sekundi i traje 100 ms.
3. *Scenarij 3:* Privremeni ispad dijela opterećenja 3 (ispada 50MW i 20MVAr), počinje u 3. sekundi simulacije, traje 3 sekunde.

#### **6.1.2 Scenariji pogonskih poremećaja u EES-u – TAFM model**

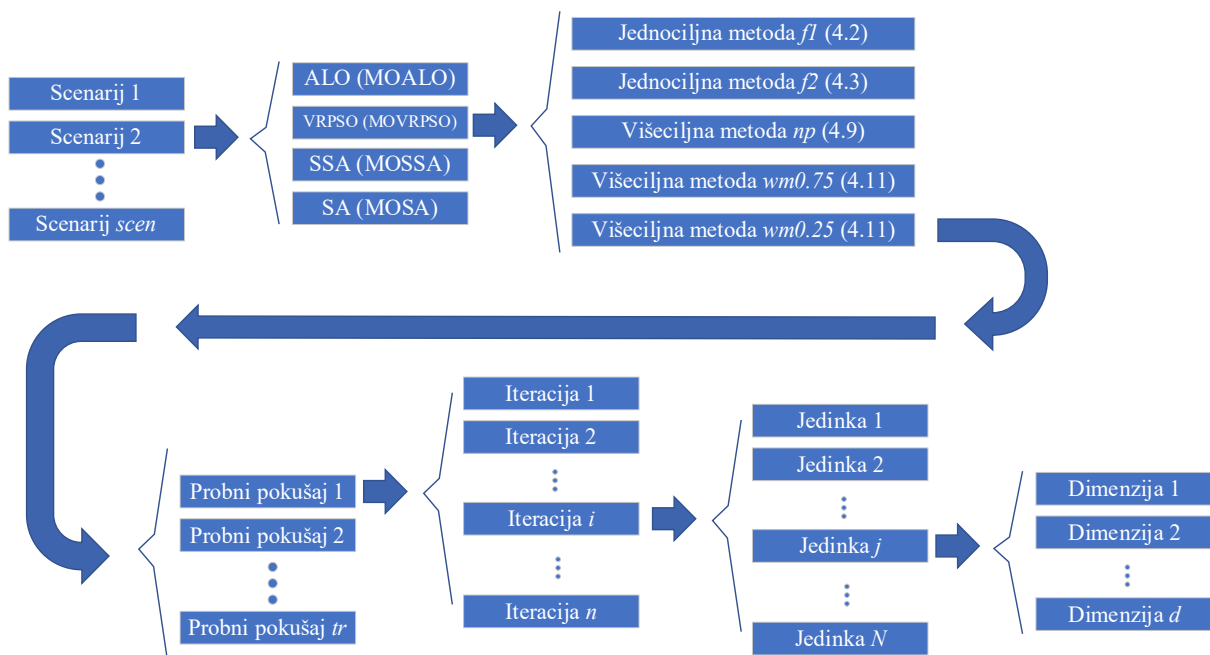
Poremećaji pomoću kojih se ispituje stabilnost TAFM sustava uključuju 4 različita scenarija:

1. *Scenarij 1:* Kratki spoj na interkonekcijskom vodu (vod 5) sa automatskim ponovnim uklopom (APU) – kratki spoj se dešava u 3. sekundi simulacije na 30-km udaljenosti od područja 1, ispad voda nastupa za 3.1 s, APU nastupa u jednoj sekundi nakon ispada (4.1 s)

2. *Scenarij 2*: Trofazni kratki spoj na 50-tom kilometru interkonekcijskog voda (vod 6) koji počinje u 3. sekundi i traje 120 ms.
3. *Scenarij 3*: Dodatni uklop tereta u 3. sekundi simulacije, iznosa 195 MW i 20 MVar na već postojeće opterećenje u području 1.
4. *Scenarij 4*: Privremeni ispad dijela opterećenja u području 1 (767 MW i 47MVar (kap.)), počinje u 3. sekundi simulacije, traje 2 sekunde.

## 6.2 Inicijalni parametri ciljnih funkcija i algoritama

Svi algoritmi su testirani kroz 5 probnih pokušaja za svaki scenarij, algoritam i metodu optimizacije, nakon čega se odabire onaj probni pokušaj koji rezultira najboljim rezultatom za algoritam i određenu metodu unutar testiranog scenarija. Svaki probni pokušaj se sastoji od  $N$  iteracija, dok se unutar svake iteracije optimizira  $n$  jedinki populacije (grabežljivaca/čestica/salpida/stanja). Svaka jedinka sadrži broj  $d$  dimenzija koje predstavljaju parametre AVR i PSS uređaja koji se namještaju optimizacijom. Hodogram procesa ispitivanja je prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1. Proces ispitivanja optimizacijskih metoda za parametriranje AVR i PSS uređaja u višestrojnom okruženju

Optimizacijski algoritmi se testiraju kroz slijedeće vrijednosti inicijalnih optimizacijskih koeficijenata:

- broj probnih pokušaja:  $tr = 5$ ,

- broj iteracija unutar probnog pokušaja:  $N = 50$ ,
- broj rješenja unutar iteracije (veličina populacije):  $n = 50$ ,
- dimenzija rješenja (broj parametara AVR/PSS):  $d = 27$  (WSCC),  $d = 28$  (TAFM).

Ispitivanja se prvo vrše za jednociljnu optimizaciju, nakon čega se kroz promatranje prostora rješenja odabiru karakteristični koeficijenti za ispitivanje višeciljne optimizacije. Jednociljne optimizacijske metode su označene oznakama svojih ciljnih funkcija:  $f_1(t)$  i  $f_2(t)$ .

U jednociljnoj optimizaciji dvjema različitim ciljnim funkcijama su prema poglavlju 4.1 definirani slijedeći uvjeti:

- u jednadžbi (4.2) za prvu ciljnu funkciju korištene su vrijednosti za korekciju napona  $w_V = 0.005$  i za korekciju tokova snaga  $w_P = 10^{-5}$ ,
- u jednadžbi (4.3) za drugu ciljnu funkciju korištene su vrijednosti korekcije prvog nadvišenja  $w_{OS} = 4000$  i korekcije prvog podvišenja  $w_{US} = 1000$ ,
- navedene vrijednosti vrijede za oba modela (WSCC i TAFM).

U problematici određivanja koeficijenata višeciljnom optimizacijom je prethodnim ispitivanjem obiju ciljnih funkcija jednociljnom optimizacijom iskustveno utvrđeno da se najgora rješenja kreću oko gornjih granica ciljnih funkcija  $f_{1,max} = 1$  i  $f_{2,max} = 10^4$  za TAFM model, dok se za WSCC model odabiru parametri  $f_{1,max} = 0.1$  i  $f_{2,max} = 10^4$ , jer iako kroz inicijalnu populaciju vrijednost ciljne funkcije bude oko vrijednosti 1, ona puno brže pada prilikom grubog podešavanja u prvim iteracijama. Na taj način se formiraju vrijednosti odabrane za normiranje ciljnih funkcija  $f_1(\vec{x})$  i  $f_2(\vec{x})$  u neutralnoj metodi odlučivanja, što vrijedi za jednadžbu (4.9). Kod metode skalarizacije, obzirom na gore navedene vrijednosti granica prostora rješenja odabrani su faktori  $K_1 = 10$  i  $K_2 = 10^{-3}$ , te one vrijede za oba modela. Ispitivanja se vrše za tri metode: jedna je neutralna, dok su dvije skalarizacijske sa različitim faktorima. Njihove oznake su  $np$  (neutralna),  $wm1$  (gdje je  $w_1 = 0.75$ ) i  $wm2$  (gdje je  $w_1 = 0.75$ ).

### **6.3 Granice parametara regulacijskih uređaja uzбудnih sustava**

Za parametriranje regulacijskih uređaja AVR-a i PSS-a određene su slijedeće vrijednosti za maksimalnu i minimalnu granicu parametara:

- kod optimizacije parametara  $K_a$  i  $T_a$   $l$ -tog AVR uređaja kod oba modela definirane su granice:

$$\begin{aligned} K_{a,l} &\in [1, 250] \\ T_{a,l} &\in [0, T_{a,max}] \end{aligned} \quad (6.1)$$

gdje je  $T_{a,max} = 0.1$  s za TAFM model dok je za WSCC model  $T_{a,max} = 0.4$  s,

- parametri TGR bloka su  $T_B = 1$ ,  $T_C = 10$ ,
- kod optimizacije parametara  $l$ -tog generičkog PSS uređaja u TAFM modelu definirane su granice:

$$\begin{aligned} K_{pss,l} &\in [1, 250] \\ T_{1n,l} &\in [0.005, 5] \\ T_{1d,l} &\in [0.005, 5] \\ T_{2n,l} &\in [0.05, 15] \\ T_{2d,l} &\in [0.05, 25] \end{aligned} \quad (6.2)$$

- parametar ulaznog filtera generičkog PSS-a je  $T_W = 10$  s, čime se prigušuju signali frekvencija nižih od 0.1 rad/s na ulazu u regulator,
- kod optimizacije parametara  $l$ -tog MB-PSS uređaja u WSCC modelu definirane su granice:

$$\begin{aligned} K_{G,l} &\in [0.01, 20] \\ F_{L,l} &\in [0.05, 1] \\ K_{L,l} &\in [0.01, 50] \\ F_{I,l} &\in [0.1, 10] \\ K_{I,l} &\in [0.01, 150] \\ F_{H,l} &\in [1, 20] \\ K_{H,l} &\in [0.01, 350] \end{aligned} \quad (6.3)$$

- svi ostali fiksni parametri MB-PSS uređaja su navedeni na slici 3.12.

Kako bi promatranje učinkovitosti optimizacije za pojedine algoritme i metode bilo što objektivnije odabran je fiksni set inicijalnih rješenja koji se ponavlja za svaku metodu i algoritam.

#### **6.4 Analitički pokazatelji kvalitete konvergencije optimizacijskih algoritama**

Osim početnih koeficijenata, predlažu se i slijedeći analitički pokazatelji kojima se utvrđuje moć konvergencije pojedinog algoritma:

- najbolji iznos ciljne vrijednosti kroz  $tr$  probnih pokušaja:

$$f_{best} = \min(f_1, \dots, f_{tr}) \quad (6.4)$$

- srednja vrijednost najboljeg iznosa ciljne funkcije kroz  $tr$  probnih pokušaja:

$$\mu = \frac{1}{tr} \cdot \sum_{i=1}^{tr} f_i \quad (6.5)$$

- standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{tr} \cdot \sum_{i=1}^{tr} (f_i - \mu)^2} \quad (6.6)$$

- moć konvergencije u jednom probnom pokušaju:

$$C_A = \left( \int_{0.2n}^n C(i) di \right)^{-1} \quad (6.7)$$

- moć konvergencije, srednja vrijednost za  $tr$  probnih pokušaja:

$$C_{A, mean} = \frac{1}{tr} \cdot \sum_{i=1}^{tr} C_{A,i} \quad (6.8)$$

- moć konvergencije, najbolja vrijednost za  $tr$  probnih pokušaja:

$$C_{A, best} = \max(C_{A,1}, \dots, C_{A, tr}) \quad (6.9)$$

- moć konvergencije, relativna vrijednost obzirom na najbolji algoritam:

$$C_r = \frac{C_{A, best}}{C_{A, best, alg}} \cdot 100[\%] \quad (6.10)$$

gdje je  $i$  oznaka iteracije,  $tr$  oznaka probnih pokušaja i  $n$  ukupni broj iteracija kroz koje algoritam prolazi. Apsolutna moć konvergencije  $C_A$  se uzima kada prođe prvih 20% iteracija, odnosno kada se može procijeniti da kreće finije parametriranje optimizacijom. Početne iteracije u kojima se dešava gruba optimizacija mogu imati velike promjene u iznosima ciljnih funkcija, pa se prema tome i isključuju. Pretpostavka je da se prava uspješnost algoritama da pronadu najbolja rješenja za inicijalni set rješenja nalazi upravo u finom podešavanju regulatora. Relativna vrijednost moći konvergencije  $C_r$  ne mora nužno predstavljati i najefektivniji algoritam u smislu najboljeg rješenja, već je to analitički pokazatelj kojim se određuje brzina konvergencije prema najboljem rješenju algoritma kroz optimizacijski proces.

Numerički pokazatelji kvalitete za pojedine algoritme su prikazani tablično kroz najbolje vrijednosti ciljnih funkcija za sve probne pokušaje, srednje vrijednosti ciljnih funkcija,



standardne devijacije te analitičke pokazatelje moći konvergencije. Prikazana su i ponuđena rješenja parametara AVR i PSS uređaja.

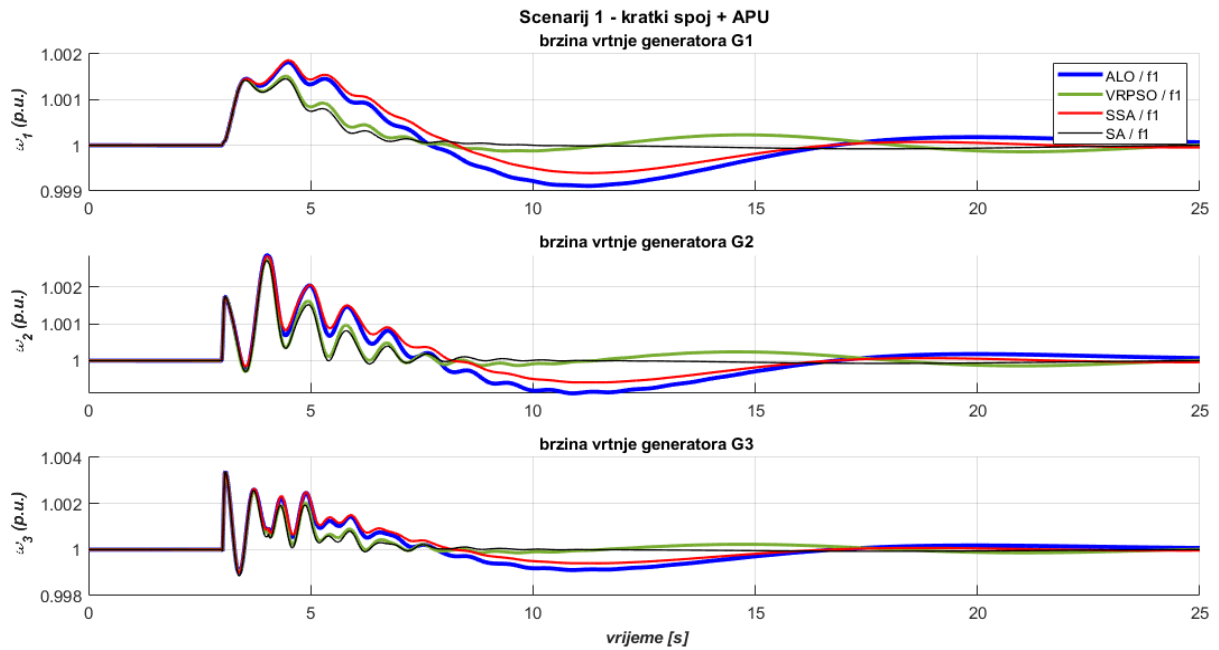
Grafički pokazatelji daju vizualni pregled kvalitete rada optimizacije. Oni uključuju promatranje odziva brzina vrtnje svih generatora na modelu, te odziva veličina koje su sastavni elementi ciljnih funkcija: razlikâ u brzinama vrtnje generatorâ, napona armature generatorâ i interkonekcijskih tokova snaga (TAFM model), odnosno zbroja tokova snaga u prijenosnom području (WSCC model). Odzivi su podijeljeni prema scenarijima na način da se uspoređuju algoritmi za pojedine metoda, a nakon toga i metode za pojedini algoritam kako bi se dobila potpuna slika o učinkovitosti algoritama, odnosno metoda unutar pojedinih scenarija pogonskih promjena. Grafički pokazatelji za višeciljnu optimizaciju sadrže i dodatak Pareto fronti. Numerički pokazatelji, uz već opisane, sadrže i raspon Pareto fronti dviju ciljnih funkcija ispitanih jednociljnom optimizacijom.

U slijedećim potpoglavljima prikazane su grafičke i numeričke vrijednosti pokazatelja kvalitete rada optimizacijskih algoritama. Modeli su podijeljeni u potpoglavlja zbog lakšeg pregleda odziva i rezultata.

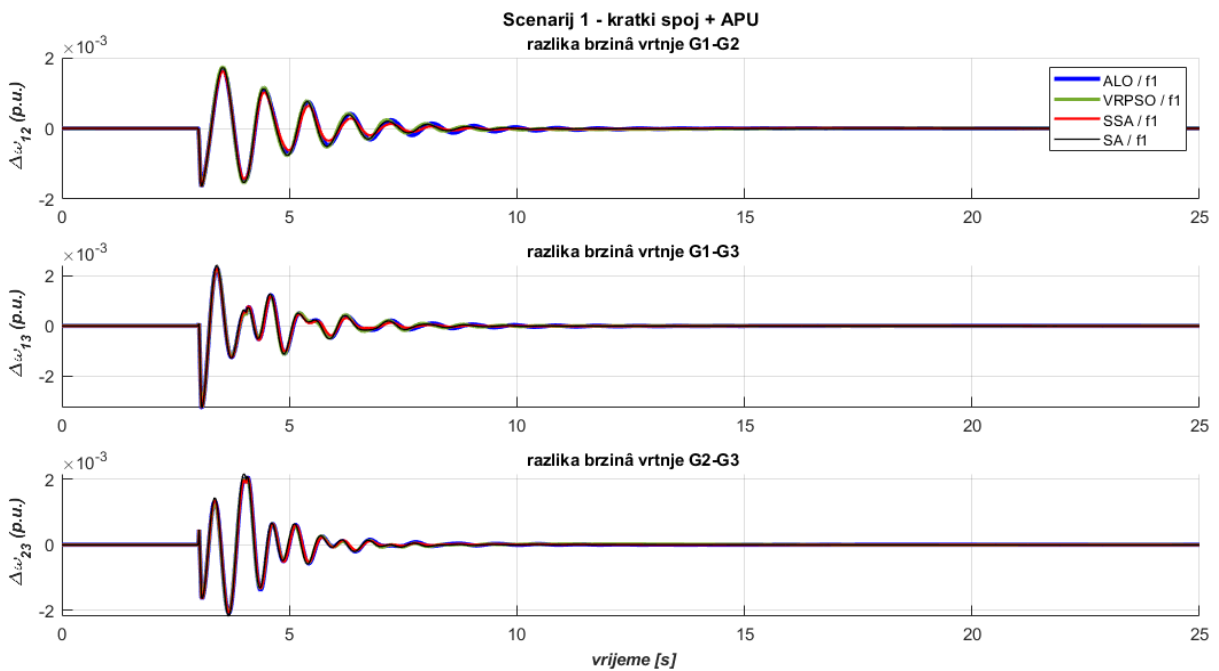
## ***6.5 Parametriranje uzbudnih upravljačkih sustava jednociljnom optimizacijom***

Kroz ovo potpoglavlje prikazani su rezultati rada optimizacijskih algoritama za jednociljnu optimizaciju kroz ciljne funkcije  $f_1(t)$ , koja je definirana jednadžbom (4.2) i  $f_2(t)$ , koja je definirana jednadžbom (4.3).

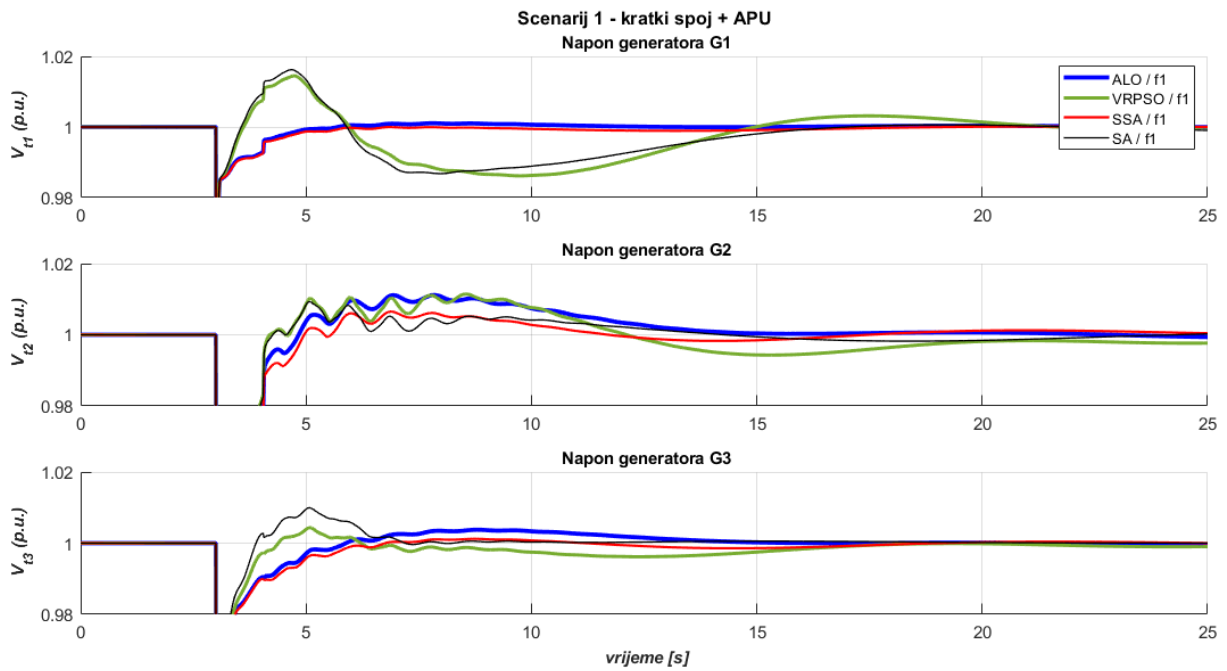
### 6.5.1 WSCC model - rezultati ispitivanja, jednociljna optimizacija



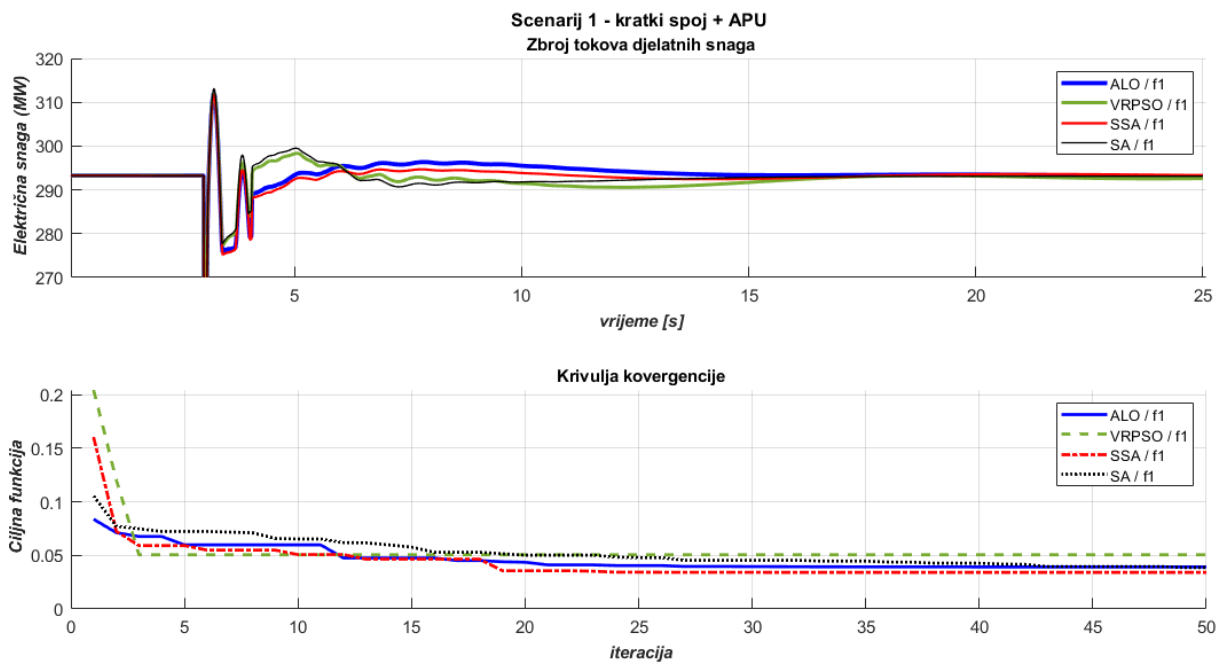
Slika 6.2. WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



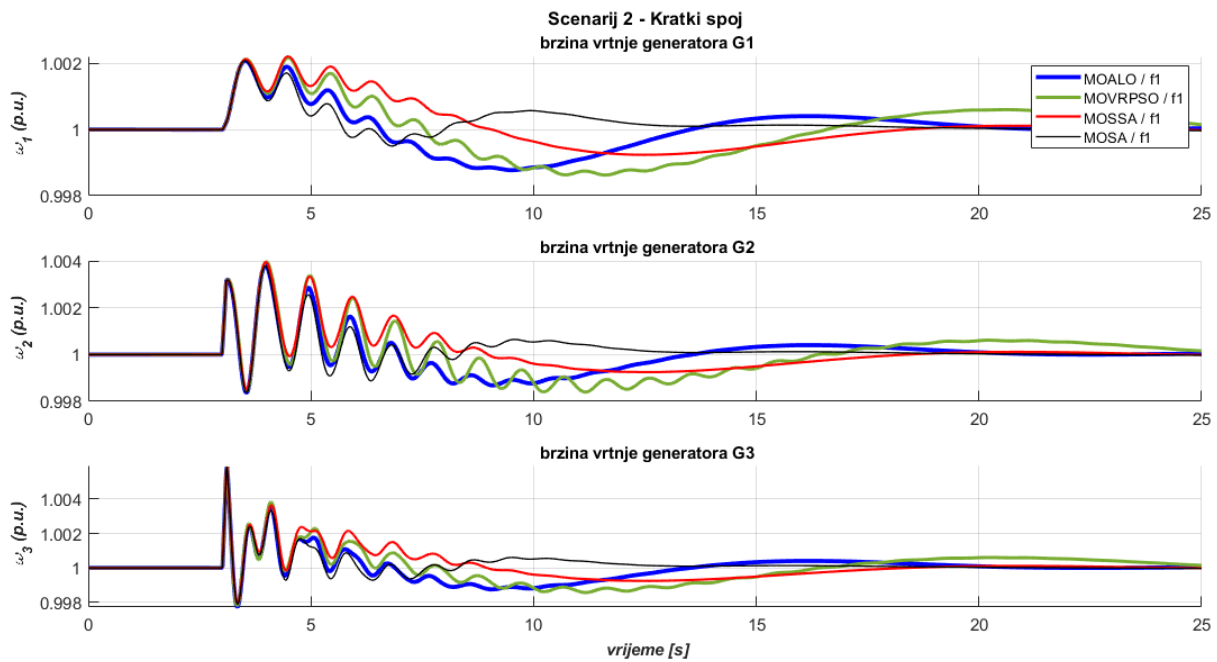
Slika 6.3. WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



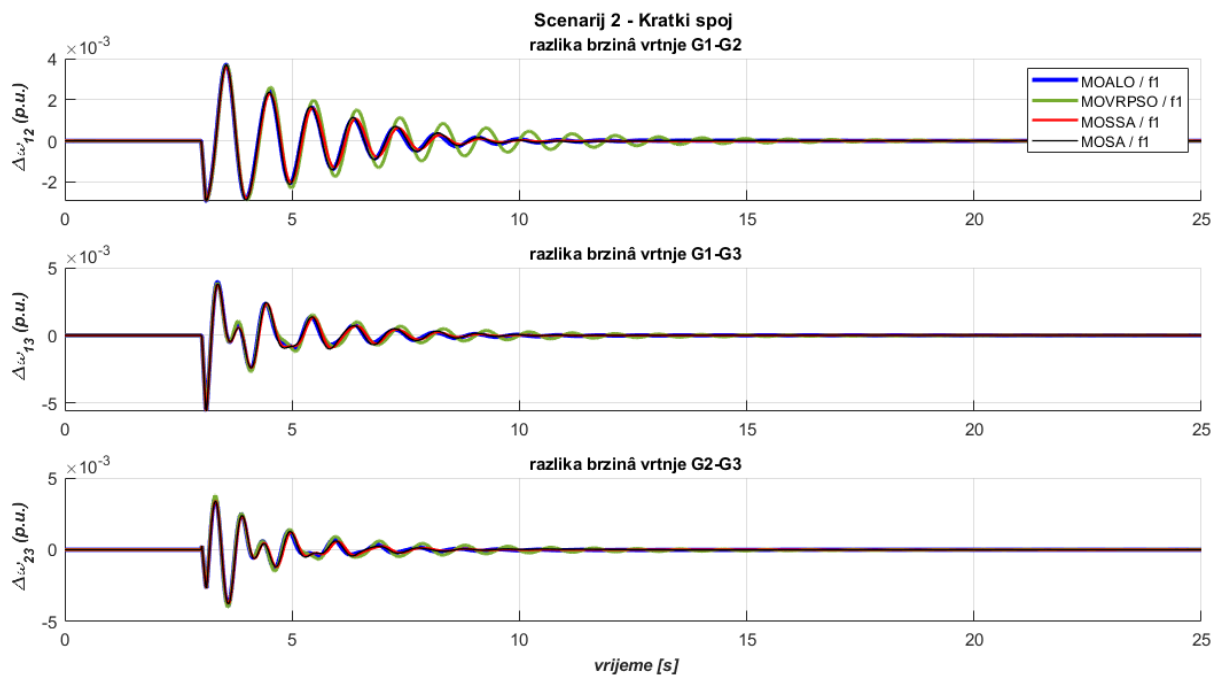
Slika 6.4. WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



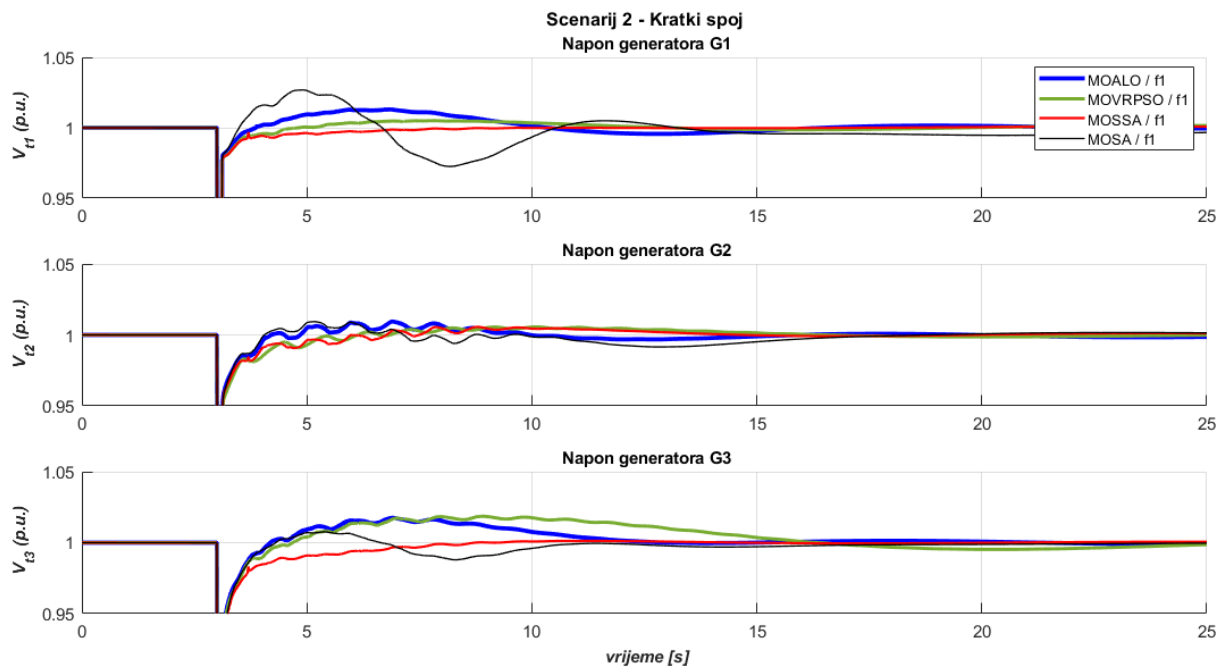
Slika 6.5. WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



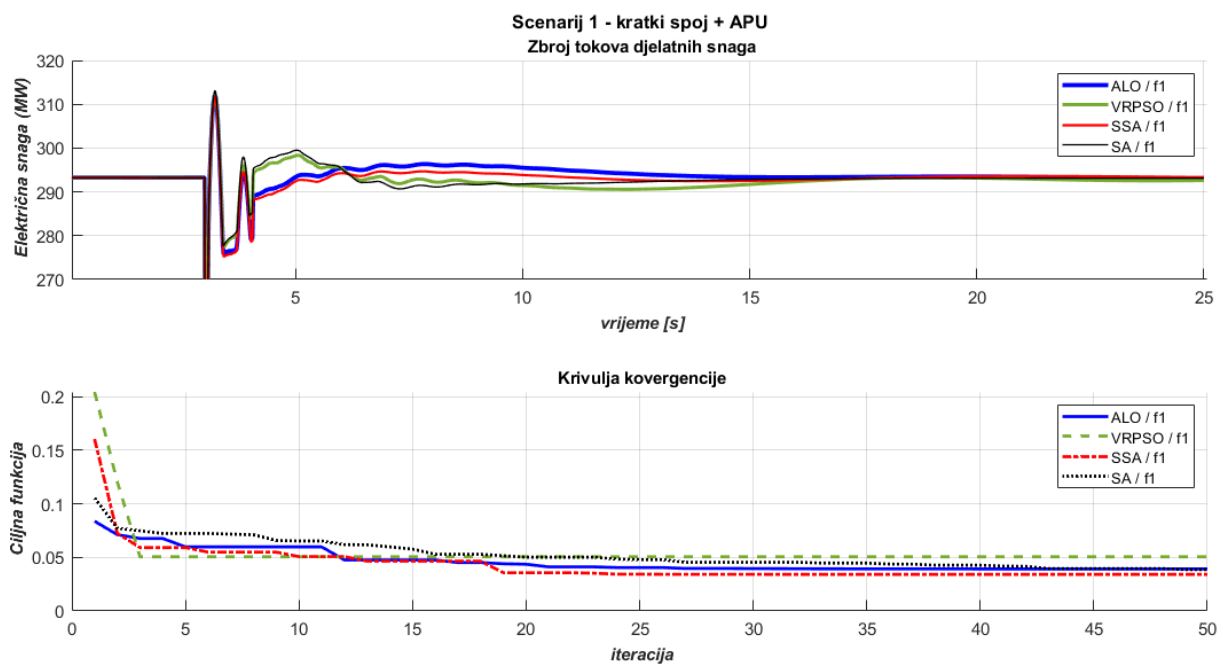
Slika 6.6. WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



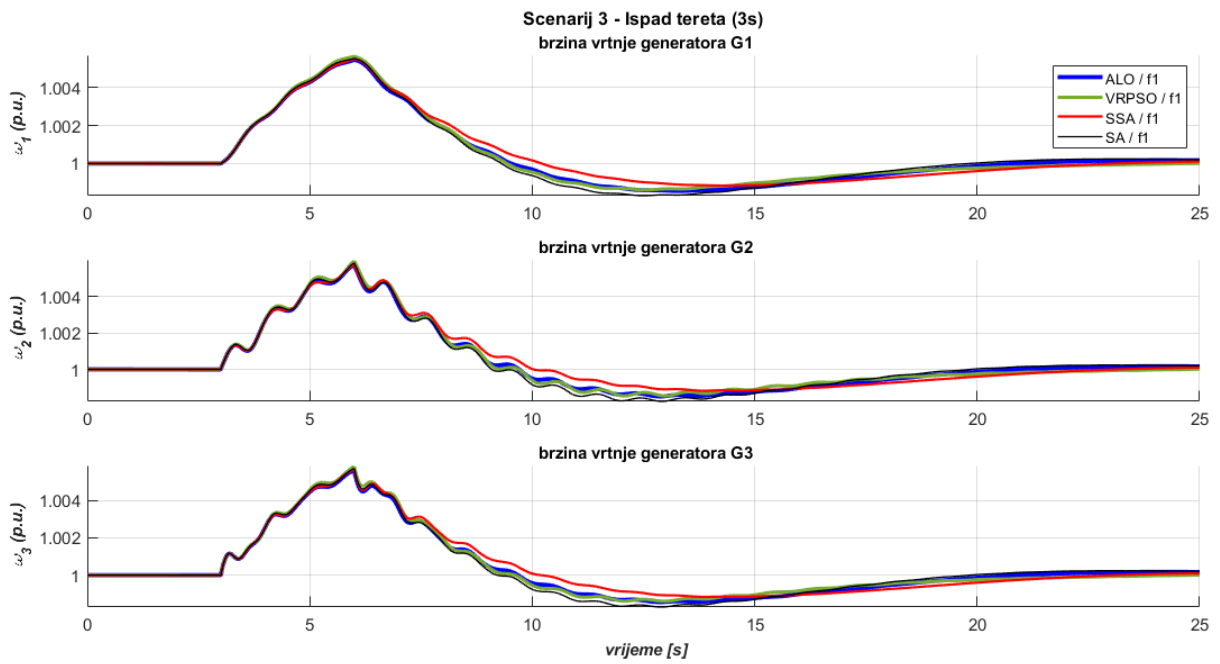
Slika 6.7. WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



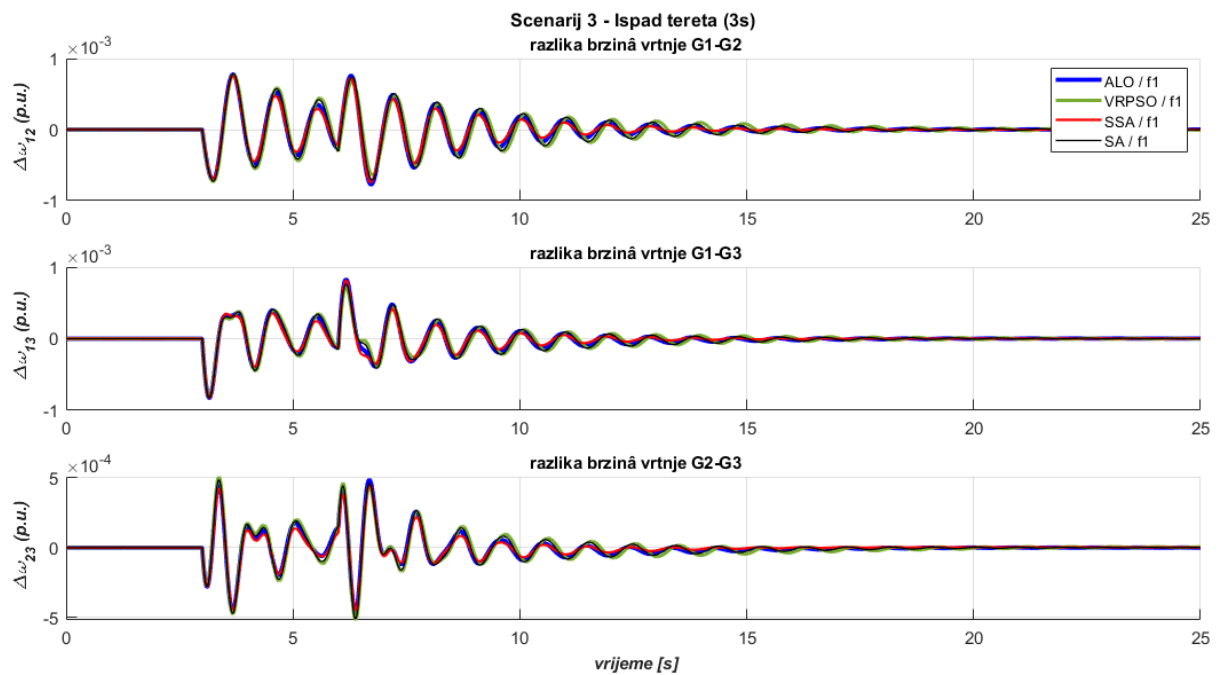
Slika 6.8. WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



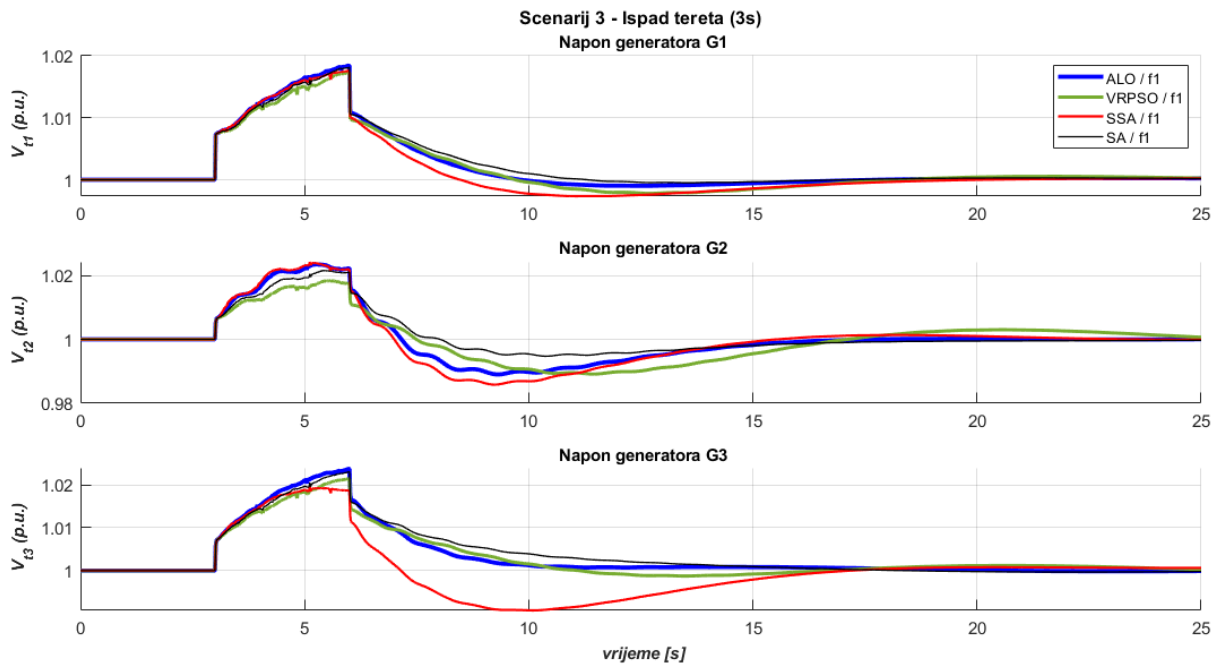
Slika 6.9. WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



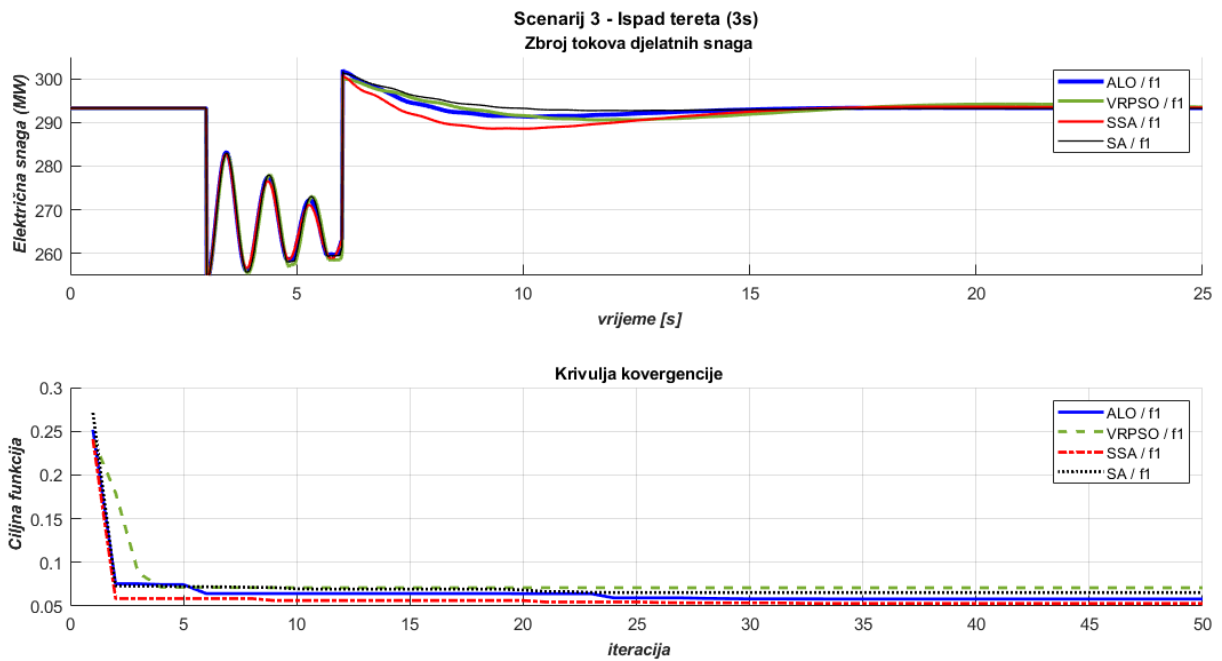
Slika 6.10. WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



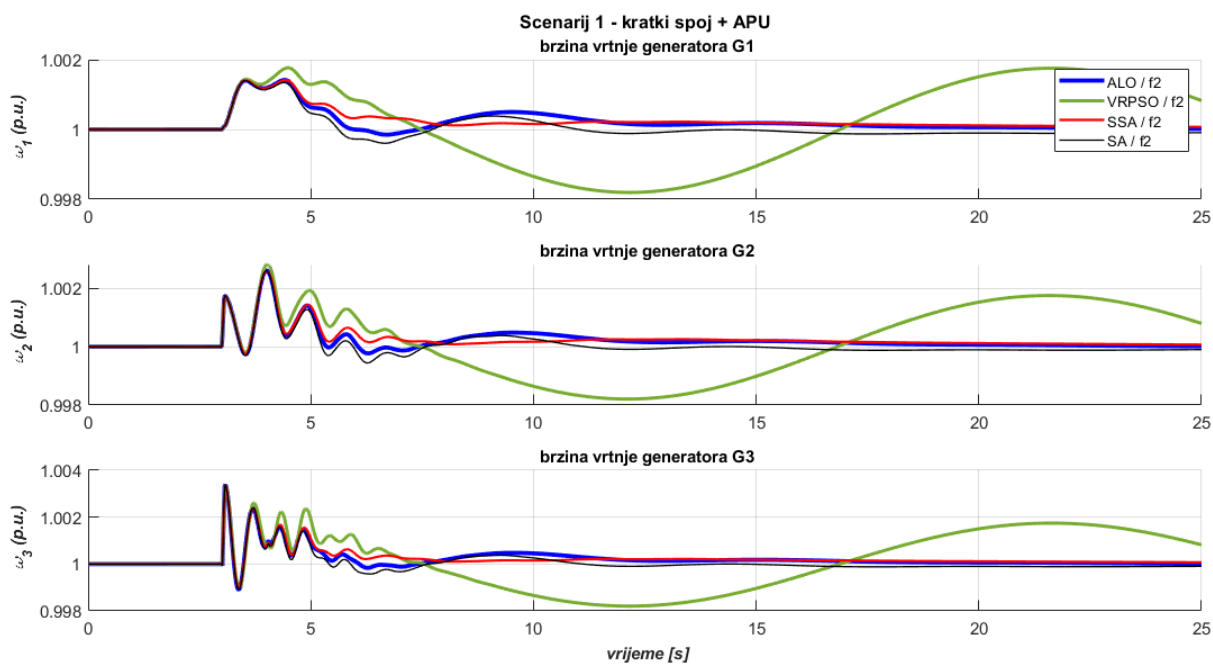
Slika 6.11. WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



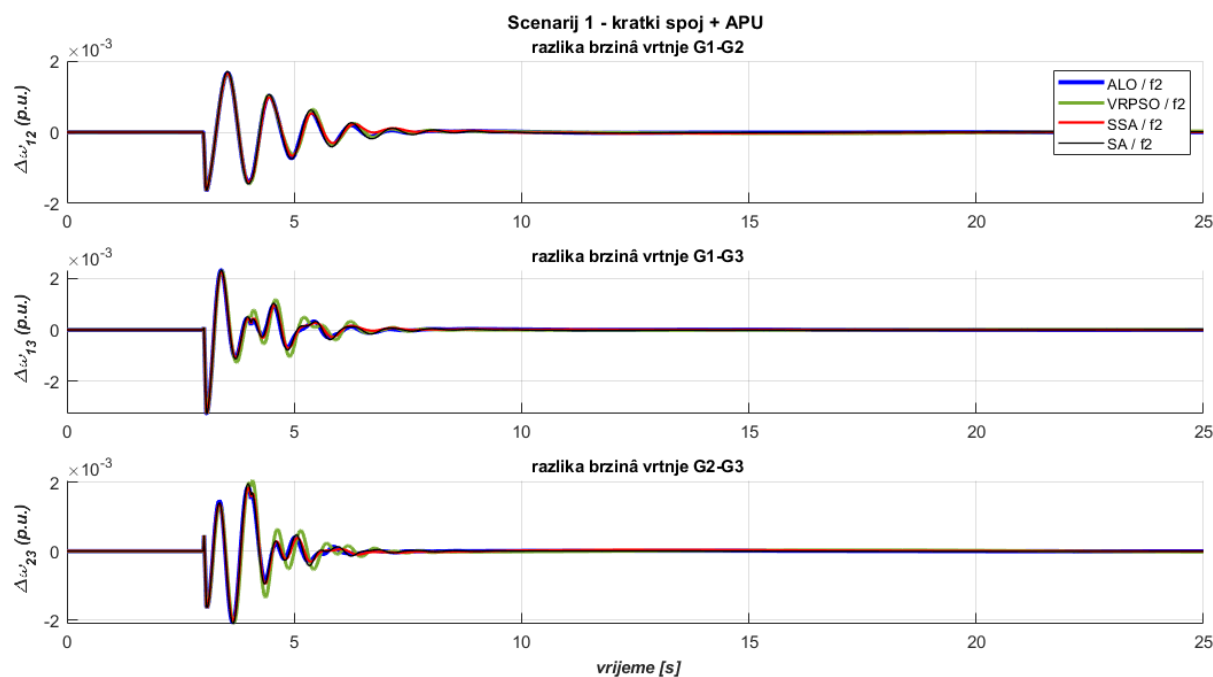
Slika 6.12. WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



Slika 6.13. WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)

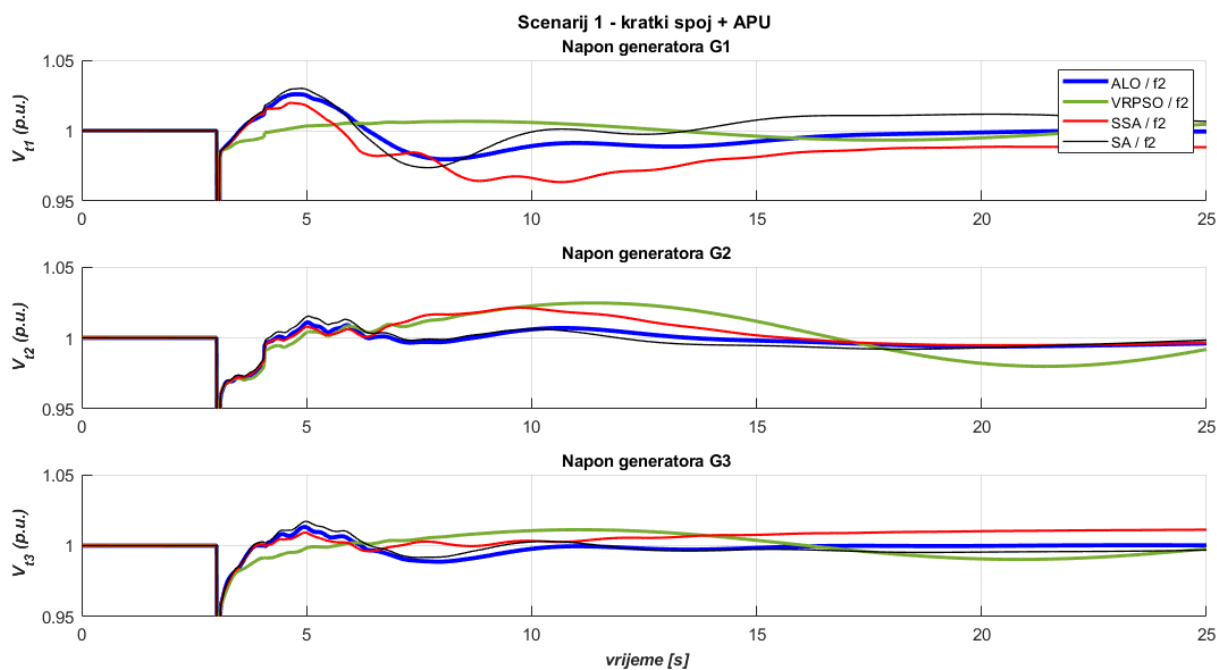


Slika 6.14. WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

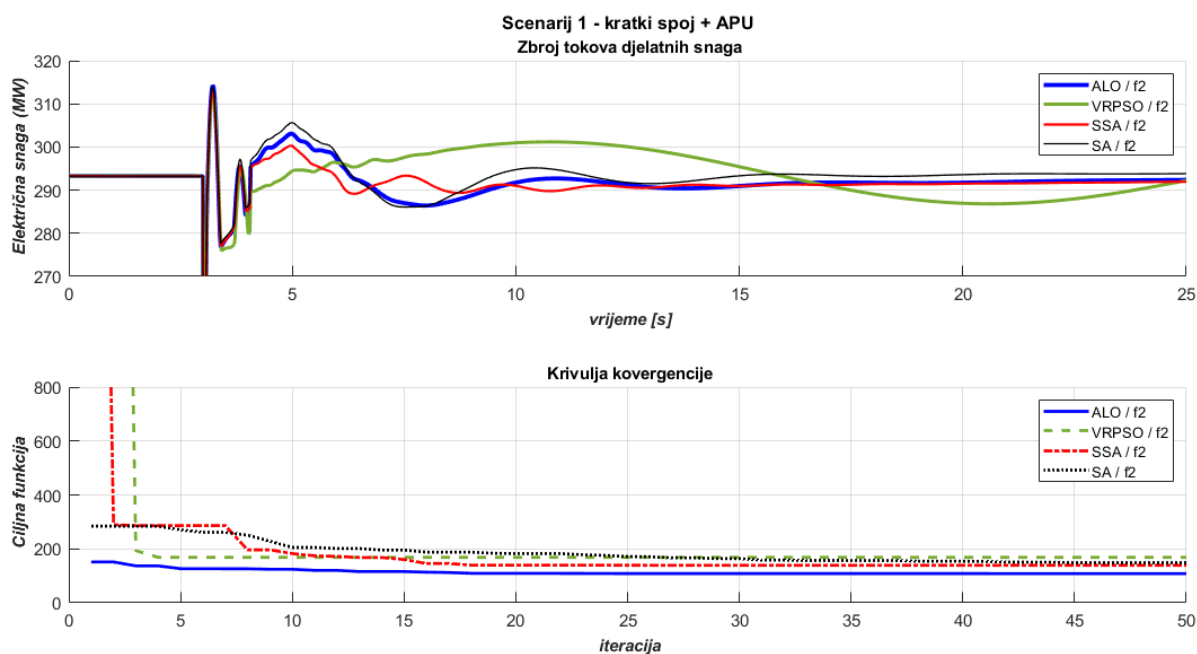


Slika 6.15. WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

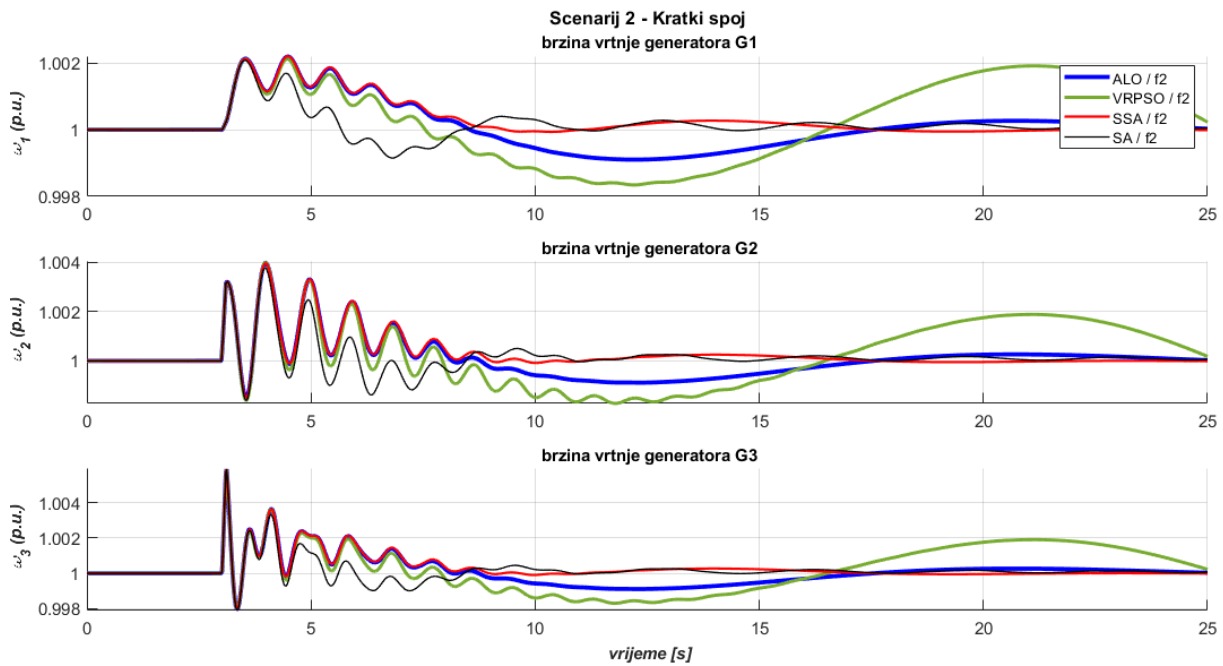




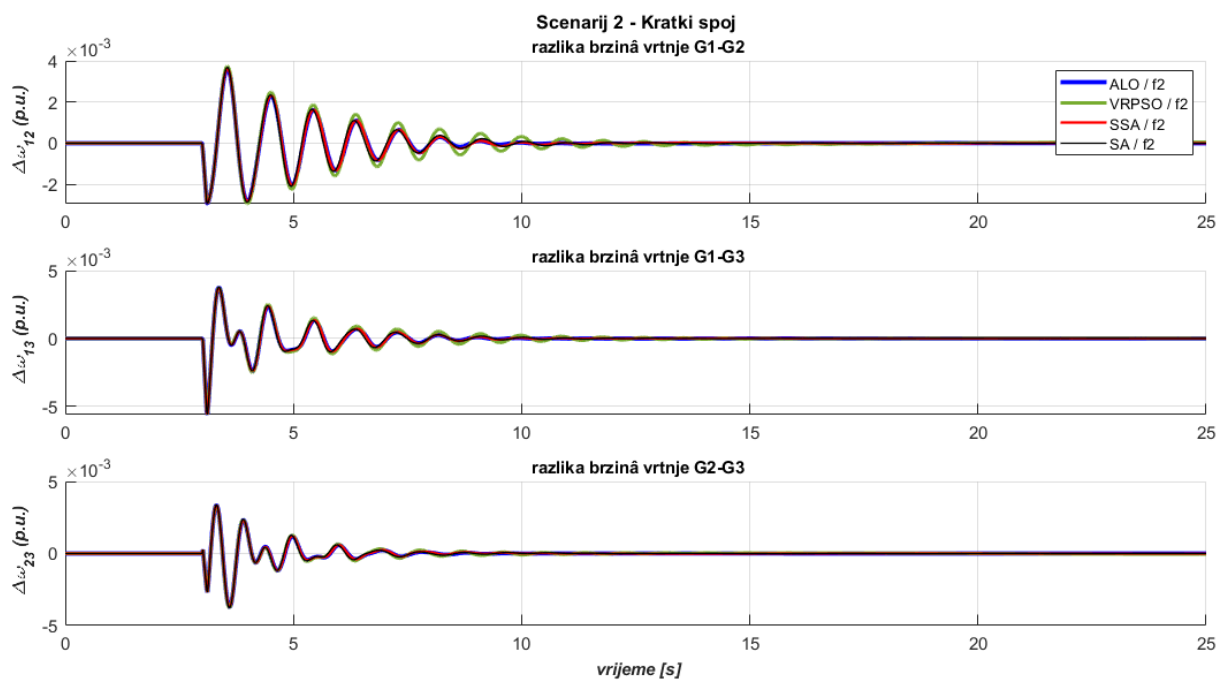
Slika 6.16. Scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



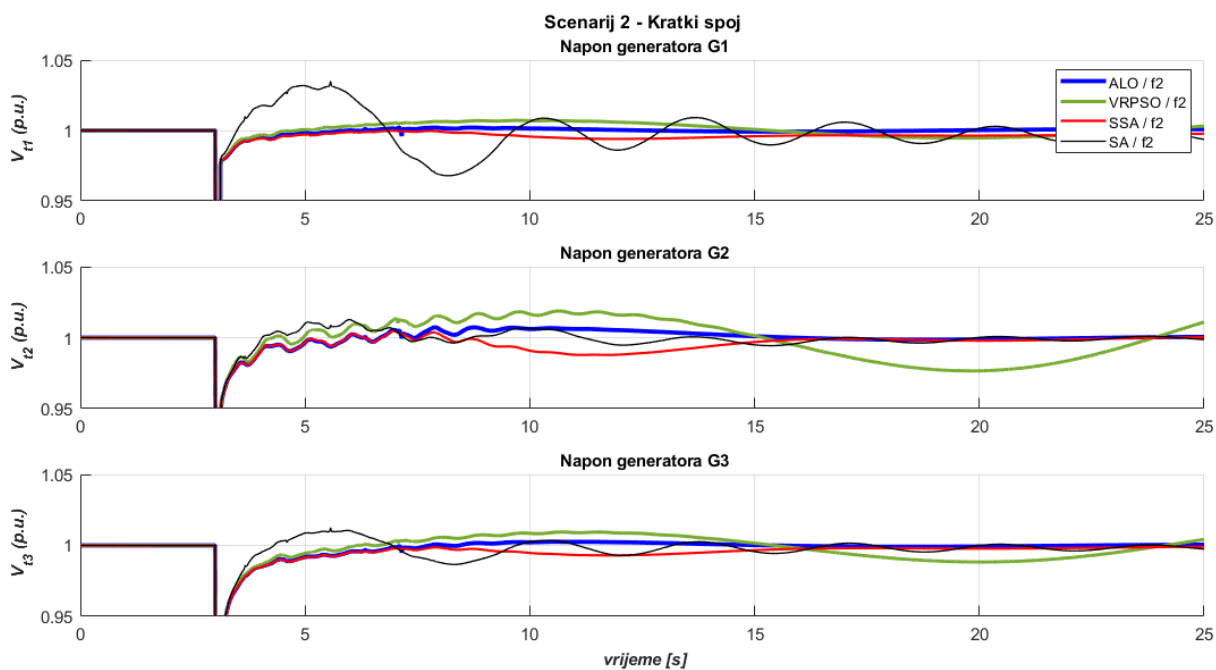
Slika 6.17. WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



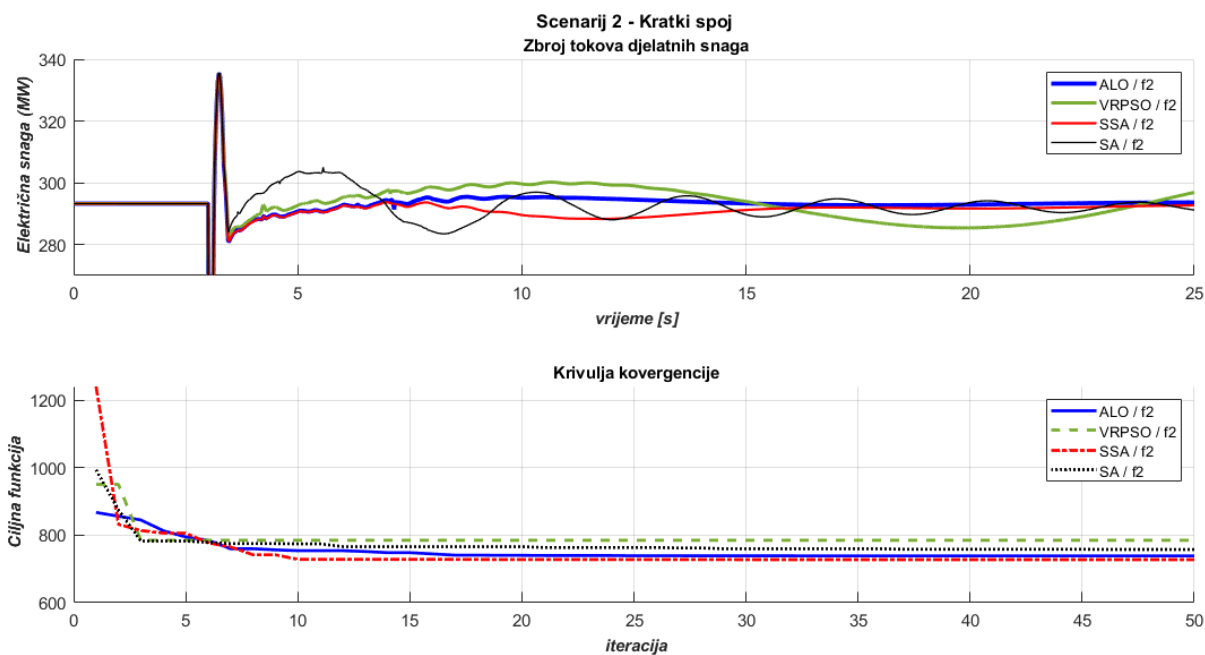
Slika 6.18. WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



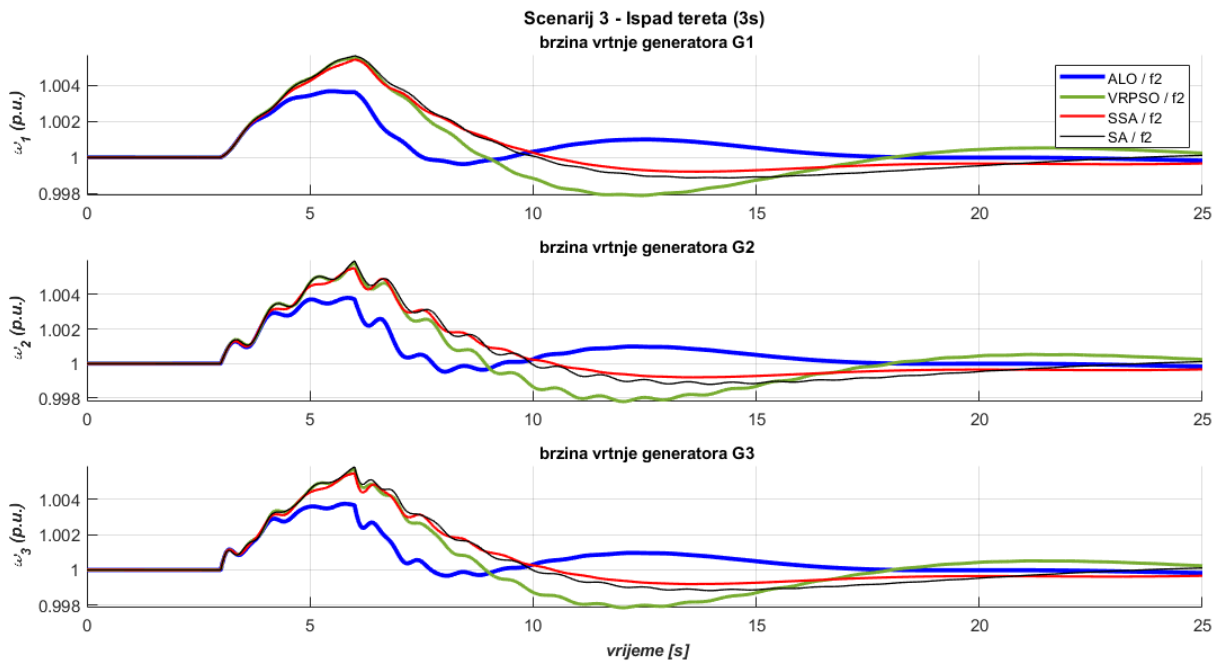
Slika 6.19. WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



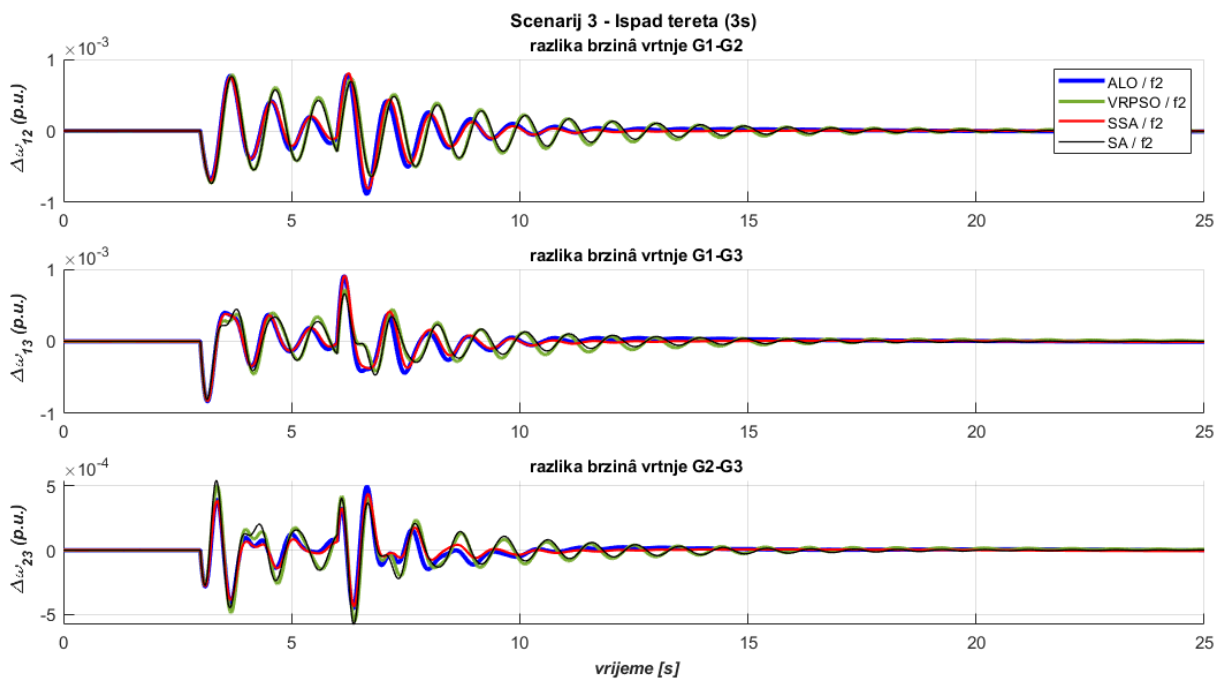
Slika 6.20. WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



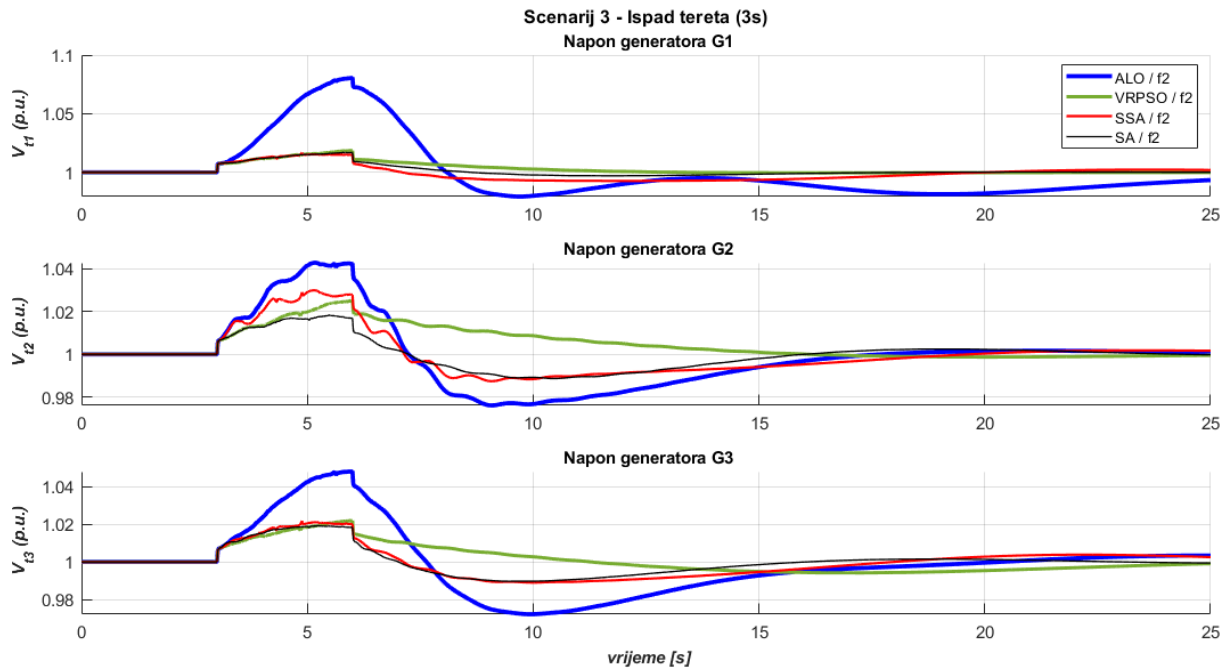
Slika 6.21. WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



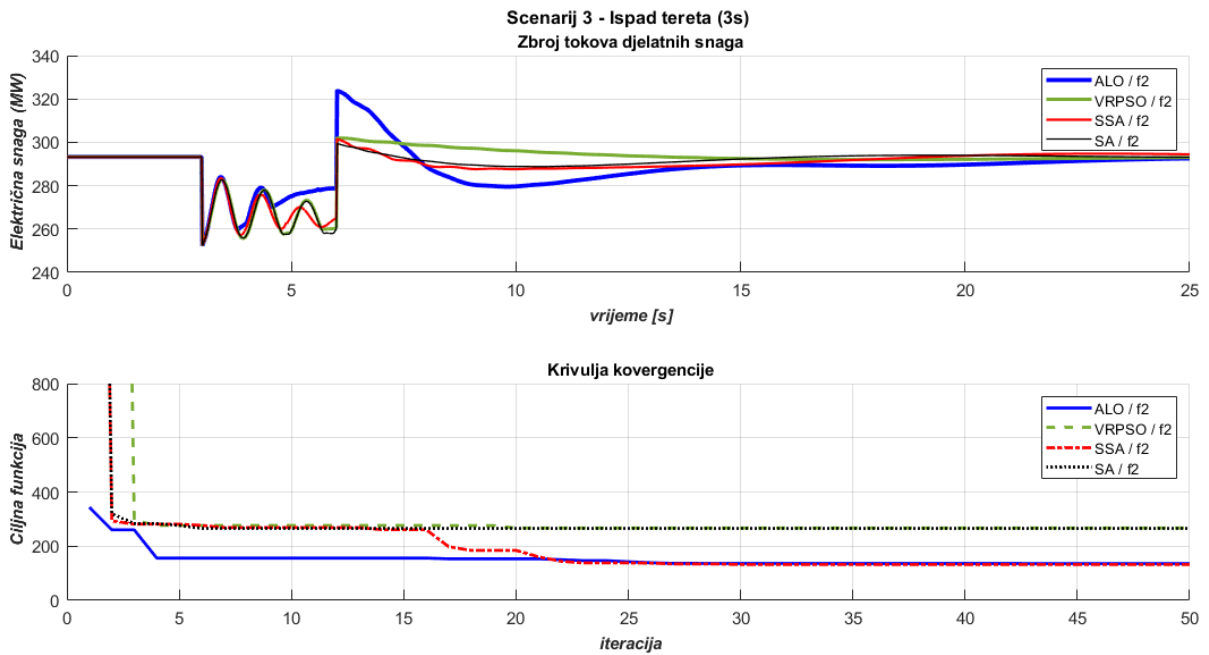
Slika 6.22. WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.23. WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.24. WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.25. WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

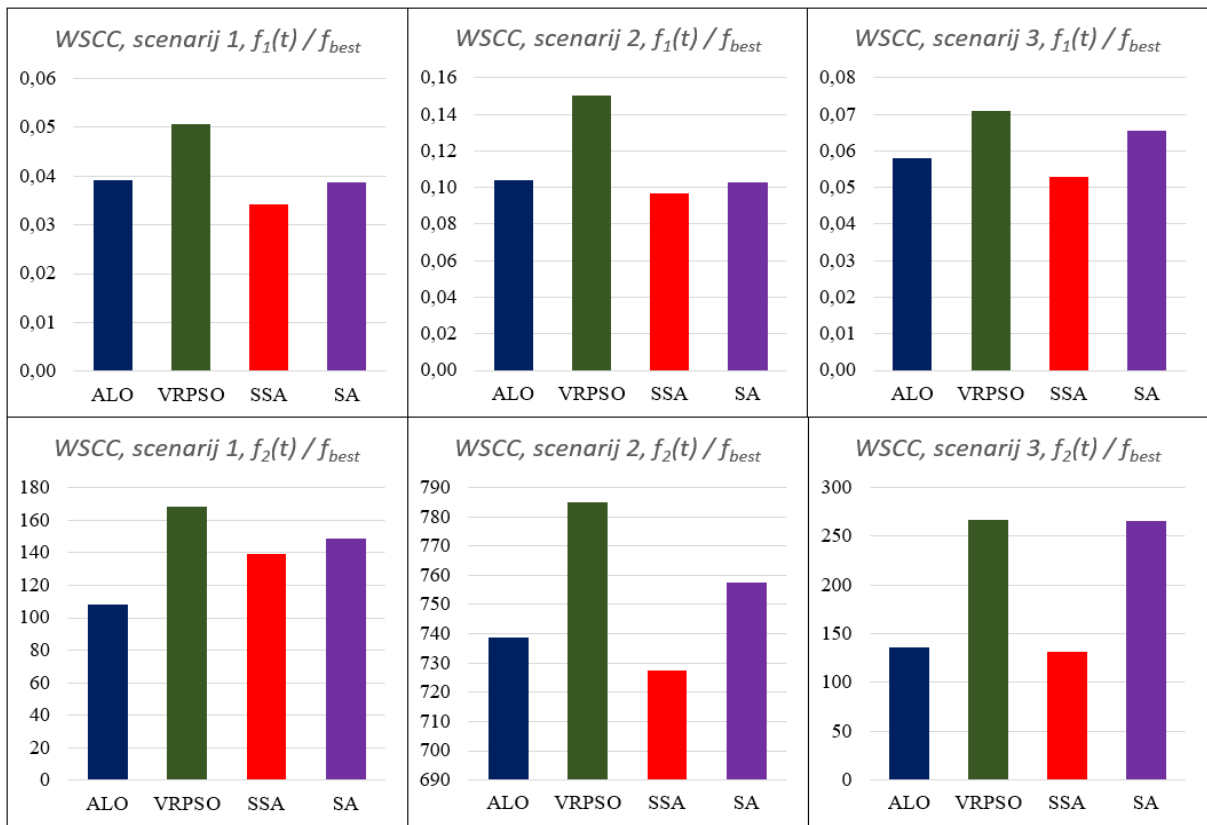
Za WSCC model u tablici 6.1 su prikazani analitički pokazatelji kvalitete optimizacijskog procesa. Najbolja rješenja pokazuju algoritmi novije generacije (SSA u 5 od 6 slučajeva, ALO u jednom od 6 slučajeva optimizacije).

Tablica 6.1 Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, WSCC model, jednociljna optimizacija

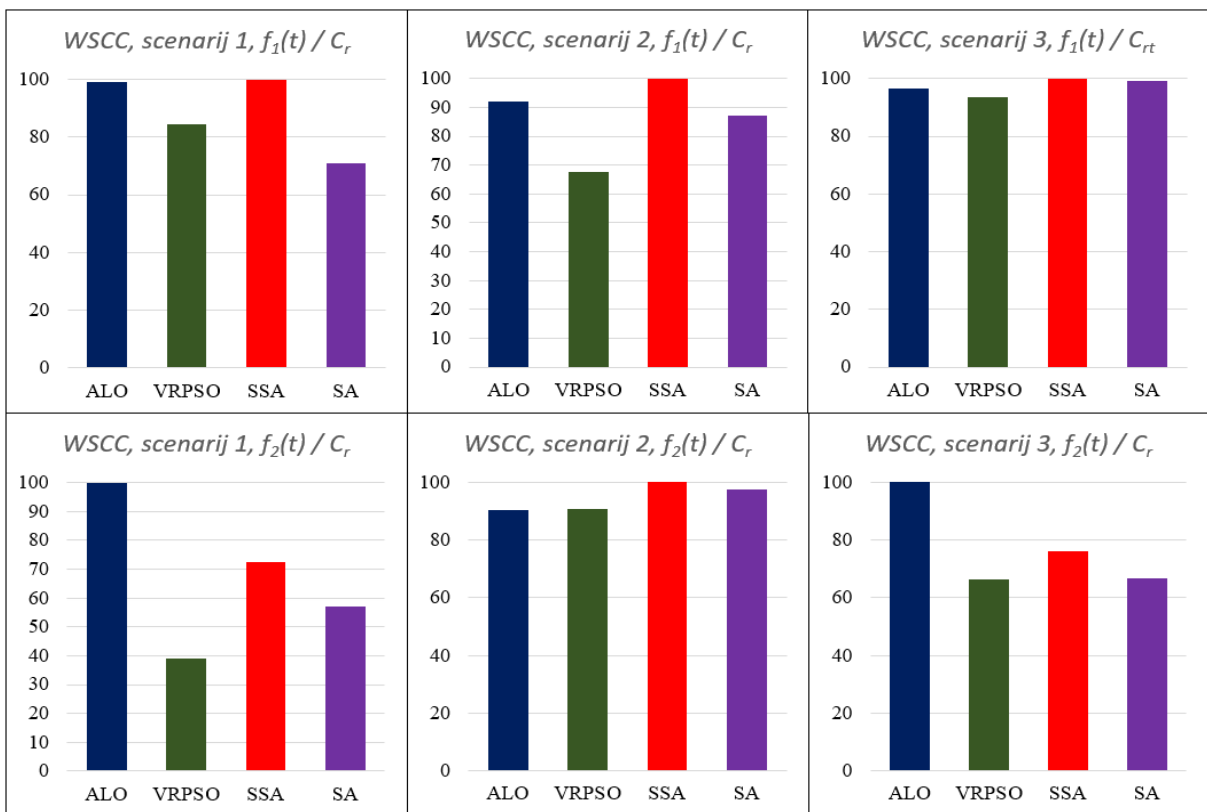
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$ (6.4)	$\mu$ (6.5)	$\sigma$ (6.6)	$C_{A, mean}$ (6.8)	$C_{A, best}$ (6.9)	$C_r$ [%] (6.10)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,039186	0,04515	0,00666	0,45286	0,50684	100
		VRPSO	0,050554	0,06118	0,00798	0,36912	0,32195	63,52142
		<b>SSA</b>	<b>0,034093</b>	<b>0,04243</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,47682</b>	<b>0,42414</b>	<b>83,68231</b>
		SA	0,038641	0,04799	0,01001	0,41074	0,42554	83,96009
	$f_2(t)$ (4.3)	<b>ALO</b>	<b>108,13375</b>	<b>113,70864</b>	<b>5,20903</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,00019</b>	<b>100</b>
		VRPSO	168,54473	255,51222	44,16491	0,00009	0,00008	44,20146
		SSA	138,93359	165,76866	29,35013	0,00013	0,00014	71,09371
		SA	148,60860	166,64741	10,34525	0,00012	0,00013	65,5709
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,103718	0,11023	0,00464	0,19026	0,18401	86,77982
		VRPSO	0,150442	0,15971	0,006	0,13918	0,14326	67,56206
		<b>SSA</b>	<b>0,096927</b>	<b>0,10227</b>	<b>0,00329</b>	<b>0,20738</b>	<b>0,21204</b>	<b>100</b>
		SA	0,102657	0,10923	0,00518	0,1927	0,20025	94,44056
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	738,61723	776,61416	27,43699	0,00003	0,00003	97,07404
		VRPSO	784,90415	815,83231	17,44527	0,00003	0,00003	89,21444
		<b>SSA</b>	<b>727,43161</b>	<b>733,94467</b>	<b>4,064</b>	<b>0,00003</b>	<b>0,00003</b>	<b>100</b>
		SA	757,53258	760,30795	1,65793	0,00003	0,00003	95,93711
Scenarij 3: Ispad tereta (3s)	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,058059	0,06412	0,00411	0,33896	0,32908	100
		VRPSO	0,070961	0,07112	0,00026	0,31201	0,31279	95,05035
		<b>SSA</b>	<b>0,052939</b>	<b>0,06515</b>	<b>0,00673</b>	<b>0,33856</b>	<b>0,3086</b>	<b>93,77814</b>
		SA	0,065493	0,06915	0,00192	0,3181	0,31256	94,98095
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	136,01988	192,15003	54,12685	0,00012	0,00015	100
		VRPSO	266,95575	269,92165	5,7058	0,00008	0,00008	53,85003
		<b>SSA</b>	<b>132,02391</b>	<b>175,19897</b>	<b>39,01658</b>	<b>0,00011</b>	<b>0,00015</b>	<b>95,31906</b>
		SA	265,59989	266,66328	0,53276	0,00008	0,00008	52,43005

- *podebljani font* – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji za metodu i scenarij
- *zelene ćelije* – najbolji analitički pokazatelji konvergencije

Pokazatelji moći konvergencije također pokazuju da algoritmi novije generacije i u tom segmentu daju najbolje rezultate u jednociljnom optimizacijskom procesu za dvije ciljne funkcije prikazane jednadžbama (4.2) i (4.3). Dakle, algoritmi novije generacije imaju tendenciju brže doći do boljih rješenja prilikom ispitivanja WSCC modela.



Slika 6.26. WSCC – pregled najboljih rješenja  $f_{best}$  algoritama po scenarijima i metodama



Slika 6.27. WSCC – pregled moći konvergencije  $C_r$  algoritama po scenarijima i metodama

Tablica 6.2 WSCC – najbolja rješenja dobivena jednociljnom optimizacijom, po algoritima i metodama

K <sub>HPSS2</sub>	Scenarij 1 – APU + kratki spoj				Scenarij 2 – kratki spoj				Scenarij 1 – ispad tereta (3s)				
	f <sub>1</sub> (t), (4.2)		f <sub>2</sub> (t), (4.3)		f <sub>1</sub> (t), (4.2)		f <sub>2</sub> (t), (4.3)		f <sub>1</sub> (t), (4.2)		f <sub>2</sub> (t), (4.3)		
	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA	
193,65357	4,65328	10,07801	0,54191	6,68510	0,00386	7,73397	72,10355	2,31106	28,19373	0,19960	5,47051	0,01834	3,54374
222,28411	3,33884	0,01000	0,13589	3,48353	0,10000	10,00500	70,12004	1,00000	17,73730	0,72778	0,01000	0,10000	10,00500
242,51961	9,95414	7,64619	0,99108	0,01033	0,05026	18,06809	195,64623	7,94513	86,87505	0,23635	1,40072	0,00100	0,16813
235,72022	5,33165	13,41203	0,82599	0,01000	0,00763	14,33019	120,63409	1,00000	46,82933	0,81910	2,68987	0,01877	6,31699
337,53233	15,67742	137,59616	9,98148	3,63281	0,17221	19,98708	300,76643	16,94267	129,79377	8,50626	28,78974	0,92933	13,35712
256,91691	5,94735	0,01000	0,15735	0,01000	0,10000	20,00000	0,01000	1,00000	33,48671	0,10000	0,01000	0,10000	0,01000
299,35973	8,01685	0,11221	0,85406	1,53268	0,04703	19,97181	198,88785	1,00146	181,61843	0,96838	2,88994	0,09443	19,40382
252,09981	5,58575	9,85616	0,32007	3,01956	0,09307	11,28907	232,92344	5,50951	89,72505	0,93983	27,53796	0,00226	9,72296
195,61461	5,86468	6,85588	0,49456	3,79224	0,00610	10,18995	18,95203	6,90202	32,41812	0,51848	4,65914	0,00536	0,86955
150,00500	1,00000	0,01000	0,10000	0,01000	0,10000	0,18935	163,26705	1,00000	61,17772	0,30946	0,01000	0,10000	0,84048
297,28183	9,91825	3,71232	0,59051	0,22785	0,00152	19,98514	114,78685	8,05216	198,49787	0,49355	38,16411	0,00209	0,14085
274,94252	4,89284	0,01000	0,13302	0,01000	0,06764	12,23310	65,23253	6,46931	78,35912	1,00000	1,69895	0,00144	11,21903
249,69887	8,46308	7,82253	8,32318	1,65545	0,44264	19,41077	31,67212	18,11406	34,10924	8,61866	11,26170	0,73282	8,37920
43,79606	2,80096	2,39166	0,61240	25,00500	0,00100	20,00000	194,56148	1,00000	0,01000	0,44792	43,46338	0,10000	0,01000
341,54897	17,27427	102,28895	8,77780	5,25650	0,42744	14,78561	308,19113	19,97745	49,42287	9,99304	47,53898	0,54938	13,50861
239,41893	6,40930	0,01000	0,88855	6,62917	0,03216	7,63423	88,10738	3,22622	144,90875	0,91613	15,40056	0,06080	17,99217
88,49804	5,07665	0,01000	0,10108	0,12221	0,00133	7,77310	79,16137	1,68617	92,56219	0,10000	6,56100	0,00140	0,09105
0,13809	1,00000	0,14258	0,11674	0,10087	0,08849	0,02502	0,01000	1,00000	0,11785	0,13056	0,07665	0,10000	0,05284
129,05145	9,99814	0,12118	0,35884	0,08355	0,09917	11,38341	295,06080	1,26384	30,14542	0,25637	47,68443	0,09102	0,07523
140,40751	3,69979	0,01000	0,46339	1,88613	0,00769	1,50071	52,52678	1,60813	26,40184	0,74151	1,19960	0,00838	0,47050
161,11991	4,66975	1,92350	0,16976	0,02217	0,07804	10,24377	120,78765	1,29321	31,59275	0,54188	0,03592	0,01984	8,55819
0,01048	1,00000	0,01000	0,10000	0,04230	0,10000	0,09602	0,01000	1,00000	0,17842	0,10000	0,11529	0,10000	0,01000
251,94958	8,18808	5,36229	0,84197	0,07009	0,09472	13,65955	100,19103	9,60393	1,13415	0,17781	48,71992	0,09311	0,08628
0,01000	4,38263	0,01000	0,56886	31,06798	0,06286	0,01000	130,10681	1,00000	84,65437	0,71325	14,06782	0,01835	3,51352



Tablica 6.2 WSCC – najbolja rješenja dobivena jednociljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama – nastavak

	Scenarij 1 – APU + kratki spoj				Scenarij 2 – kratki spoj				Scenarij 1 – ispad tereta (3s)			
	$f_1(t), (4.2)$		$f_2(t), (4.3)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_2(t), (4.3)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_2(t), (4.3)$	
	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA
$T_{a,AVR2}$	$K_{a,AVR2}$	$T_{a,AVR1}$	$K_{a,AVR}$	$F_{L,PSS2}$	$K_{a,AVR1}$	$K_{H,PSS3}$	$F_{H,PSS3}$	$K_{I,PSS3}$	$F_{I,PSS3}$	$K_{I,PSS3}$	$F_{L,PSS3}$	$K_{g,PSS3}$
0,05796	0,19095	0,01740	128,76281	0,01773	0,00530	43,26828	5,03623	14,88493	0,33365	2,39801	0,01165	0,44957
0,20000	0,00100	0,20000	142,88680	0,20000	94,74871	205,58629	7,34042	144,28031	0,19921	10,13512	0,10000	10,00500
0,00005	0,03844	0,00556	243,02280	0,18528	0,00252	299,63124	1,50918	199,99967	0,25343	34,93376	0,01881	19,66408
0,04755	17,60139	0,06023	80,93861	0,03074	134,09552	144,68229	3,74587	96,98681	0,71631	3,07008	0,07032	0,70469
0,39977	234,18890	0,30668	249,89696	0,30240	198,46304	347,06909	15,94443	148,11949	9,48581	4,66226	0,95555	7,94793
0,20000	0,00100	0,08005	225,20084	0,20000	160,92991	0,01000	6,40168	0,01000	0,10000	0,01000	0,09298	0,01000
0,08196	132,36937	0,05564	249,61132	0,06494	72,82915	165,05277	9,00774	0,17108	0,23240	18,62203	0,00102	10,34269
0,08911	103,17818	0,16470	224,33433	0,13677	195,97756	278,78842	6,19154	21,07020	0,85588	6,64771	0,07888	6,70366
0,08892	109,43471	0,08736	205,43783	0,01180	45,22270	128,75467	3,59832	4,19335	0,37061	2,22629	0,00322	4,58337
0,20000	235,51710	0,20000	0,00100	0,20000	2,71002	111,69183	3,26875	0,01000	0,55000	0,01000	0,10000	9,53456
0,00002	0,00100	0,05947	209,73514	0,19968	0,82457	91,36549	9,14469	67,79094	0,11859	32,68510	0,06038	11,58509
0,16035	1,11871	0,00713	146,34353	0,03565	172,53908	216,73081	7,70148	0,01000	0,44559	27,86860	0,08187	0,01000
0,18598	0,00100	0,35147	188,55041	0,31679	1,64698	277,07803	12,46322	71,41844	9,70581	24,47613	0,18393	0,01000
0,20000	0,00100	0,12281	127,17757	0,20000	10,45983	0,01000	1,00000	108,84472	0,10000	8,25546	0,10000	12,81862
0,16466	0,00108	0,39720	216,19194	0,33958	0,37098	33,78825	1,68828	149,78707	3,11760	1,05031	0,96301	12,05161
0,05454	0,00100	0,19587	172,26891	0,04797	175,81238	260,07363	3,86183	79,16103	0,48519	47,52912	0,00100	18,06035
0,03495	0,00100	0,00094	39,85956	0,00241	0,00100	11,78142	1,15995	27,22819	0,10000	6,28284	0,00130	3,58035
0,16152	0,09498	0,09735	243,21570	0,00001	0,22468	0,01000	1,00000	0,04632	0,12554	0,11244	0,10000	0,09317
0,02416	247,60882	0,10635	98,37989	0,19953	0,00100	3,11149	4,35294	8,14656	0,14883	47,95249	0,00108	0,05968
0,01352	0,00100	0,00602	32,21748	0,01352	0,00100	22,38103	1,73173	13,52322	0,12073	3,38780	0,00838	0,61049
0,01581	97,03530	0,10453	178,11220	0,13464	142,04712	260,92398	5,47395	28,67456	0,55221	12,83851	0,04333	0,13244
0,10741	16,41265	0,07575	0,00100	0,01837	0,00100	0,01000	1,00000	0,01000	0,10907	0,07795	0,10000	0,08142
0,03096	165,91608	0,15445	93,44347	0,04934	83,52100	265,82189	1,17004	164,78852	0,44952	3,11743	0,07029	0,01000
0,12473	138,60240	0,03506	236,51111	0,06358	0,00100	247,80392	8,59278	0,01000	0,67268	0,01000	0,00100	3,51352

Usporedbom pojedinih metoda u tablici 6.2 prikazana je učinkovitost pojedine jednociljne metode obzirom na obje ciljne funkcije. Vidljivo je da je učinkovitost metode

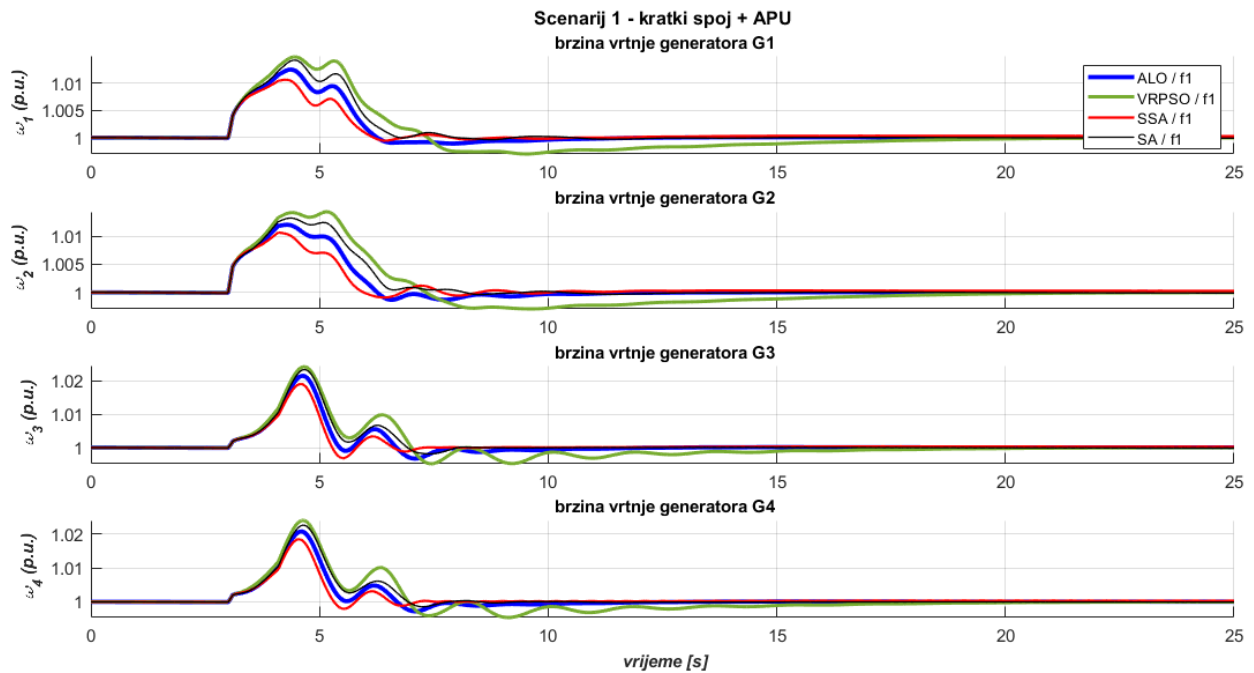
ciljnom funkcijom  $f_2(t)$  potpuna u odnosu na svoju ciljnu funkciju. Metoda optimizacije ciljnom funkcijom  $f_1(t)$  je učinkovita u 11 od 12 slučajeva, odnosno samo u jednom slučaju je optimizacija metodom  $f_2(t)$  dala bolje rezultate i za ciljnu funkciju  $f_1(t)$  od slučaja kada je algoritam ispitan metodom  $f_2(t)$ .

Tablica 6.3 Usporedba efikasnosti ciljnih funkcija algoritama, WSCC model, jednociljna optimizacija

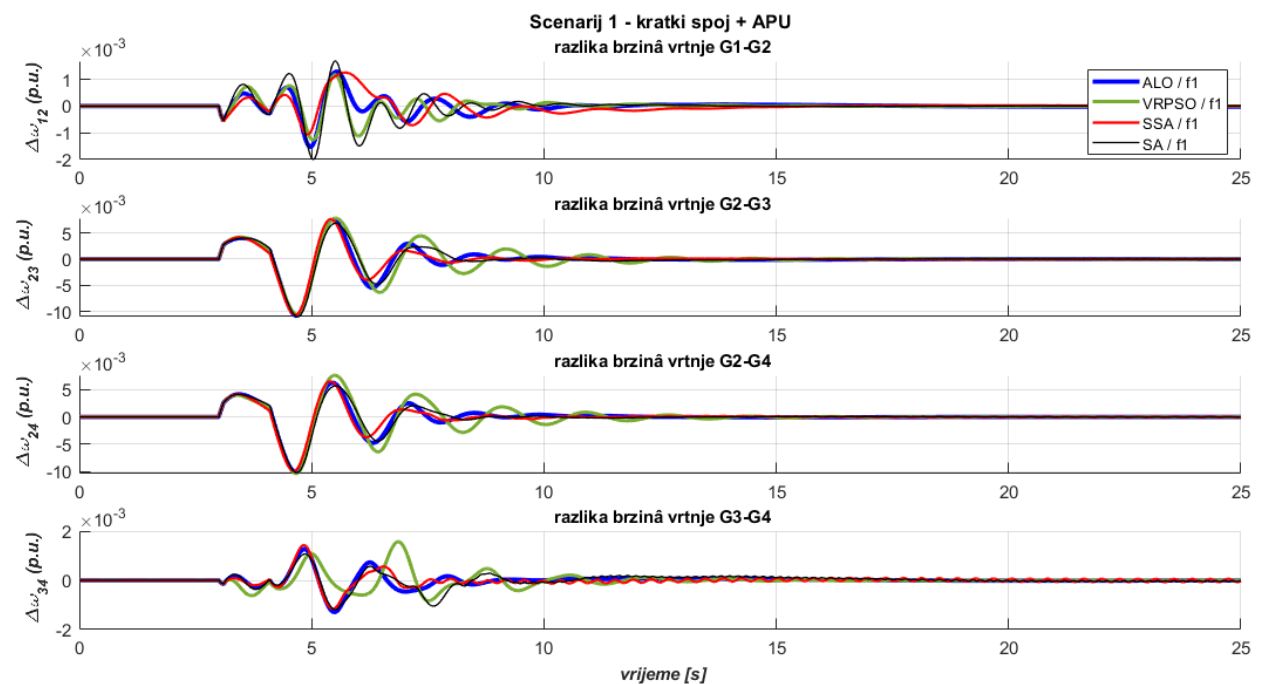
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_1(t)$ (4.2)	$f_2(t)$ (4.3)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,039186</b>	193,29728
		VRPSO	<b>0,050554</b>	186,91139
		SSA	<b>0,034093</b>	173,46125
		SA	<b>0,038641</b>	182,29014
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	0,040945	<b>108,13375</b>
		VRPSO	0,082667	<b>168,54473</b>
		SSA	0,058148	<b>138,93359</b>
		SA	0,055953	<b>148,60860</b>
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,103718	794,80876
		VRPSO	<b>0,150442</b>	849,84711
		SSA	<b>0,096927</b>	751,97846
		SA	<b>0,102657</b>	764,35950
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	<b>0,085017</b>	<b>738,61723</b>
		VRPSO	0,162942	<b>784,90415</b>
		SSA	0,097700	<b>727,43161</b>
		SA	0,123039	<b>757,53258</b>
Scenarij 3: Ispad tereta (3s)	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,058059</b>	223,64089
		VRPSO	<b>0,070961</b>	310,65602
		SSA	<b>0,052939</b>	176,67649
		SA	<b>0,065493</b>	275,97982
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	0,095926	<b>136,01988</b>
		VRPSO	0,078459	<b>266,95575</b>
		SSA	0,061549	<b>132,02391</b>
		SA	0,066501	<b>265,59989</b>

Usporedba odziva prikazuje veću uspješnost metode  $f_2(t)$  u suzbijanju oscilacija u razlikama brzina vrtnje, ali i manju uspješnost u smirivanju odziva napona i tokova snaga, koji su sastavni dio ciljne funkcije  $f_1(t)$ . Ovime je vidljiva različitost u parametranju dvjema ciljnim funkcijama, koja je prisutna u zadnjim ciklusima optimizacije. Kod početnih iteracija, kada nastupa grubo podešavanje parametara ciljne funkcije pomažu jednu drugoj, dok finije podešavanje vrlo često pokazuje obrnuto proporcionalno ponašanje jedne ciljne funkcije naspram druge. Posebno problematičnim se pokazao VRPSO algoritam prilikom optimizacije metodom  $f_2(t)$  jer ne uzima u obzir oscilacije napona i tokova snaga, što u nekim slučajevima dovodi do pojave vrlo niskih frekvencija.

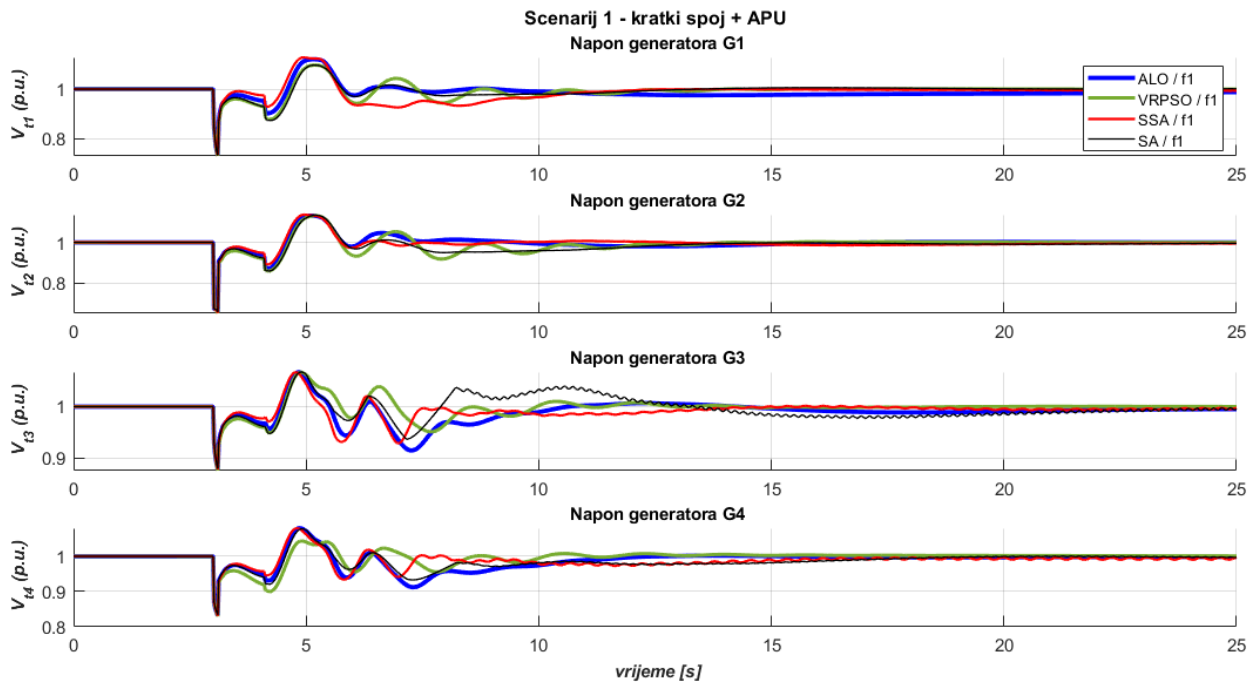
## 6.5.2 TAFM model - rezultati ispitivanja, jednociljna optimizacija



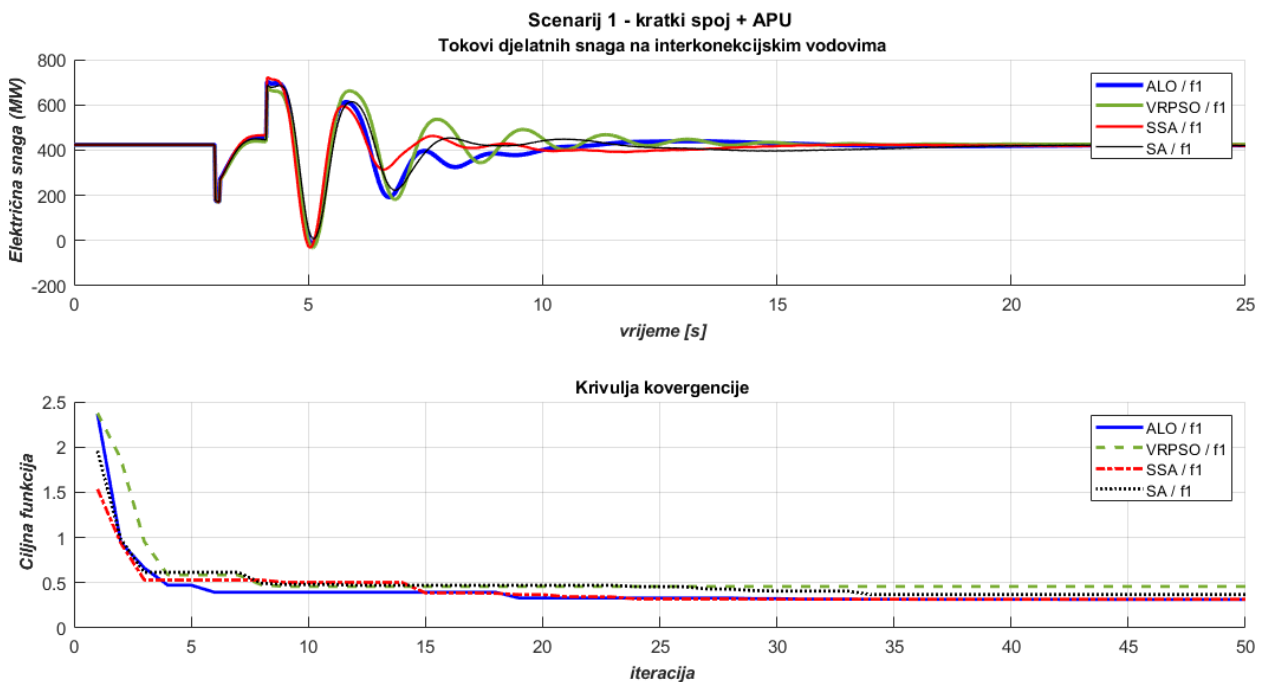
Slika 6.28. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



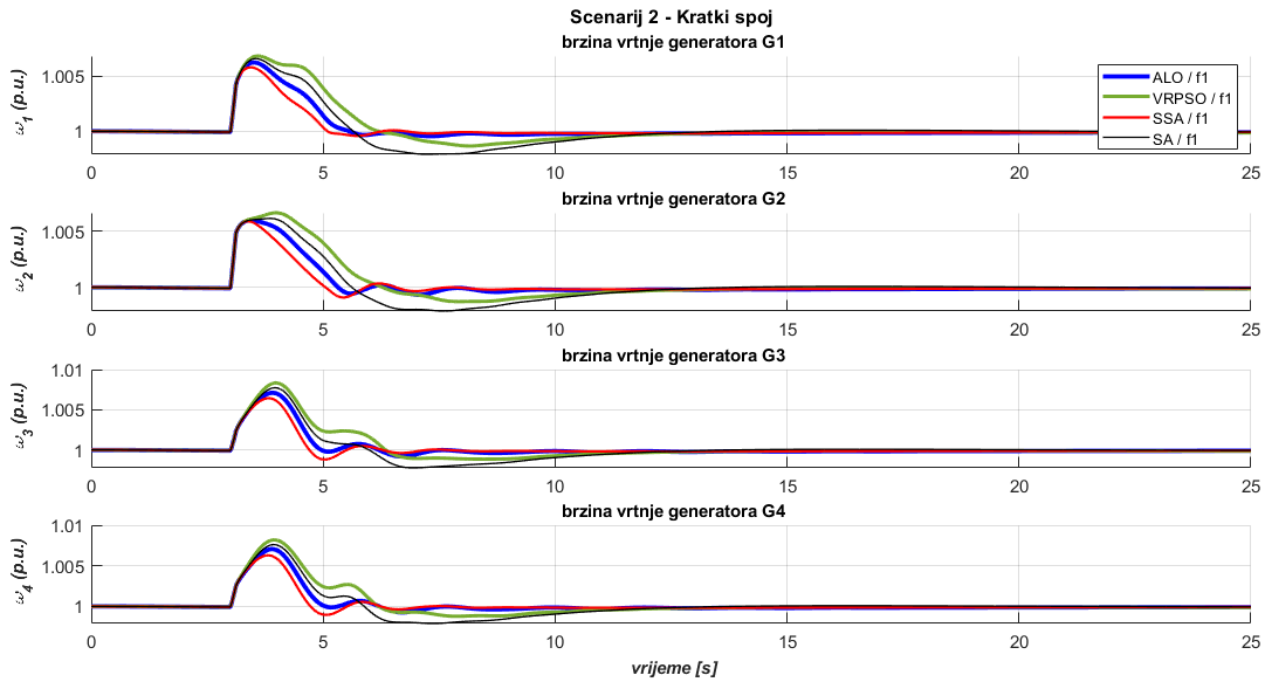
Slika 6.29. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



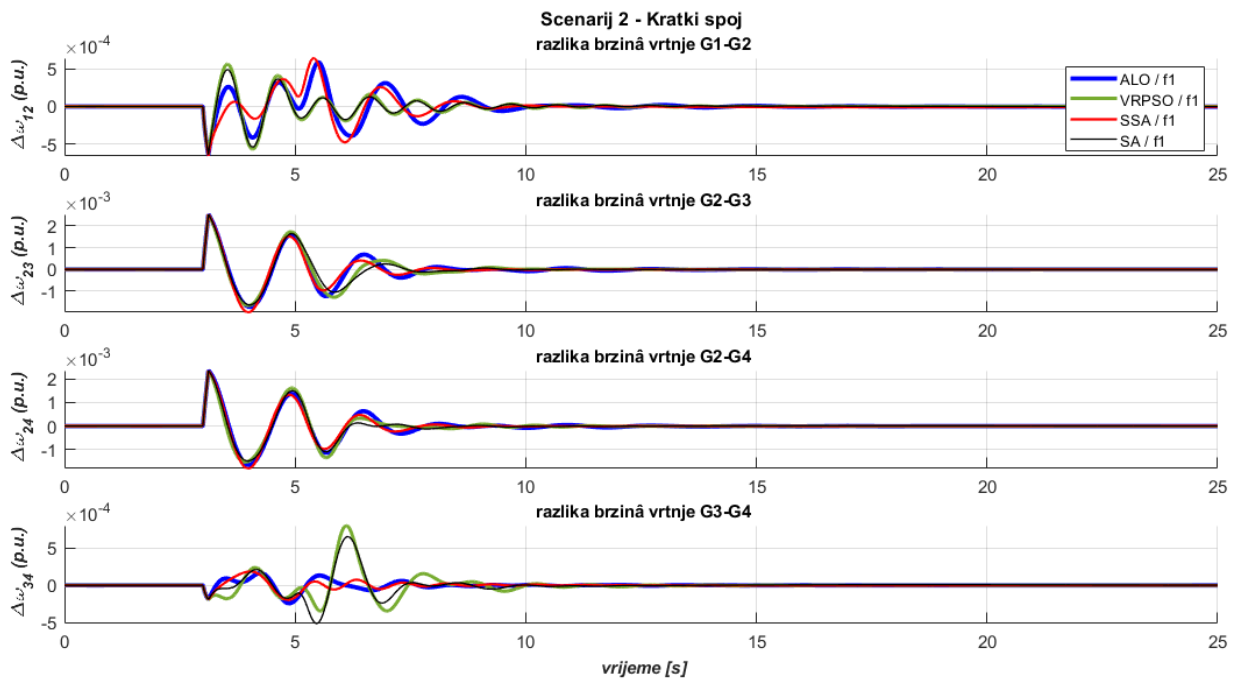
Slika 6.30. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



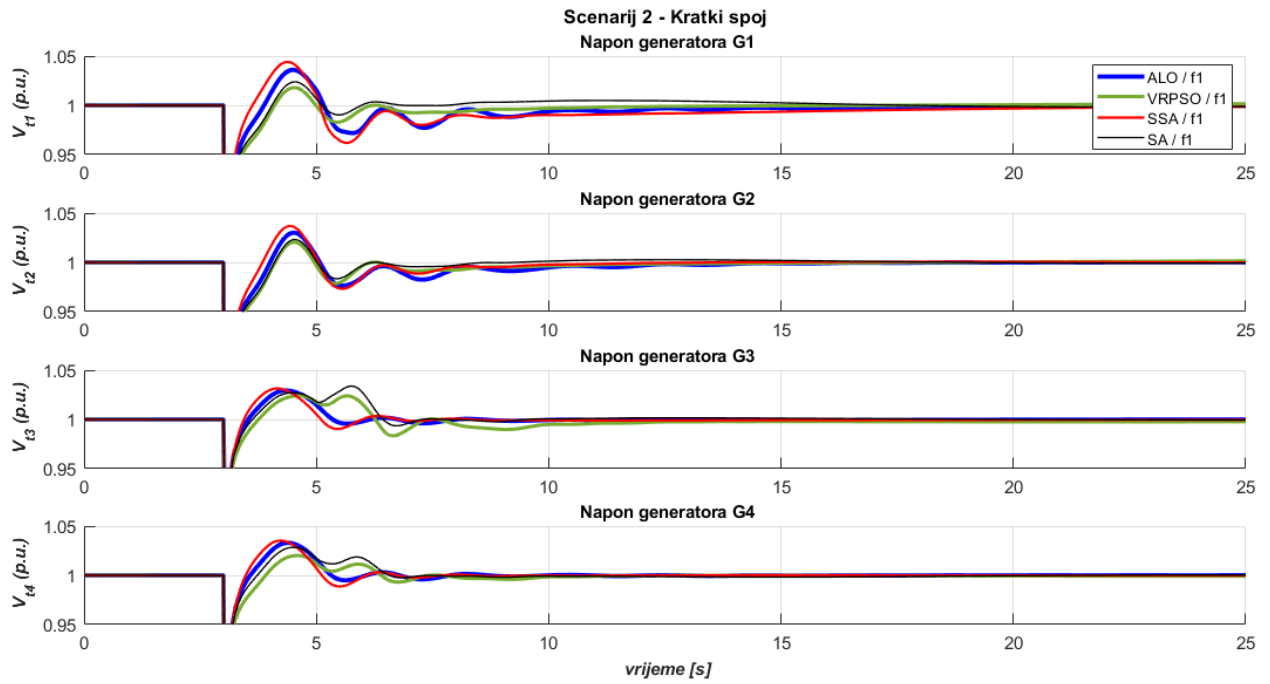
Slika 6.31. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



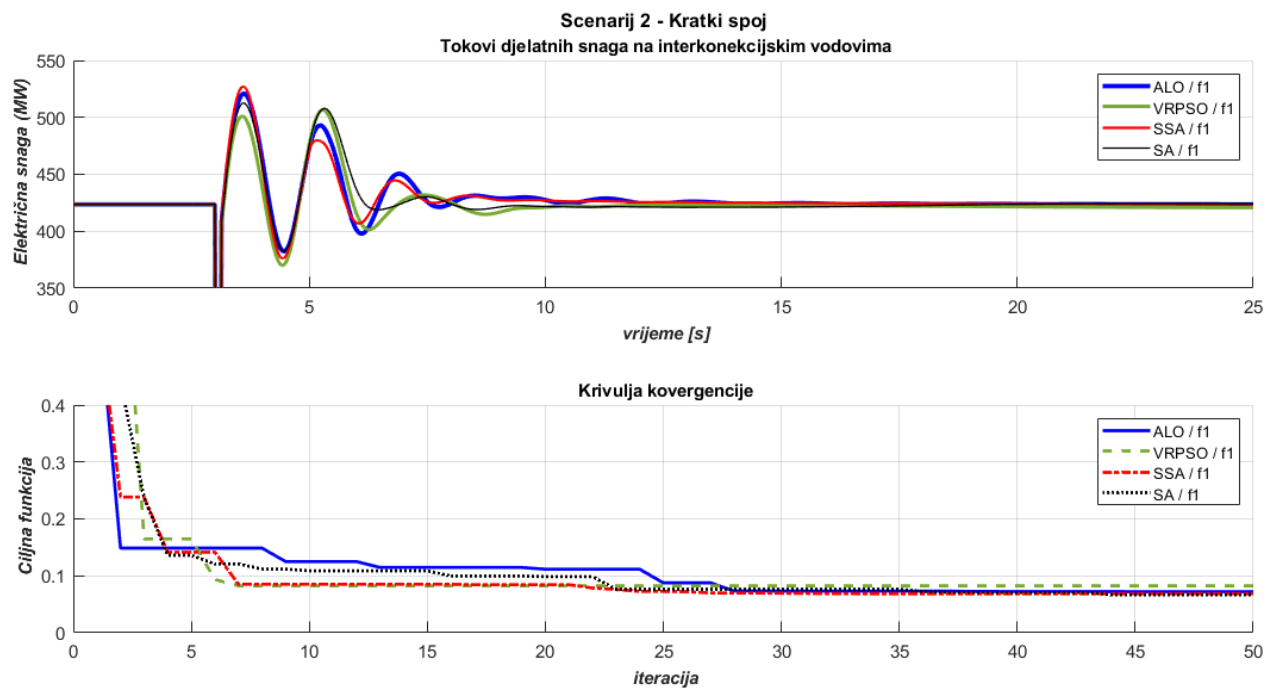
Slika 6.32. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



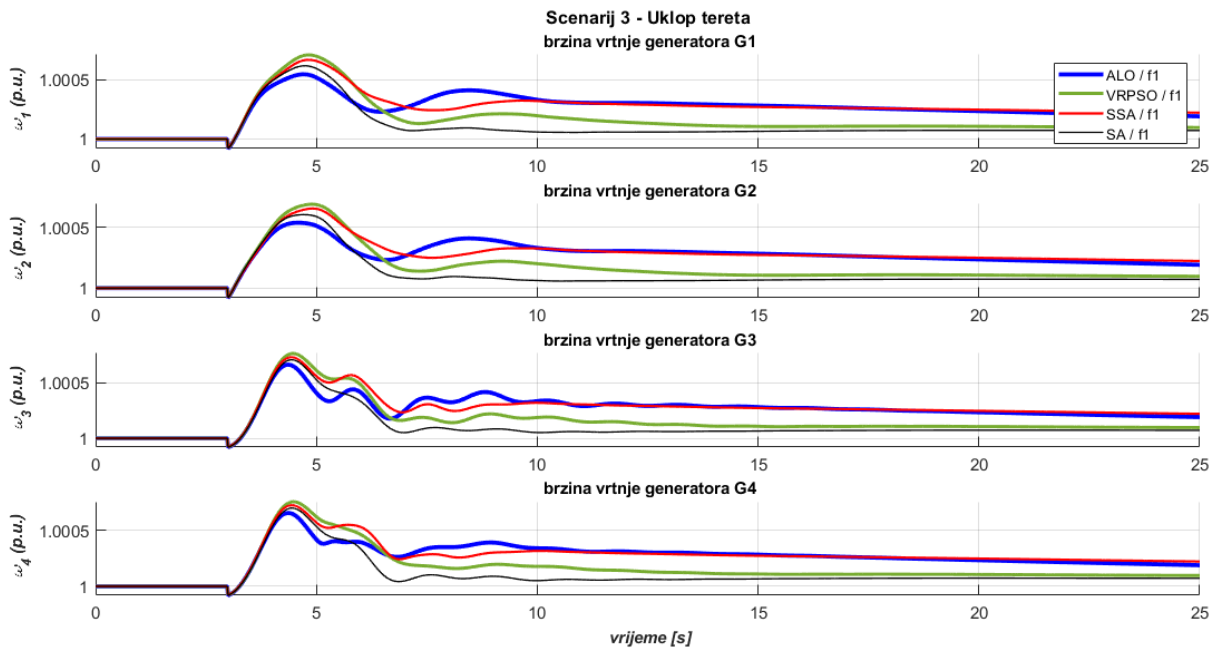
Slika 6.33. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



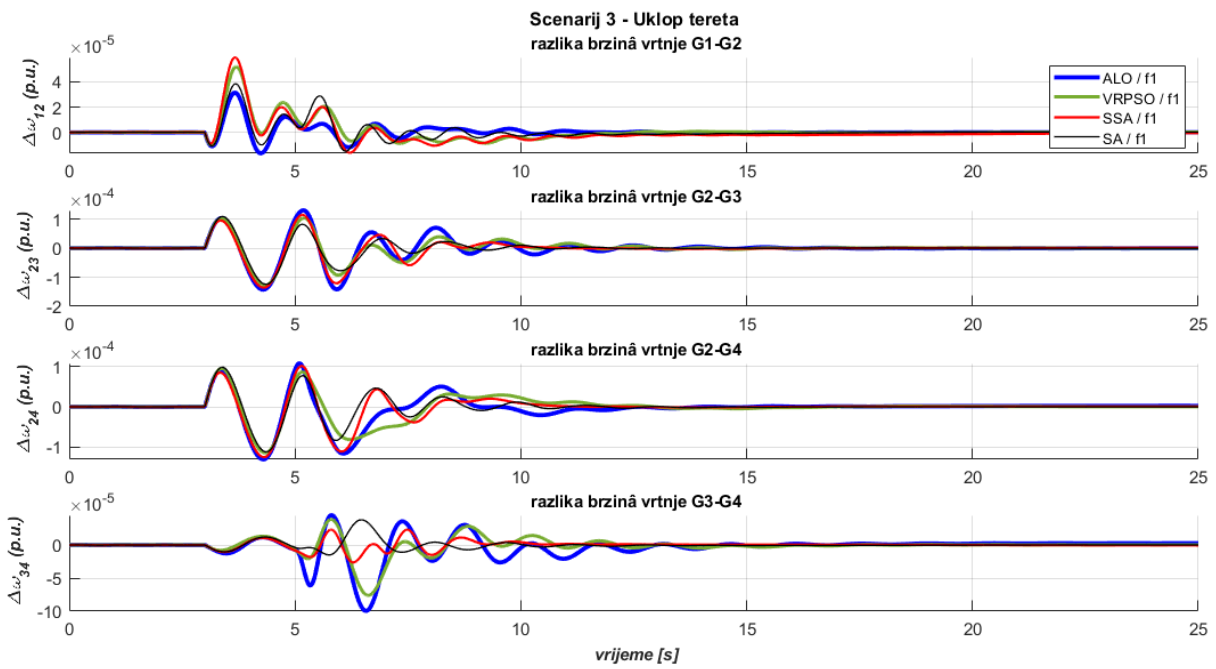
Slika 6.34. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



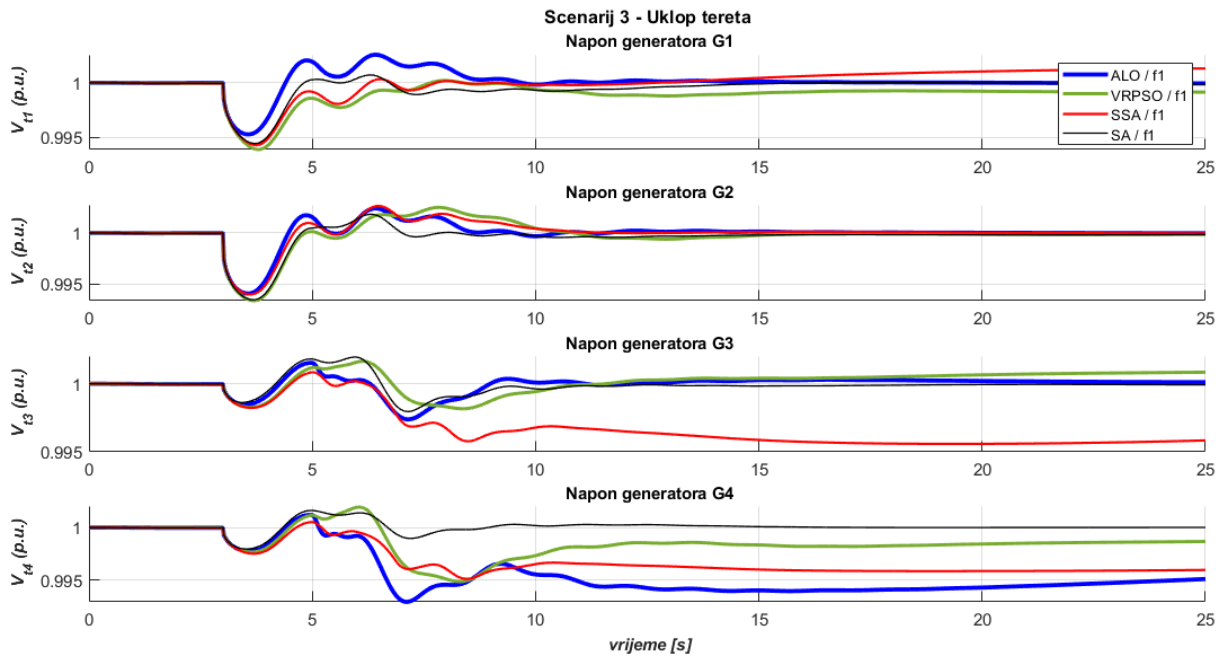
Slika 6.35. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



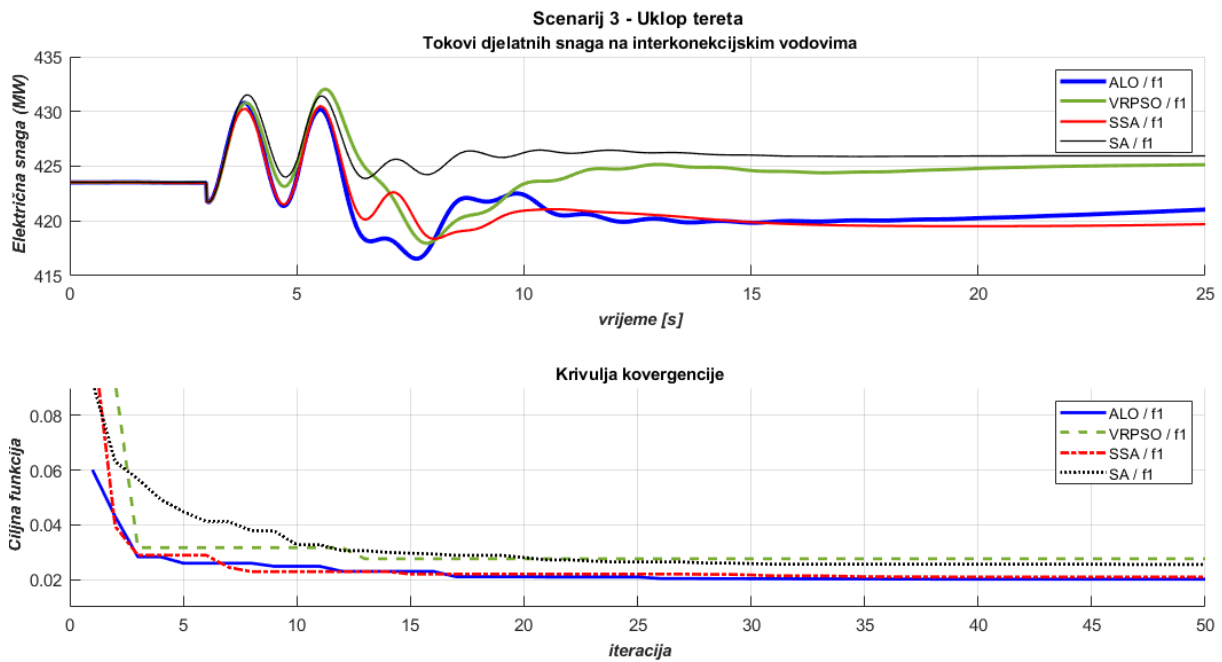
Slika 6.36. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



Slika 6.37. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)

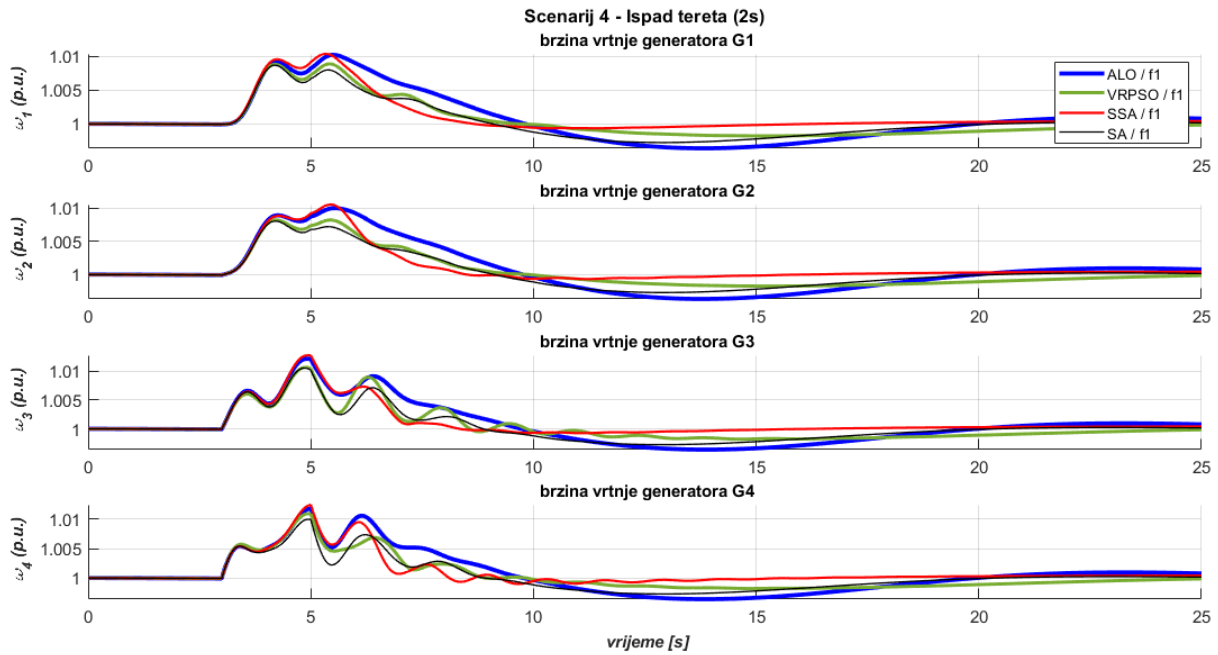


Slika 6.38. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)

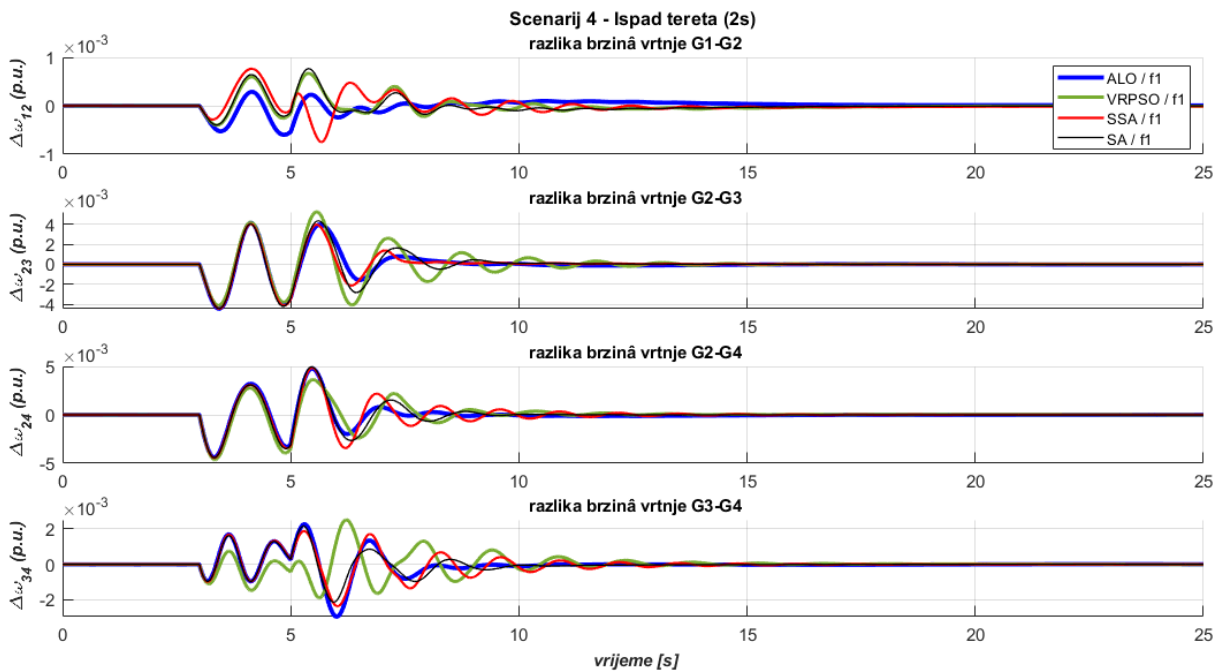


Slika 6.39. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)

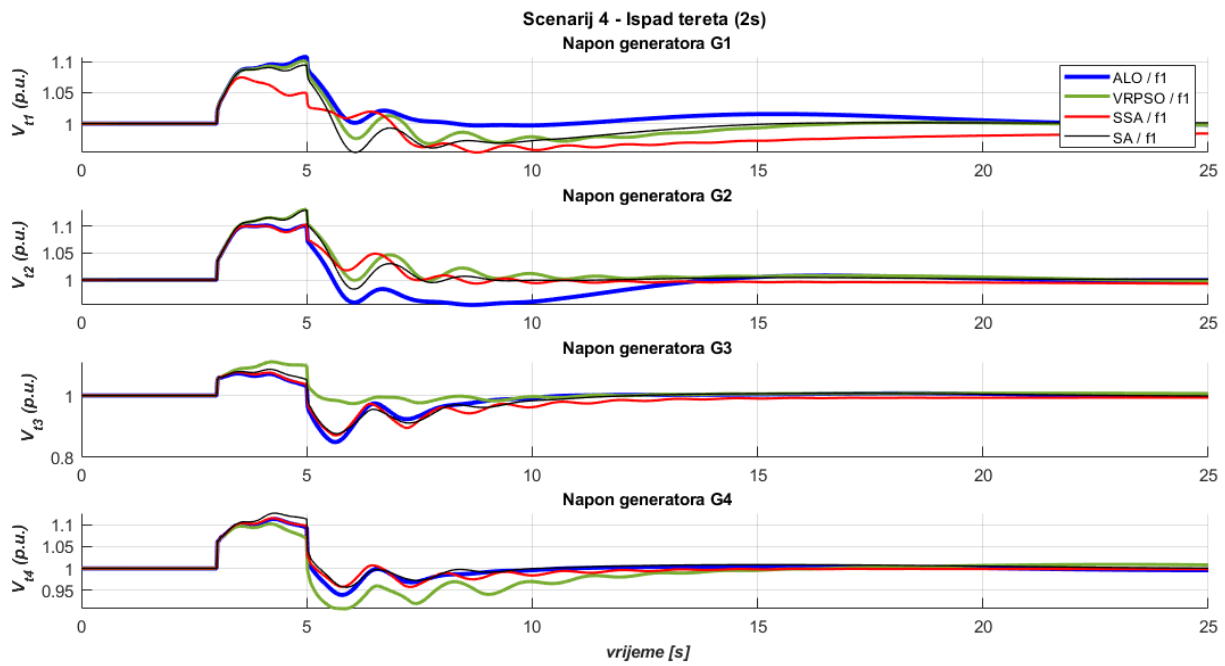




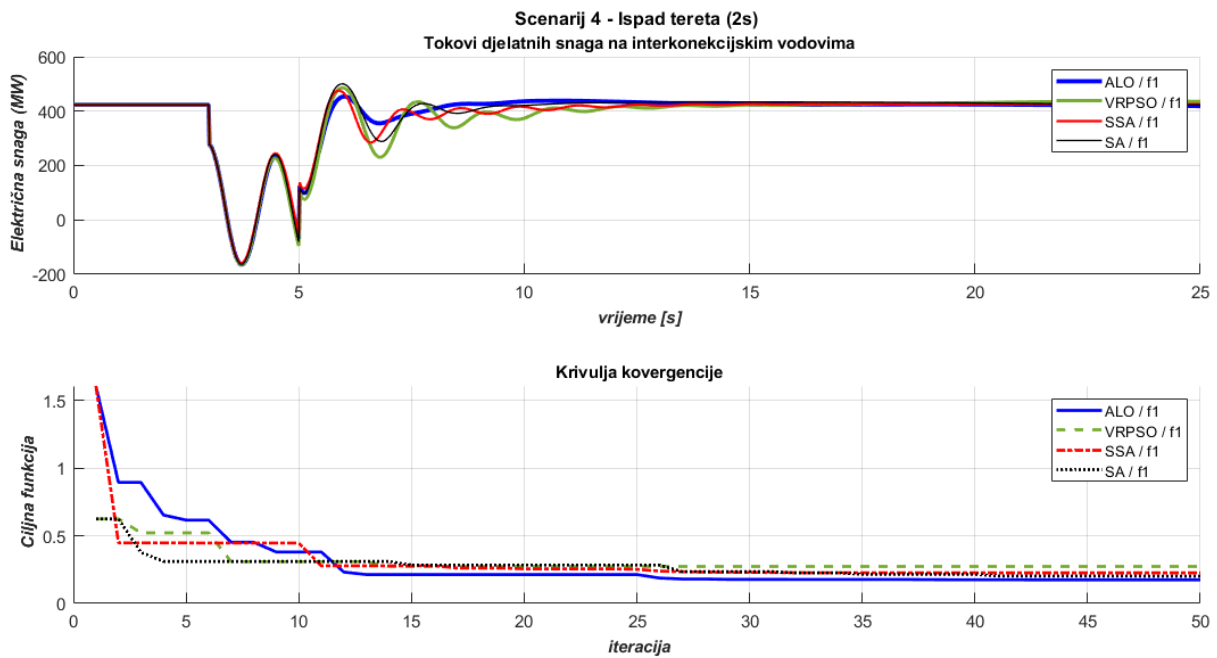
Slika 6.40. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



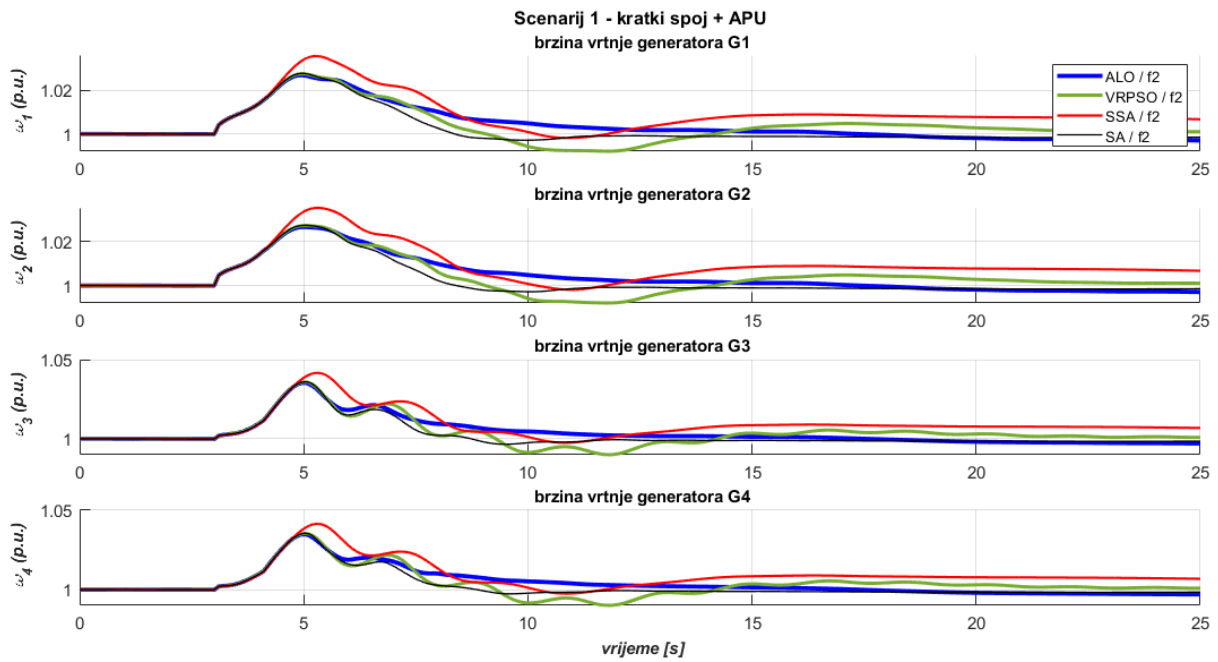
Slika 6.41. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



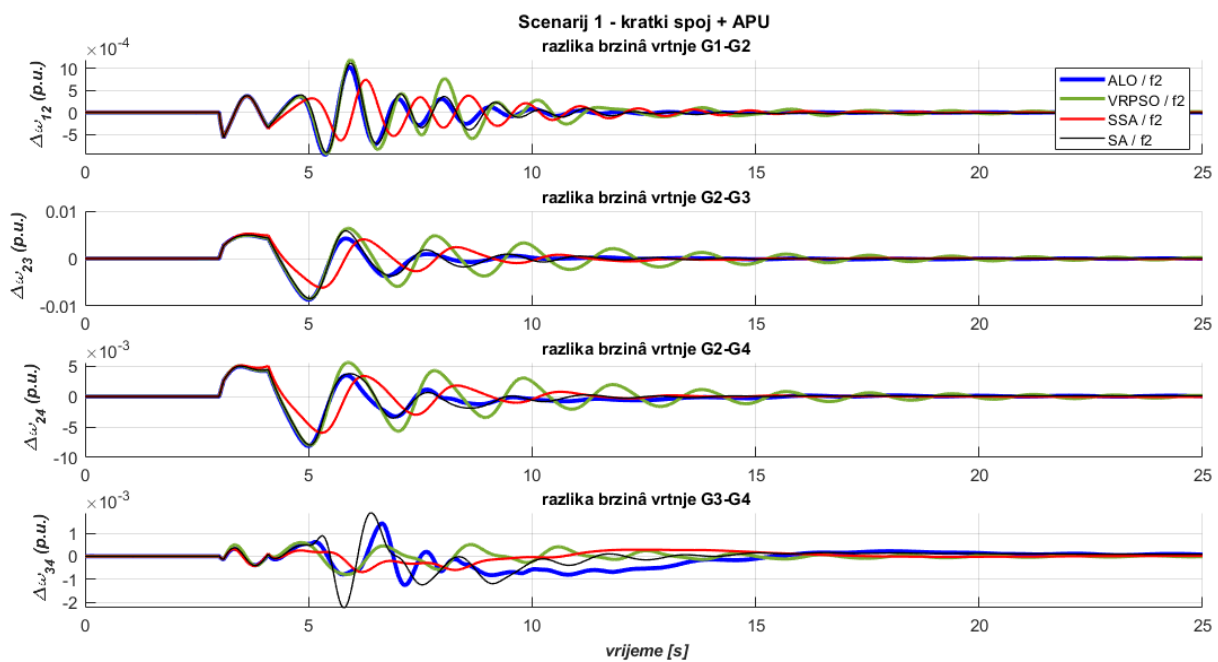
Slika 6.42. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



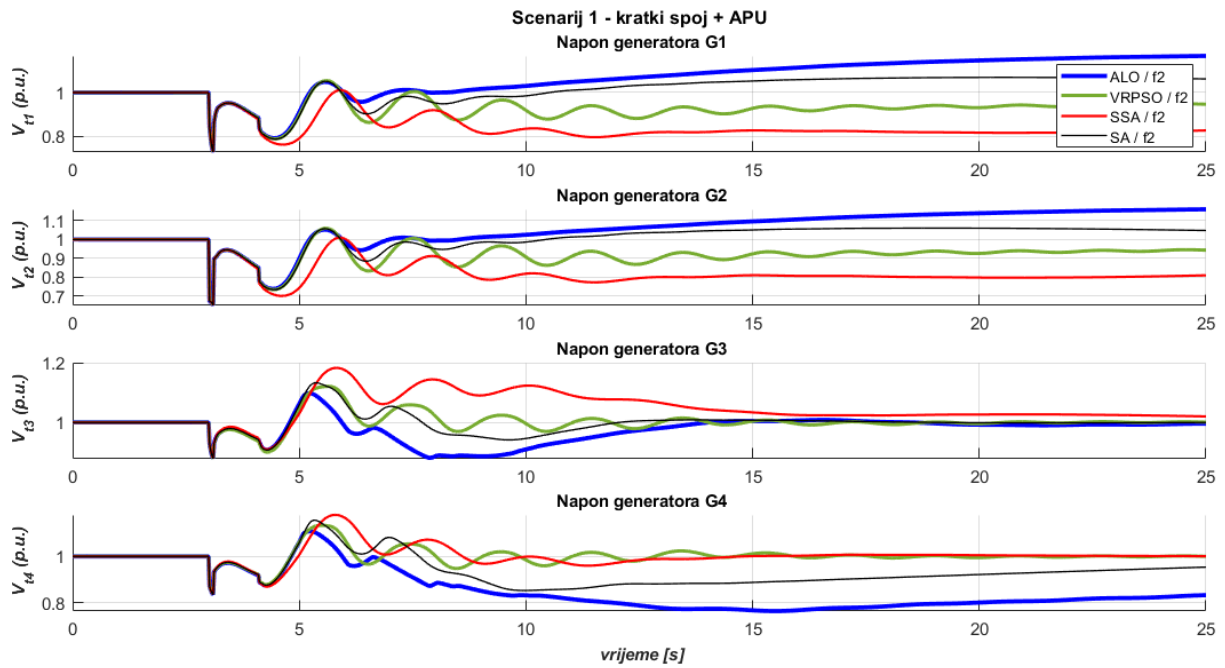
Slika 6.43. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_1(t)$  (4.2)



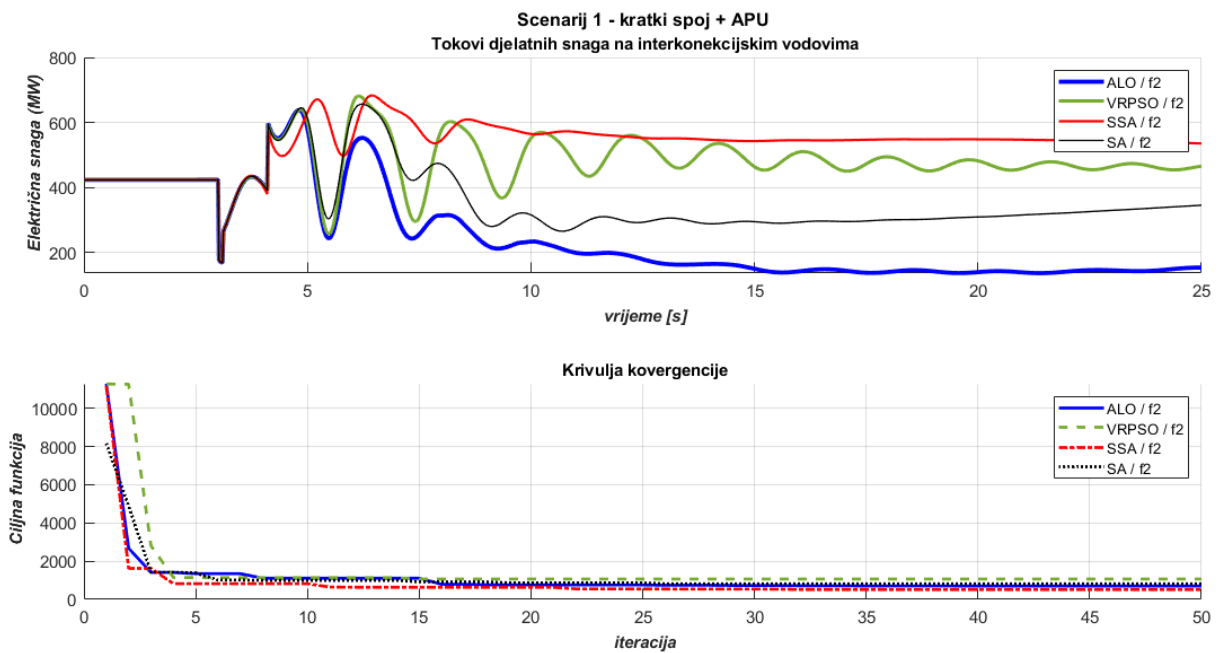
Slika 6.44. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



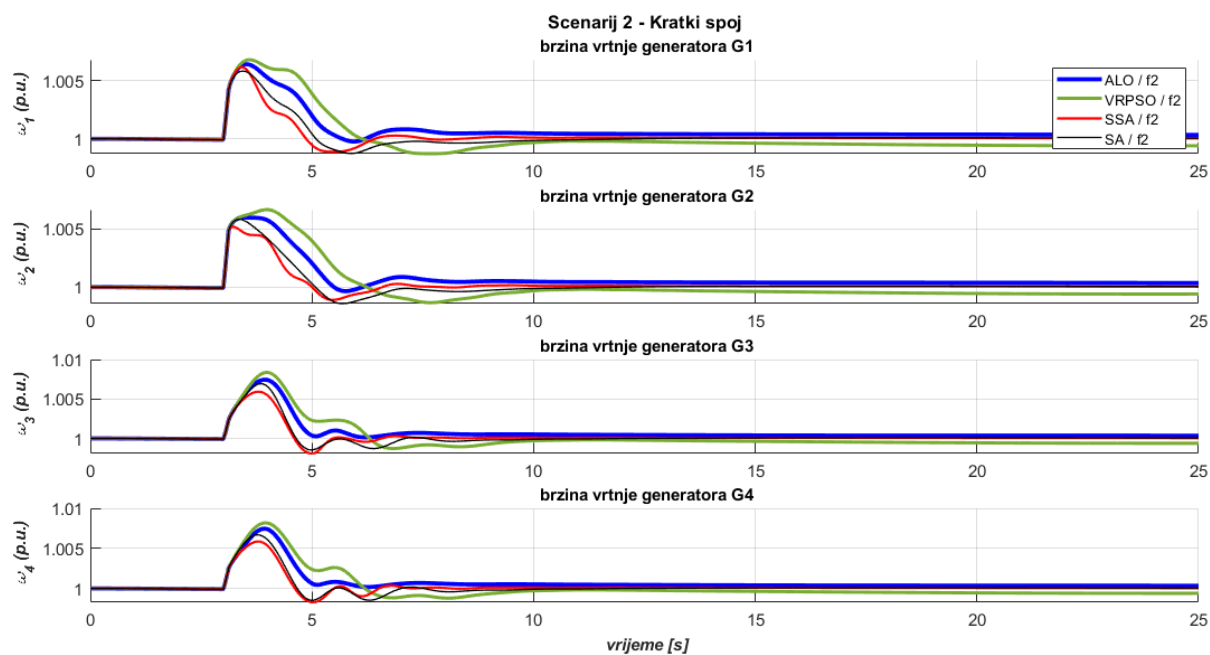
Slika 6.45. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



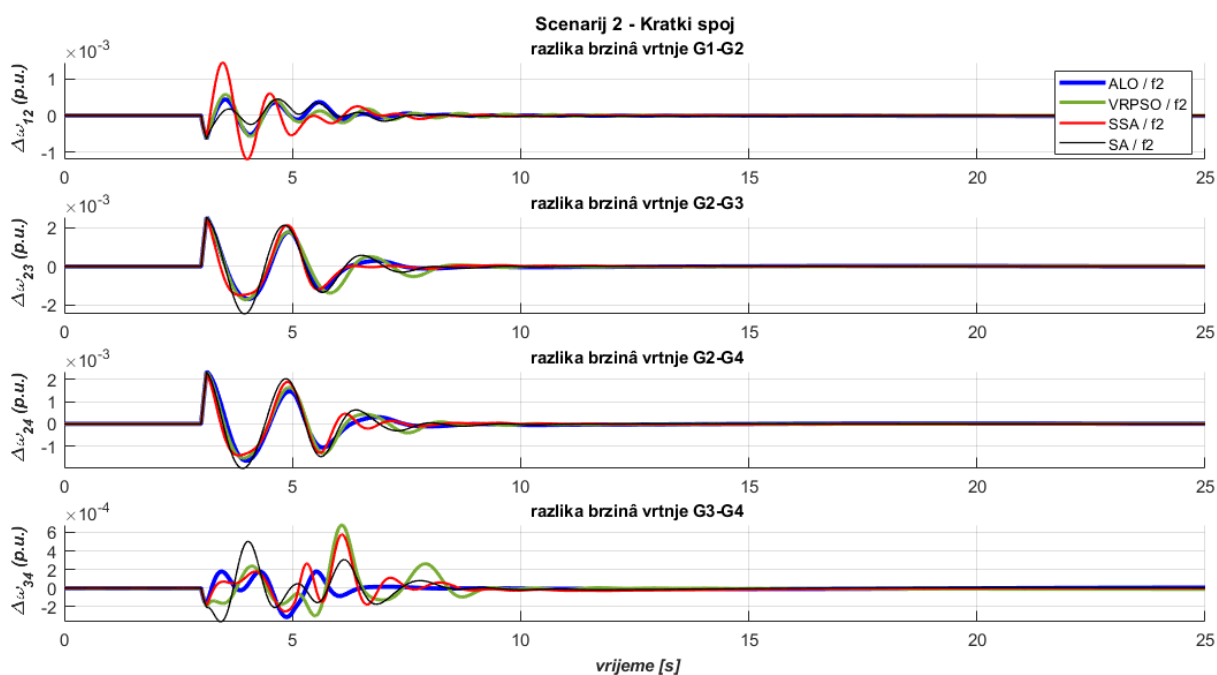
Slika 6.46. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



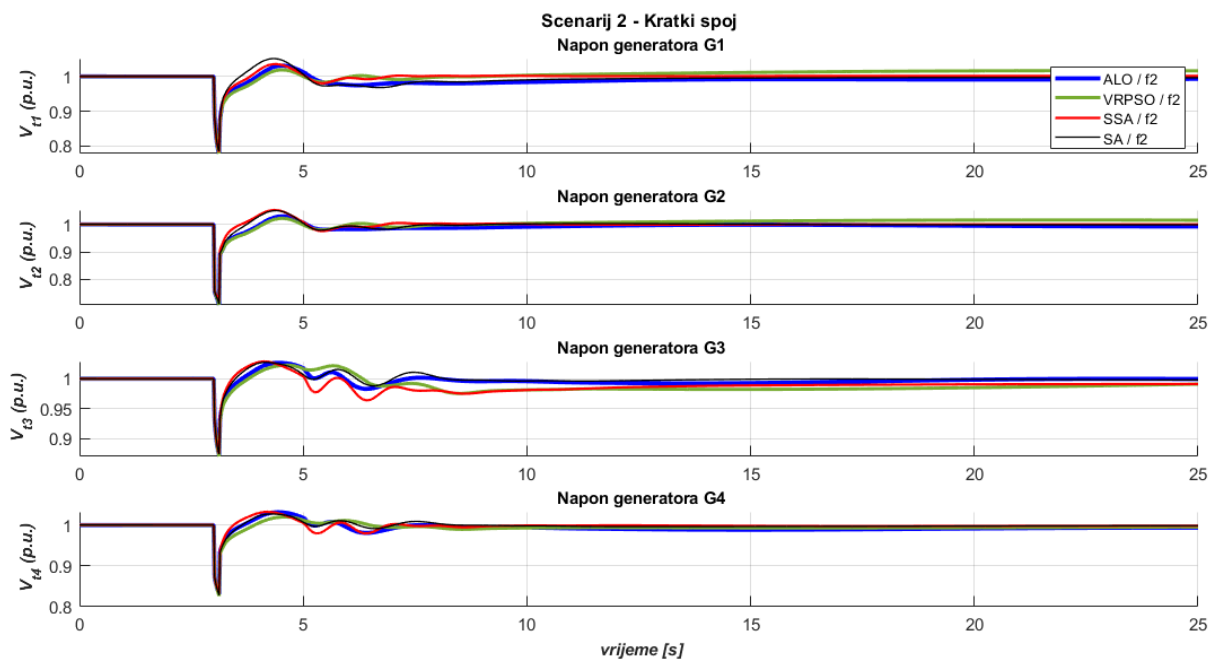
Slika 6.47. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



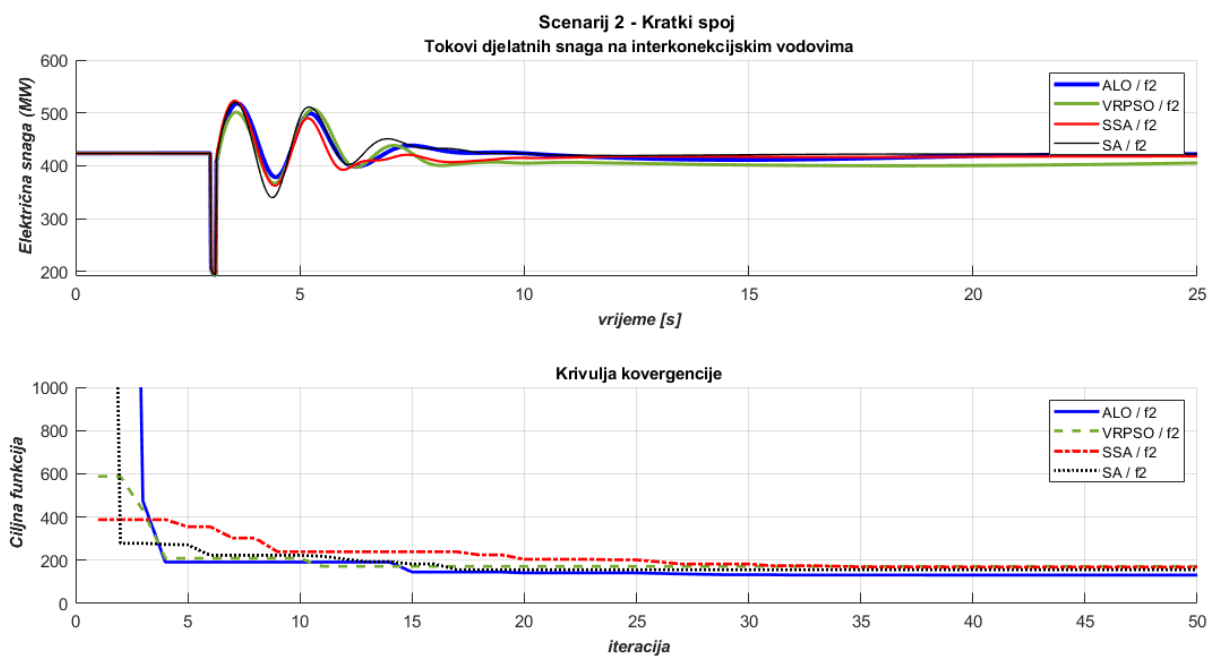
Slika 6.48. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



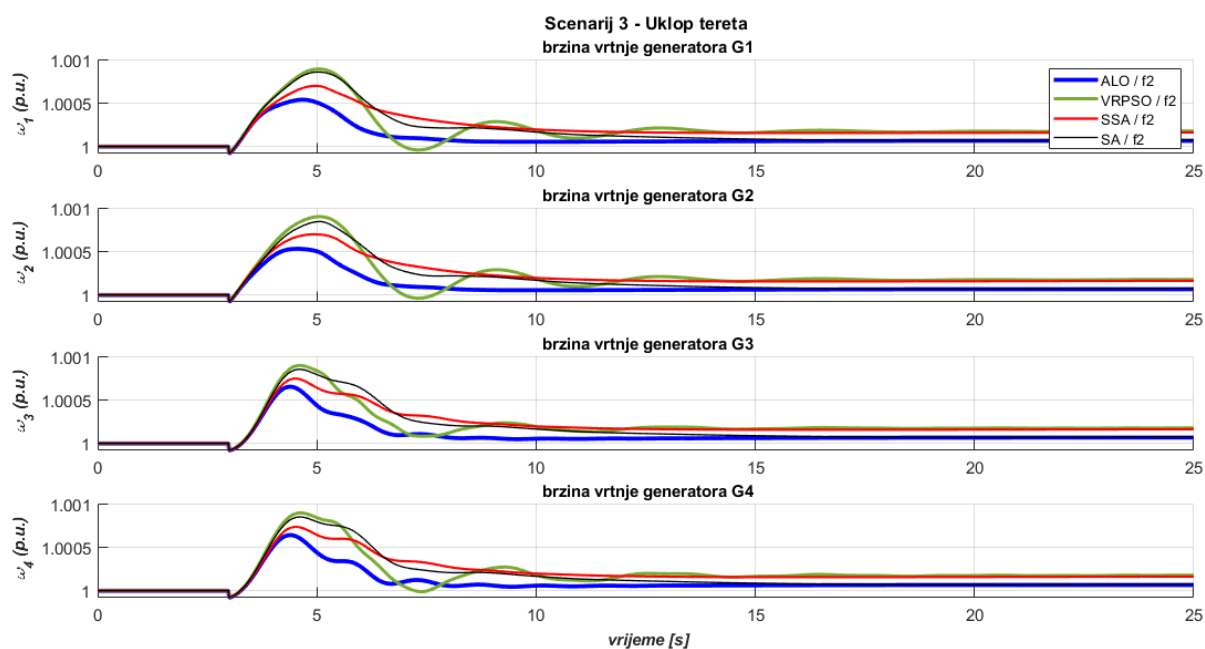
Slika 6.49. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



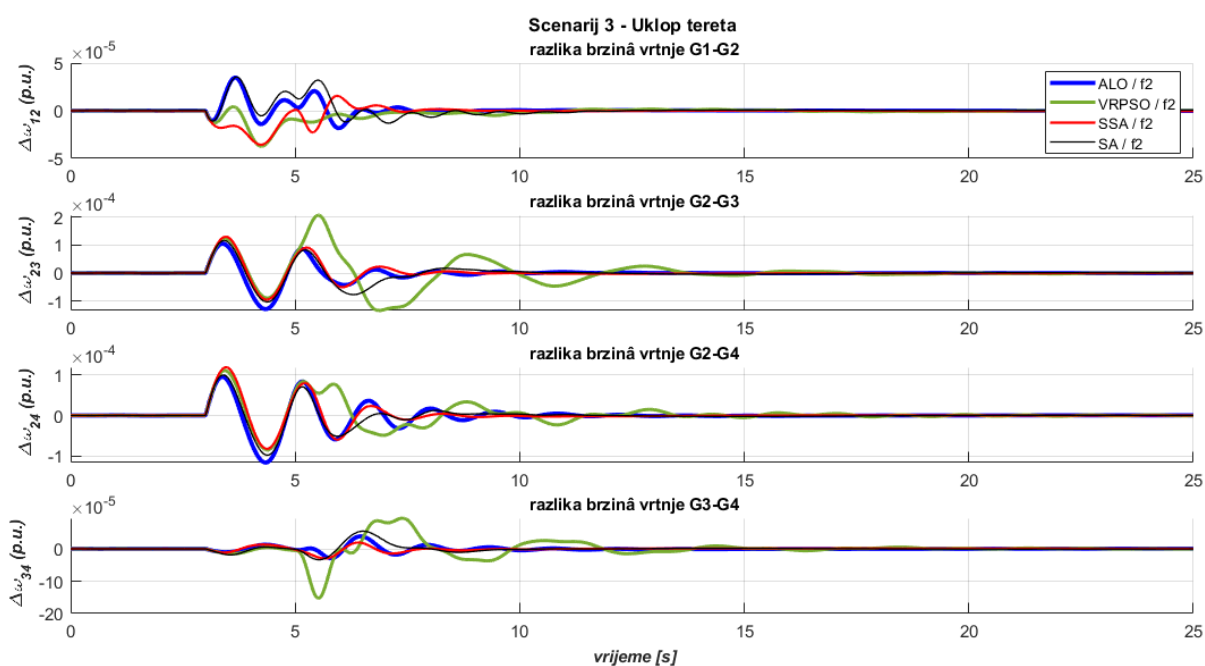
Slika 6.50. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



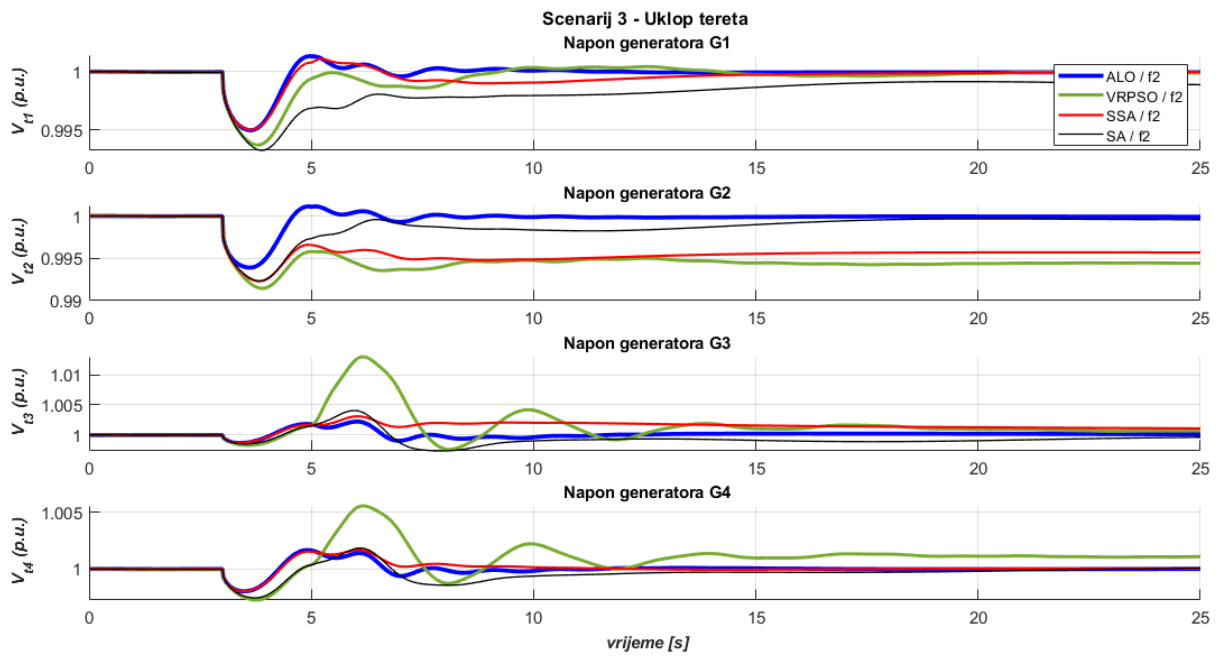
Slika 6.51. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



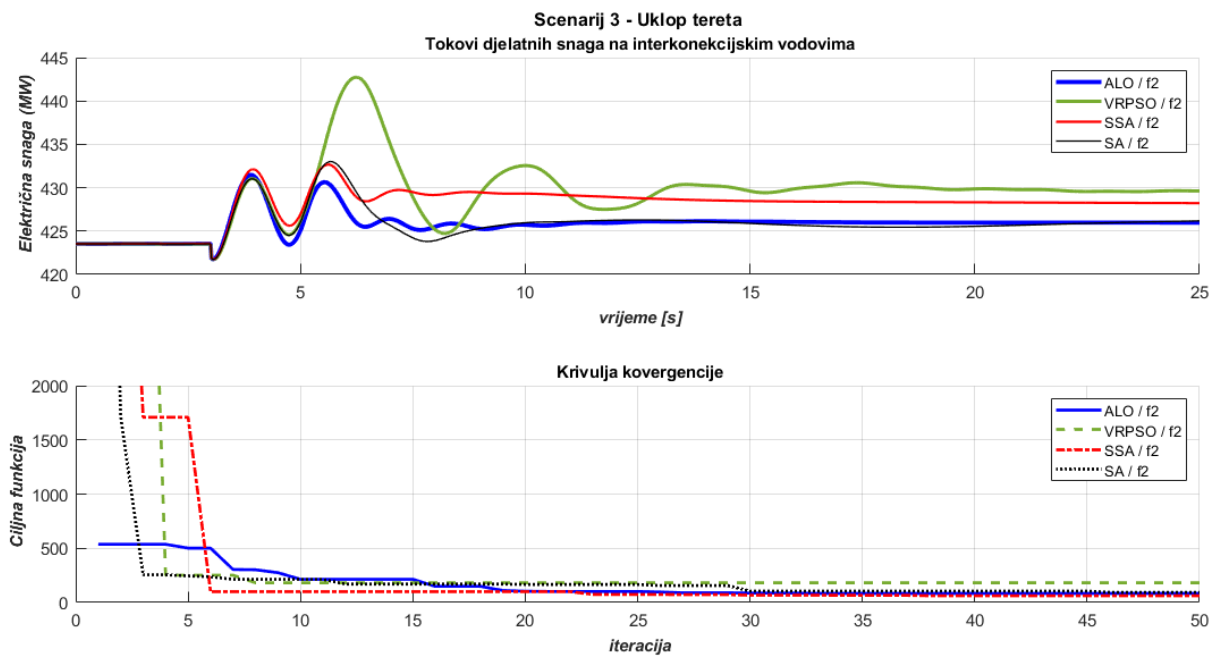
Slika 6.52. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.53. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

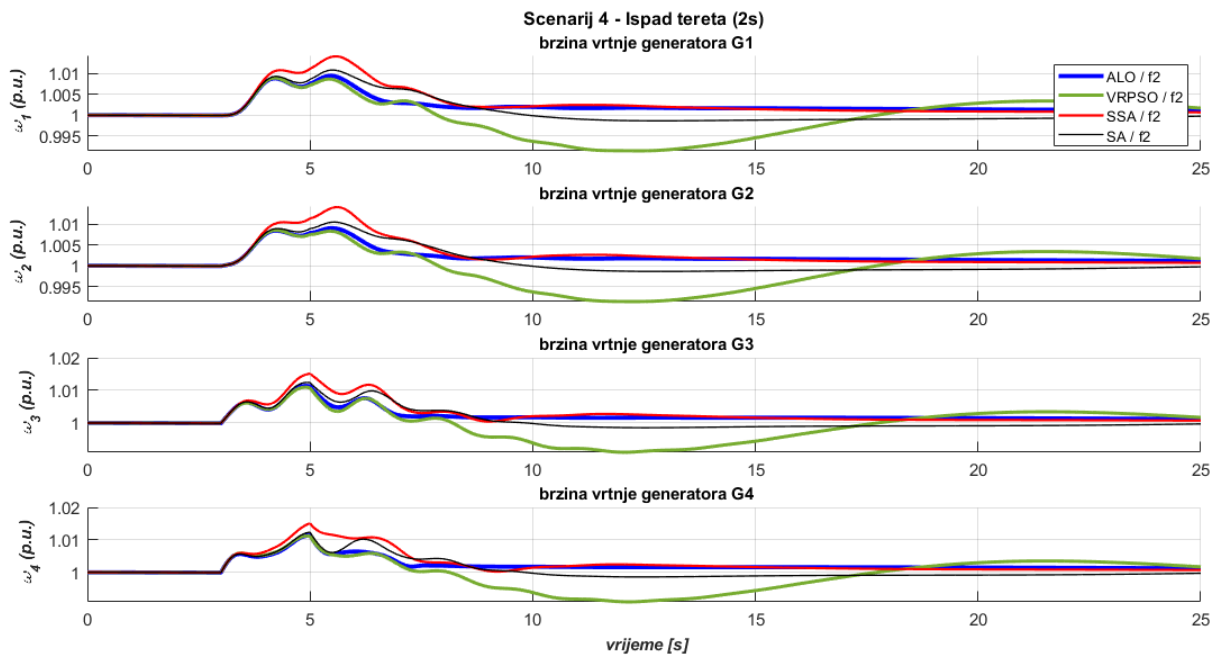


Slika 6.54. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

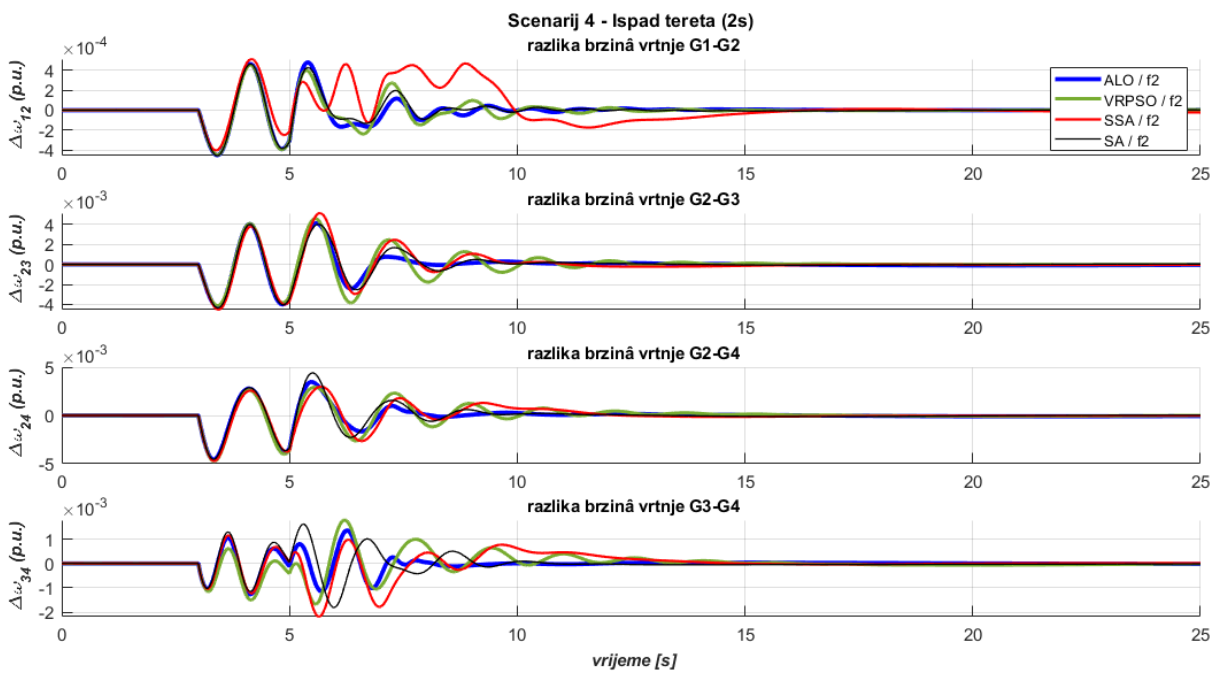


Slika 6.55. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

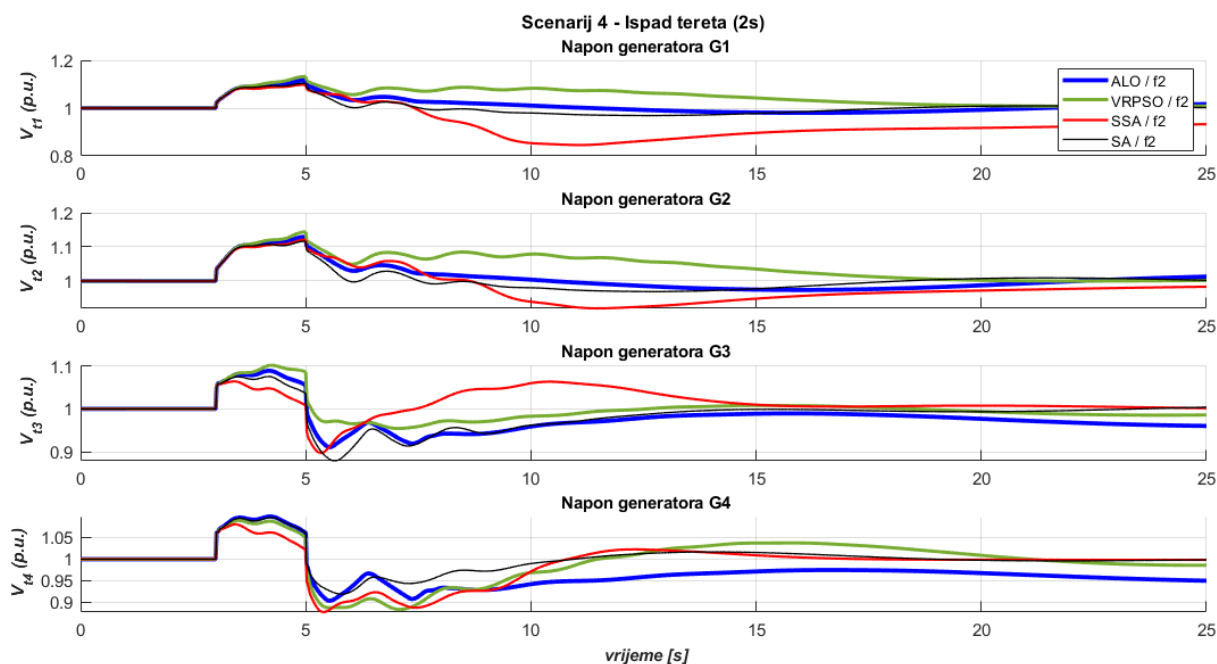




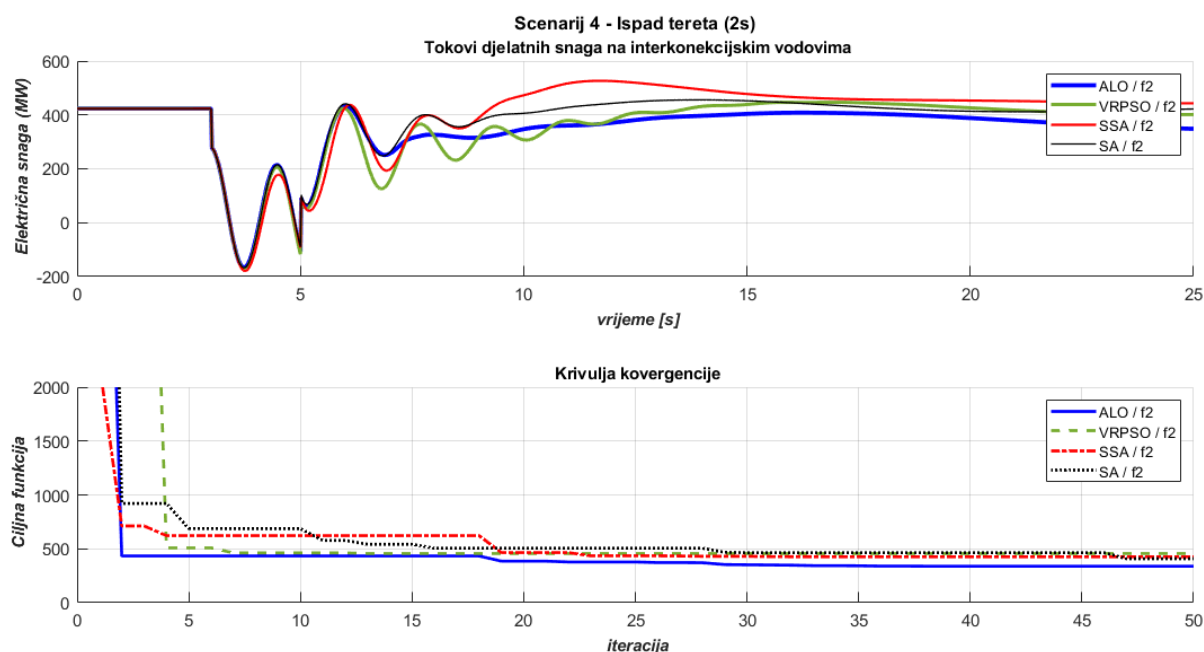
Slika 6.56. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.57. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.58. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)



Slika 6.59. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi  $f_2(t)$  (4.3)

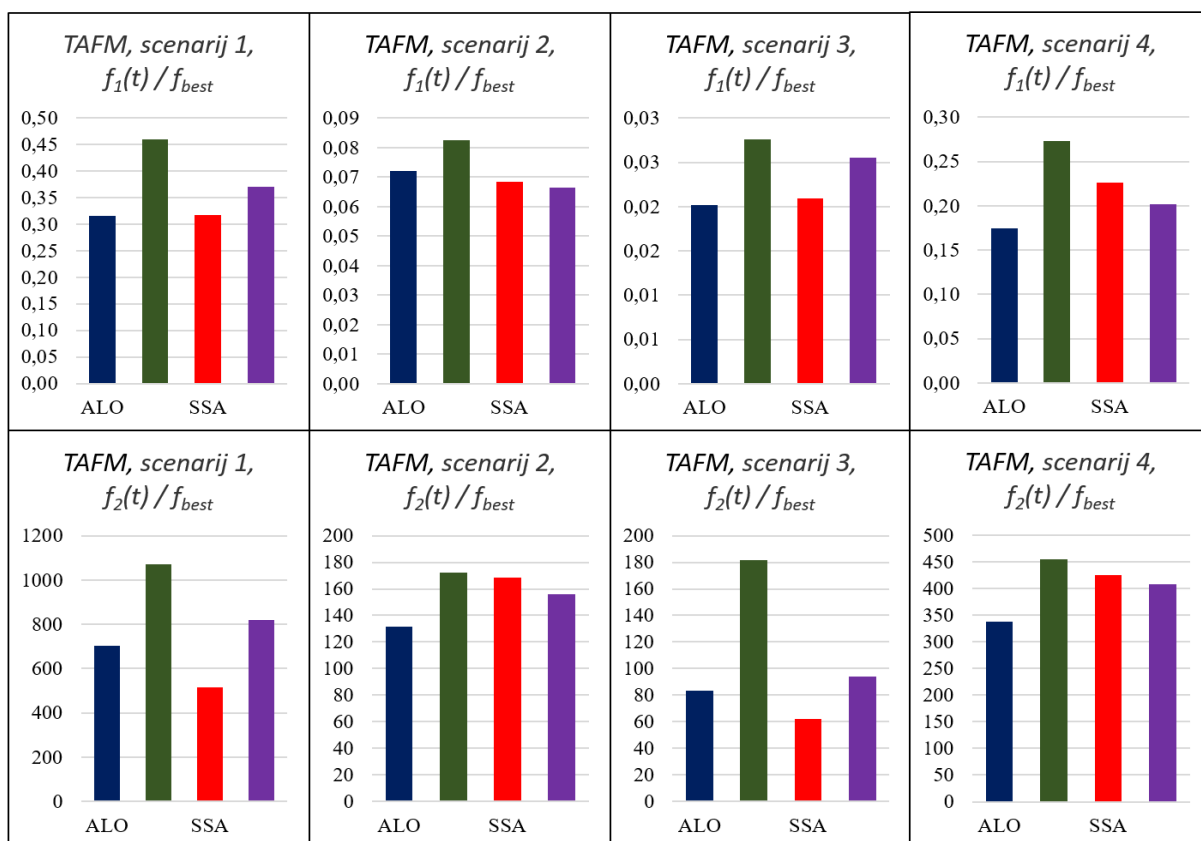
Za TAFM model u tablici 6.4 su prikazani analitički pokazatelji kvalitete optimizacijskog procesa. Najbolja rješenja pokazuju u velikoj većini algoritmi novije generacije (ALO u 5 od 8 slučajeva, SSA u 2 od 8 slučajeva, SA u jednom od 8 slučajeva optimizacije).

Tablica 6.4 Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, TAFM model, jednociljna optimizacija

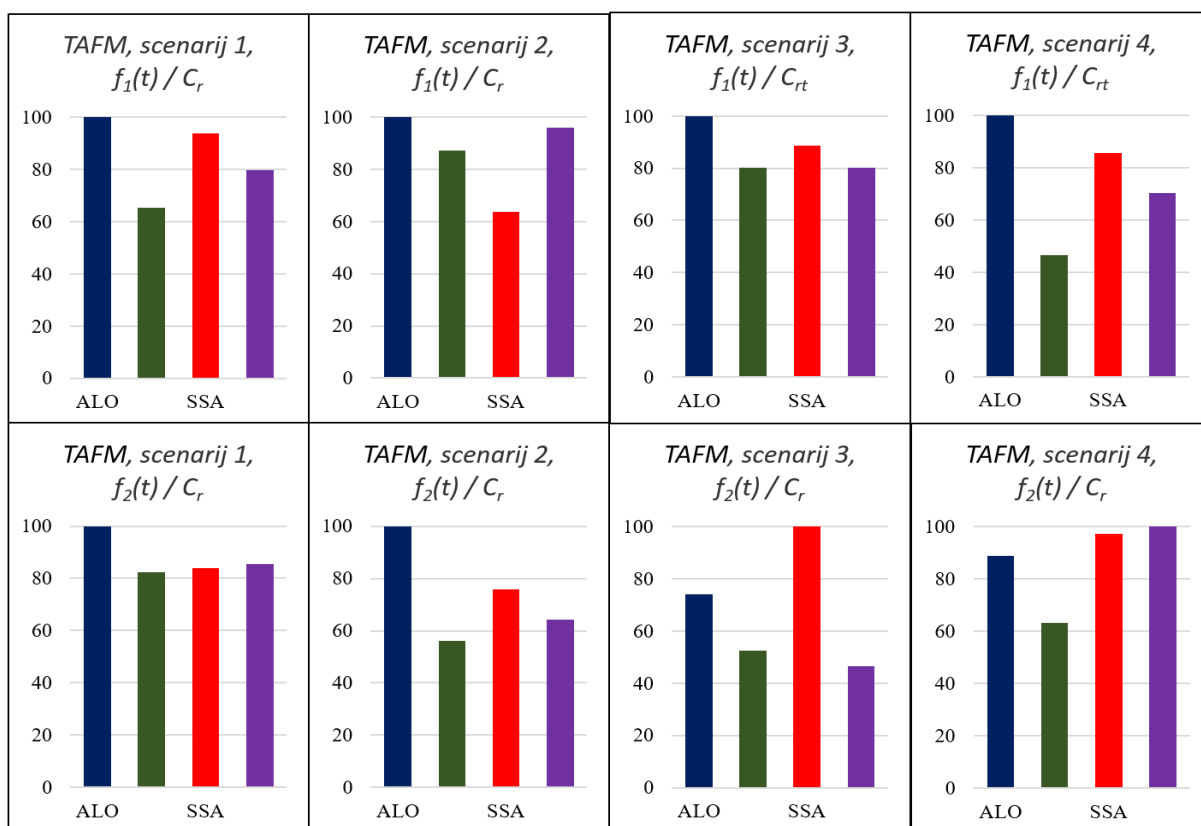
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$ (6.4)	$\mu$ (6.5)	$\sigma$ (6.6)	$C_{A, mean}$ (6.8)	$C_{A, best}$ (6.9)	$C_r$ [%] (6.10)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,3155</b>	<b>0,35368</b>	<b>0,03758</b>	<b>0,05619</b>	<b>0,05447</b>	<b>100</b>
		VRPSO	0,4592	0,6067	0,13894	0,03805	0,03559	65,33168
		SSA	0,3175	0,39108	0,05366	0,05244	0,05118	93,95686
		SA	0,3696	0,44652	0,0418	0,04563	0,0434	79,66979
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	701,7867	910,902	146,343	0,00002	<b>0,000022</b>	<b>100</b>
		VRPSO	1069,6469	1336,04	241,816	0,00002	0,000018	82,3205
		SSA	<b>515,4889</b>	<b>901,066</b>	<b>311,036</b>	<b>0,00003</b>	<b>0,000018</b>	<b>83,83756</b>
		SA	817,7141	1060,84	131,488	0,00002	0,000019	85,50865
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,0721	0,08511	0,01877	0,2289	<b>0,23365</b>	<b>100</b>
		VRPSO	0,0824	0,10748	0,01659	0,20821	0,20369	87,17645
		SSA	0,0685	0,09334	0,0294	0,22649	0,14882	63,69275
		SA	<b>0,0665</b>	<b>0,07857</b>	<b>0,00947</b>	<b>0,23038</b>	<b>0,2239</b>	<b>95,8259</b>
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	<b>131,5678</b>	<b>152,533</b>	<b>18,4323</b>	<b>0,00013</b>	<b>0,00015</b>	<b>100</b>
		VRPSO	171,9321	213,214	31,236	0,0001	0,00008	56,18002
		SSA	168,5703	183,762	10,2317	0,00011	0,00011	75,90079
		SA	155,9309	186,136	20,9334	0,00011	0,00009	64,37338
Scenarij 3: Uklop tereta	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,0202</b>	<b>0,02328</b>	<b>0,00238</b>	<b>0,91121</b>	<b>0,9789</b>	<b>100</b>
		VRPSO	0,0276	0,03322	0,00647	0,68537	0,78547	80,24077
		SSA	0,0210	0,02299	0,00162	0,91655	0,86795	88,66579
		SA	0,0255	0,02675	0,00086	0,77166	0,7844	80,13086
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	83,5679	104,943	27,0206	0,00014	0,00017	74,04005
		VRPSO	181,7034	1657,73	2263,09	0,00006	0,00012	52,40575
		SSA	<b>62,1954</b>	<b>119,003</b>	<b>42,8986</b>	<b>0,00017</b>	<b>0,00023</b>	<b>100</b>
		SA	94,0015	156,668	46,1973	0,00012	0,00011	46,57347
Scenarij 4: Ispad tereta (2s)	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,1745</b>	<b>0,22212</b>	<b>0,04238</b>	<b>0,08325</b>	<b>0,09701</b>	<b>100</b>
		VRPSO	0,2735	0,38524	0,10517	0,06009	0,04522	46,61067
		SSA	0,2260	0,30553	0,05664	0,0677	0,0832	85,76128
		SA	0,2015	0,26124	0,03984	0,07344	0,06826	70,36895
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	<b>338,0256</b>	<b>418,138</b>	<b>51,258</b>	<b>0,00005</b>	<b>0,000044</b>	<b>88,92826</b>
		VRPSO	456,1209	608,073	97,8871	0,00004	0,000031	63,19624
		SSA	425,6750	473,444	47,945	0,00004	0,000047	97,37717
		SA	408,1960	435,649	29,6766	0,00004	0,000048	100

- *podebljani font* – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji za metodu i scenarij
- *zelene ćelije* – najbolji analitički pokazatelji konvergencije

Pokazatelji moći konvergencije također pokazuju da algoritmi novije generacije i u tom segmentu daju bolje rezultate u jednociljnom optimizacijskom procesu. Najbolje konvergencijske moći u 6 od 8 slučajeva daje ALO, dok po jedan daju SSA i SA algoritam. U slučaju ispitivanja TAFM modela algoritmi novije generacije pokazuju bolju pouzdanost i moć konvergencije od klasičnih algoritama. Slike 6.60 i 6.61 prikazuju preglede najboljih rješenja i moći konvergencije, dok su u tablici 6.5 prikazana najbolja rješenja/parametri dobiveni jednociljnim optimizacijskim procesima.



Slika 6.60. TAFM – pregled najboljih rješenja  $f_{best}$  algoritama po scenarijima i metodama



Slika 6.61. TAFM – pregled moći konvergencije  $C_r$  algoritama po scenarijima i metodama

Tablica 6.5 TAFM – najbolja rješenja dobivena jednociljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama

	Scenarij 1 – APU+kratki spoj				Scenarij 2 – kratki spoj				Scenarij 3 – uklop tereta				Scenarij 4 – ispad tereta (2s)			
	$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$		$f_1(t), (4.2)$	
	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA	ALO	VRPSO	SSA	SA
$T_{2n,PSS3}$	$T_{1d,PSS3}$	$T_{1n,PSS3}$	$K_{PSS3}$	$T_{2d,PSS2}$	$T_{2n,PSS2}$	$T_{1d,PSS2}$	$T_{1n,PSS2}$	$K_{PSS2}$	$T_{2d,PSS1}$	$T_{2n,PSS1}$	$T_{1d,PSS1}$	$T_{1n,PSS1}$	$K_{PSS1}$			
3,55646	0,04977	3,18150	22,02484	2,74169	2,96930	0,61708	0,38068	2,61708	0,92800	2,11213	0,01715	1,94346	52,55699			
4,47184	0,09868	0,59817	1,00000	0,05000	1,38583	0,01801	1,96661	8,18476	0,05000	4,65607	0,00500	0,61880	12,77796			
5,07101	5,00000	3,32913	19,92425	7,56910	2,60708	1,78547	3,21516	27,33410	19,81212	8,70280	0,03073	2,68979	55,20436			
4,81600	0,73431	3,47966	75,27457	3,18815	2,68892	0,09680	1,96601	10,61082	2,43955	0,05000	0,52945	0,00500	46,29912			
9,89067	0,41165	0,48391	1,17450	0,13016	4,71080	0,02724	0,06557	58,96720	8,71299	8,41496	2,03490	3,31973	3,85468			
0,05000	0,00500	0,02526	1,00000	0,05000	0,05000	0,31417	0,00995	1,00000	0,05000	0,05000	0,40767	0,00500	1,00000			
0,07055	4,98926	4,79338	17,32022	23,71834	2,51214	2,65122	1,44202	172,78625	0,82267	14,82988	2,44157	0,00506	10,78964			
9,46538	0,58141	0,58141	1,00000	2,92918	1,77520	0,00500	0,58141	29,73411	15,85290	5,55556	2,06477	0,00500	62,54037			
0,41089	2,19802	0,98224	1,02493	18,44711	4,29895	2,19516	0,14011	51,22585	0,36634	4,54762	0,07281	0,67385	24,88627			
2,44790	0,06746	1,07379	17,95385	1,37472	0,05000	0,00500	0,34653	1,00000	3,51209	0,05000	0,00500	2,09900	1,00000			
3,67549	0,00500	4,98737	8,12982	14,18859	13,62921	3,54403	0,37436	10,00275	7,38418	3,61089	0,00500	4,27048	33,78905			
1,77072	0,17975	1,91141	6,51772	1,35159	0,05000	0,00552	1,26736	1,00000	0,05000	0,27461	0,00500	2,52764	1,00000			
4,40443	0,05111	0,07920	24,53412	5,02172	2,39650	0,01170	1,78112	138,17505	2,81659	2,51255	0,00920	1,50864	55,49564			
0,40872	0,00500	2,33399	30,85070	5,98063	0,05000	0,00500	0,00500	1,00000	0,05000	1,26937	0,00500	0,00500	1,00000			
12,93257	0,00500	0,35581	224,76262	0,22628	7,57616	0,10071	0,05448	2,85050	6,04630	13,22089	4,96966	1,46337	249,41827			
1,14176	0,00500	3,03238	111,71078	20,37293	13,88080	2,75961	1,37596	15,84138	12,07640	3,51482	0,03576	0,56646	126,62671			
1,65093	2,42054	2,13313	1,00000	15,38199	0,06927	0,24037	3,18164	1,19287	1,68984	2,49058	1,27597	0,52985	1,00000			
10,53061	0,34152	1,00815	1,00000	2,72459	1,98883	0,22233	0,00500	1,00000	7,73799	1,11416	0,03460	0,37815	95,68357			
14,72181	4,34491	4,98523	104,37077	0,12788	0,27417	1,75790	1,97281	1,11380	21,64048	14,95873	1,65433	3,56660	195,97700			
1,51294	0,01967	3,34492	30,56985	2,98688	2,30303	0,56937	2,13162	9,89871	0,05000	1,08907	0,93405	1,95231	6,62611			
6,88640	0,01249	1,15750	58,75841	9,24849	5,88290	0,09684	1,38764	27,85959	0,47909	3,27704	0,41268	1,19952	1,11152			
0,05000	0,00500	0,70011	103,08379	0,05000	0,05000	0,00500	0,00500	1,00000	1,47727	9,01717	1,12071	2,09110	1,00000			
2,62194	0,00791	4,85366	50,06070	0,08883	1,41544	4,97753	0,20740	240,74462	3,40930	4,64591	0,02469	1,75761	12,13111			
9,54240	0,00500	1,93413	30,07550	0,05000	7,21781	1,24042	0,32056	5,32237	15,79251	8,54509	0,31593	0,31593	165,43418			
6,19325	0,32807	1,70559	1,34029	0,43881	1,14020	0,02077	3,06854	1,00015	6,72616	0,10135	0,77482	1,68860	48,50410			
0,05000	0,09067	0,00500	1,00000	0,05000	0,05000	0,01737	0,49885	46,03003	0,33350	0,05000	0,01609	0,00500	1,00000			
3,46497	0,00500	2,92882	229,99674	12,11310	0,46716	4,12805	4,89194	119,64040	18,22103	1,87423	0,00500	3,50760	223,20159			
4,74046	0,24888	0,98591	2,93464	0,13105	0,05000	0,10922	0,11859	18,44990	3,49779	3,65686	0,20410	0,02123	1,80888			
0,41233	0,00501	0,66970	99,05951	0,16021	2,74875	0,67505	1,15041	18,02662	1,14390	0,36784	0,99751	2,79101	5,51189			
0,05000	0,00500	0,00500	1,00000	0,05000	0,05000	0,04906	0,00500	1,00000	0,05000	0,05000	0,00500	0,87516	1,00000			
0,42369	4,94511	4,94488	24,52689	20,98355	4,74580	4,92465	0,33620	217,21731	5,46071	2,61047	0,03530	4,93831	90,45327			
3,66262	0,35299	0,72385	6,57923	7,13299	1,75017	0,12236	0,16423	2,26456	3,50672	2,33839	0,11692	0,03037	1,72441			



Usporedbom pojedinih metoda u tablici 6.2 prikazana je učinkovitost pojedine jednociljne metode obzirom na obje ciljne funkcije za TFM model. Učinkovitost metode ciljnom funkcijom  $f_1(t)$  je potpuna u odnosu na svoju ciljnu funkciju. Metoda optimizacije ciljnom funkcijom  $f_2(t)$  je učinkovita u 16 od 18 slučajeva, odnosno samo u dva slučaja je optimizacija metodom  $f_1(t)$  dala bolje rezultate i za ciljnu funkciju  $f_2(t)$  od slučaja kada je algoritam ispitivan metodom  $f_2(t)$ .

Tablica 6.6 Usporedba efikasnosti ciljnih funkcija algoritama, TAFM model, jednociljna optimizacija

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_1(t)$ (4.2)	$f_2(t)$ (4.3)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,315453</b>	1170,339503
		VRPSO	<b>0,459168</b>	1335,850902
		SSA	<b>0,317465</b>	1215,025866
		SA	<b>0,369640</b>	1153,045781
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	1,285781	<b>701,786700</b>
		VRPSO	1,014569	<b>1069,646917</b>
		SSA	1,375355	<b>515,488851</b>
		SA	0,937332	<b>817,714054</b>
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,072107</b>	171,770927
		VRPSO	<b>0,082448</b>	183,113218
		SSA	<b>0,068458</b>	<b>157,770653</b>
		SA	<b>0,066549</b>	171,075430
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	0,117714	<b>131,567827</b>
		VRPSO	0,195862	<b>171,932056</b>
		SSA	0,101881	168,570296
		SA	0,092597	<b>155,930935</b>
Scenarij 3: Uklop tereta	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,020151</b>	148,727498
		VRPSO	<b>0,027614</b>	<b>152,071799</b>
		SSA	<b>0,020972</b>	115,160632
		SA	<b>0,025510</b>	124,225429
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	0,319931	<b>83,567918</b>
		VRPSO	0,073640	181,703373
		SSA	0,059433	<b>62,195415</b>
		SA	0,048043	<b>94,001505</b>
Scenarij 4: Ispad tereta (3s)	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	<b>0,174501</b>	478,958793
		VRPSO	<b>0,273532</b>	595,930905
		SSA	<b>0,226016</b>	532,825197
		SA	<b>0,201473</b>	549,641265
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	0,407190	<b>338,025604</b>
		VRPSO	0,422570	<b>456,120911</b>
		SSA	0,570620	<b>425,674990</b>
		SA	0,263069	<b>408,195951</b>

Usporedba odziva prikazuje veću uspješnost metode  $f_2(t)$  u suzbijanju oscilacija u razlikama brzina vrtnje, ali i manju uspješnost u smirivanju odziva napona i tokova snaga, koji su sastavni dio ciljne funkcije  $f_1(t)$ . Kao i u prethodnom ispitnom modelu i ovdje je vidljiva različitost u parametranju dvjema ciljnim funkcijama, koja je prisutna u zadnjim ciklusima

optimizacije. Kod početnih iteracija, kada nastupa grubo podešavanje parametara ciljne funkcije pomažu jednu drugoj, dok finije podešavanje opet često pokazuje obrnuto proporcionalno ponašanje jedne ciljne funkcije naspram druge.

Kada su performanse u pitanju VRPSO algoritam je opet dao najlošije rezultate, te se i u ovom slučaju prilikom optimizacije metodom  $f_2(t)$  pojavile oscilacije vrlo niskih frekvencija (scenarij 4, odzivi napona). Spomenute frekvencije su problem pri istom scenariju i metodi i za ostale algoritme, ali u puno manjem obimu.

Razlika u performansama dviju ciljnih funkcija je također vidljiva i kod algoritama u scenariju 3. Budući se ovdje radi o vrlo malim iznosima (reda  $10^{-4}$  p.u.), i vrlo malih iznosa elemenata napona i razlika brzina, računski postaje dominantan iznos prenesene snage kao posljednji element u ciljnoj funkciji  $f_1(t)$ . Prenesena snaga iz područja A u područje B je u slučaju scenarija 3 veća za 4 MW nakon uklopa tereta. Tu dolazi do nekonzistentnosti između grafičkih prikaza i numeričkih podataka, jer odzivi dobiveni optimizacijom po funkciji  $f_2(t)$  daju grafički bolje odzive brzina vrtnje i napona armature, dok numerički podatci u tablicama 6.1 i 6.3 daju lošije rezultate, prvenstveno ako se obje funkcije promatra iz aspekta funkcije  $f_1(t)$ . SA algoritam jedini za odziv tokova snaga daje konzistentne rezultate za obje metode, međutim u oba slučaja biva tek treći po redu algoritam po performansama ako se promatraju obje metode u spomenutom scenariju. Scenarij 3 je jedini scenarij u kojem se sustav ne vraća u prvobitno stanje. Iako su promjene svih veličina puno manje u odnosu na „kvarne“ slučajeve ostalih scenarija, vidljivo je da obje metode daju oprečne rezultate kada su u pitanju prijelazna stanja vrlo malih promjena.

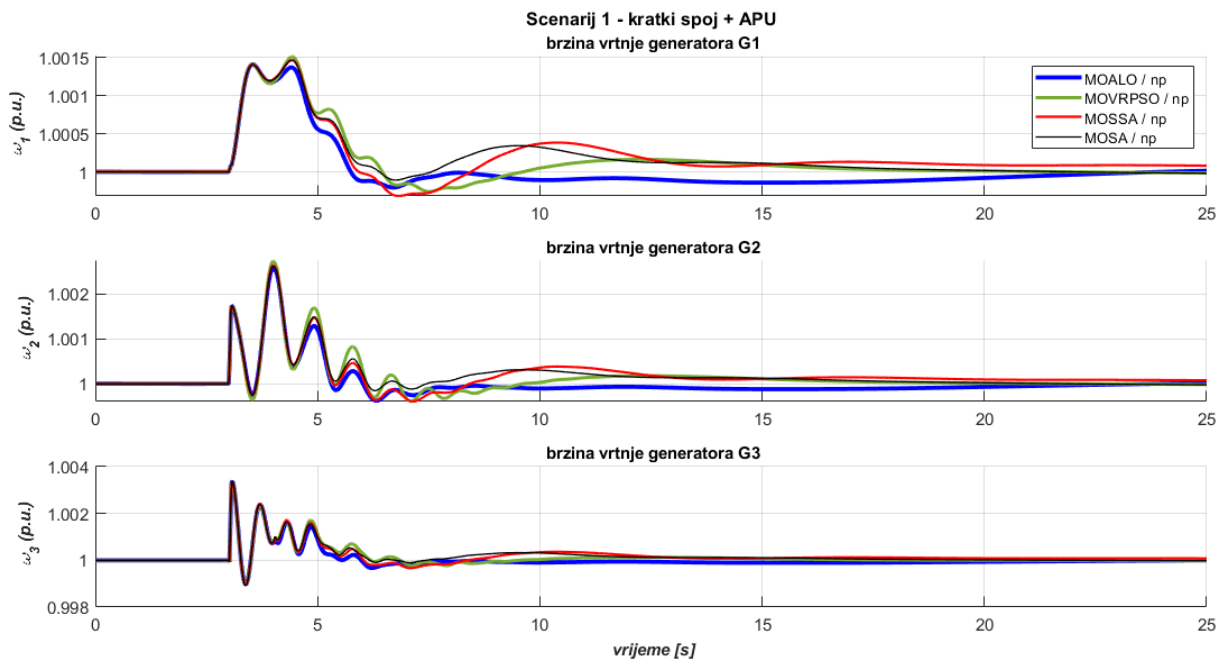
Iako navedeni problemi pokazuju nekonzistentnost u specifičnim slučajevima važno je naglasiti da su obje metode uspješne u optimizaciji parametara sa svrhom smanjivanja oscilacija u sustavu.

## **6.6 Parametriranje uzбудnih upravljačkih sustava višeciljnom optimizacijom**

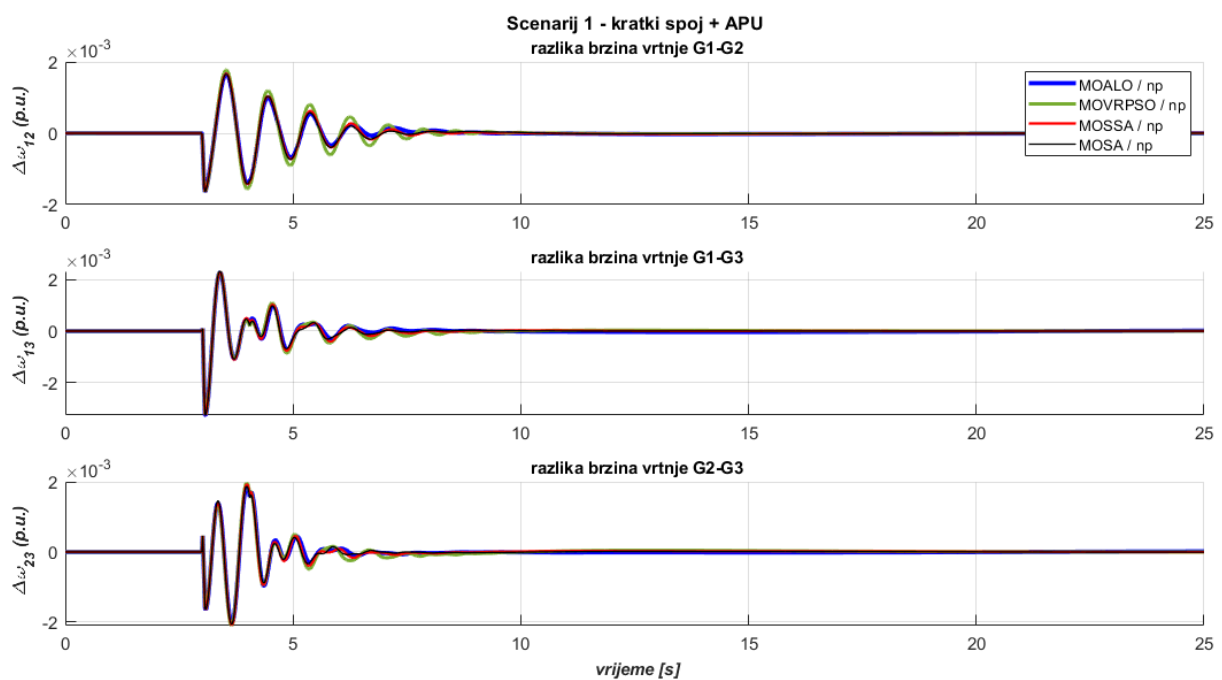
Kroz ovo potpoglavlje prikazani su rezultati rada optimizacijskih algoritama za višeciljnu optimizaciju kroz ciljne funkcije  $np$ , koja je definirana jednadžbom (4.9) i  $wm1/wm2$ , koje su definirane jednadžbom (4.11). Svi ostali inicijalni uvjeti su postavljeni kao i kod jednociljne optimizacije.



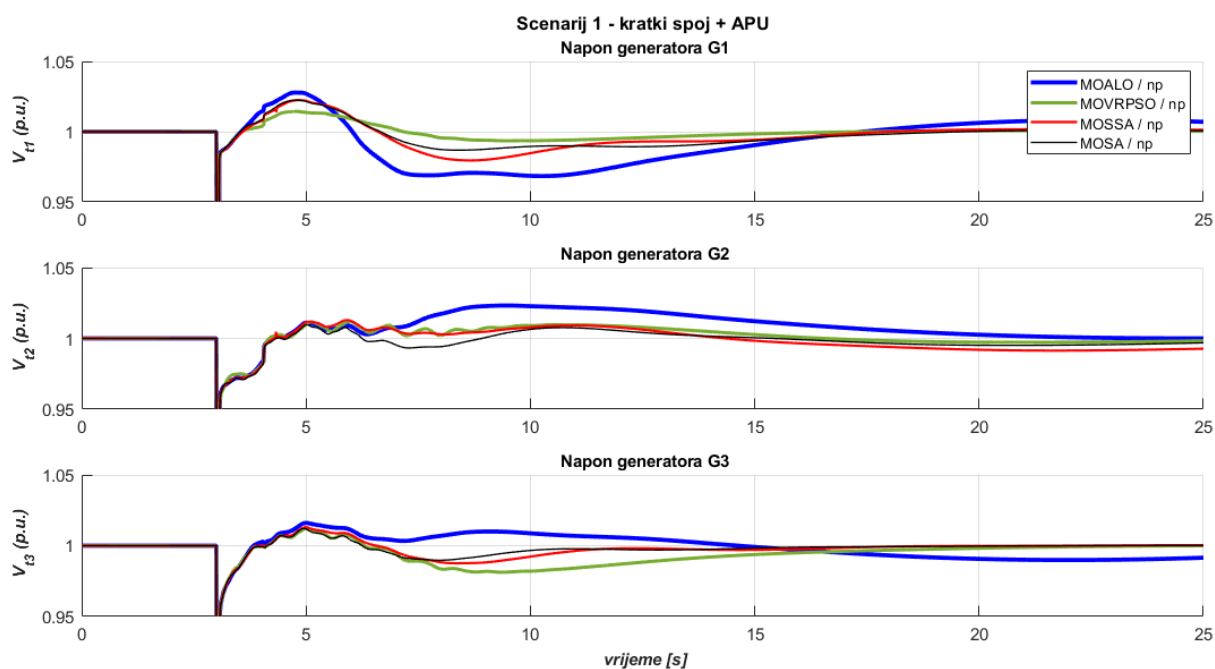
### 6.6.1 WSCC model - rezultati ispitivanja, višeciljna optimizacija



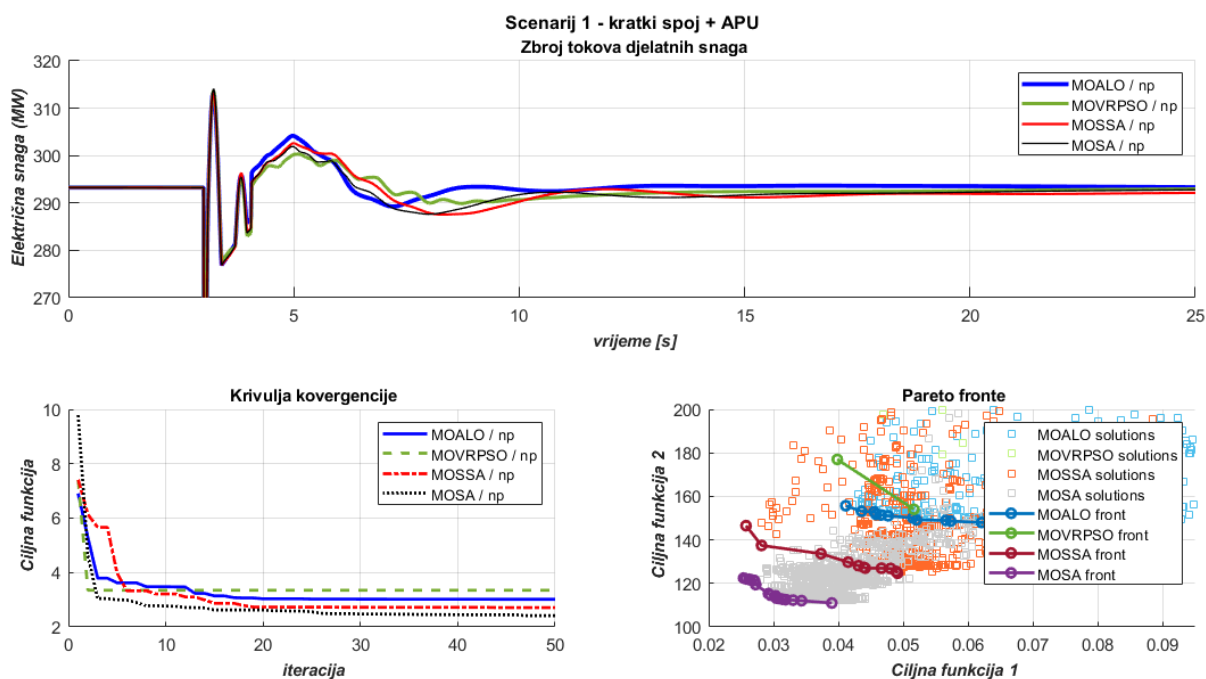
Slika 6.62. WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



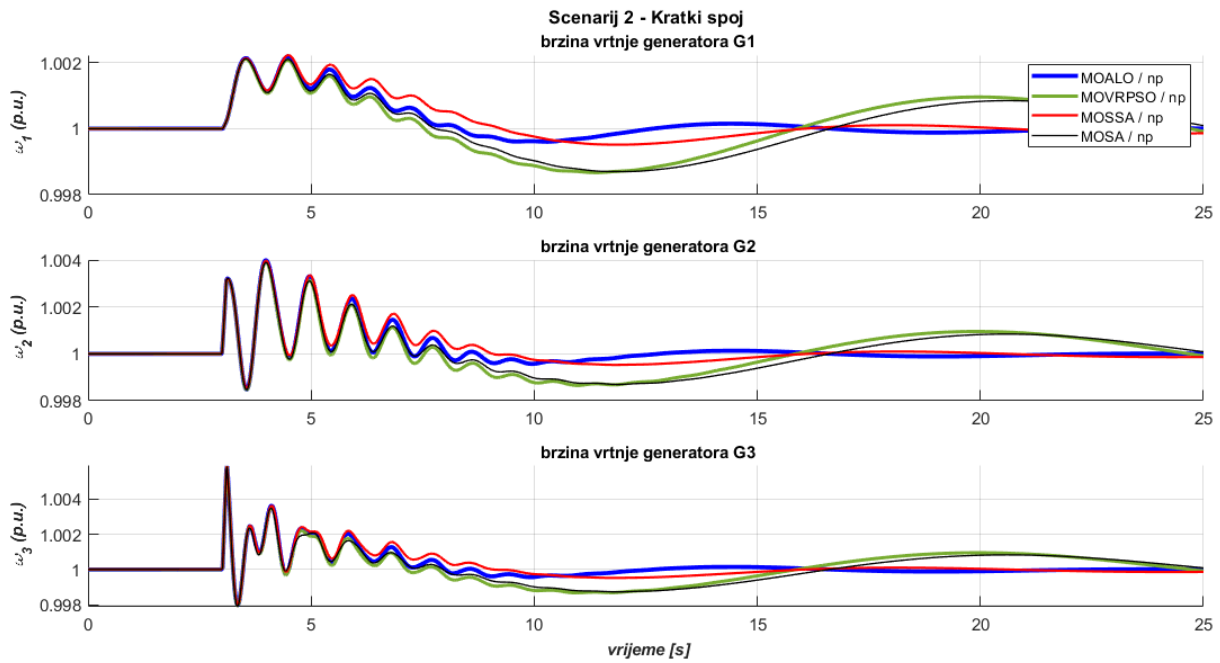
Slika 6.63. WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



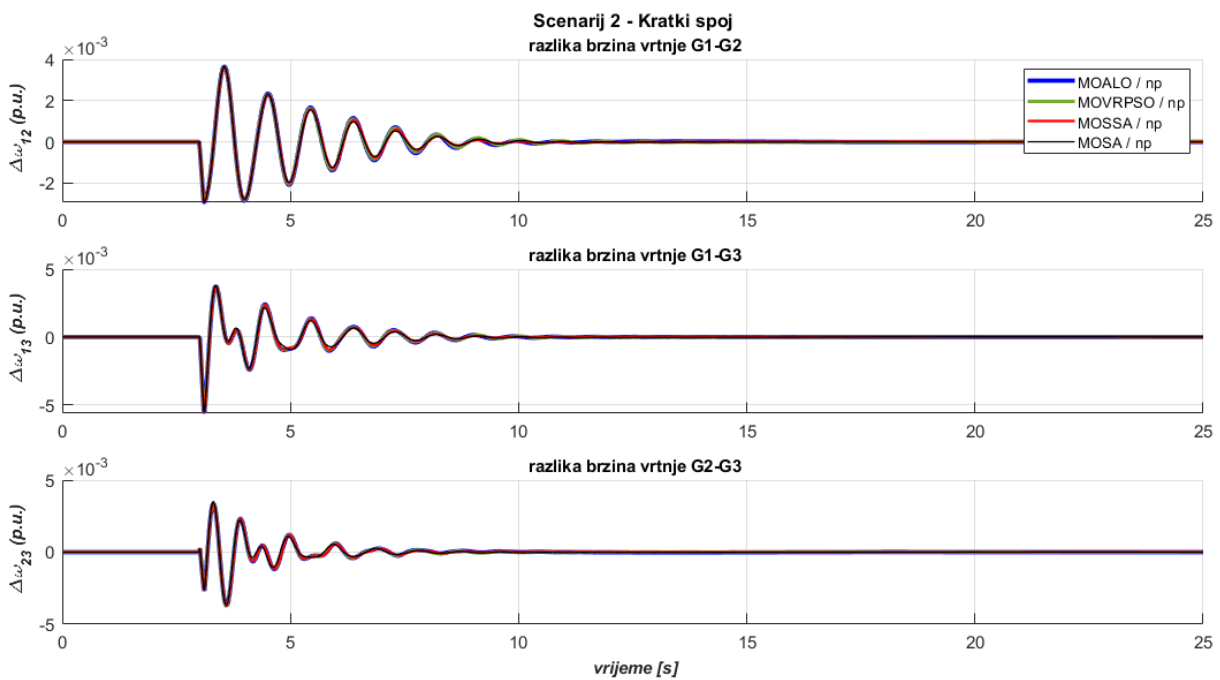
Slika 6.64. WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



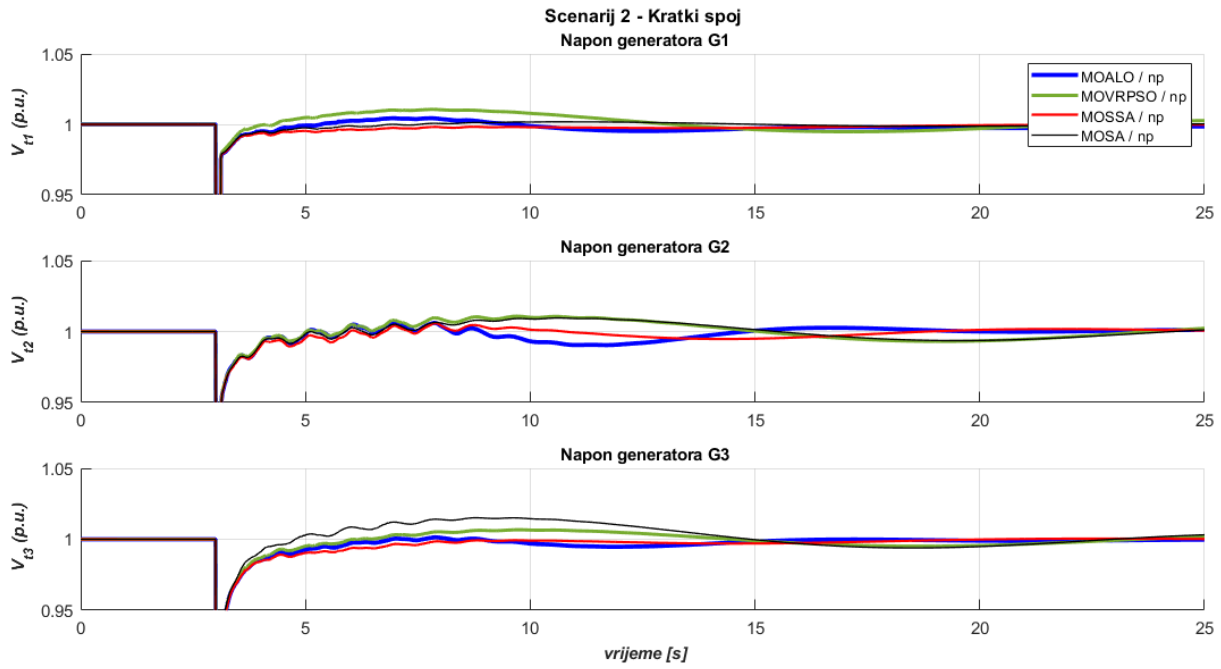
Slika 6.65. WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



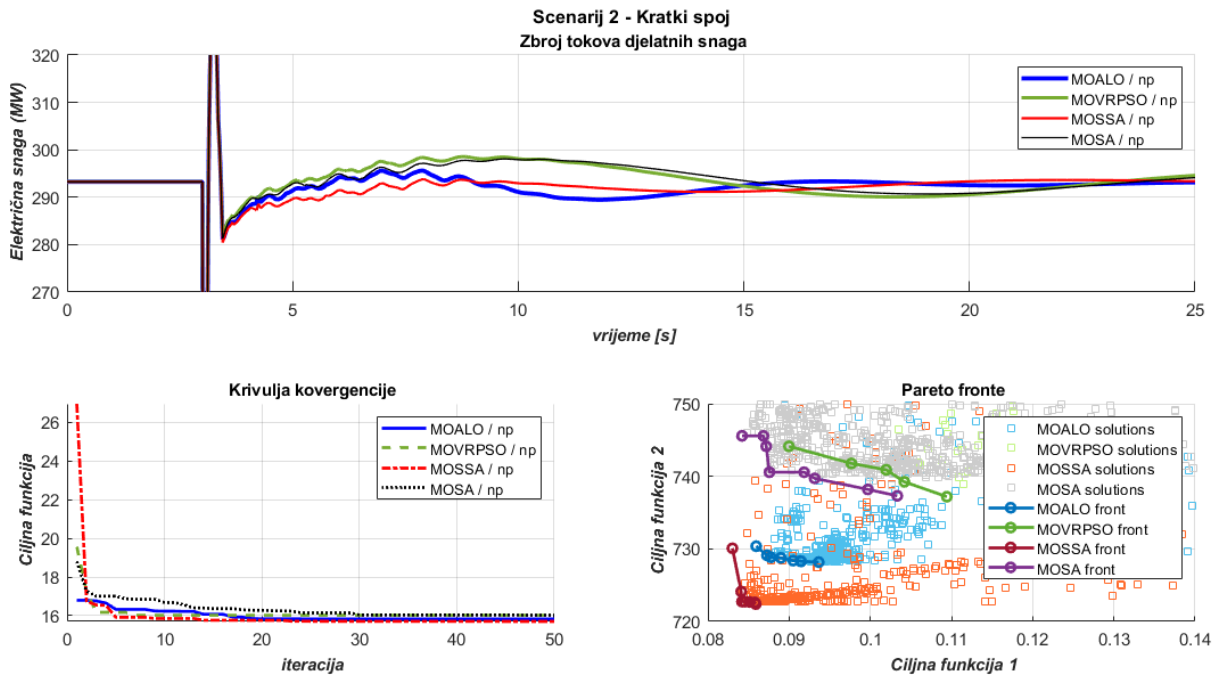
Slika 6.66. WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



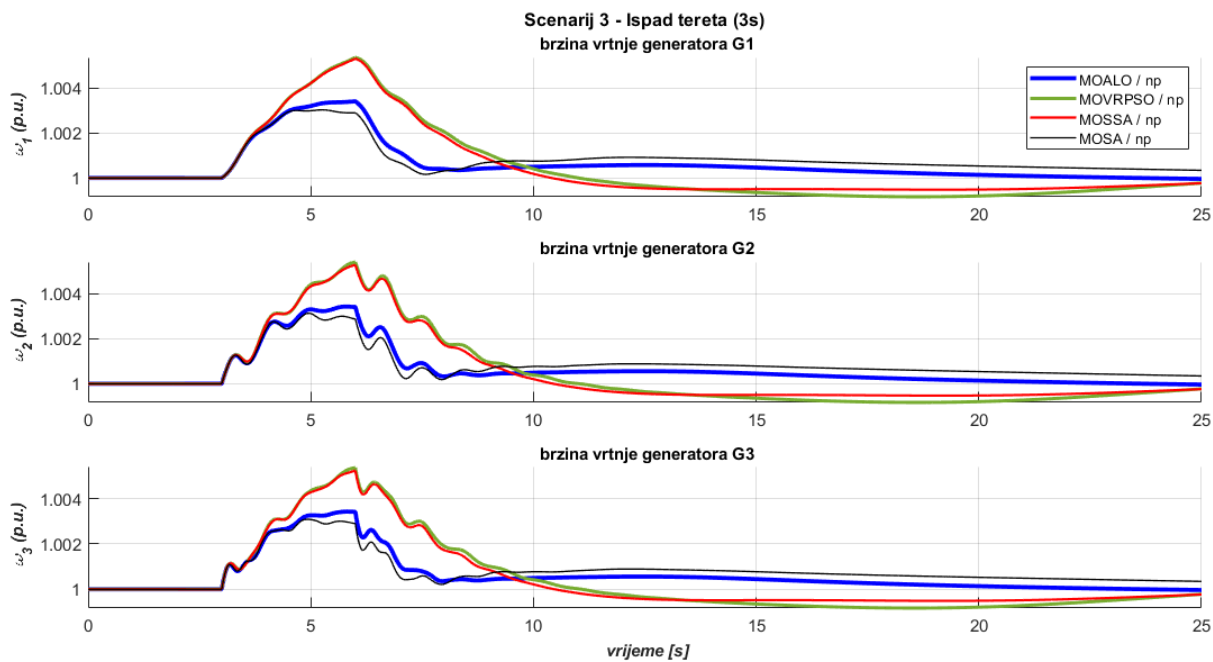
Slika 6.67. WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



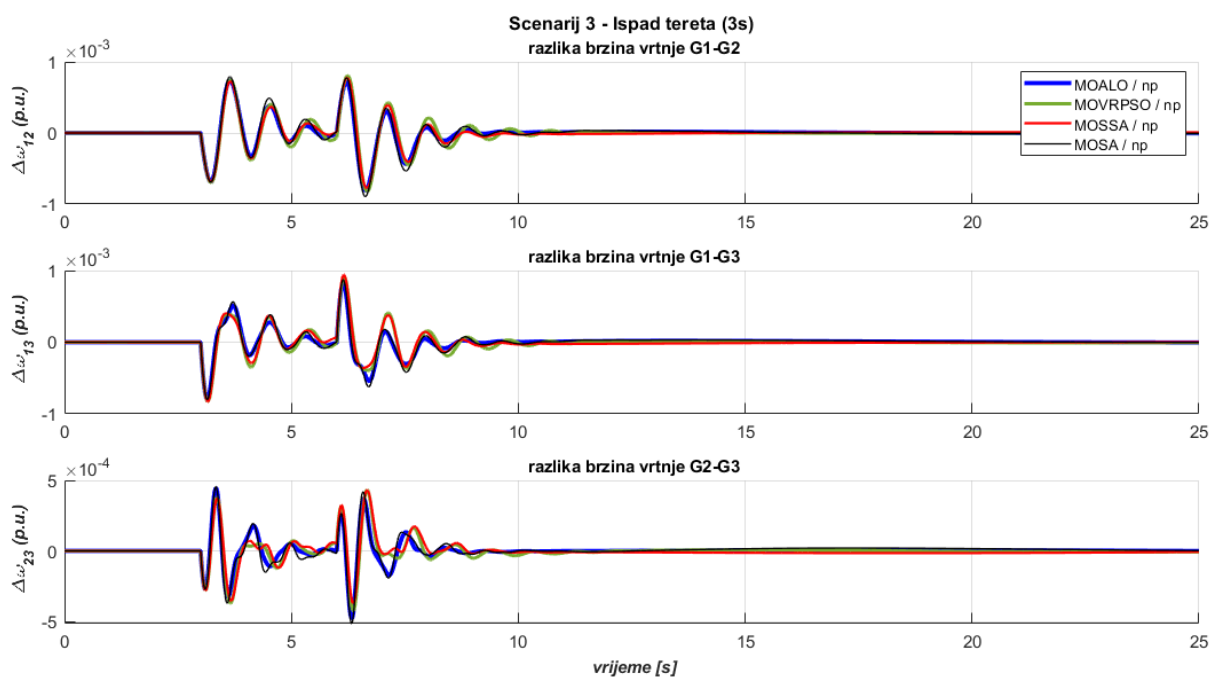
Slika 6.68. WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



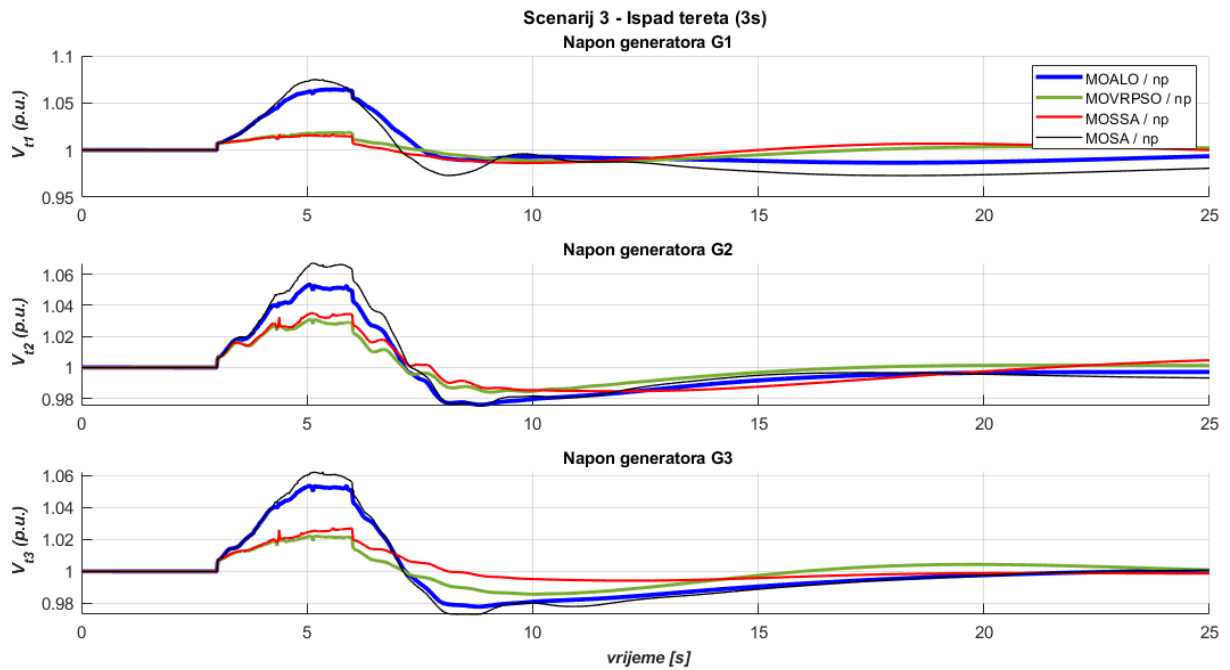
Slika 6.69. WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



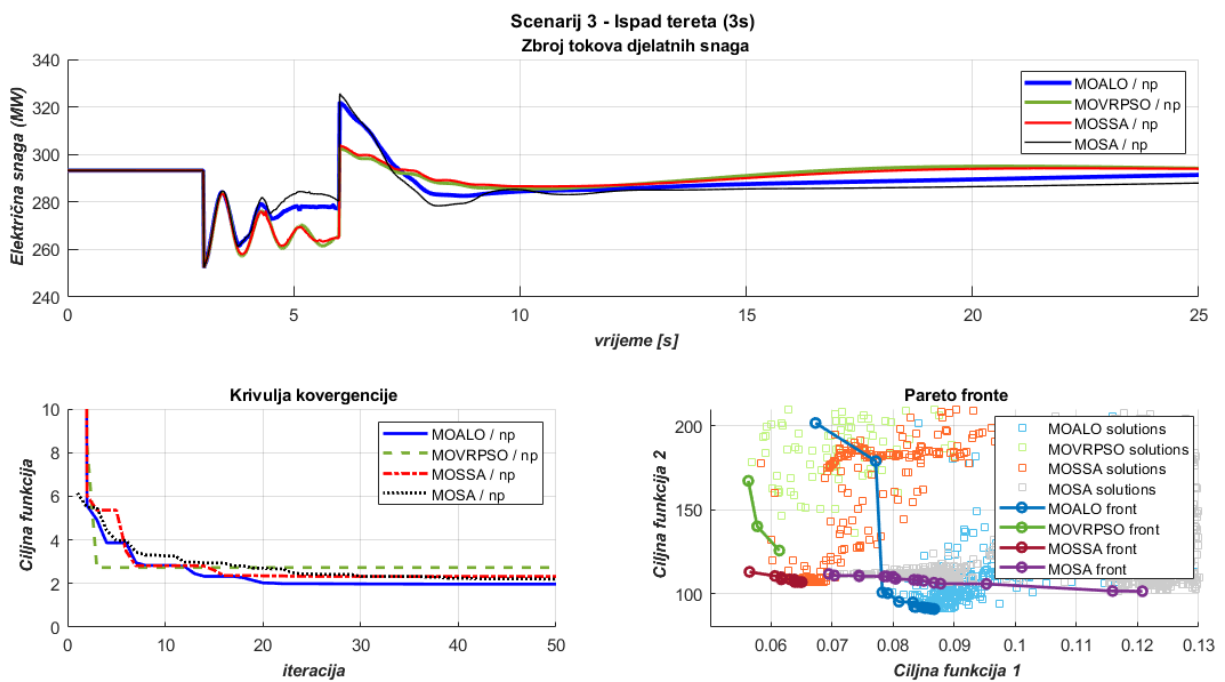
Slika 6.70. WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



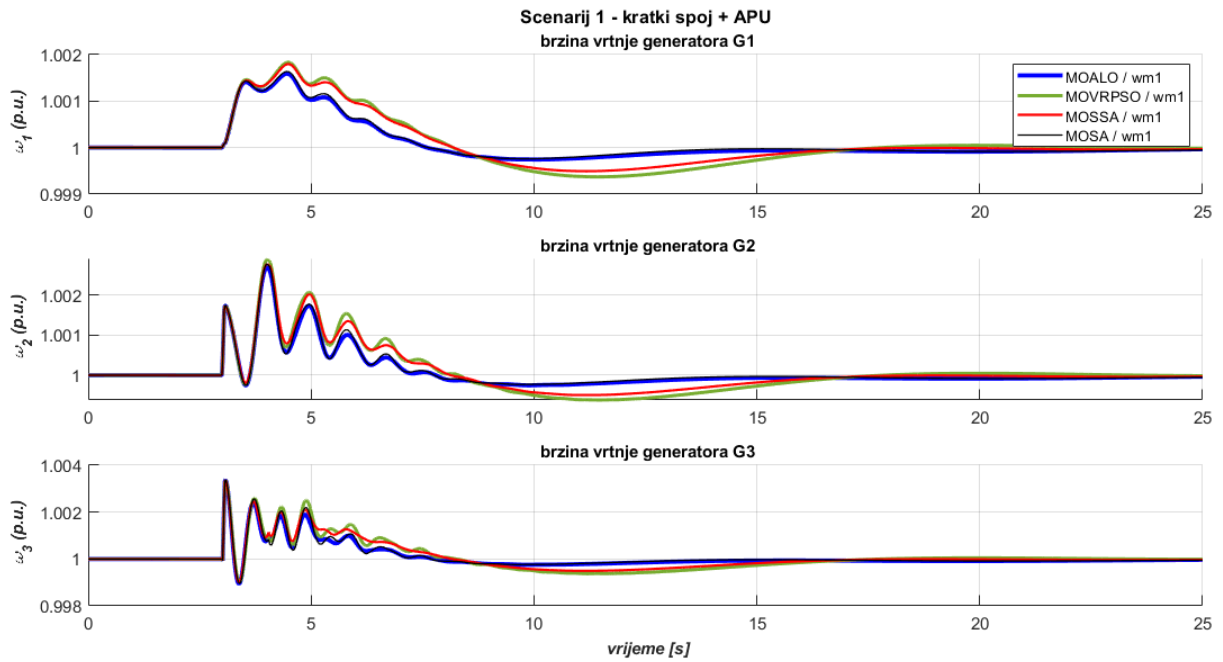
Slika 6.71. WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



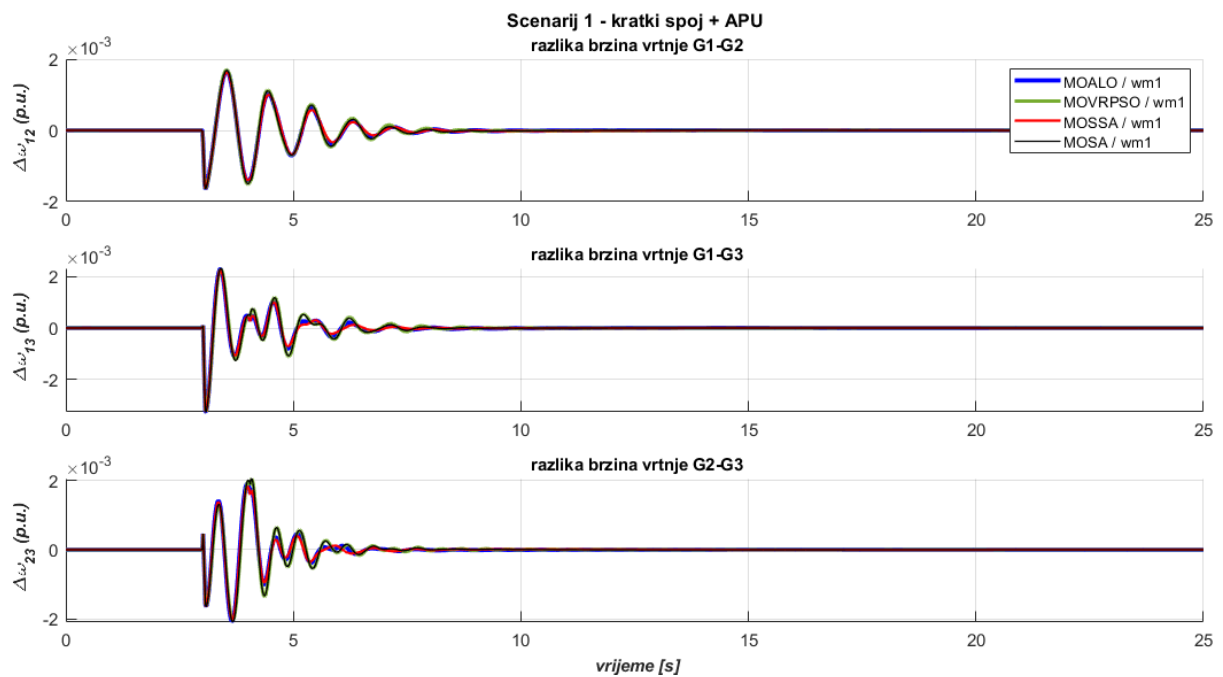
Slika 6.72. WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



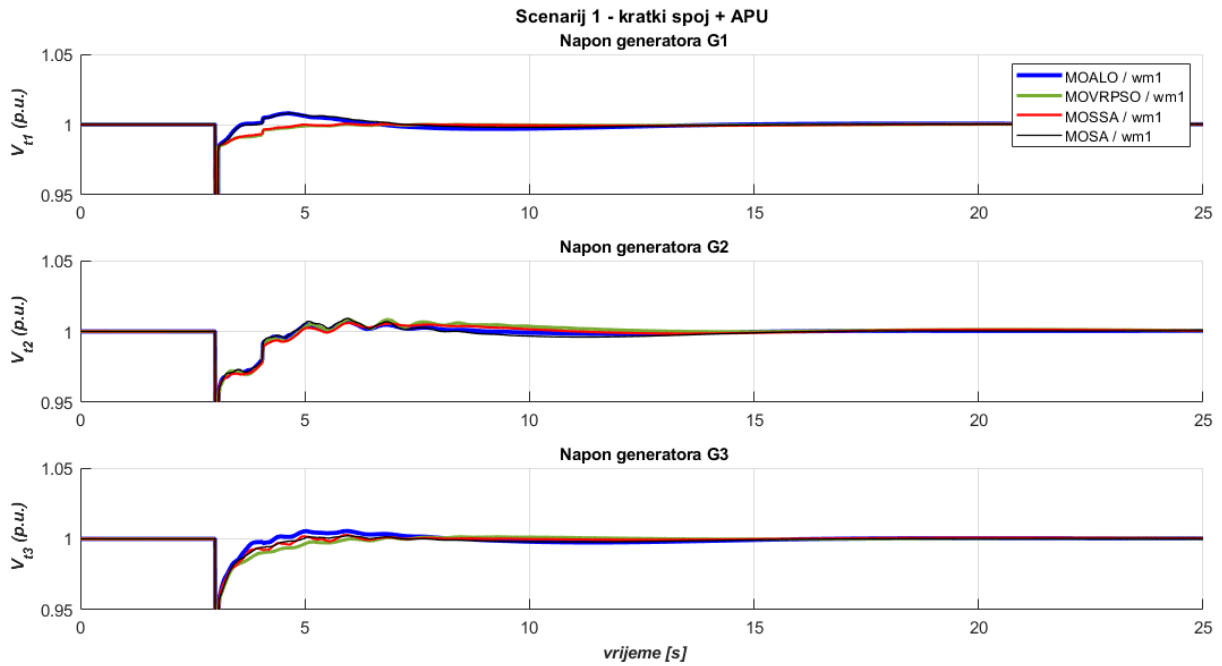
Slika 6.73. WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



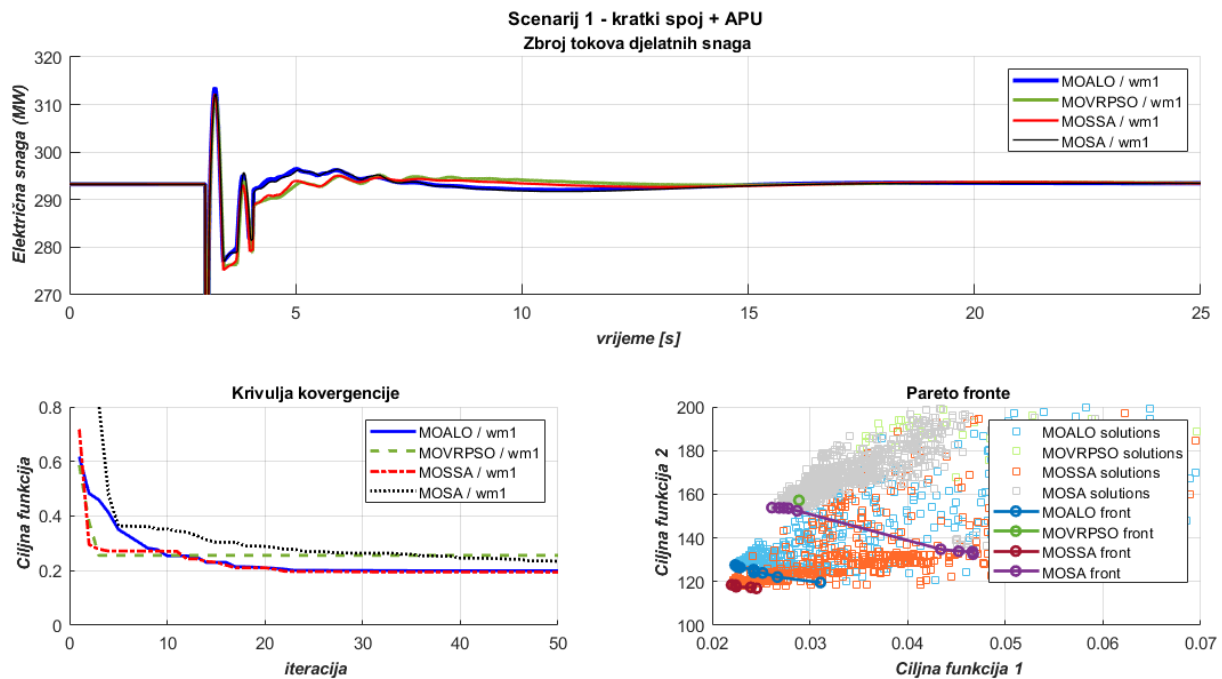
Slika 6.74. WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



Slika 6.75. WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)

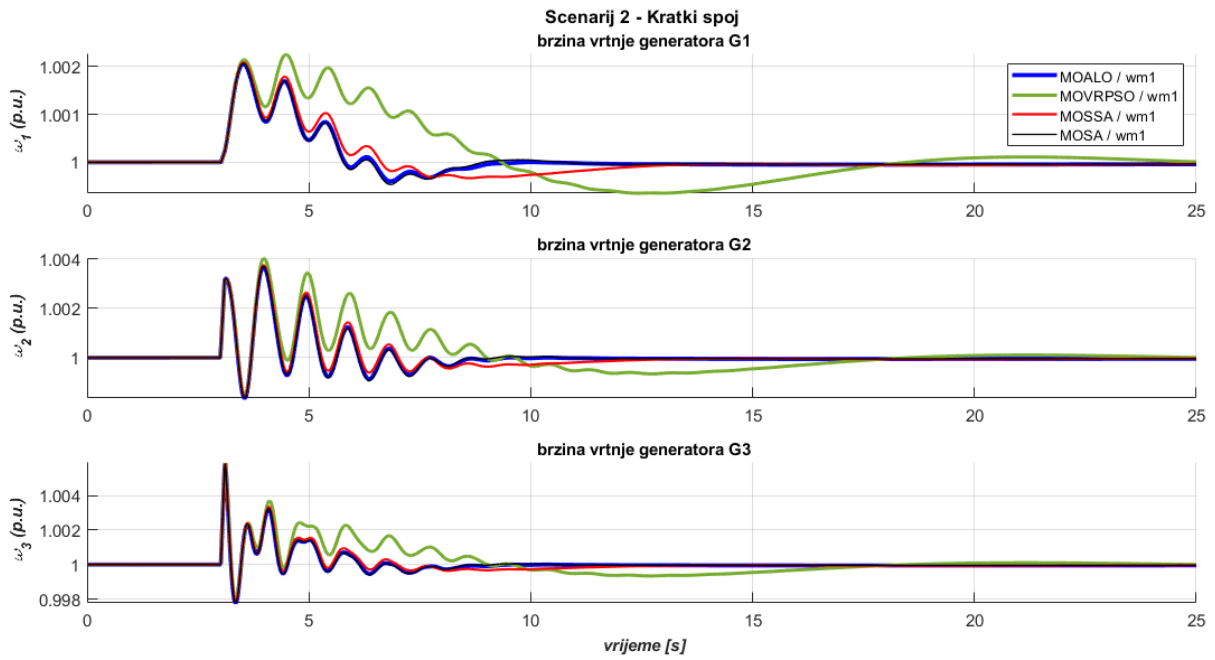


Slika 6.76. WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)

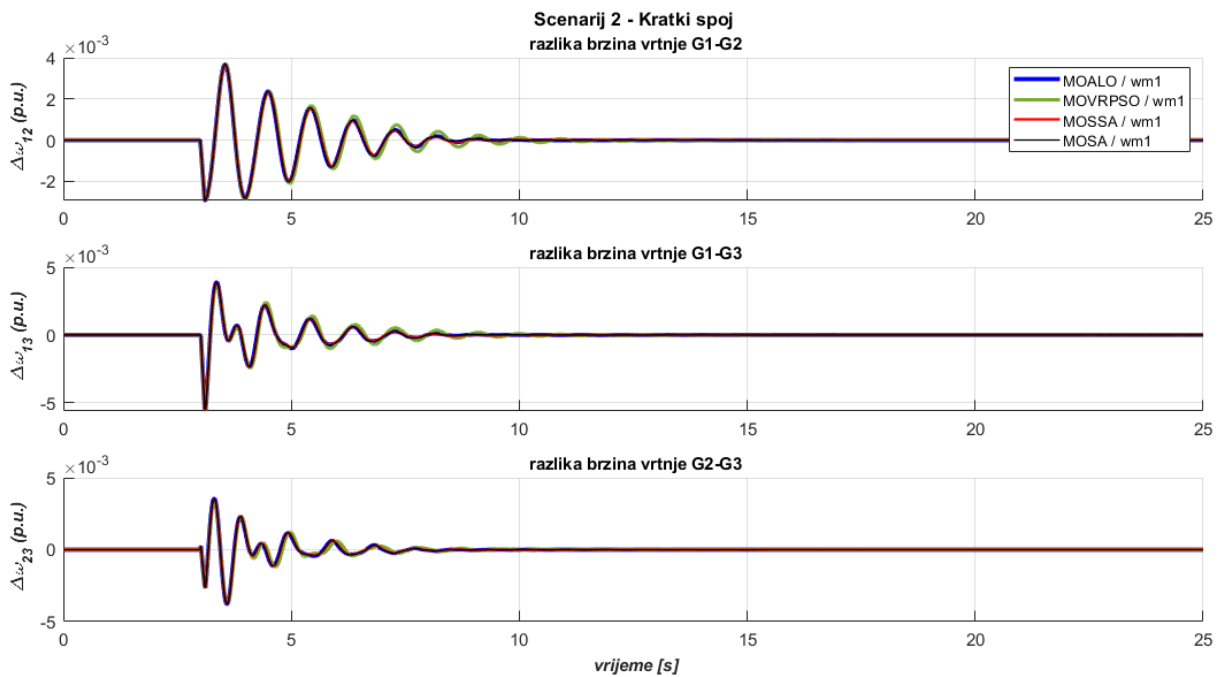


Slika 6.77. WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)

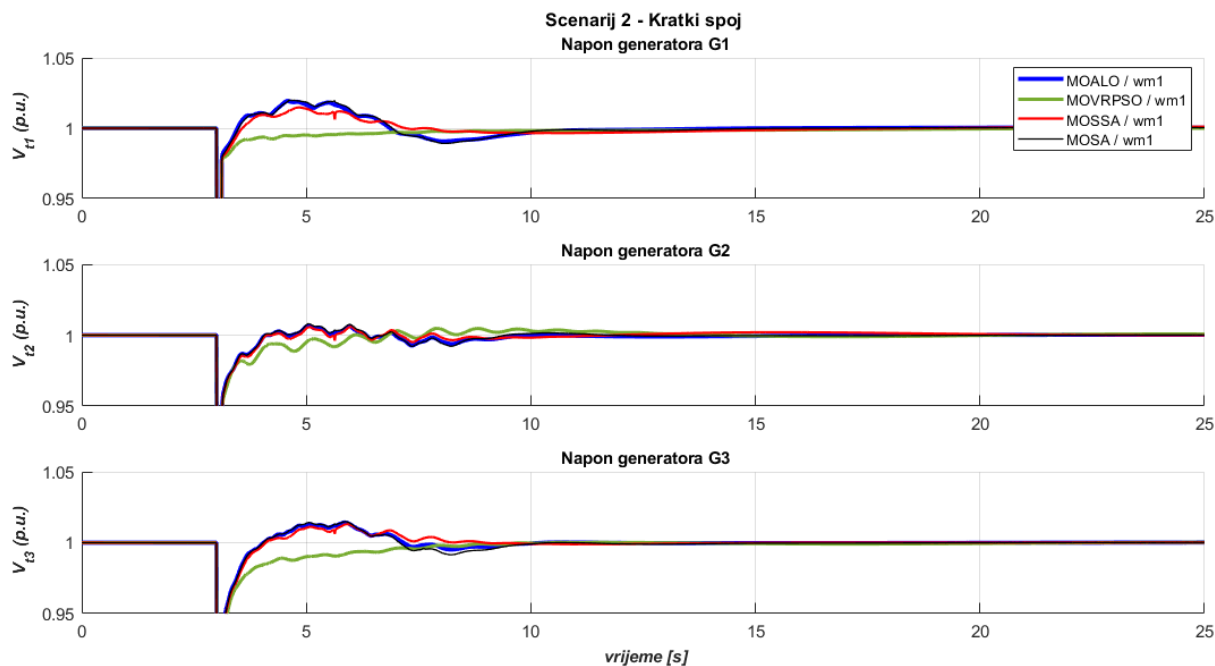




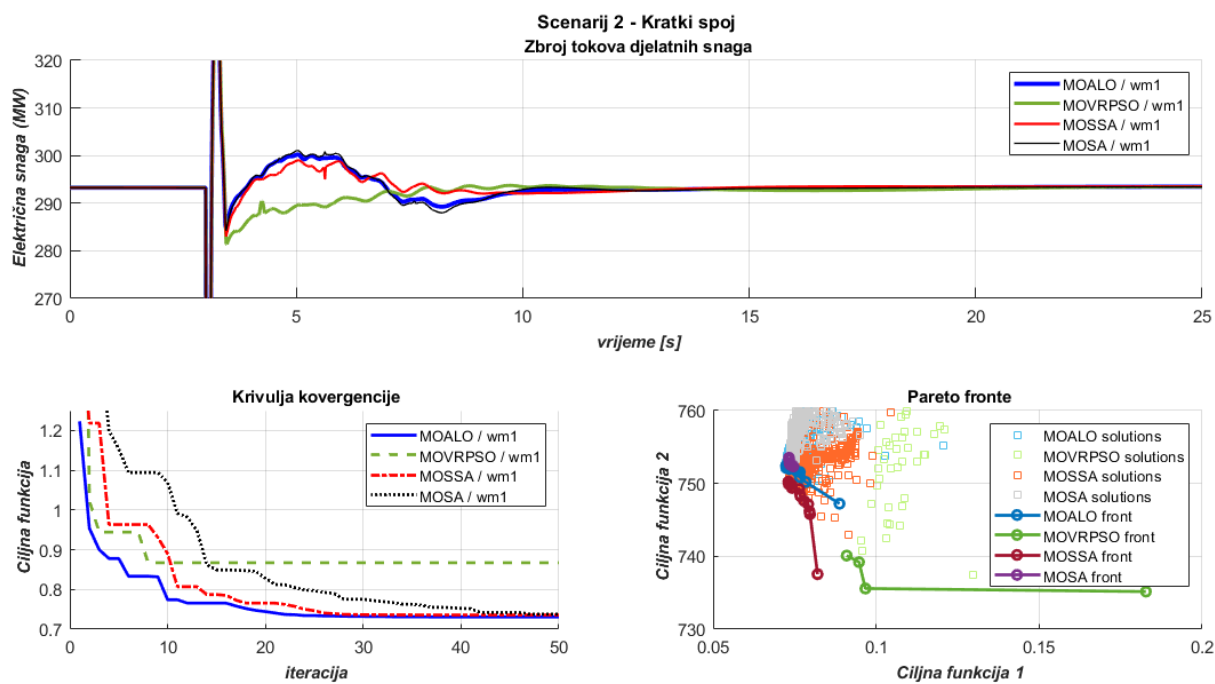
Slika 6.78. WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



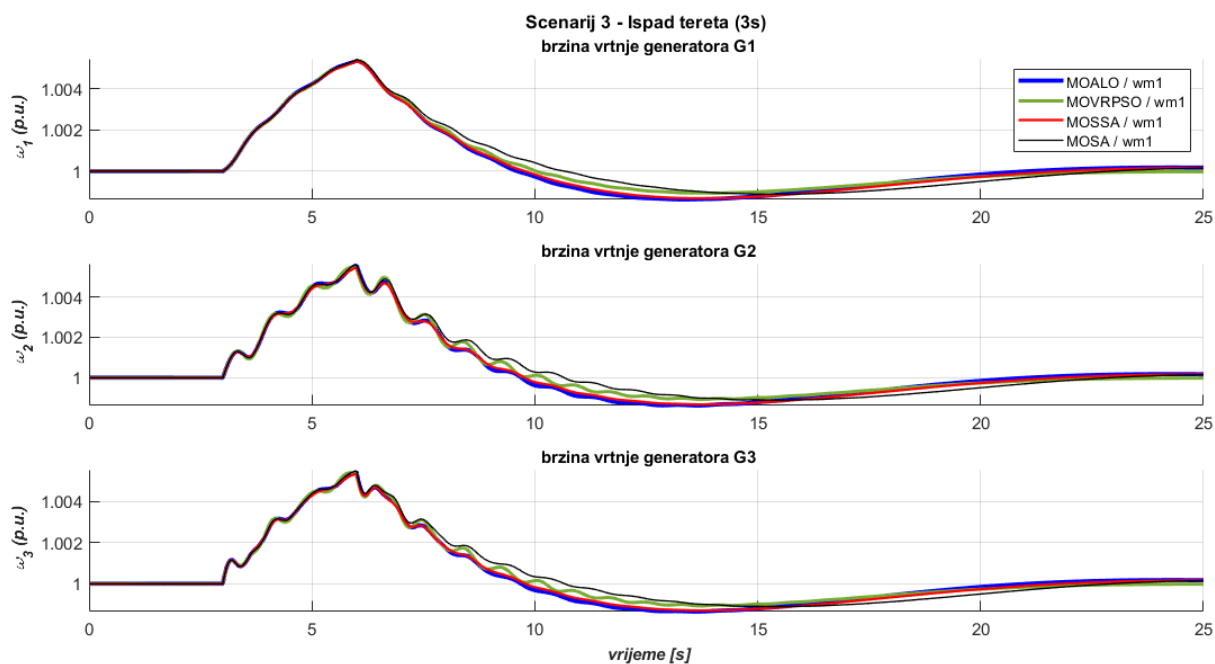
Slika 6.79. WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



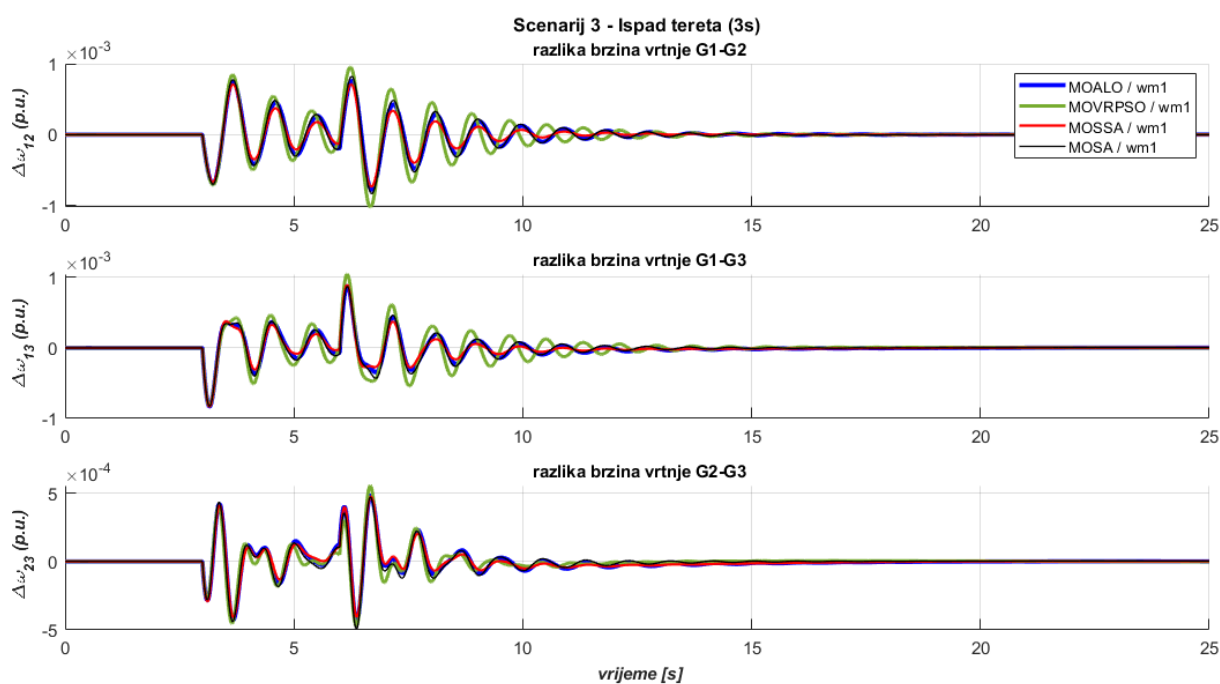
Slika 6.80. WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



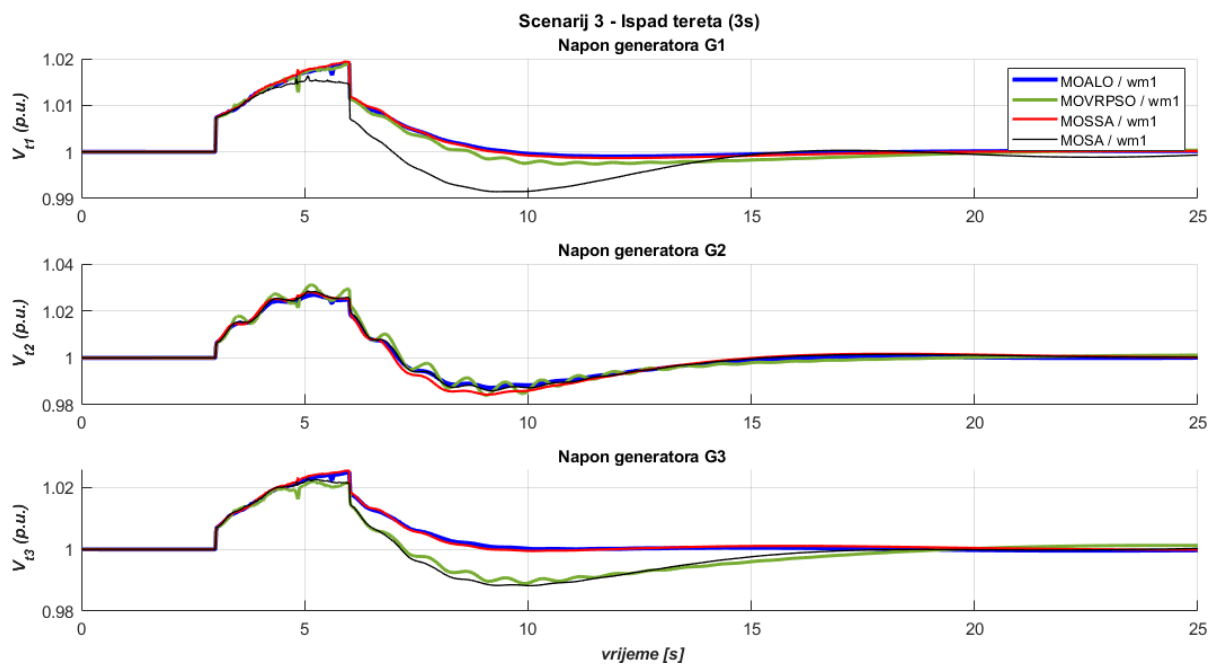
Slika 6.81. WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



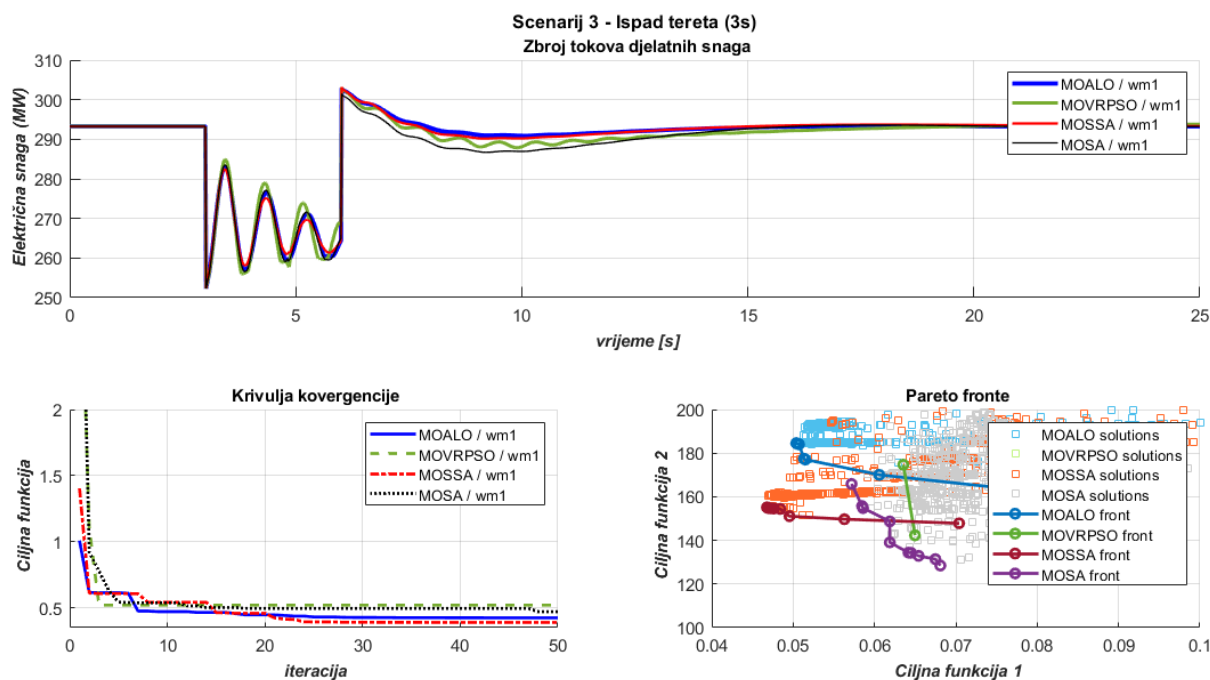
Slika 6.82. WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



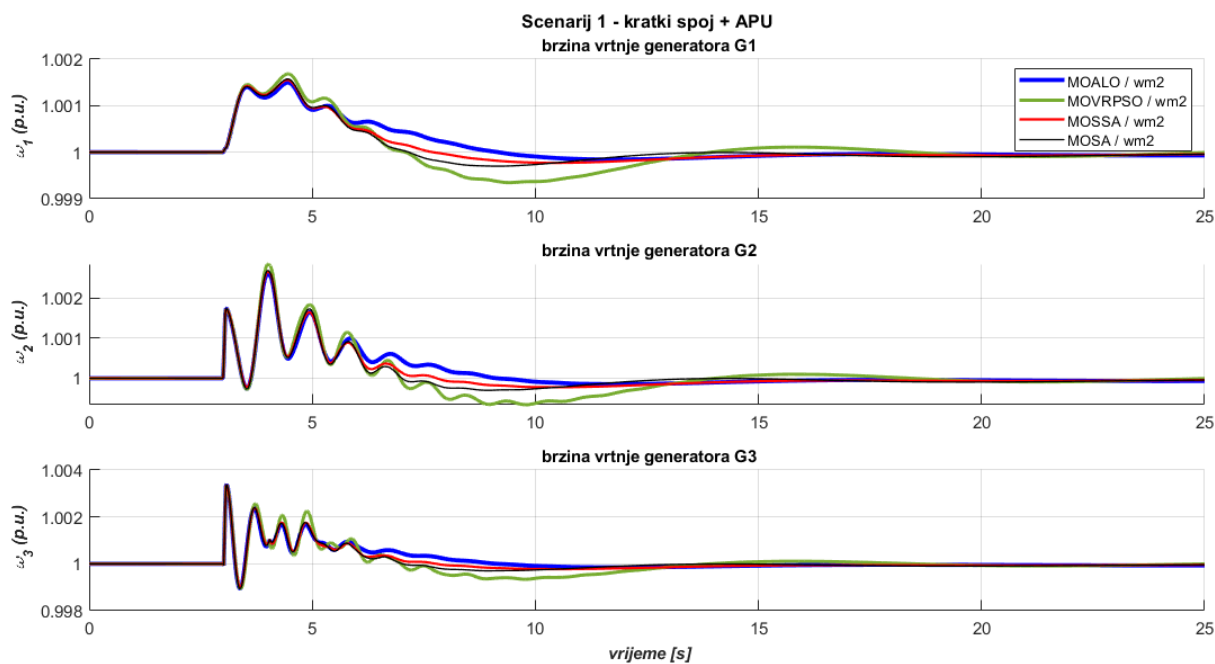
Slika 6.83. WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



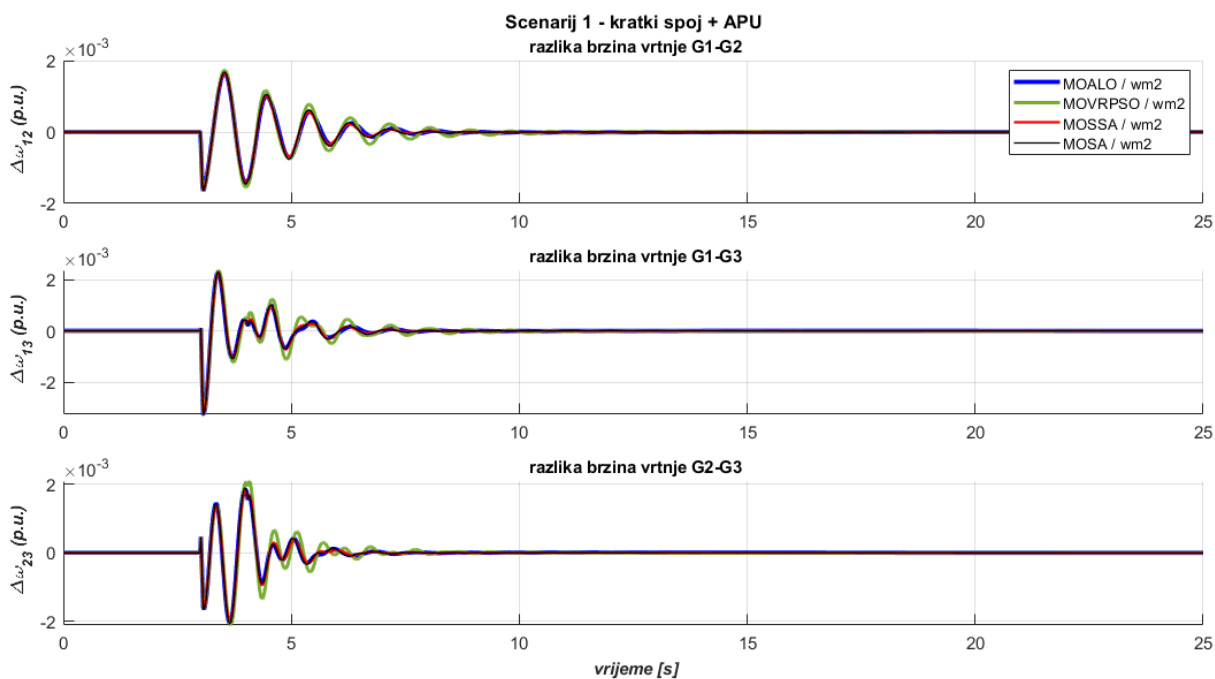
Slika 6.84. WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



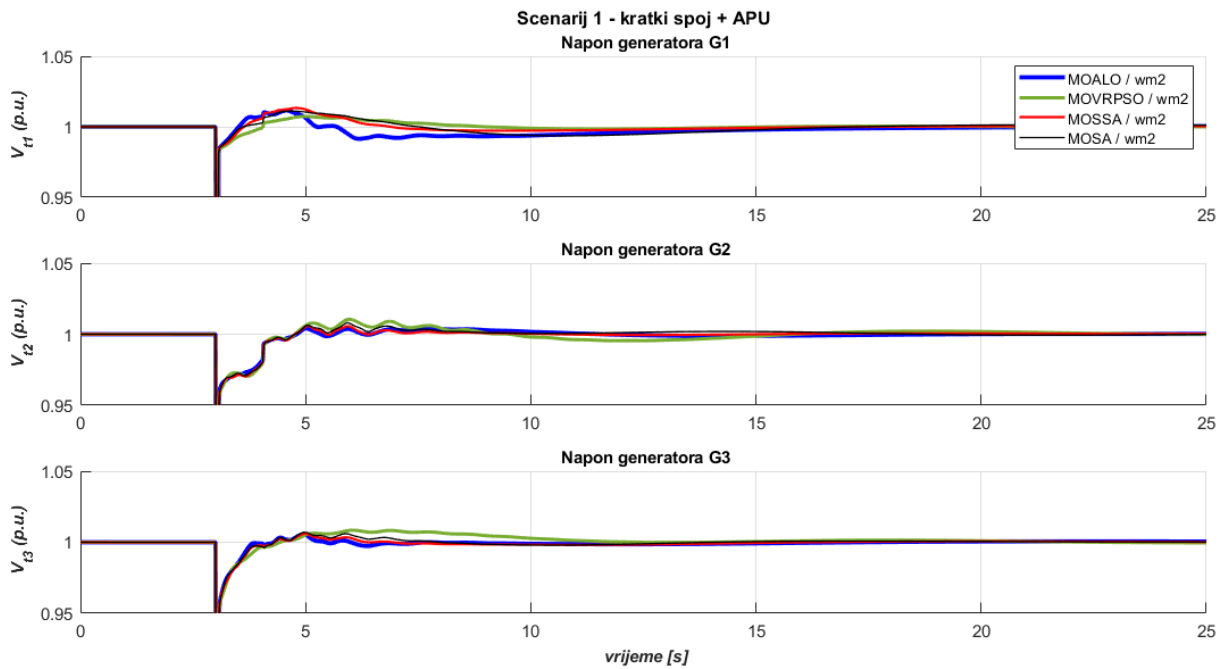
Slika 6.85. WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



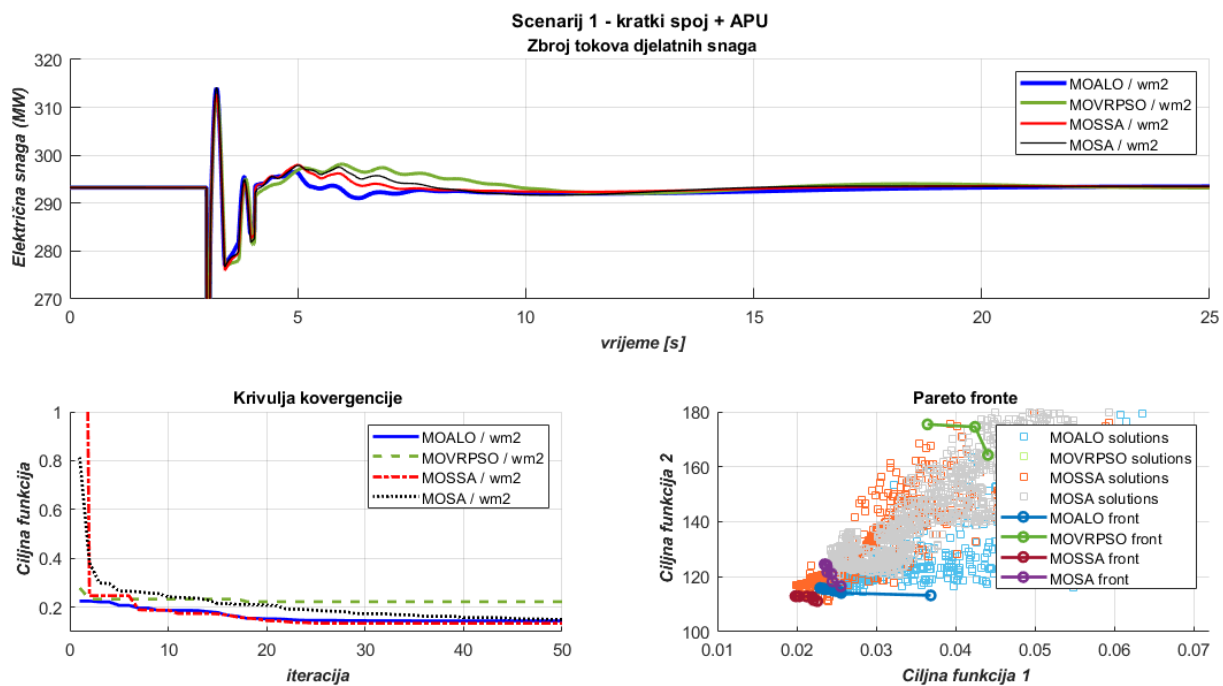
Slika 6.86. WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



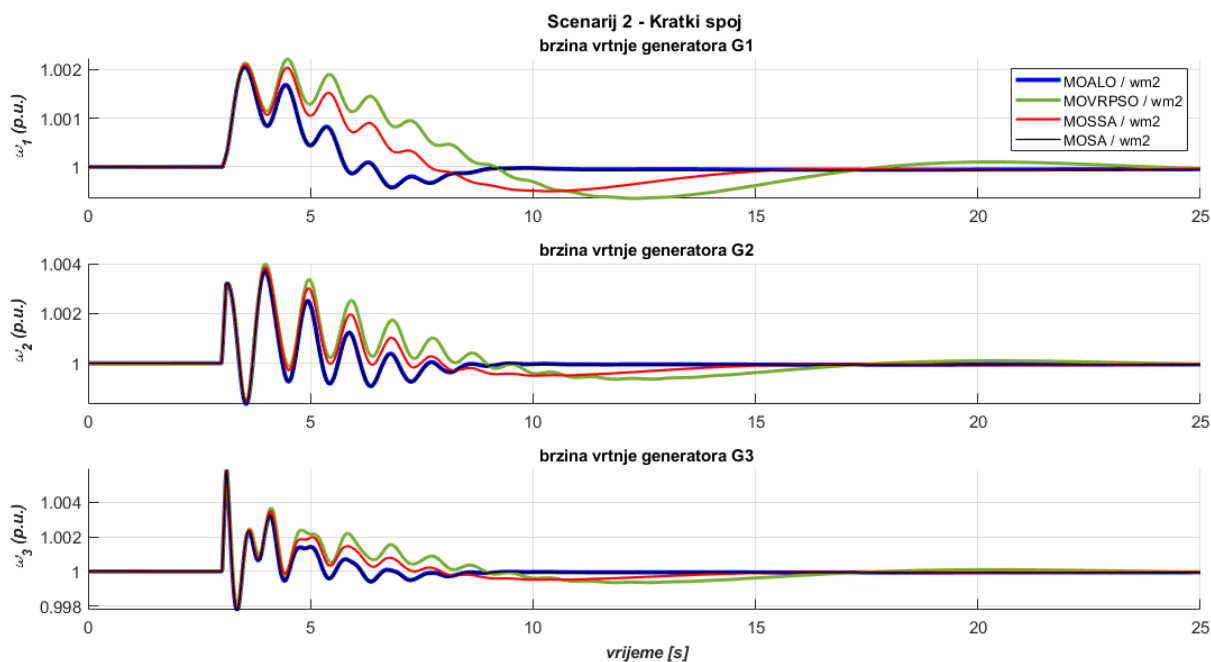
Slika 6.87. WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



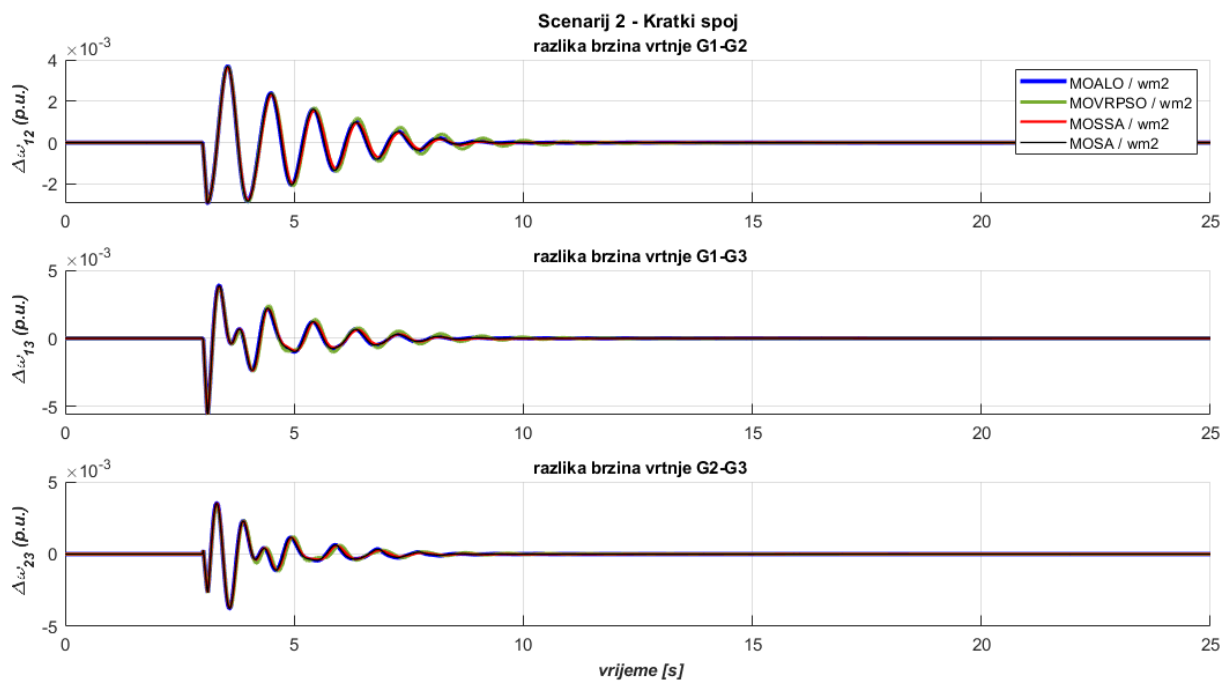
Slika 6.88. WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



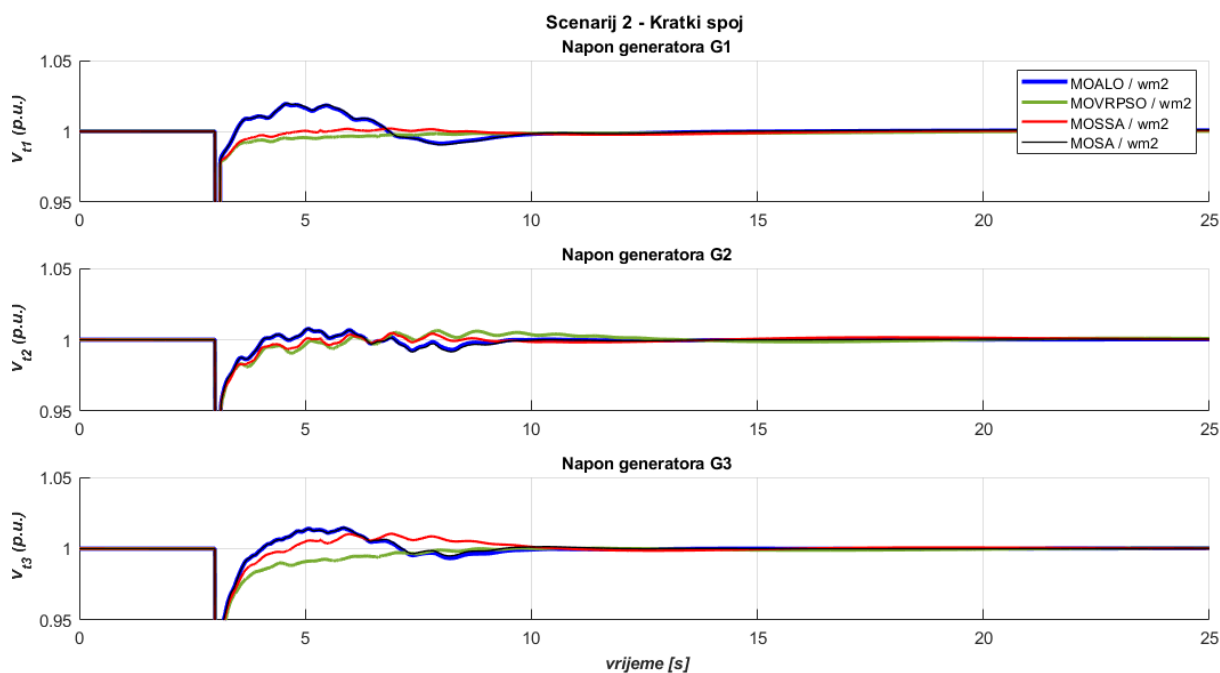
Slika 6.89. WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



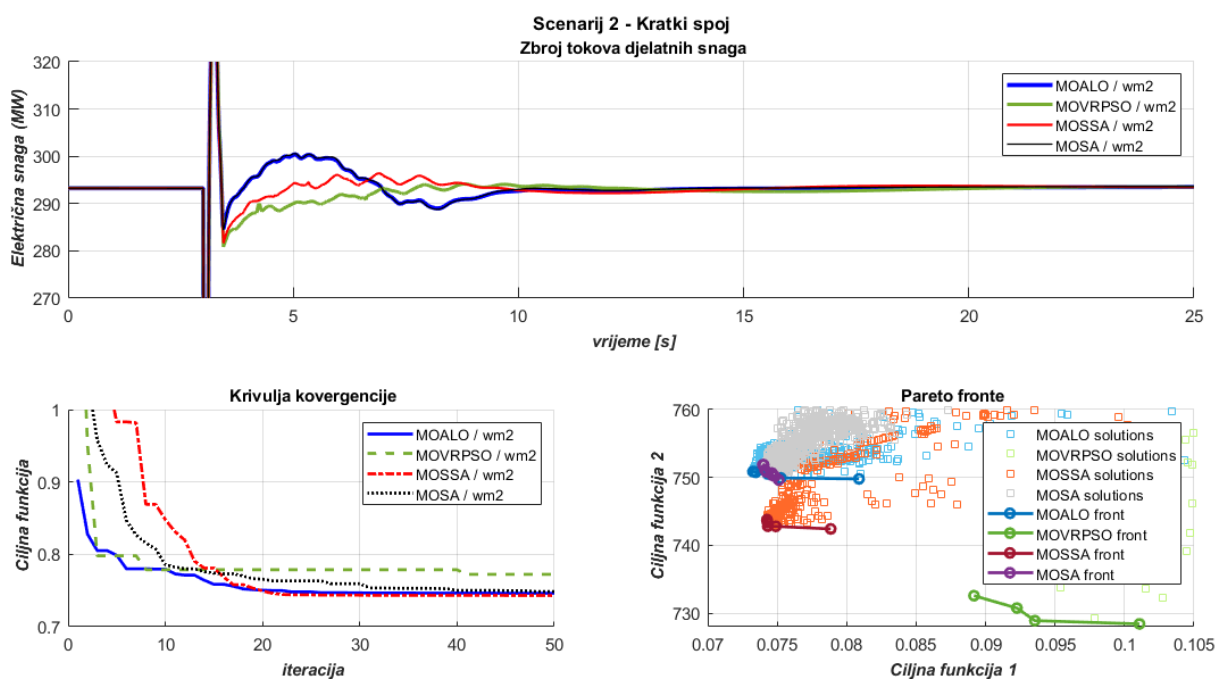
Slika 6.90. WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jed višeciljnoj nociljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.91. WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)

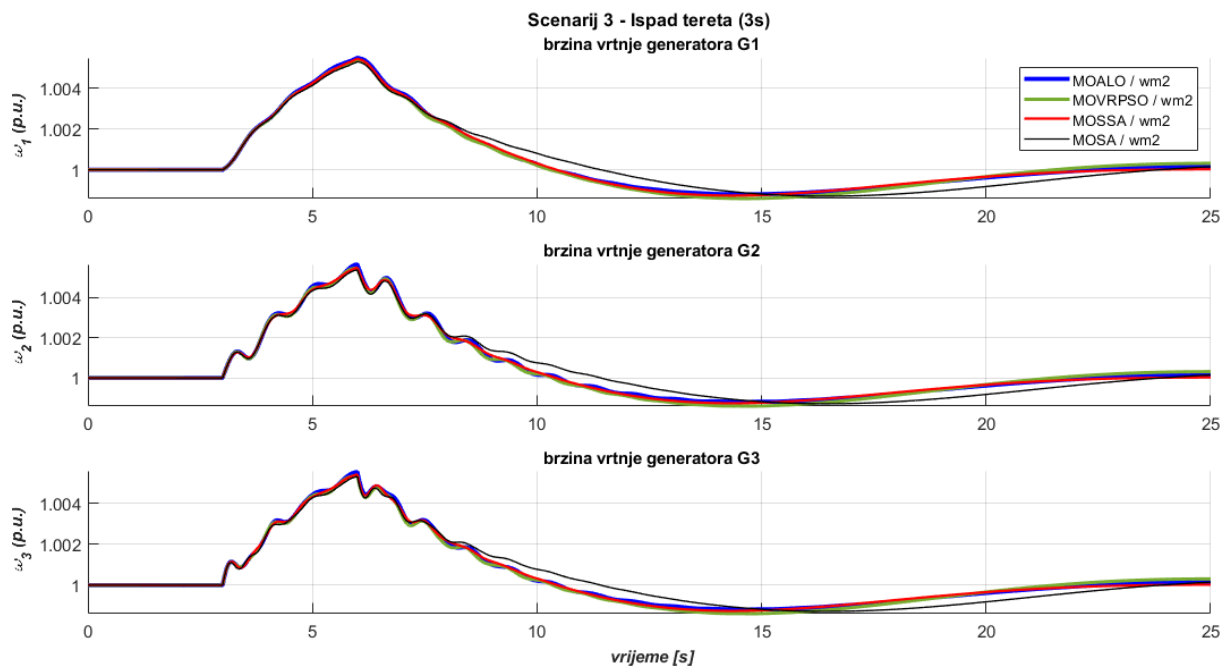


Slika 6.92. WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)

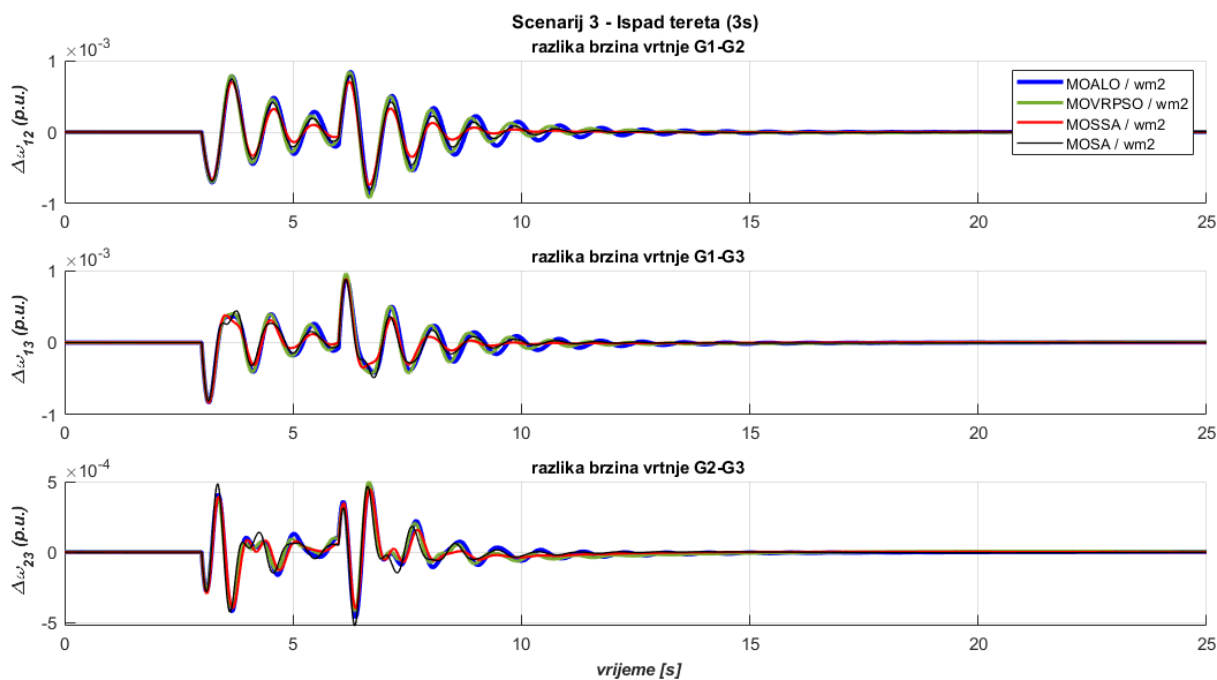


Slika 6.93. WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)

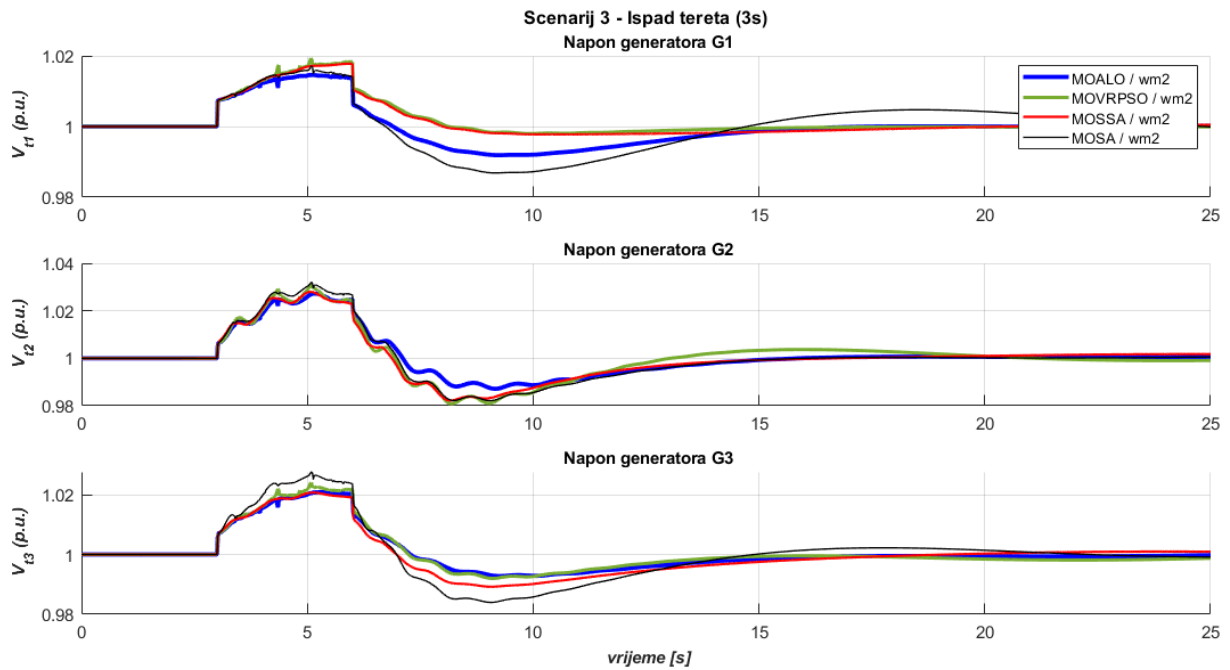




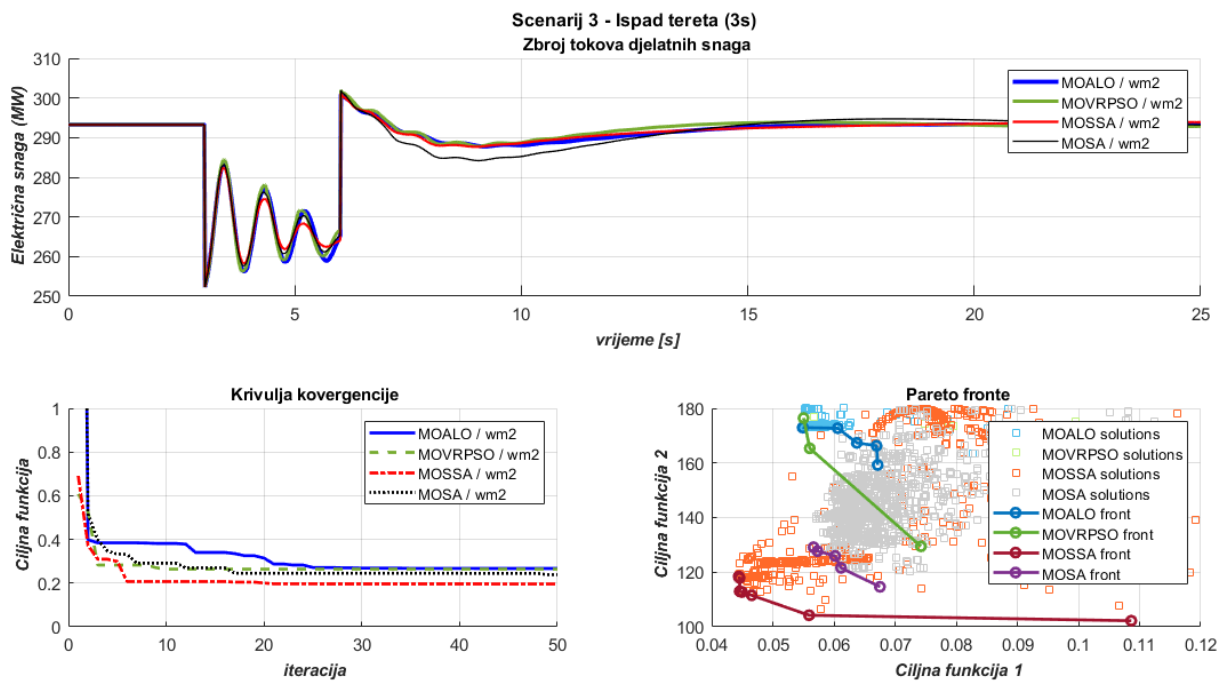
Slika 6.94. WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.95. WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.96. WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.97. WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)

U tablici 6.7 su za WSCC model prikazani rezultati uspješnosti višeciljne optimizacije po algoritmima, metodama i scenarijima. Prema istoj razdiobi tablica 6.8 prikazuje analitičke pokazatelje kvalitete optimizacijskih procesa. Iz rezultata je vidljivo da algoritmi novije generacije imaju veću uspješnost u postizanju minimalnih oscilacija: u 9 ispitnih slučajeva za

algoritme MOSSA algoritam se prikazao najboljim u 6 slučajeva, MOALO u 2 i MOSA u jednom. U grafičkim priložima se vidi da je problem globalnih oscilacija prisutan u manjoj mjeri kod neutralne metode, no za razliku od jednociljne optimizacije, globalne oscilacije pokazuju tendenciju prigušenja. Broj ponuđenih Pareto rješenja je također prikazan i definira uz broj i raspon prema kojem je moguće odabrati određeno rješenje prema preferenciji za prvu ili drugu ciljnu funkciju.

Tablica 6.7 Rezultati optimizacijskih procesa, WSCC model, višeciljna optimizacija

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj Pareto rješenja
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	np (4.9)	MOALO	3,015279	0,041125	0,066683	147,7487	155,6985	14
		MOVRPSO	3,349088	0,039824	0,051627	154,0581	176,9814	2
		MOSSA	2,539122	0,039313	0,057137	124,417	143,9939	28
		MOSA	2,412729	0,025382	0,038976	110,9855	122,4561	17
	wm1 (4.11)	MOALO	0,199571	0,022356	0,03108	119,5796	127,588	28
		MOVRPSO	0,255936	0,028885	0,028885	157,2079	157,2079	1
		MOSSA	0,194618	0,021997	0,024532	116,8846	118,55	6
		MOSA	0,234315	0,026113	0,046713	132,5473	153,8798	10
	wm2 (4.11)	MOALO	0,144323	0,022959	0,036866	113,2306	115,9018	26
		MOVRPSO	0,222754	0,036473	0,04409	164,2929	175,4294	3
		MOSSA	0,134329	0,019841	0,022583	111,122	112,9681	9
		MOSA	0,149964	0,023513	0,025548	116,5628	124,5171	9
Scenarij 2: Kratki spoj	np (4.9)	MOALO	15,82993	0,085949	0,09365	728,1768	730,3669	8
		MOVRPSO	16,02588	0,08998	0,109426	737,1903	744,1361	5
		MOSSA	15,70422	0,083016	0,085894	722,3941	730,0805	8
		MOSA	16,02846	0,084208	0,103322	737,3093	745,5794	8
	wm1 (4.11)	MOALO	0,730962	0,072381	0,088763	747,2245	752,4638	14
		MOVRPSO	0,867256	0,090964	0,182758	735,1628	740,1016	4
		MOSSA	0,735814	0,0731	0,082034	737,5532	750,2597	25
		MOSA	0,737865	0,073264	0,074593	752,3426	753,5251	8
	wm2 (4.11)	MOALO	0,746292	0,073259	0,080887	749,7845	750,86	6
		MOVRPSO	0,772336	0,089164	0,101079	728,4093	732,5663	4
		MOSSA	0,742918	0,074264	0,078853	742,4146	743,7869	10
		MOSA	0,748642	0,073966	0,075116	749,6081	751,8809	8
Scenarij 3: Ispad tereta (3s)	np (4.9)	MOALO	1,973699	0,067273	0,086742	90,79009	201,66	54
		MOVRPSO	2,731409	0,05627	0,061358	125,6448	167,1759	3
		MOSSA	2,323171	0,05647	0,065036	106,8659	112,949	43
		MOSA	2,204103	0,069471	0,120805	101,3887	111,6601	17
	wm1 (4.11)	MOALO	0,424063	0,050389	0,080078	162,2435	184,5731	14
		MOVRPSO	0,520251	0,063543	0,064977	142,3236	174,7235	2
		MOSSA	0,389686	0,046786	0,070409	147,8224	155,159	49
		MOSA	0,470332	0,057182	0,068099	128,4695	165,8813	10
	wm2 (4.11)	MOALO	0,266901	0,054875	0,067154	159,2597	172,9533	12
		MOVRPSO	0,264137	0,055028	0,07424	129,4641	176,4616	3
		MOSSA	0,196213	0,044431	0,108638	102,2221	118,4247	18
		MOSA	0,238507	0,056663	0,06753	114,6477	129,1307	5

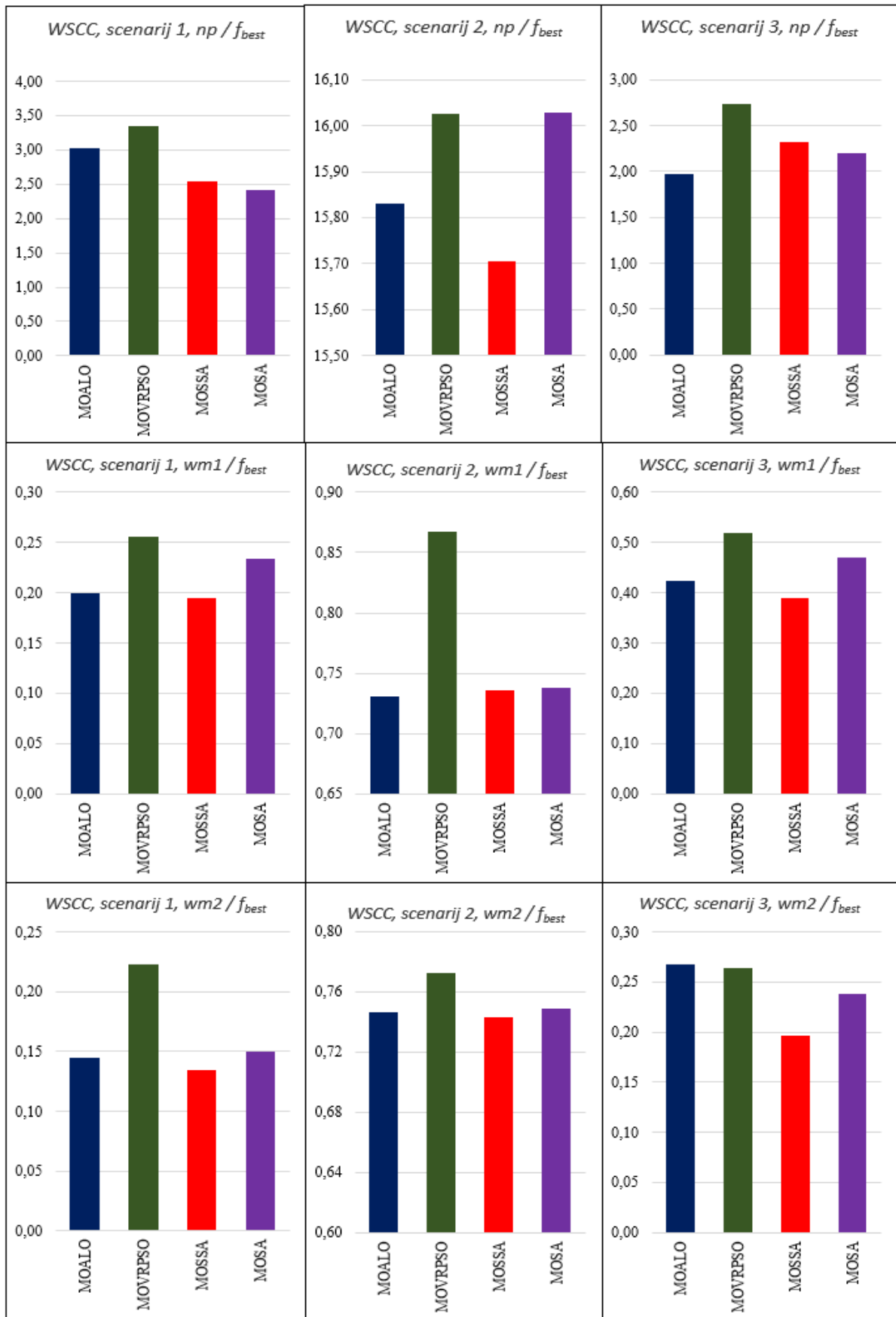
- zelene ćelije – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji

Tablica 6.8 Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, WSCC model, višeciljna optimizacija

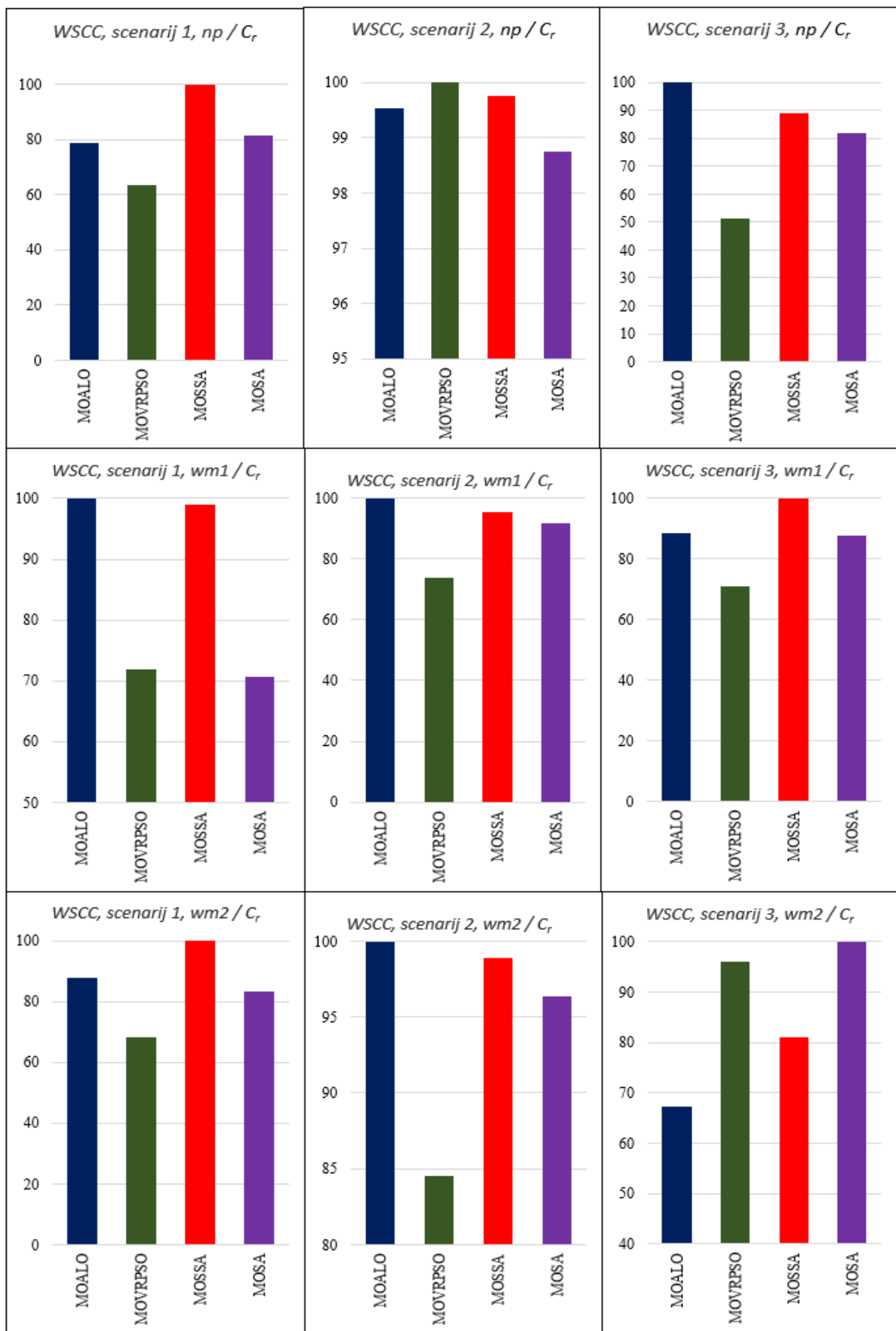
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$ (6.4)	$\mu$ (6.5)	$\sigma$ (6.6)	$C_{A, mean}$ (6.8)	$C_{A, best}$ (6.9)	$C_r$ [%] (6.10)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	np (4.9)	MOALO	3,015279	3,26962	0,28152	0,00657	0,00663	78,82107
		MOVRPSO	3,349088	3,62768	0,28957	0,00616	0,00535	63,55601
		MOSSA	2,539122	3,12502	0,64486	0,00701	0,00841	100
		<b>MOSA</b>	<b>2,412729</b>	<b>2,56457</b>	<b>0,14984</b>	<b>0,00793</b>	<b>0,00685</b>	<b>81,39372</b>
	wm1 (4.11)	MOALO	0,199571	0,22836	0,02714	0,08967	0,0927	100
		MOVRPSO	0,255936	0,34731	0,09997	0,06829	0,06655	71,78484
		<b>MOSSA</b>	<b>0,194618</b>	<b>0,21396</b>	<b>0,0125</b>	<b>0,09447</b>	<b>0,09168</b>	<b>98,89539</b>
		MOSA	0,234315	0,27854	0,02488	0,06998	0,06546	70,61
	wm2 (4.11)	MOALO	0,144323	0,15403	0,01172	0,1347	0,12223	87,95251
		MOVRPSO	0,222754	0,236	0,01491	0,09361	0,09508	68,41313
		<b>MOSSA</b>	<b>0,134329</b>	<b>0,14776</b>	<b>0,01565</b>	<b>0,13627</b>	<b>0,13898</b>	<b>100</b>
		MOSA	0,149964	0,15995	0,00917	0,12053	0,11578	83,30646
Scenarij 2: Kratki spoj	np (4.9)	MOALO	15,82993	15,9864	0,09542	0,00138	0,00137	99,53723
		MOVRPSO	16,02588	16,29604	0,33582	0,00136	0,00138	100
		<b>MOSSA</b>	<b>15,70422</b>	<b>15,73409</b>	<b>0,03302</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,00138</b>	<b>99,75056</b>
		MOSA	16,02846	16,1108	0,10671	0,00136	0,00136	98,74171
	wm1 (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>0,730962</b>	<b>0,74762</b>	<b>0,01531</b>	<b>0,02888</b>	<b>0,02963</b>	<b>100</b>
		MOVRPSO	0,867256	1,00702	0,16372	0,02251	0,02181	73,61544
		MOSSA	0,735814	0,76287	0,02096	0,02819	0,02822	95,23869
		MOSA	0,737865	0,75938	0,0254	0,027	0,02718	91,72565
	wm2 (4.11)	MOALO	0,746292	0,74882	0,00355	0,02938	0,02951	100
		MOVRPSO	0,772336	0,82379	0,03899	0,02693	0,02494	84,50644
		<b>MOSSA</b>	<b>0,742918</b>	<b>0,74755</b>	<b>0,00321</b>	<b>0,02932</b>	<b>0,02918</b>	<b>98,86262</b>
		MOSA	0,748642	0,75729	0,00782	0,02871	0,02845	96,39054
Scenarij 3: Ispad tereta (3s)	np (4.9)	<b>MOALO</b>	<b>1,973699</b>	<b>2,04738</b>	<b>0,0913</b>	<b>0,00999</b>	<b>0,01005</b>	<b>100</b>
		MOVRPSO	2,731409	3,70048	0,56129	0,00613	0,00515	51,26399
		MOSSA	2,323171	2,44078	0,11076	0,00848	0,00895	89,04014
		MOSA	2,204103	2,34929	0,10713	0,00845	0,00823	81,9106
	wm1 (4.11)	MOALO	0,424063	0,49892	0,05705	0,04341	0,04478	88,7141
		MOVRPSO	0,520251	0,56562	0,04123	0,03944	0,03576	70,8455
		<b>MOSSA</b>	<b>0,389686</b>	<b>0,46474</b>	<b>0,0819</b>	<b>0,04649</b>	<b>0,05048</b>	<b>100</b>
		MOSA	0,470332	0,57057	0,05078	0,03857	0,04431	87,78
	wm2 (4.11)	MOALO	0,266901	0,32217	0,04145	0,06582	0,05853	67,28218
		MOVRPSO	0,264137	0,30567	0,02885	0,07259	0,08363	96,14265
		<b>MOSSA</b>	<b>0,196213</b>	<b>0,22458</b>	<b>0,0411</b>	<b>0,09857</b>	<b>0,0705</b>	<b>81,04459</b>
		MOSA	0,238507	0,31062	0,06313	0,0694	0,08699	100

- *podebljani font – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji za metodu i scenarij*
- *zelene ćelije – najbolji analitički pokazatelji konvergencije*

Moć konvergencije potvrđuje recept uspješnosti algoritama novije generacije iz slučaja jednociljne optimizacije za WSCC: MOALO u 4 slučaja, MOSSA u 2 slučaja i po jedan slučaj za MOVRPSO i MOSA algoritme. Novi algoritmi kod višeciljne optimizacije pokazuju u analizi rezultata jaču konvergenciju i daju bolje rezultate. Najbolji rezultati i najjače konvergencije su prikazane kroz slike 6.60 i 6.61. Dobiveni parametri su navedeni u tablici 6.9.



Slika 6.98. WSCC – pregled najboljih rješenja  $f_{best}$  algoritama po scenarijima i metodama



Slika 6.99. WSCC – pregled moći konvergencije  $C_r$  algoritama po scenarijima i metodama

Tablica 6.9 WSSC – najbolja rješenja dobivena višeciljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama

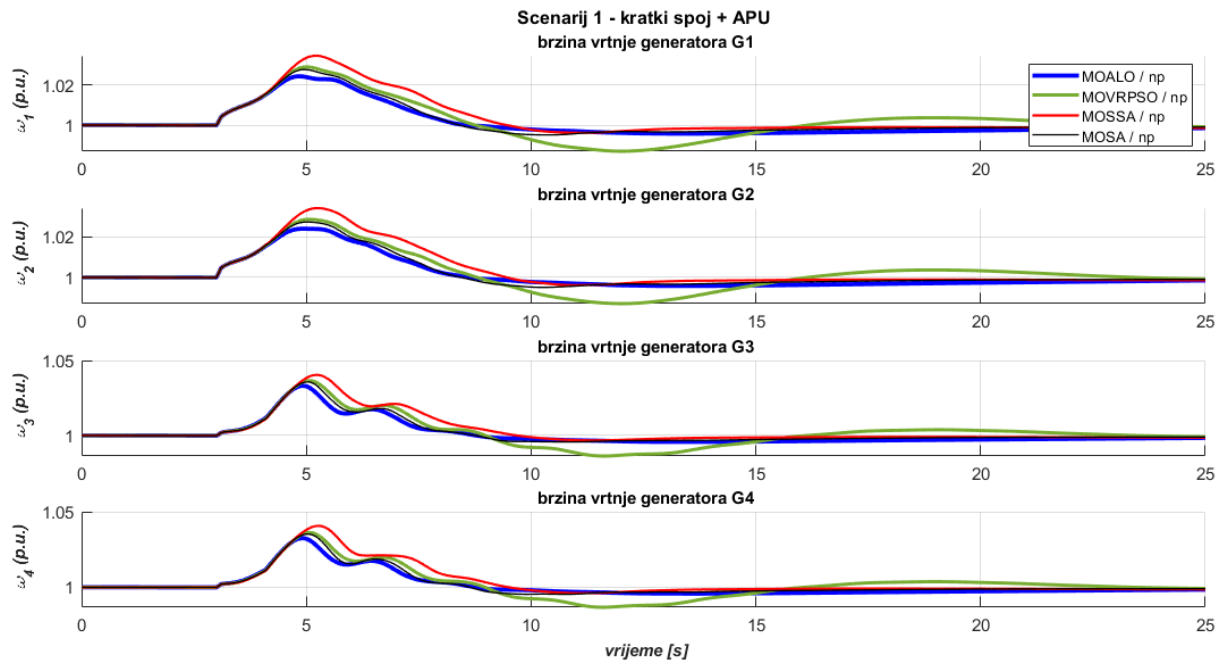
	Scenarij 1: Kratki spoj + APU				Scenarij 2: Kratki spoj				Scenarij 1: Ispad tereta (3s)										
	np		wm1		wm2		np		wm1		wm2		np		wm1		wm2		
	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA
293,57079	7,56049	0,70790	0,42554	19,16382	0,00159	16,48568	193,11684	1,04968	186,06719	0,71481	10,57257	0,01170	5,62709						
256,33293	3,34419	120,68956	5,82362	5,48011	0,53627	11,22945	350,00000	5,36301	72,98602	5,80203	20,13675	0,55908	4,02507						
240,99591	6,16002	3,20362	0,35685	22,59302	0,00106	11,43007	253,07866	4,26770	64,98578	0,44759	22,25574	0,01906	3,40506						
350,00000	15,35967	147,28032	10,00000	10,37187	0,58437	19,68945	135,78656	11,88385	95,52913	8,41328	13,21592	0,89126	16,39791						
234,90517	11,00901	77,81980	8,80149	2,53730	0,70356	18,79056	274,42077	5,14677	58,08366	6,03360	0,11602	0,93335	5,28362						
267,95154	6,02483	58,12607	4,45124	0,01000	0,77897	14,10863	202,15474	20,00000	49,58446	2,49173	13,36576	0,84459	0,01000						
249,99093	14,75249	34,86924	4,80947	0,01001	0,10848	18,32659	303,97033	7,78259	43,78181	6,48714	1,98466	0,11631	5,41182						
231,09317	6,83975	130,75286	7,20045	1,58372	0,48302	16,14754	275,58752	5,01804	70,65017	6,35345	0,01000	0,55486	4,53293						
322,60408	16,94964	77,47758	7,21357	0,01209	0,62930	16,88540	289,48284	1,61292	130,10034	8,43925	34,60035	0,99335	11,78160						
259,76981	5,55987	0,01000	2,64480	8,73872	0,39819	7,95473	62,57312	1,00000	49,24445	3,18627	0,60375	0,23779	3,83421						
337,00903	13,74961	102,45531	9,77371	2,41957	0,88894	16,67085	331,97934	1,00185	0,48732	6,58949	43,02523	0,70905	1,34361						
350,00000	10,54938	60,67607	6,72419	6,62478	0,69614	16,03099	275,58619	9,85599	33,75831	7,55786	8,52408	0,85781	9,55115						
196,04669	9,44631	92,07914	6,80941	3,32139	0,39438	14,86489	133,80596	11,71839	101,15693	7,36102	39,97651	0,26213	6,90411						
258,94337	7,08207	0,01000	6,12098	0,01000	0,51607	8,21012	28,77085	1,00000	21,30560	2,46638	0,01000	0,15590	0,01000						
346,13376	13,16639	41,52707	9,41539	1,22717	0,22094	18,31178	30,01094	3,39951	131,46217	3,89567	25,30258	0,09790	12,95310						
279,50447	12,99318	0,15109	4,66283	0,01000	0,05283	13,03069	217,59402	9,39211	8,67503	0,10000	0,82516	0,27878	4,20081						
334,21407	14,77534	51,26213	9,65161	1,90543	0,42865	19,81836	350,00000	11,89444	147,72440	8,56678	32,44287	0,99705	19,87656						
309,12133	10,47925	0,01000	9,07352	4,85542	0,68061	10,02641	103,05348	4,10396	39,50329	0,37480	24,39863	0,53878	6,99461						
349,99963	18,82214	119,97488	9,96780	0,01345	0,66106	16,73231	175,97651	1,00000	71,07983	7,89026	49,01912	0,65431	4,46188						
350,00000	14,30064	131,54456	9,21902	0,99159	0,43514	19,44012	350,00000	17,58388	83,23687	2,50492	17,39829	0,93748	17,75101						
324,21442	13,78413	112,38990	9,10951	0,93052	0,66752	18,72703	349,52088	9,26938	146,77936	9,23174	33,73708	0,84420	18,24842						
182,82712	6,51477	4,91646	0,77561	0,27410	0,29765	13,41047	1,15209	1,00000	18,10155	2,49659	6,29060	0,31393	0,33840						
349,61607	16,81612	79,17784	9,44343	0,07582	0,30605	19,58093	301,67903	4,11492	50,07971	1,56910	1,71786	0,32267	19,27275						
350,00000	12,51934	103,69290	9,63781	6,54803	0,50549	18,58654	346,61266	13,52267	149,85755	5,98715	24,19202	0,86347	19,80653						
348,73812	11,52002	118,95250	8,54495	5,57400	0,83510	18,82890	349,48027	6,47087	134,62452	6,58663	11,40184	0,77734	16,78543						
196,58431	10,93424	17,66022	4,24869	0,01000	0,42943	19,40369	0,01000	7,28968	57,92783	4,63893	21,42268	0,90721	0,58743						
349,99129	11,27431	98,46456	8,39334	0,01003	0,95350	19,93472	25,16502	18,00818	149,07961	9,99382	0,95996	0,94141	0,07845						
300,43921	14,67277	133,19597	6,68713	13,31635	0,90106	17,33607	228,56009	1,35164	121,83950	9,18506	38,39115	0,51221	17,58440						
195,74133	7,03996	2,99602	4,40712	0,33592	0,28309	7,59314	185,41689	4,59474	84,06589	0,28225	38,66674	0,09229	2,41317						
314,02545	3,90030	46,95862	3,98371	0,01000	0,72350	7,27299	119,21880	4,06009	27,04562	1,38173	0,01000	0,63301	0,01000						
337,00082	18,31231	14,69818	7,03362	0,08925	0,67794	14,78912	123,83375	15,75105	144,09777	3,77497	2,12456	0,59012	16,22332						
114,84453	4,49008	15,97351	7,32667	0,56168	0,58191	9,74491	54,22252	10,64230	92,64596	4,43902	7,42695	0,05000	0,23061						
159,75558	5,09346	10,28922	3,76499	0,76615	0,53313	9,04017	22,64822	2,78977	1,01707	0,36911	2,20971	0,05924	0,68807						
237,74803	3,99684	28,87943	6,24493	1,07508	0,64284	6,77592	30,39553	1,00000	36,82064	0,10000	0,01000	0,96813	0,01000						
343,27199	12,62599	50,19238	9,72762	0,01404	0,05071	19,67019	190,80612	1,00013	132,39856	8,34242	49,99982	0,73983	18,99115						
216,77282	4,96985	0,01000	9,48765	6,02419	0,85420	9,93268	242,52368	8,84613	134,48208	3,89498	14,73328	0,30528	0,08277						

Tablica 6.9 WSSC – najbolja rješenja dobivena višeciljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama (nastavak)

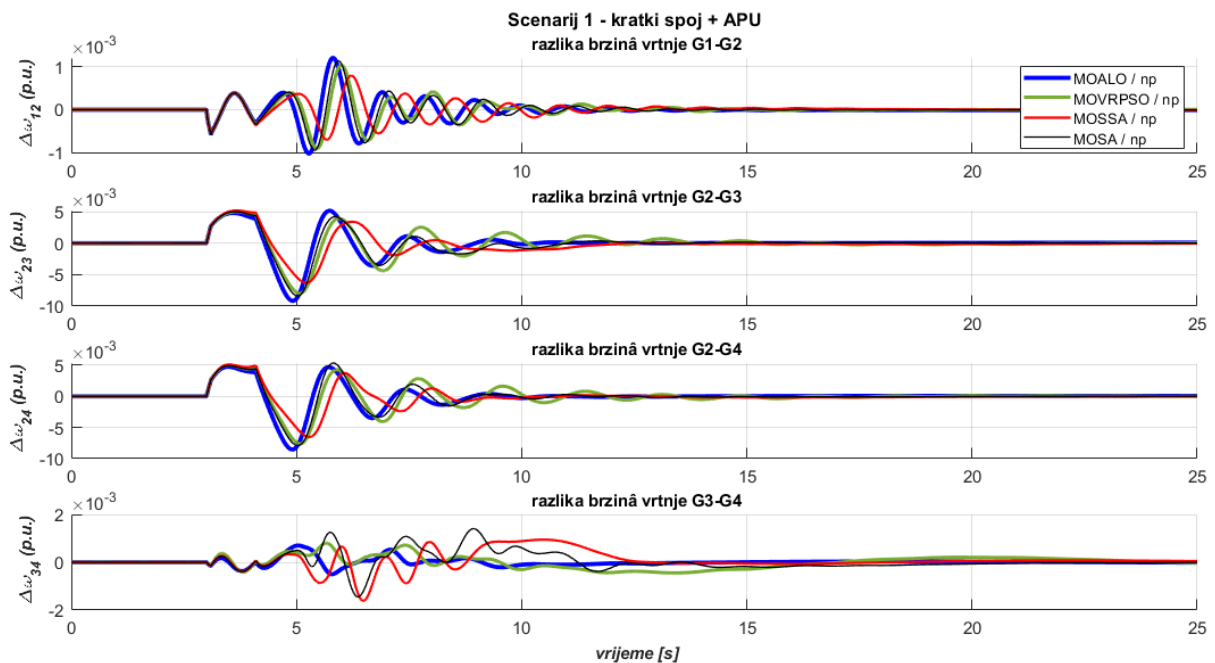
	Scenarij 1: Kratki spoj + APU								Scenarij 2: Kratki spoj								Scenarij 1: Ispad tereta (3s)								
	np				wm1				wm2				np				wm1				wm2				
	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	MOALO	MOVRPSO	MOSSA	MOSA	
0,13179	164,14139	0,02333	235,69319	0,16253	166,42513	204,94196	9,68741	5,61729	0,36201	13,44537	0,03410	5,24313	0,17029	250,00000	0,24826	127,86092	0,29146	99,01920	289,39148	13,34841	150,00000	4,23222	10,66782	0,45128	11,84892
0,00329	219,96737	0,18406	178,45897	0,11276	205,63028	116,00573	8,91693	0,05007	0,65526	2,04125	0,00451	19,98334	0,32947	205,53885	0,21337	250,00000	0,28266	156,37674	213,83624	13,05286	150,00000	2,70630	0,82430	0,00451	19,98334
0,13071	176,88175	0,12594	216,63856	0,24709	157,59339	237,17153	19,65074	83,42144	6,43838	8,16370	0,89733	3,73595	0,40000	0,00100	0,39274	148,92683	0,32946	0,00100	165,36686	9,92214	75,47673	8,95022	0,01000	0,82744	2,05374
0,08258	249,23885	0,00579	205,91861	0,34224	0,25766	254,33318	6,99761	72,21055	8,70206	0,24662	0,77808	15,12930	0,29229	0,00100	0,26745	190,55305	0,29426	113,19014	15,98613	2,25347	104,50952	4,78390	0,32221	0,00451	19,98334
0,26547	224,98685	0,03568	157,04650	0,34025	221,19143	329,12502	9,72192	92,05835	8,70035	3,92378	0,99886	6,96703	0,26844	40,36668	0,27388	83,22417	0,20450	15,42918	46,42069	1,00000	104,89173	4,95534	1,30227	0,15261	0,01000
0,10423	142,51069	0,32352	208,30403	0,07458	190,68489	348,39161	17,92340	88,14110	9,65966	0,21206	0,58517	5,93001	0,10423	142,51069	0,32352	208,30403	0,07458	190,68489	348,39161	17,92340	88,14110	9,65966	0,21206	0,58517	5,93001
0,29232	217,71899	0,18308	149,17760	0,10833	81,13201	173,32694	8,76260	37,96601	6,03215	0,35277	0,83475	10,18903	0,29232	217,71899	0,18308	149,17760	0,10833	81,13201	173,32694	8,76260	37,96601	6,03215	0,35277	0,83475	10,18903
0,01381	0,00143	0,38843	205,17660	0,18916	0,76030	247,64847	11,83419	85,14861	6,36875	14,30551	0,26193	10,15154	0,01381	0,00143	0,38843	205,17660	0,18916	0,76030	247,64847	11,83419	85,14861	6,36875	14,30551	0,26193	10,15154
0,19512	0,00100	0,20338	155,93735	0,22297	116,21103	9,21686	3,86217	0,01000	0,10000	0,01000	0,23845	2,19405	0,19512	0,00100	0,20338	155,93735	0,22297	116,21103	9,21686	3,86217	0,01000	0,10000	0,23845	2,19405	
0,00635	0,01102	0,40000	214,75264	0,29928	0,00640	88,04914	8,72327	63,23084	4,48562	38,66152	0,91445	11,69925	0,00635	0,01102	0,40000	214,75264	0,29928	0,00640	88,04914	8,72327	63,23084	4,48562	38,66152	0,91445	11,69925
0,00001	135,37485	0,31535	133,23137	0,10749	0,00100	234,65986	11,30891	0,01000	3,62394	0,69818	0,13022	9,48120	0,00001	135,37485	0,31535	133,23137	0,10749	0,00100	234,65986	11,30891	0,01000	3,62394	0,69818	0,13022	9,48120
0,09786	220,78512	0,32058	248,01516	0,21466	230,23178	308,67454	11,33379	124,75925	8,28405	9,79989	0,49889	14,29992	0,09786	220,78512	0,32058	248,01516	0,21466	230,23178	308,67454	11,33379	124,75925	8,28405	9,79989	0,49889	14,29992
0,34007	0,00100	0,39116	99,09496	0,40000	0,00100	149,71450	1,00000	35,92210	2,27558	1,46941	0,59092	11,60883	0,34007	0,00100	0,39116	99,09496	0,40000	0,00100	149,71450	1,00000	35,92210	2,27558	1,46941	0,59092	11,60883
0,00087	98,46778	0,33056	233,21035	0,09211	27,86996	241,21669	7,37951	9,24929	3,28406	12,86702	0,98091	17,74660	0,00087	98,46778	0,33056	233,21035	0,09211	27,86996	241,21669	7,37951	9,24929	3,28406	12,86702	0,98091	17,74660
0,01873	222,79998	0,29216	230,49862	0,14811	72,56439	350,00000	17,92850	135,62216	6,71460	11,52141	0,51840	14,78808	0,01873	222,79998	0,29216	230,49862	0,14811	72,56439	350,00000	17,92850	135,62216	6,71460	11,52141	0,51840	14,78808
0,06545	246,53614	0,34749	242,37501	0,22647	236,20975	322,15777	10,32239	96,80107	9,92020	24,86459	0,59702	18,15650	0,06545	246,53614	0,34749	242,37501	0,22647	236,20975	322,15777	10,32239	96,80107	9,92020	24,86459	0,59702	18,15650
0,25688	0,02828	0,26404	143,69616	0,26700	0,08540	17,08880	3,90093	17,97184	1,33082	10,47292	0,25961	2,89935	0,25688	0,02828	0,26404	143,69616	0,26700	0,08540	17,08880	3,90093	17,97184	1,33082	10,47292	0,25961	2,89935
0,00138	148,51264	0,19021	211,11122	0,18361	1,83395	139,84765	10,20806	107,20751	9,79426	0,05049	0,76834	13,22422	0,00138	148,51264	0,19021	211,11122	0,18361	1,83395	139,84765	10,20806	107,20751	9,79426	0,05049	0,76834	13,22422
0,11249	248,01079	0,34883	241,44297	0,27689	196,34551	310,77532	13,75012	89,21969	7,14587	8,34516	0,57598	20,00000	0,11249	248,01079	0,34883	241,44297	0,27689	196,34551	310,77532	13,75012	89,21969	7,14587	8,34516	0,57598	20,00000
0,10381	169,62590	0,18233	153,01223	0,37165	181,05347	316,22476	8,29125	124,57439	8,91594	4,47986	0,91911	11,06242	0,10381	169,62590	0,18233	153,01223	0,37165	181,05347	316,22476	8,29125	124,57439	8,91594	4,47986	0,91911	11,06242
0,39246	133,68484	0,31883	125,00050	0,20001	37,31392	29,44757	5,56633	18,17436	4,59288	1,58310	0,60305	0,01000	0,39246	133,68484	0,31883	125,00050	0,20001	37,31392	29,44757	5,56633	18,17436	4,59288	1,58310	0,60305	0,01000
0,38033	0,18087	0,39924	216,22413	0,01109	218,51149	346,49346	2,42225	70,37325	7,75299	12,43354	0,05945	18,12434	0,38033	0,18087	0,39924	216,22413	0,01109	218,51149	346,49346	2,42225	70,37325	7,75299	12,43354	0,05945	18,12434
0,22801	215,48175	0,31436	169,22213	0,27382	115,73269	258,95836	15,25756	124,24209	9,65589	0,93519	0,79724	12,11321	0,22801	215,48175	0,31436	169,22213	0,27382	115,73269	258,95836	15,25756	124,24209	9,65589	0,93519	0,79724	12,11321
0,09842	0,57125	0,00026	72,17795	0,01548	0,00105	89,61389	1,47080	50,32943	0,95205	12,75394	0,55595	0,36843	0,09842	0,57125	0,00026	72,17795	0,01548	0,00105	89,61389	1,47080	50,32943	0,95205	12,75394	0,55595	0,36843
0,39923	125,00050	0,36498	91,28783	0,40000	0,00100	317,28995	3,55165	150,00000	2,15845	0,01000	0,68232	0,01000	0,39923	125,00050	0,36498	91,28783	0,40000	0,00100	317,28995	3,55165	150,00000	2,15845	0,01000	0,68232	0,01000
0,06824	0,10205	0,01022	217,47969	0,10759	0,04012	148,97109	1,06239	0,35662	6,86201	32,09100	0,39882	2,97627	0,06824	0,10205	0,01022	217,47969	0,10759	0,04012	148,97109	1,06239	0,35662	6,86201	32,09100	0,39882	2,97627
0,08761	135,04484	0,01678	51,60491	0,15834	162,86499	103,77100	2,92759	9,81951	2,69492	8,07094	0,80804	0,99799	0,08761	135,04484	0,01678	51,60491	0,15834	162,86499	103,77100	2,92759	9,81951	2,69492	8,07094	0,80804	0,99799
0,01303	14,75522	0,06393	48,43158	0,11004	96,47024	9,91088	6,46825	18,33371	2,90457	15,96938	0,09043	0,01000	0,01303	14,75522	0,06393	48,43158	0,11004	96,47024	9,91088	6,46825	18,33371	2,90457	15,96938	0,09043	0,01000
0,33737	19,93096	0,40000	161,22886	0,40000	0,00100	0,01000	3,46568	4,29437	8,08077	8,14637	0,54451	0,01000	0,33737	19,93096	0,40000	161,22886	0,40000	0,00100	0,01000	3,46568	4,29437	8,08077	8,14637	0,54451	0,01000
0,39813	202,16633	0,00013	248,68441	0,03003	0,00221	58,93759	4,10083	8,46048	1,69509	48,77154	0,9247	0,01007	0,39813	202,16633	0,00013	248,68441	0,03003	0,00221	58,93759	4,10083	8,46048	1,69509	48,77154	0,9247	0,01007
0,12989	118,72536	0,02137	98,35014	0,27958	207,88258	137,41172	6,00923	7,55360	2,91384	0,37226	0,70014	8,20203	0,12989	118,72536	0,02137	98,35014	0,27958	207,88258	137,41172	6,00923	7,55360	2,91384	0,37226	0,70014	8,20203



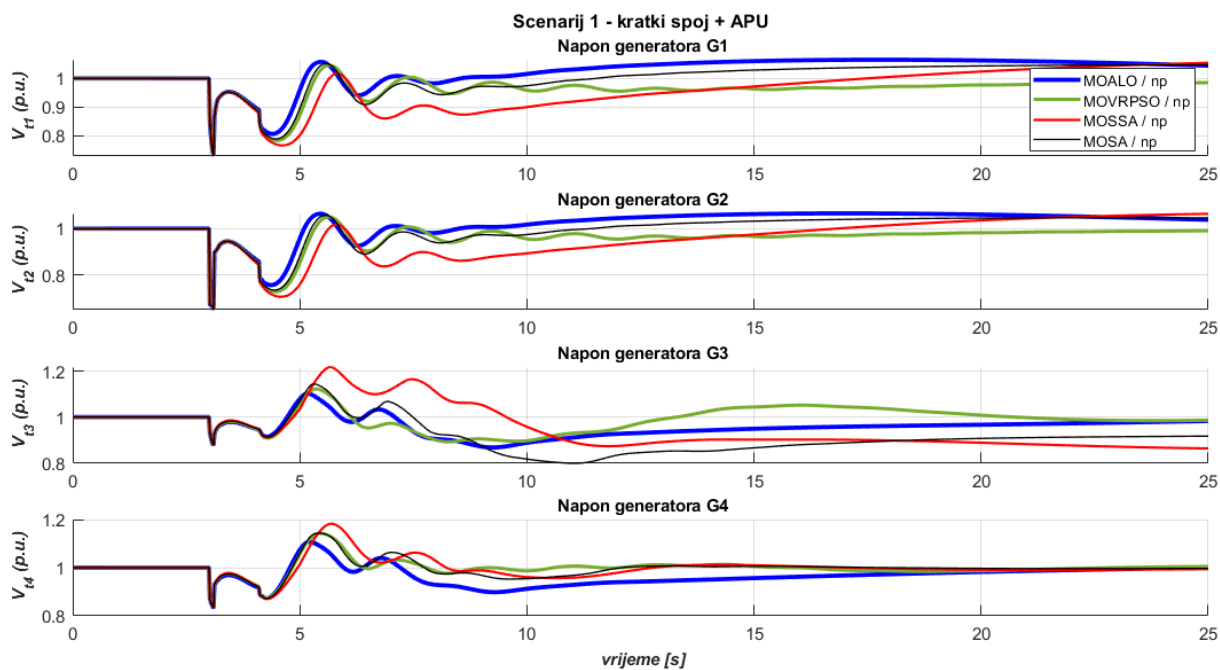
## 6.6.2 TAFM model - rezultati ispitivanja, višeciljna optimizacija



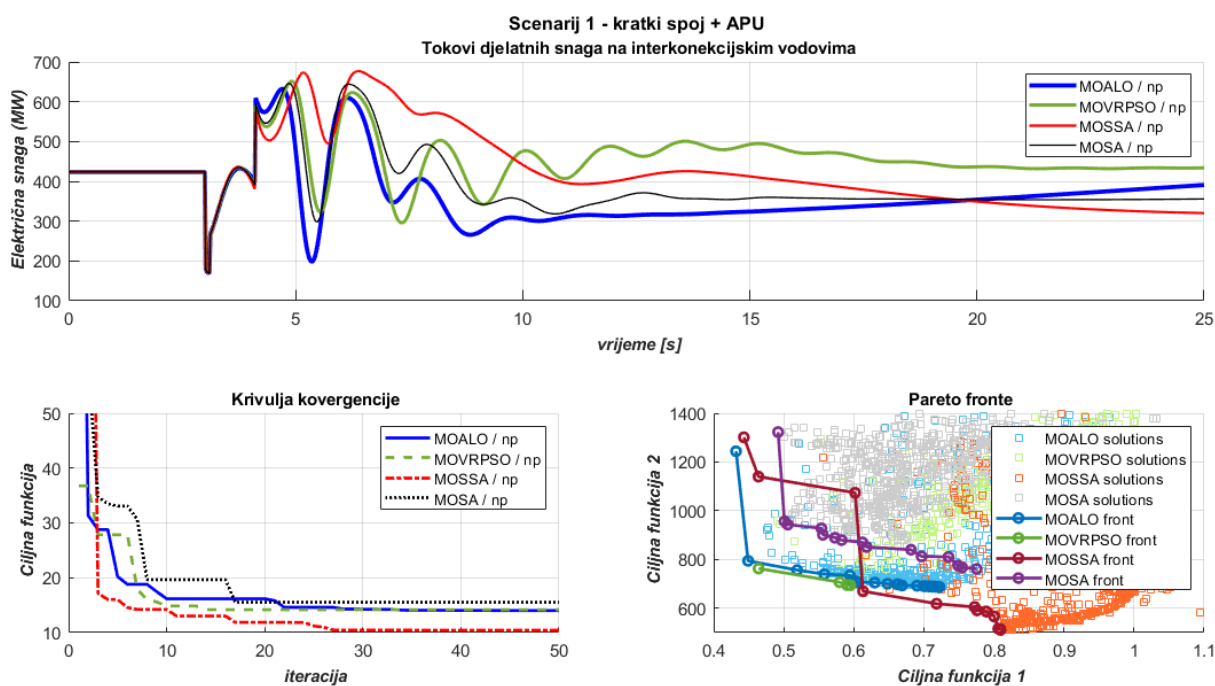
Slika 6.100. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



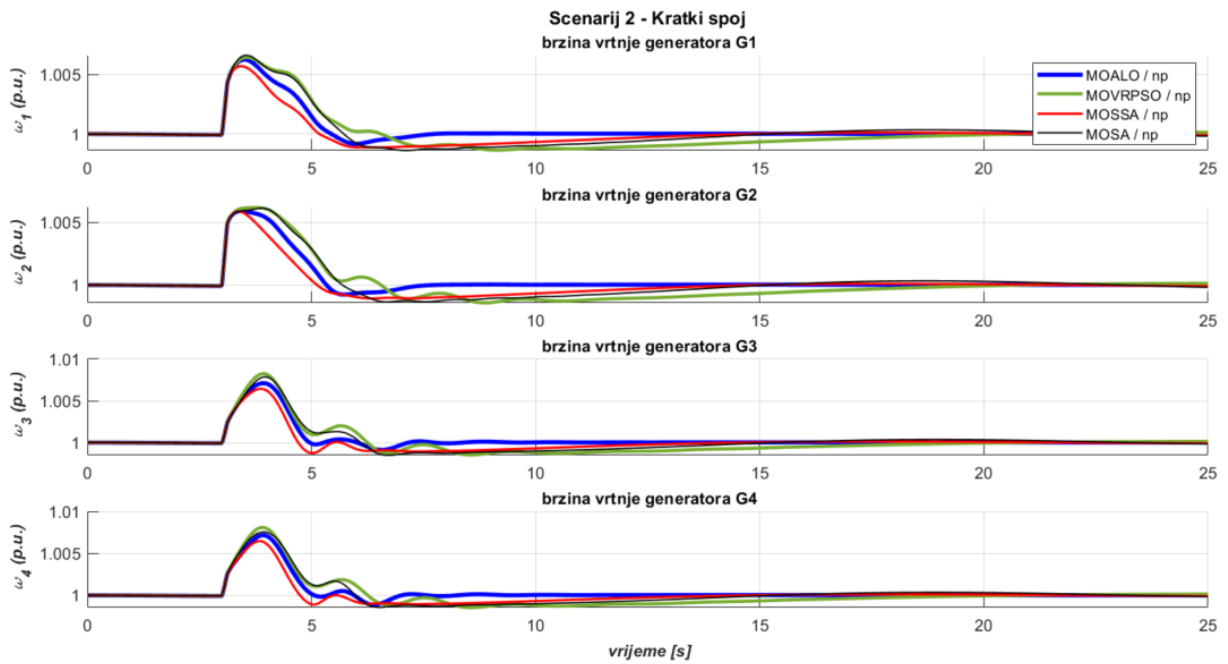
Slika 6.101. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



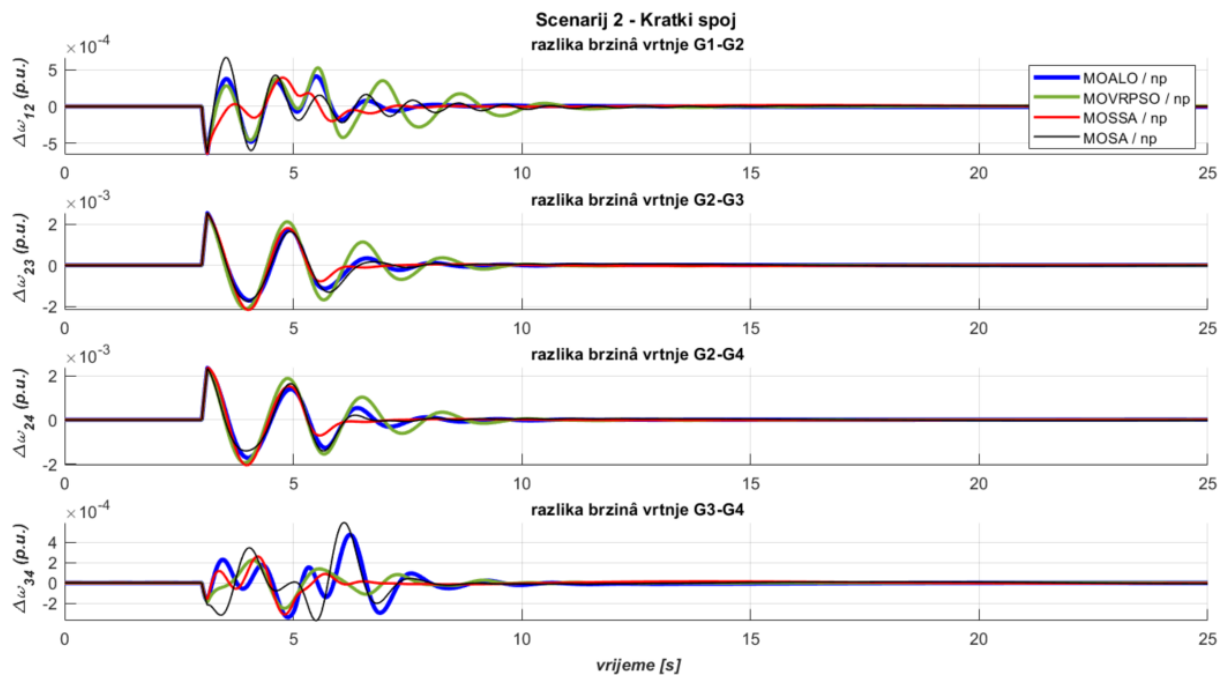
Slika 6.102. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



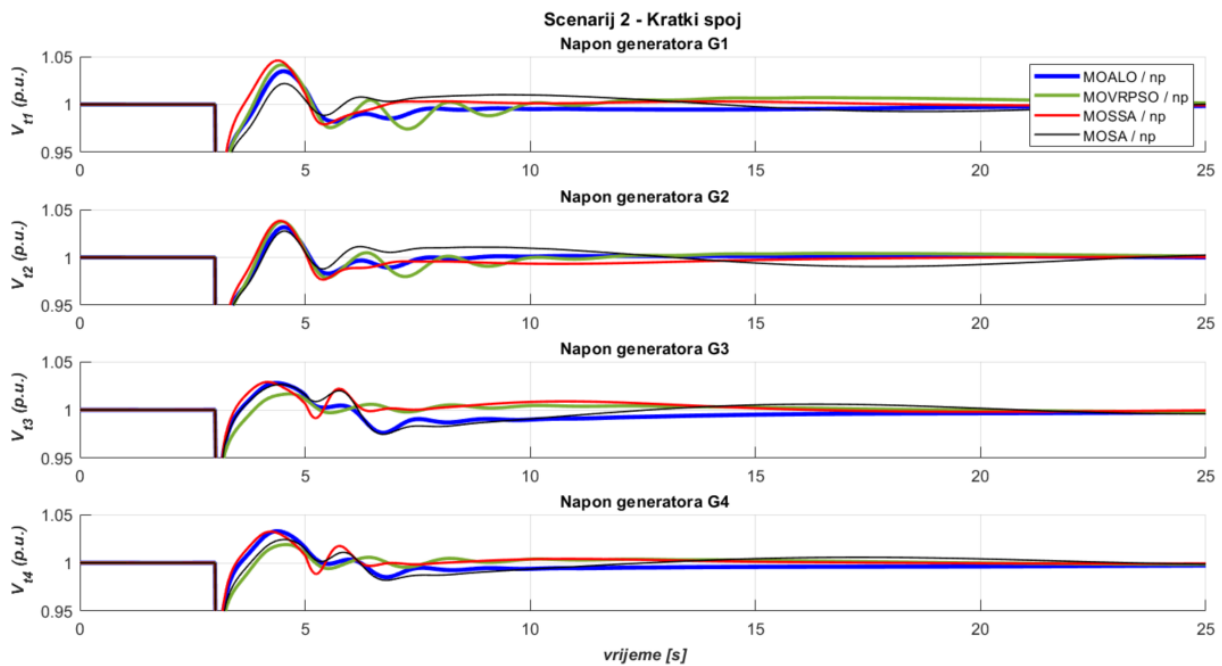
Slika 6.103. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



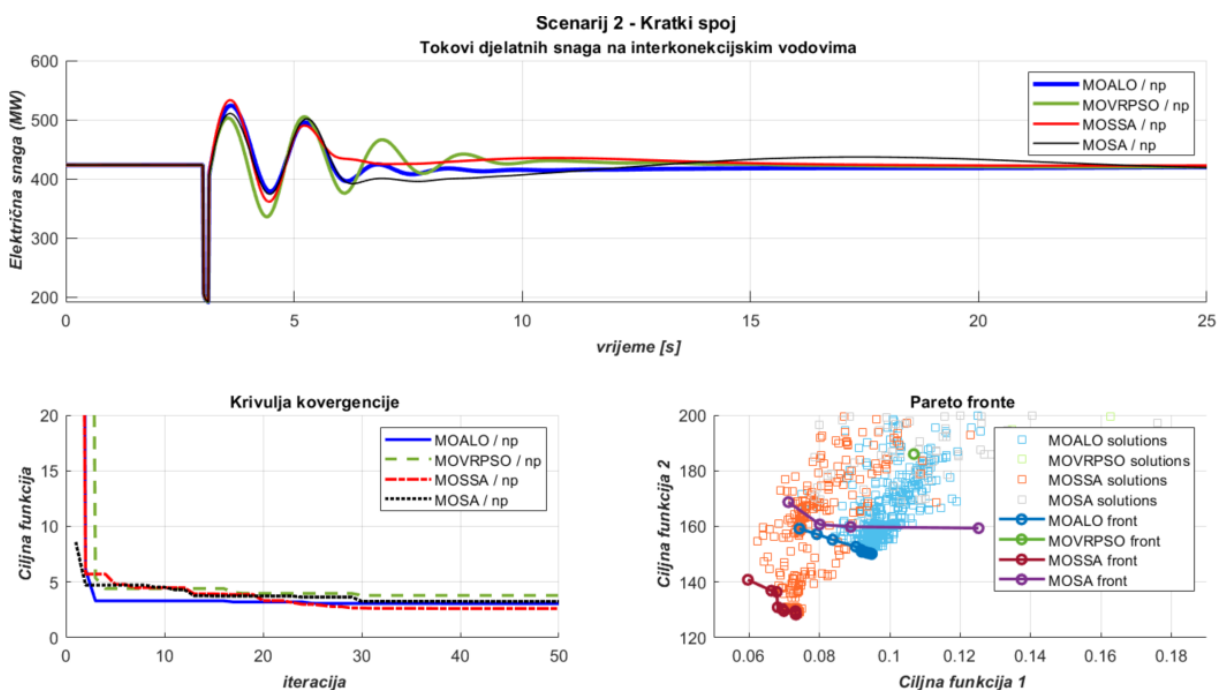
Slika 6.104. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



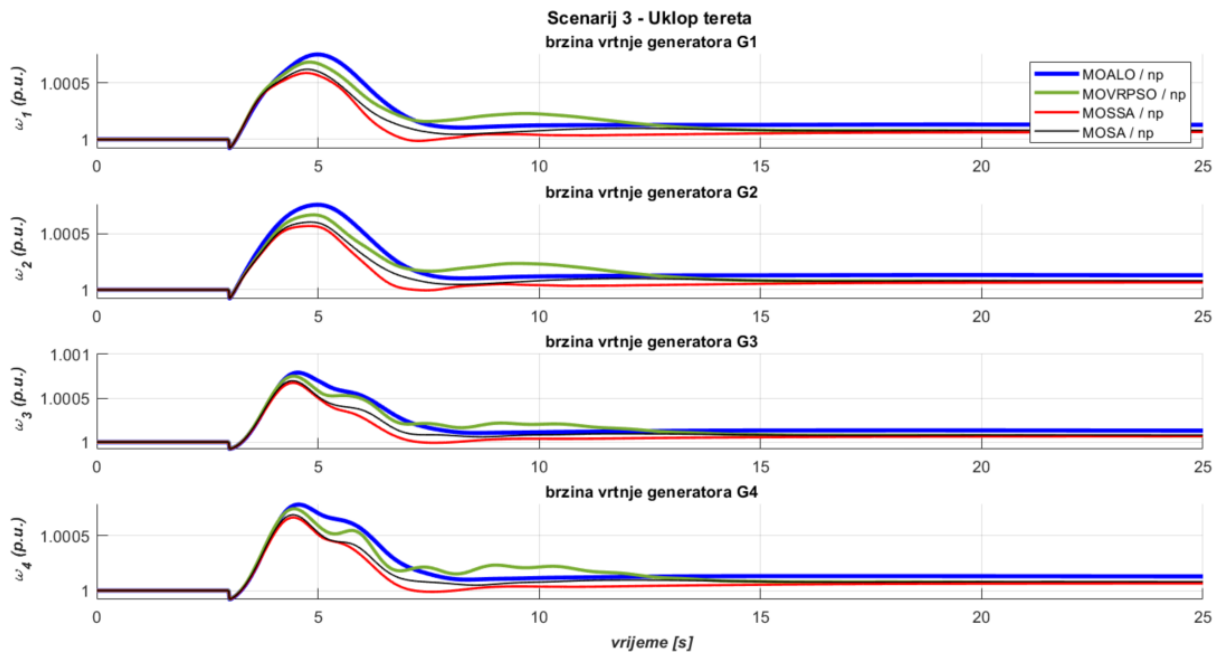
Slika 6.105. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



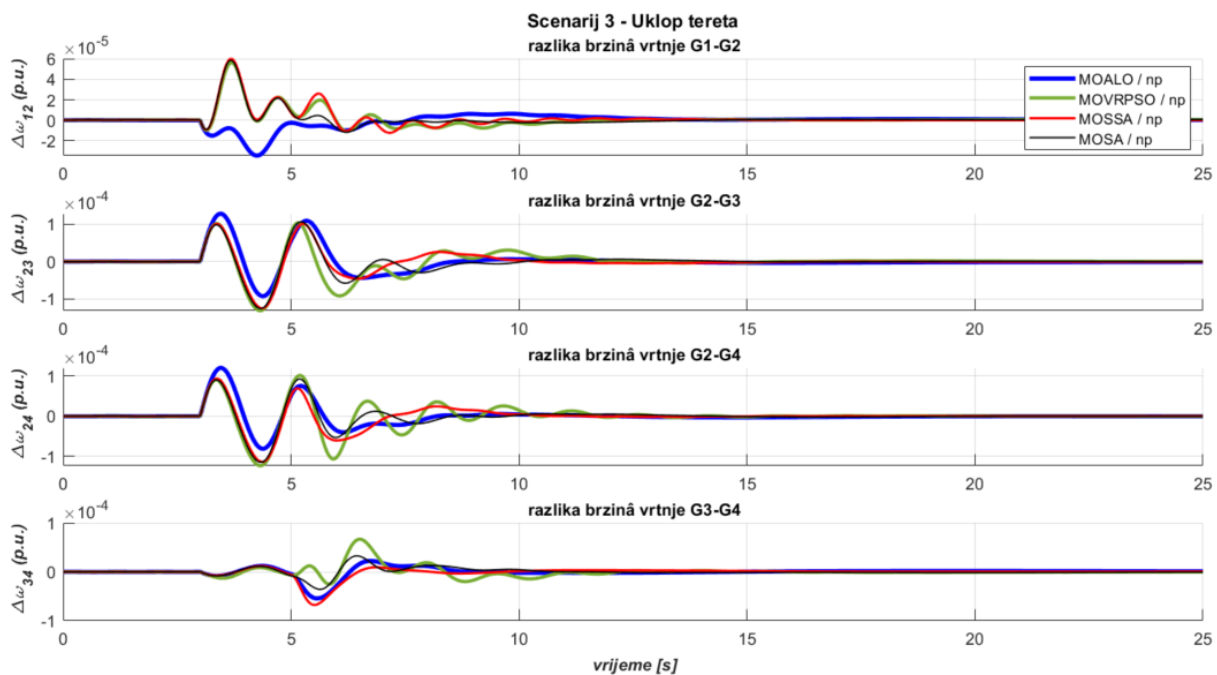
Slika 6.106. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



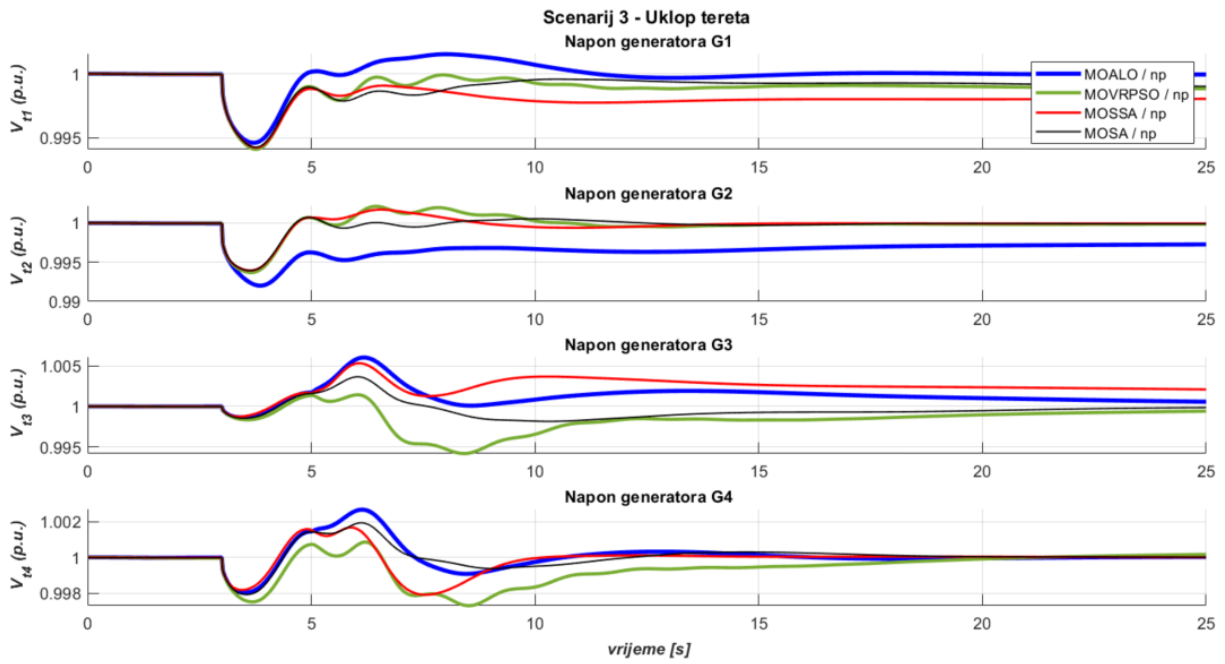
Slika 6.107. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



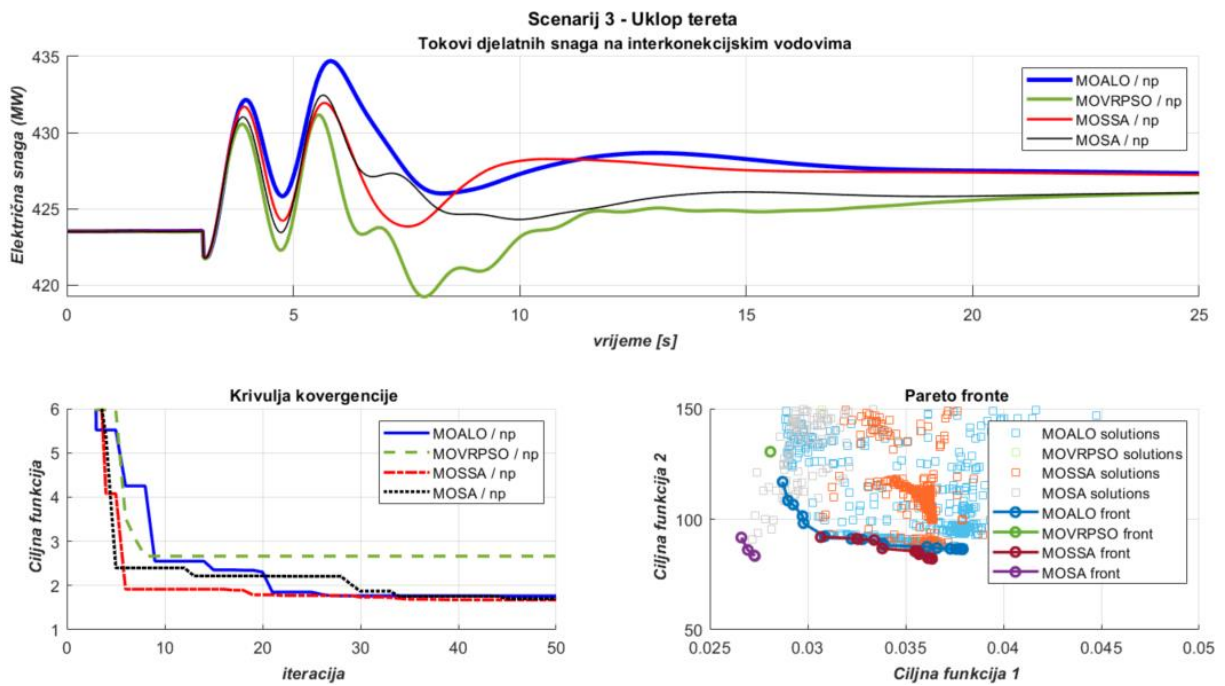
Slika 6.108. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



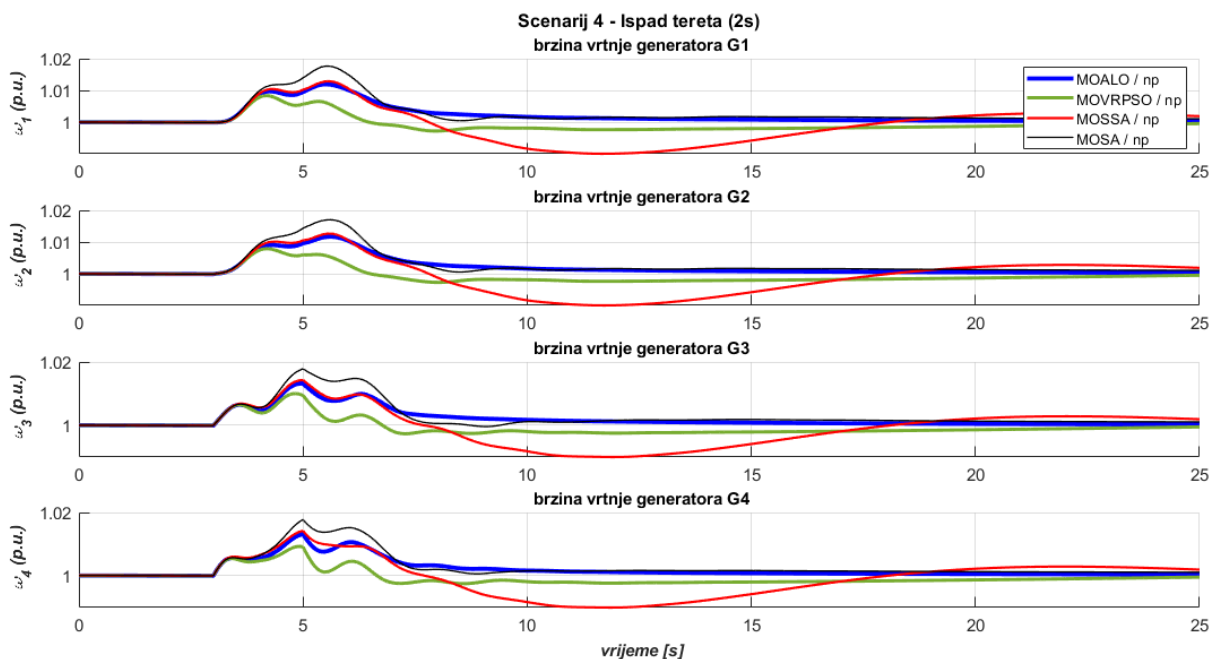
Slika 6.109. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



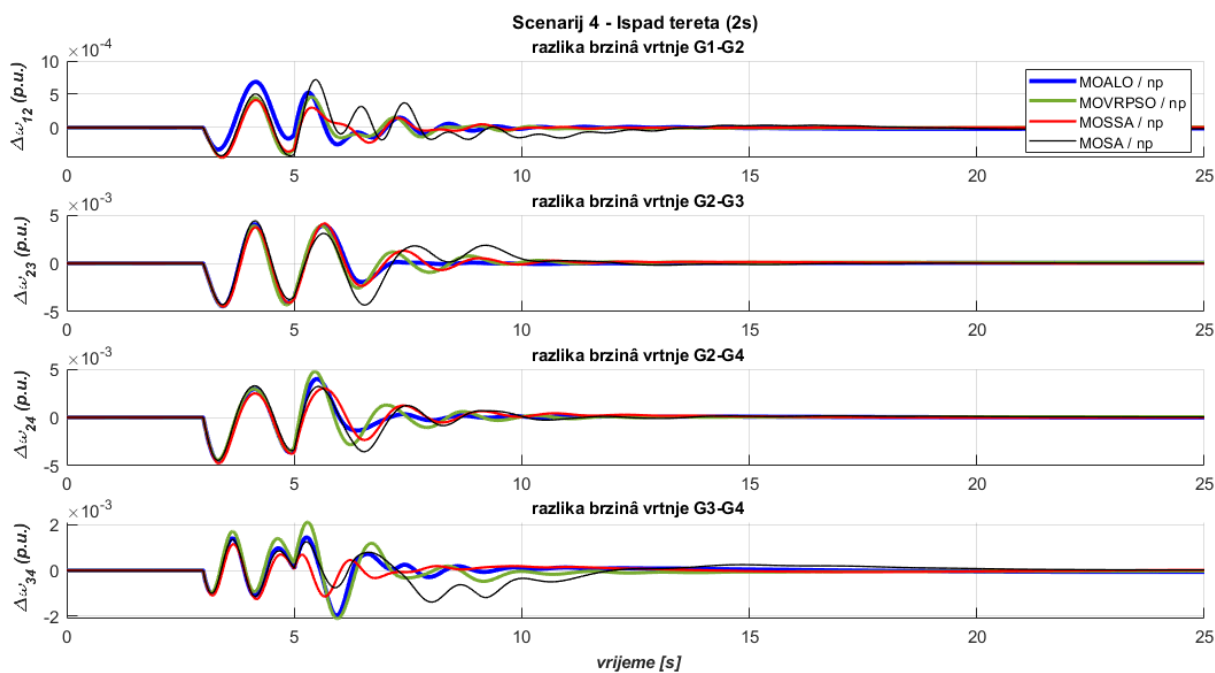
Slika 6.110. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



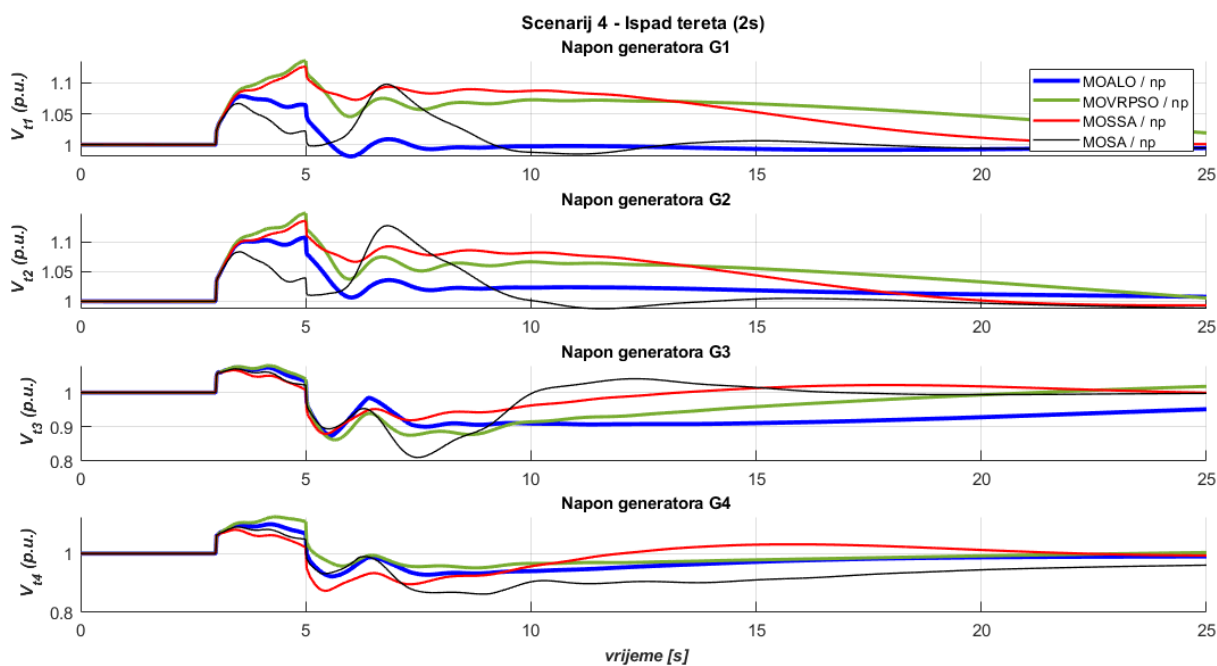
Slika 6.111. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi np (4.9)



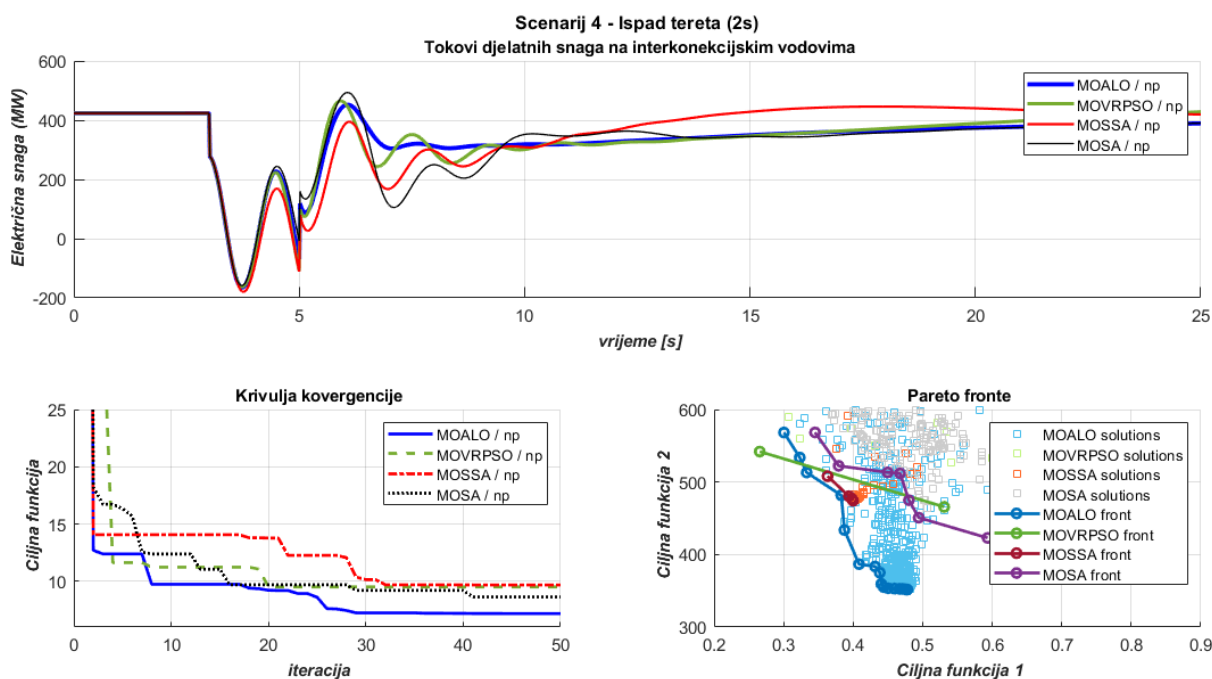
Slika 6.112. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)



Slika 6.113. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)

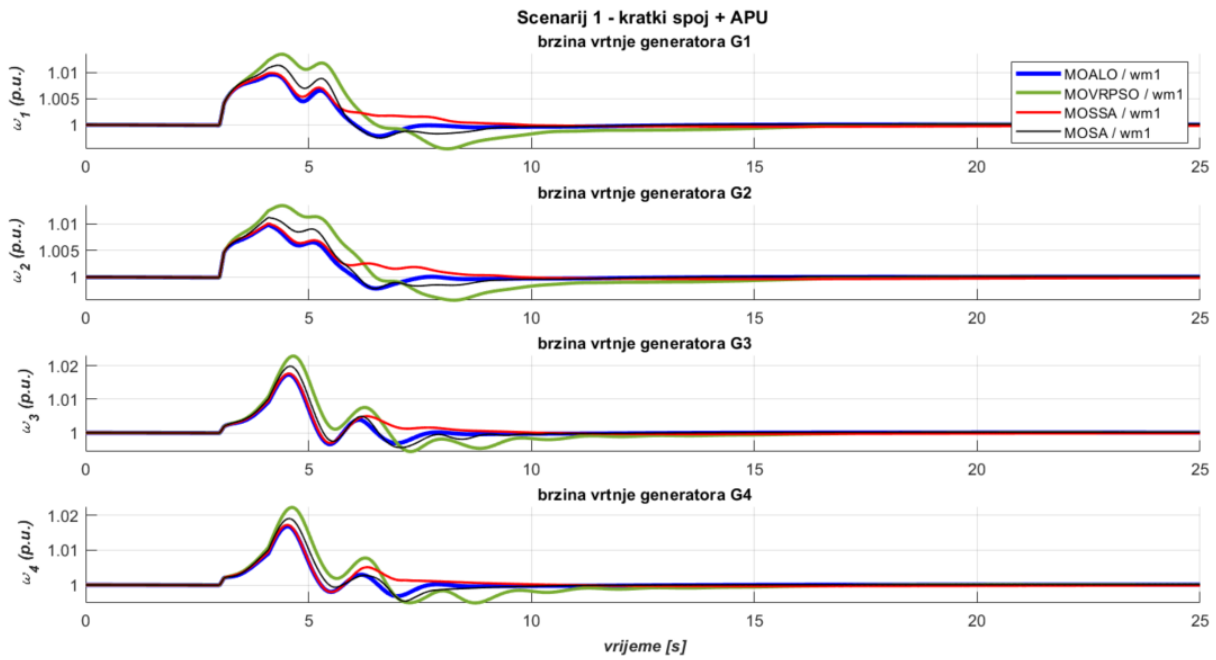


Slika 6.114. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)

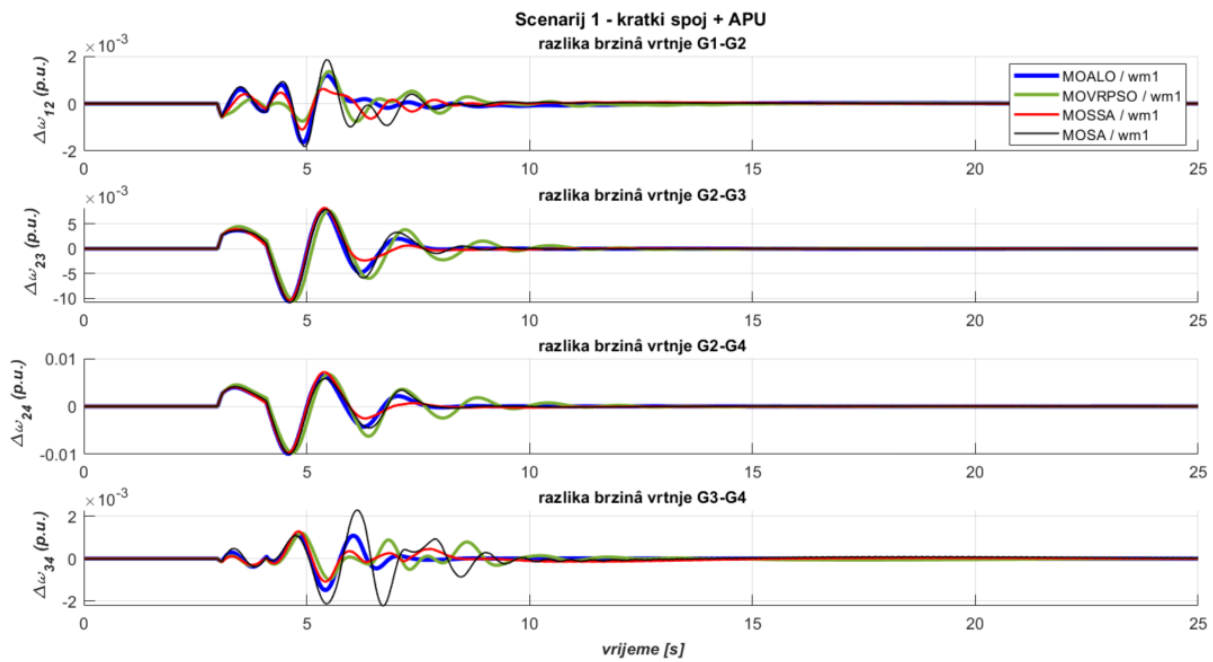


Slika 6.115. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi np (4.9)

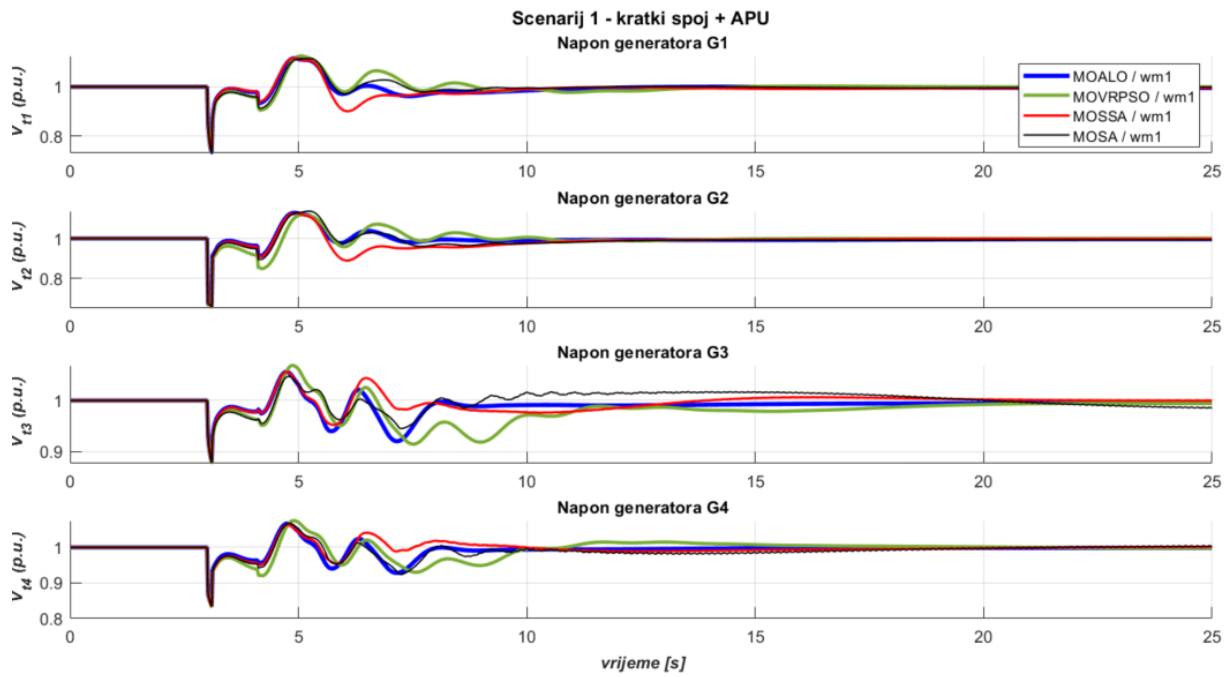




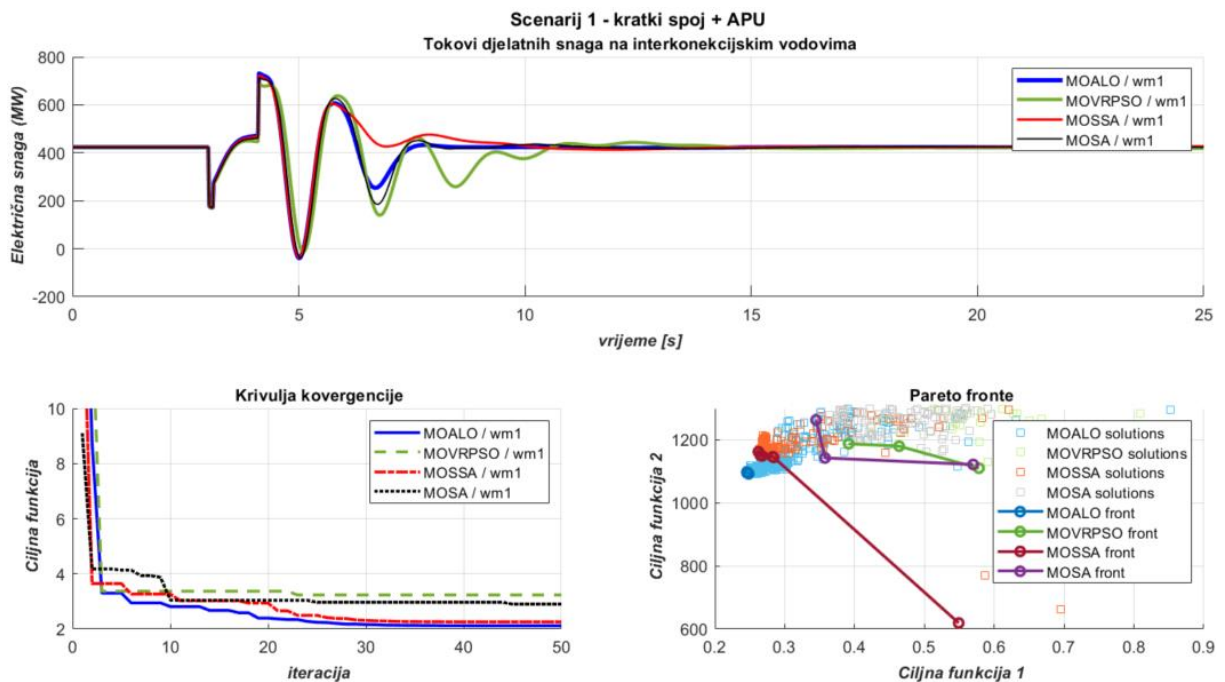
Slika 6.116. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



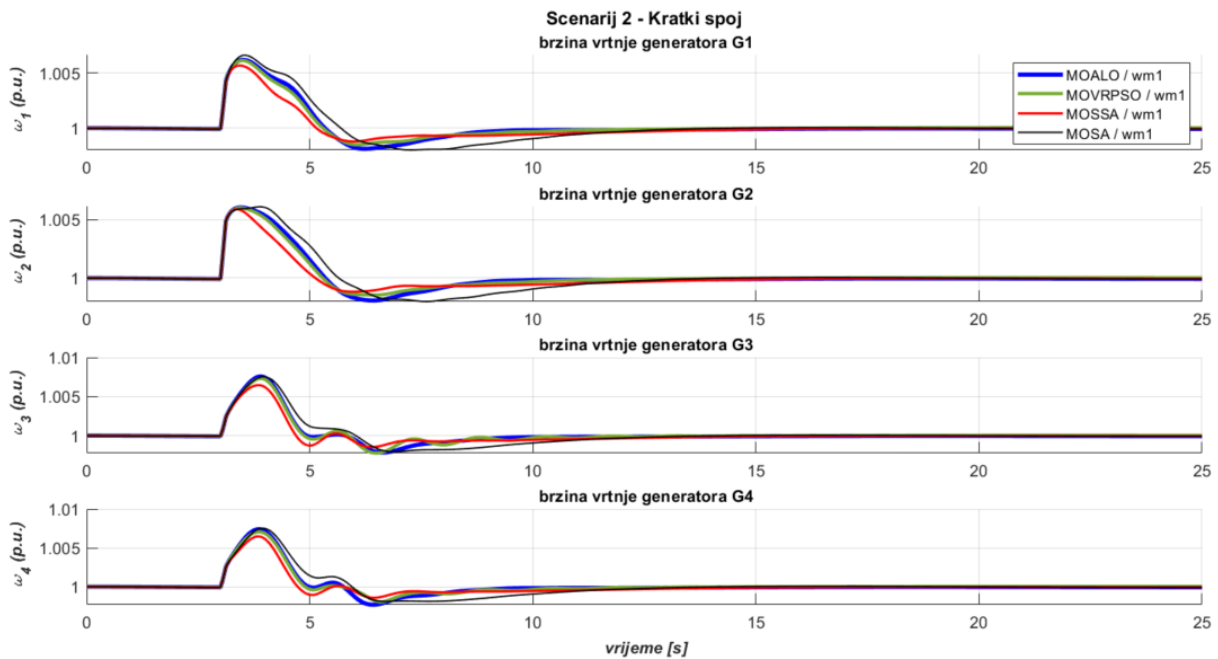
Slika 6.117. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



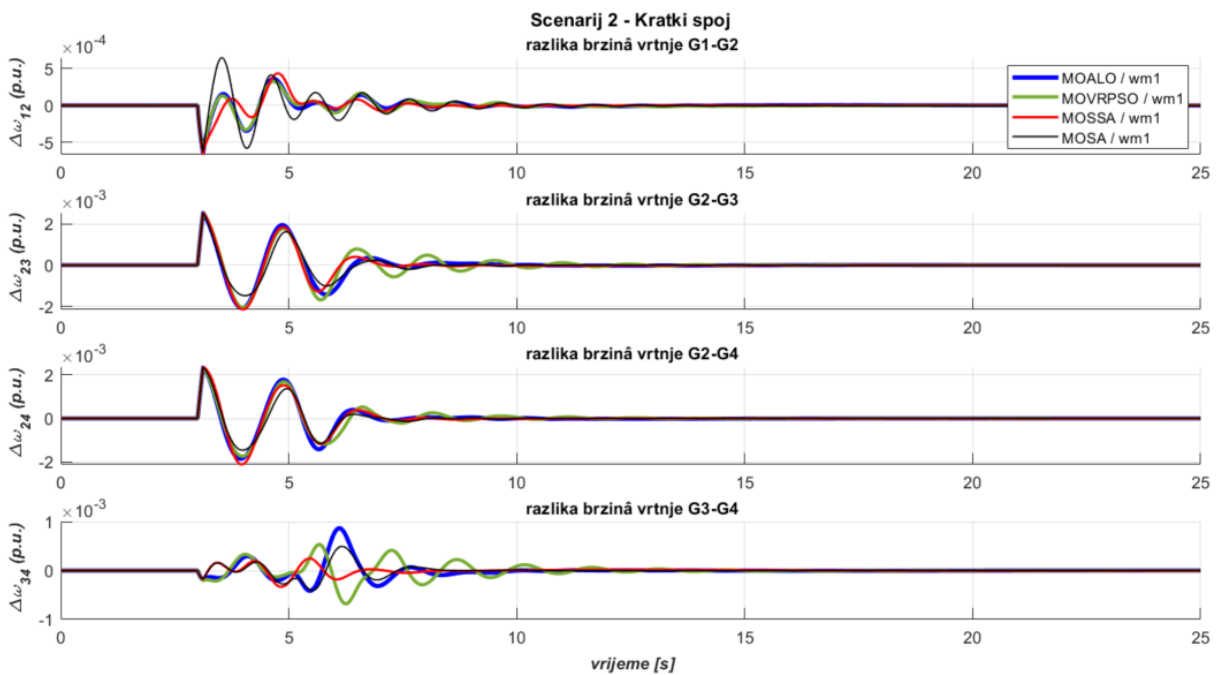
Slika 6.118. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



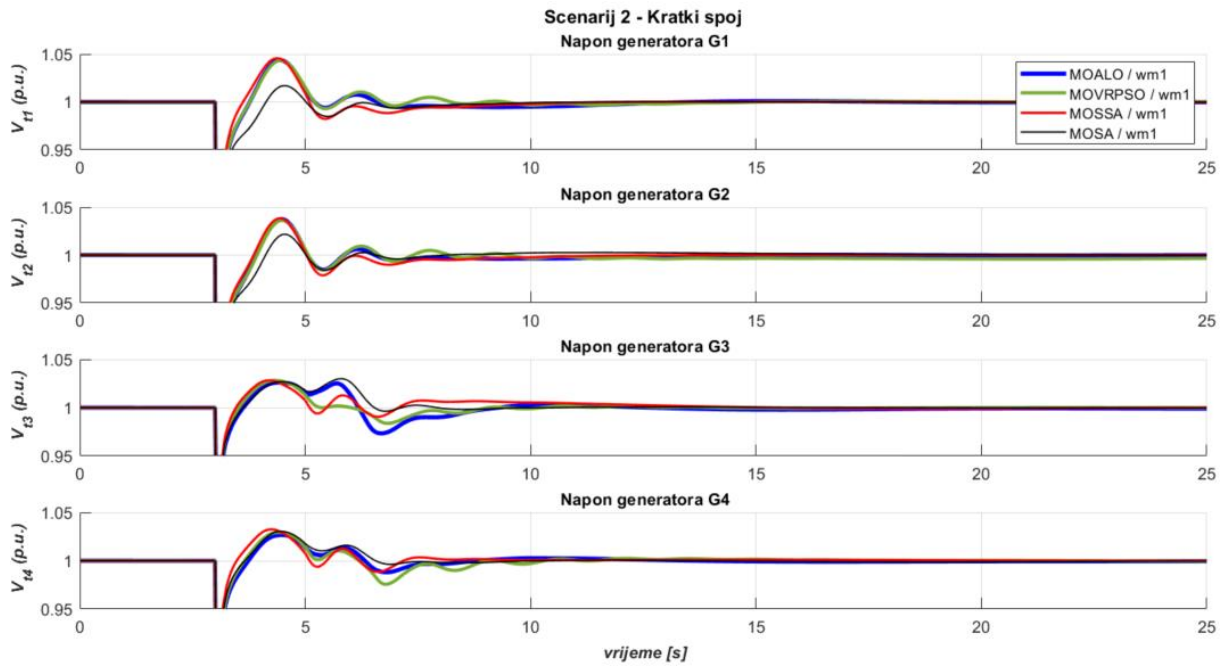
Slika 6.119. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



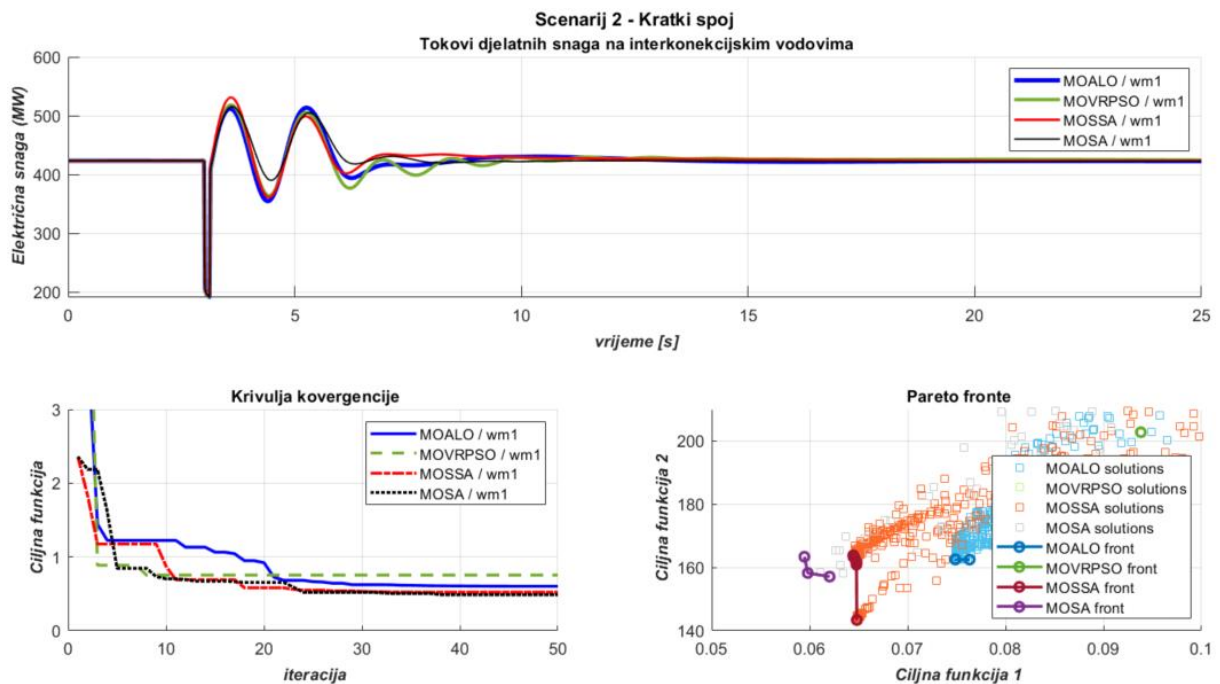
Slika 6.120. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



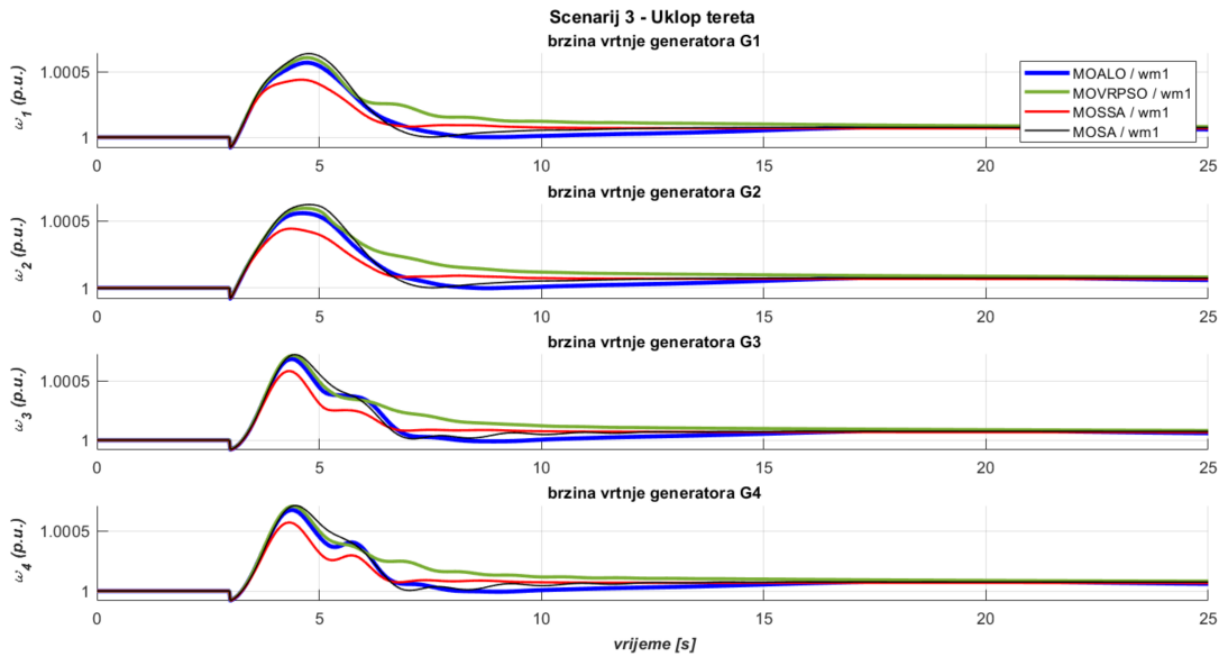
Slika 6.121. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



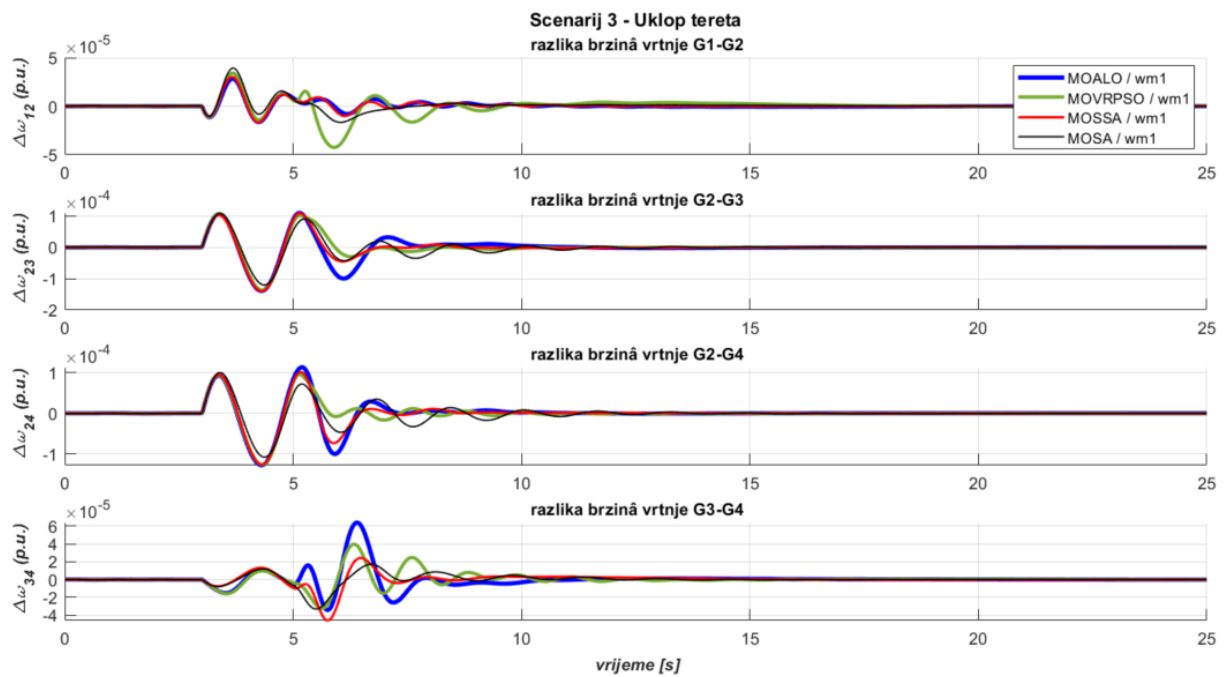
Slika 6.122. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



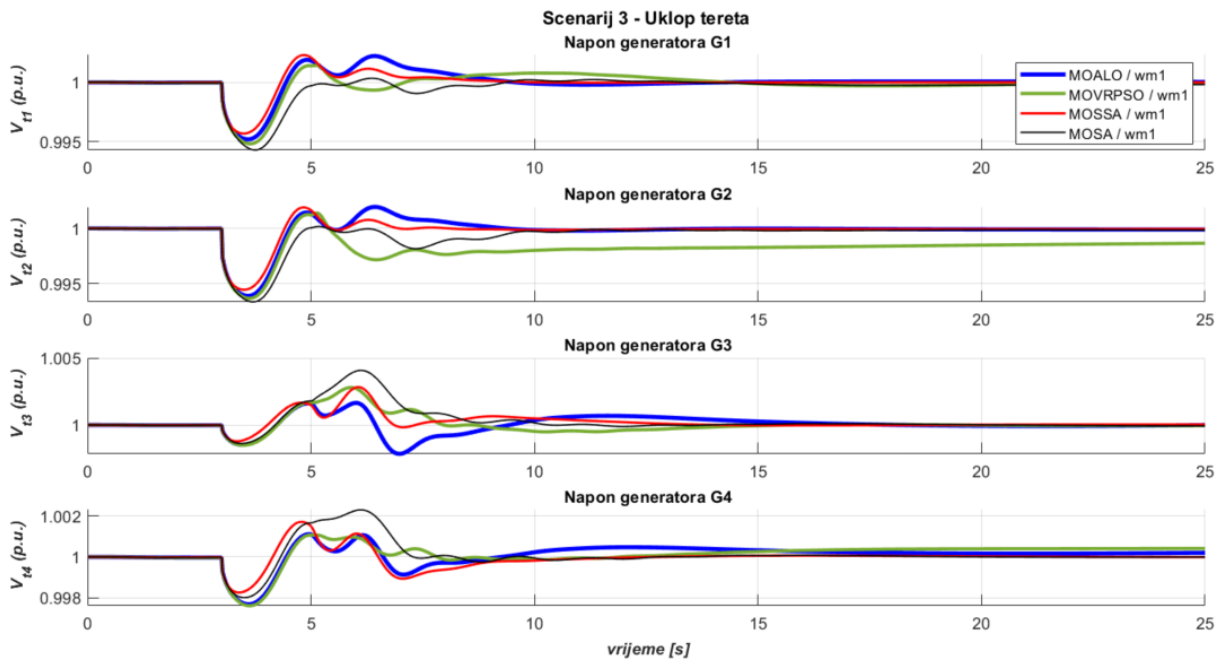
Slika 6.123. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



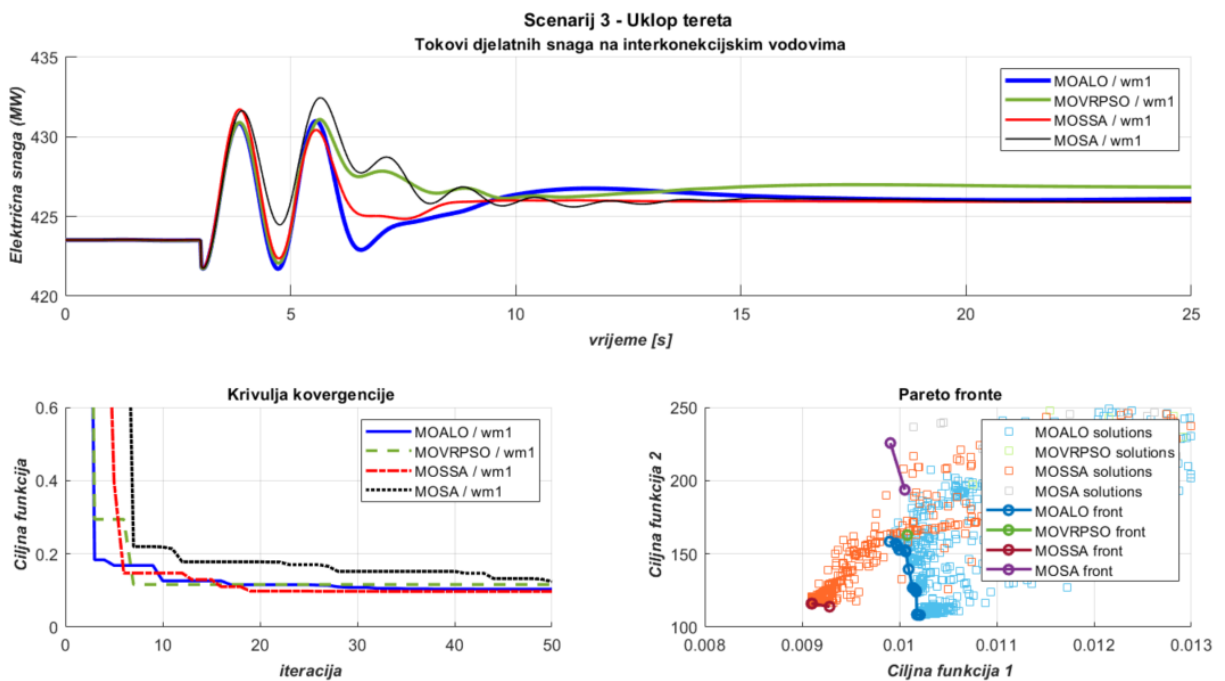
Slika 6.124. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



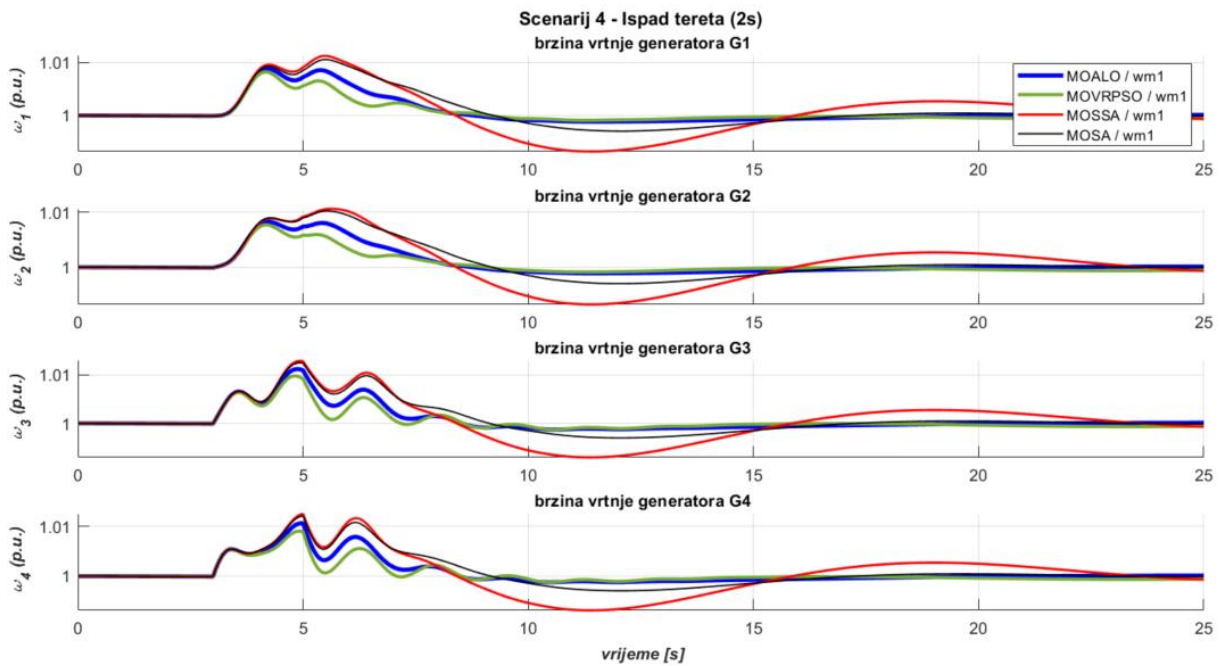
Slika 6.125. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



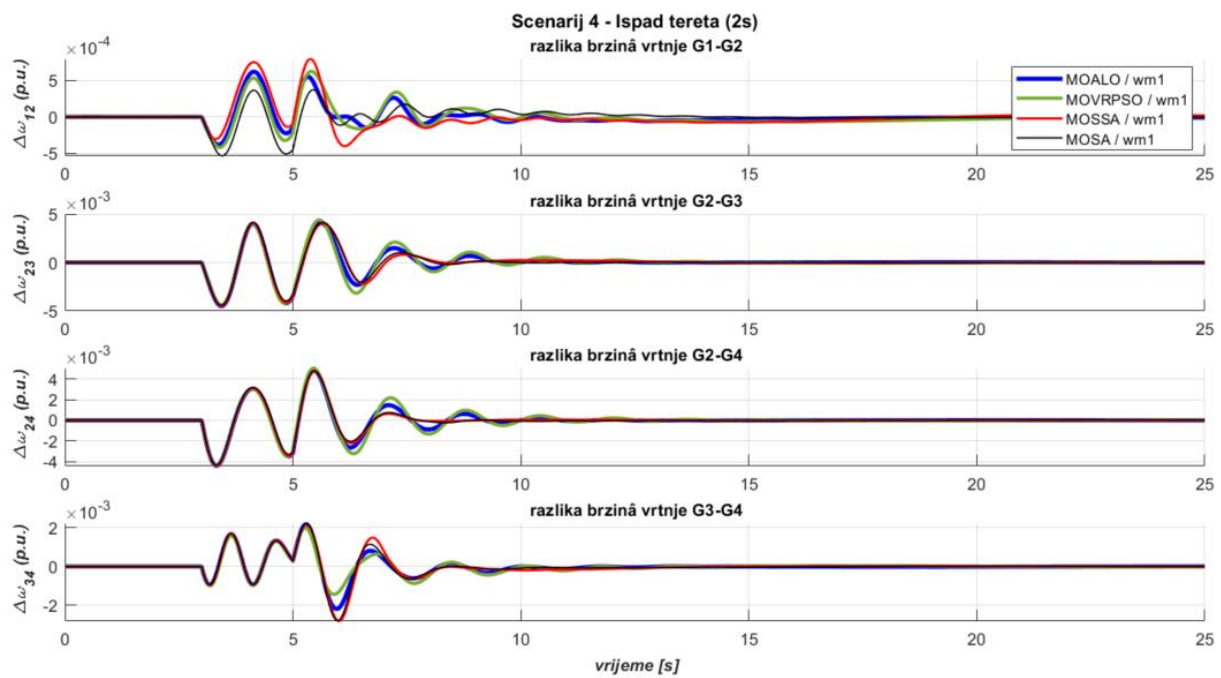
Slika 6.126. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



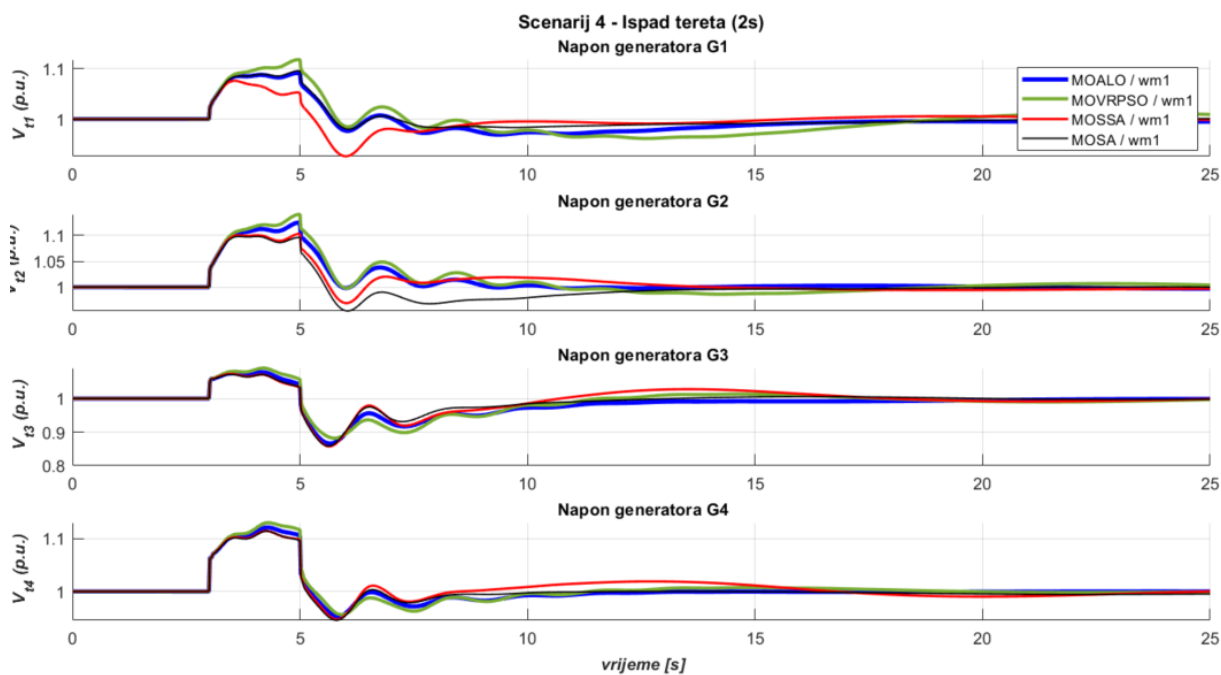
Slika 6.127. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)



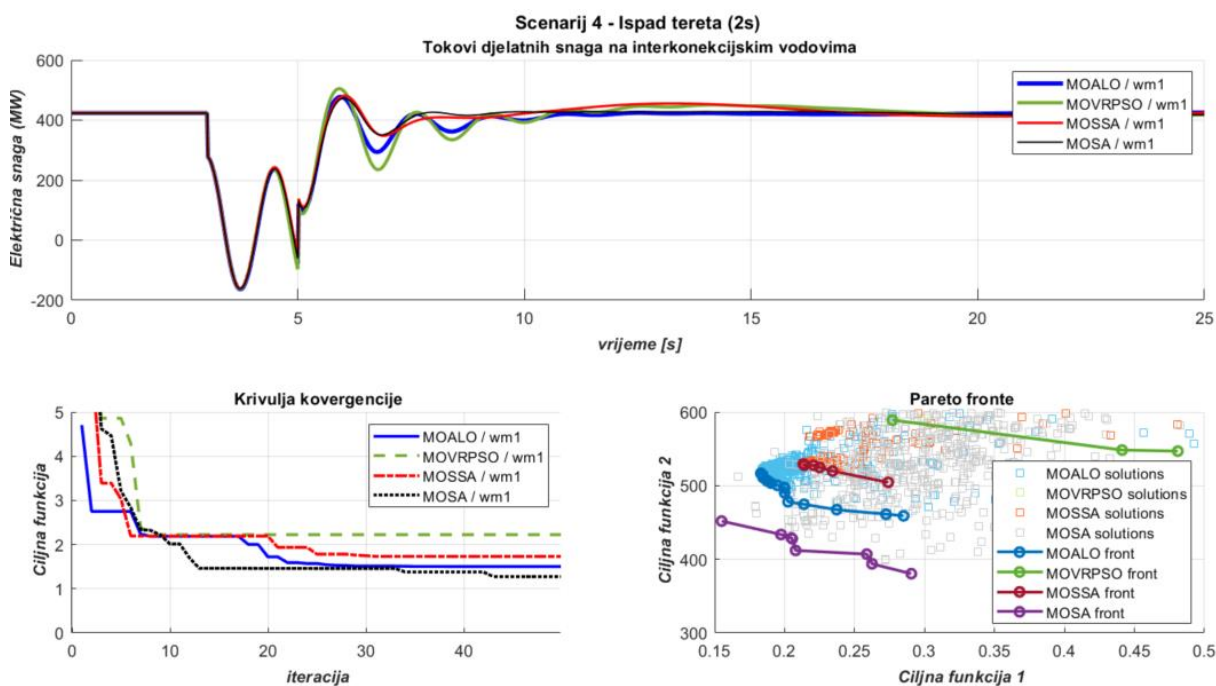
Slika 6.128. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)



Slika 6.129. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm1 (4.11)

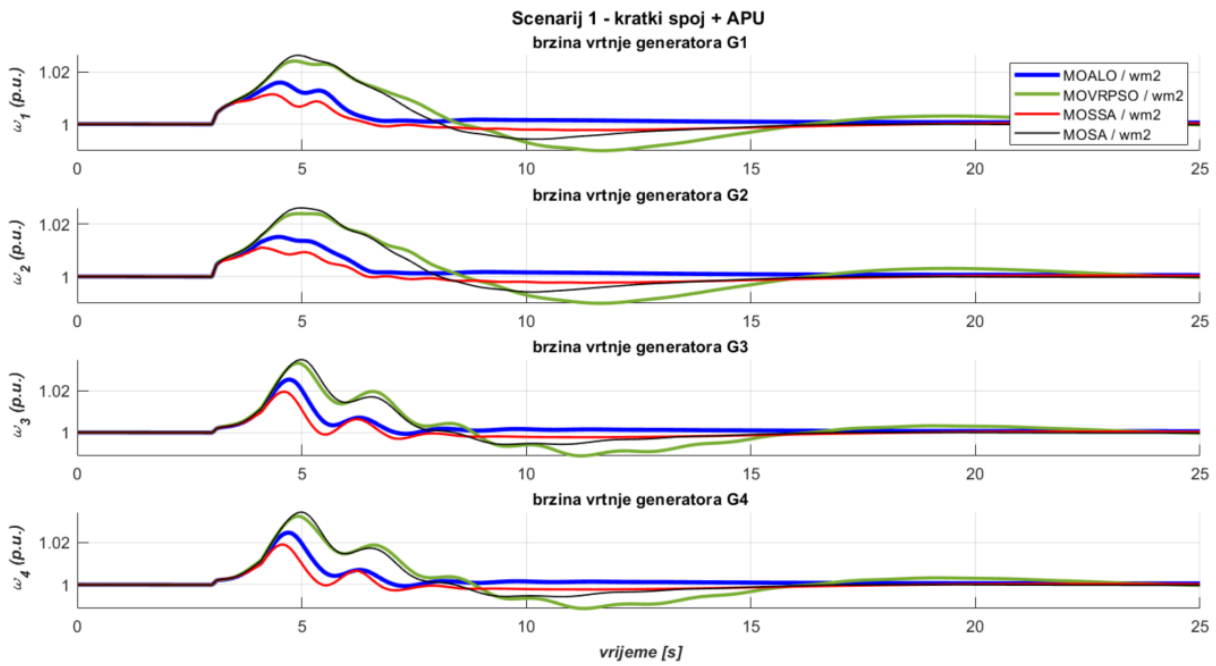


Slika 6.130. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)

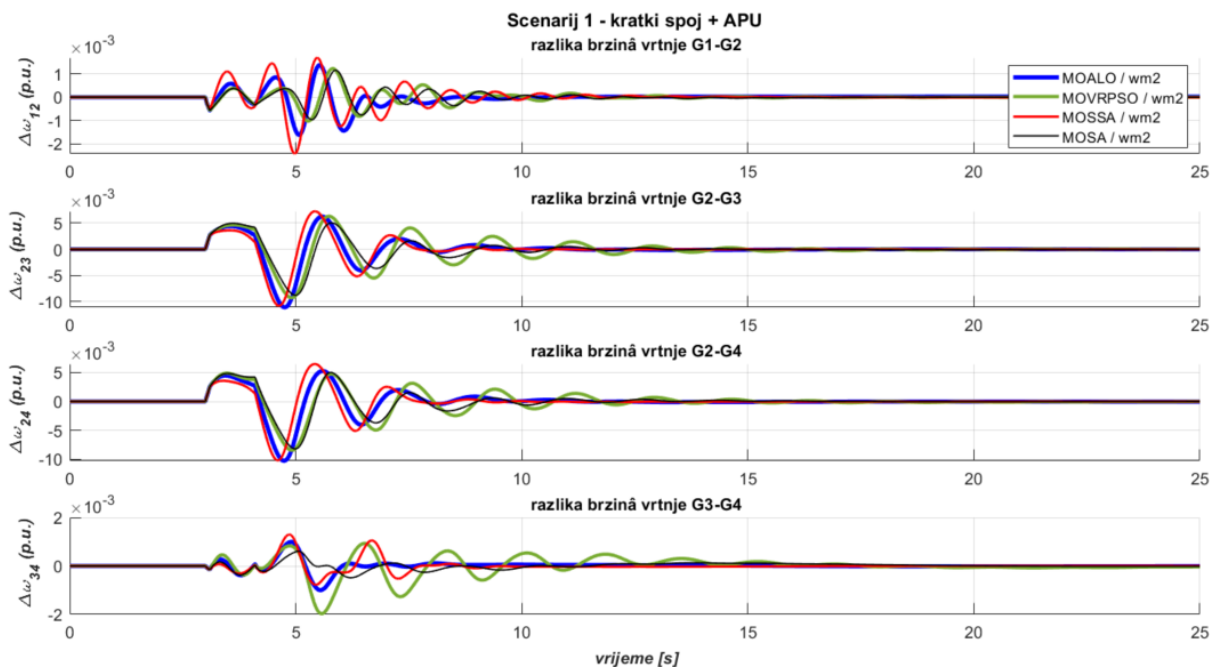


Slika 6.131. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm1 (4.11)

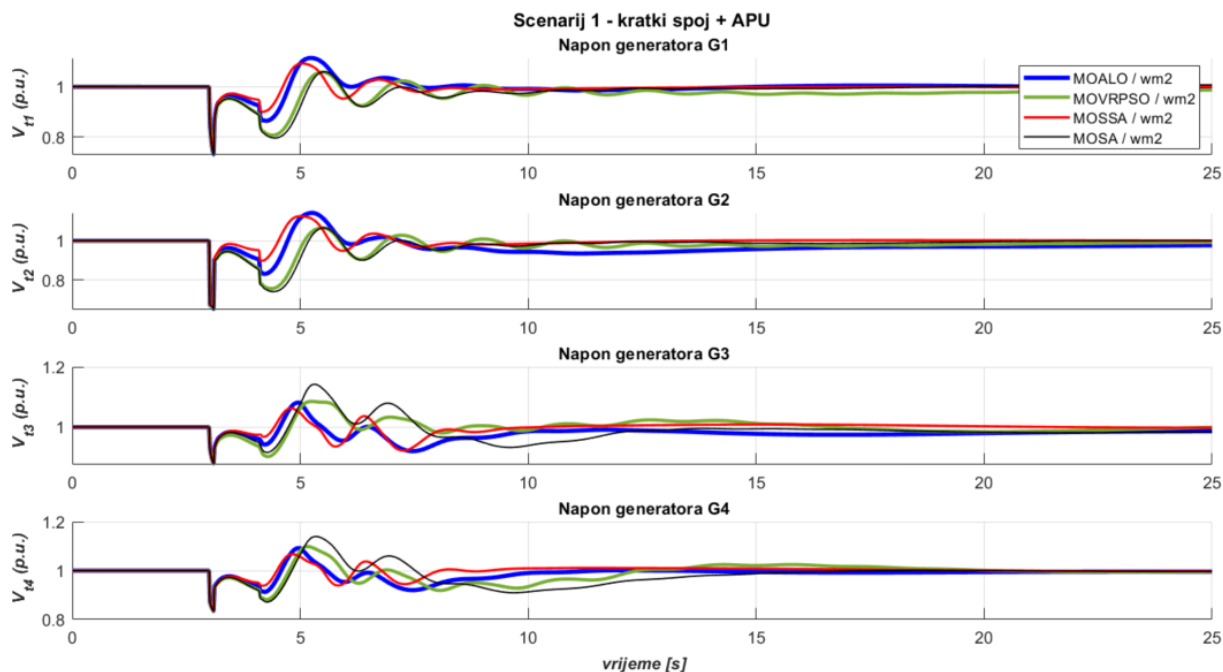




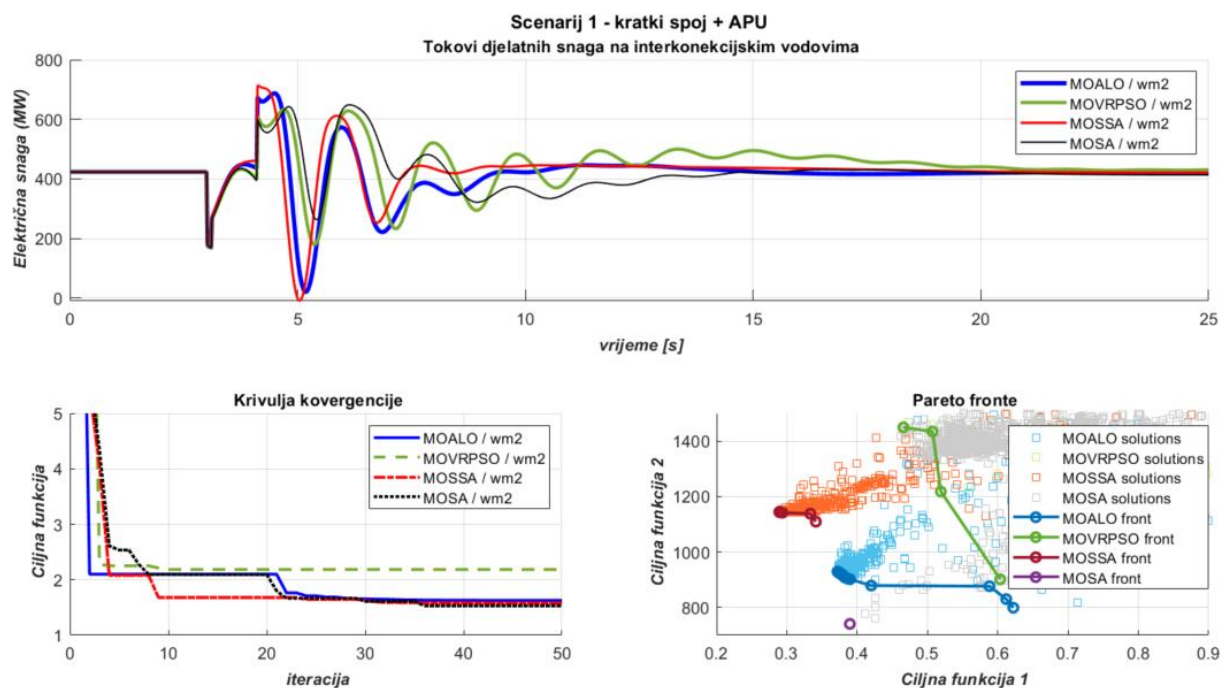
Slika 6.132. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



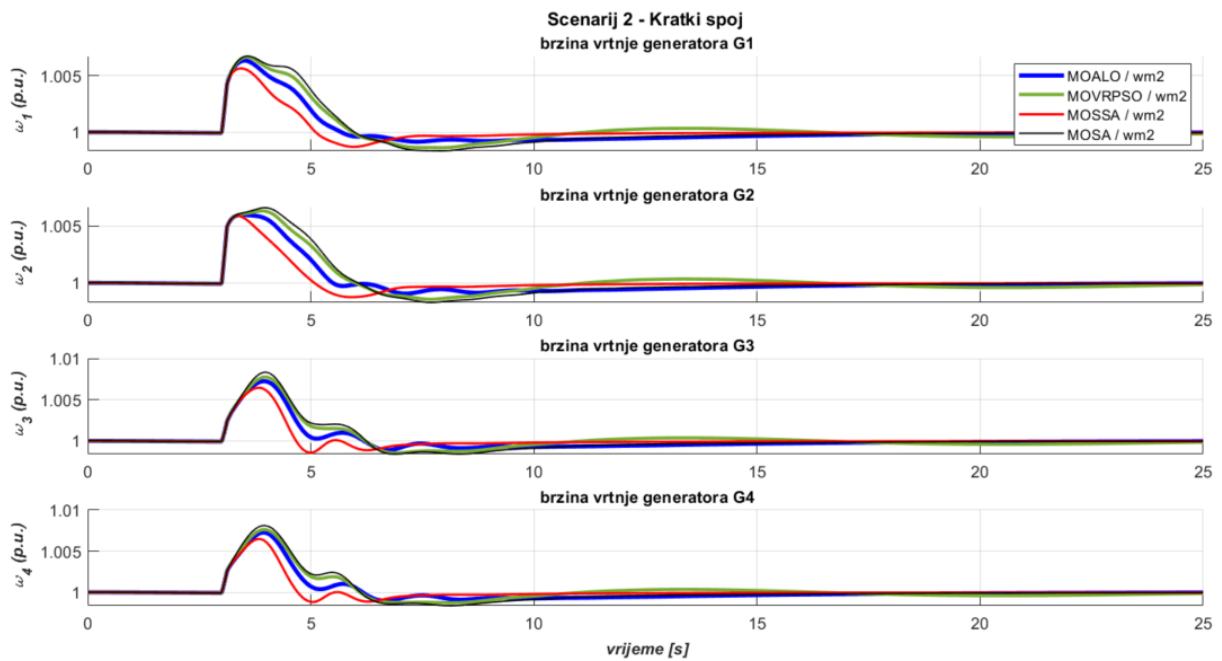
Slika 6.133. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



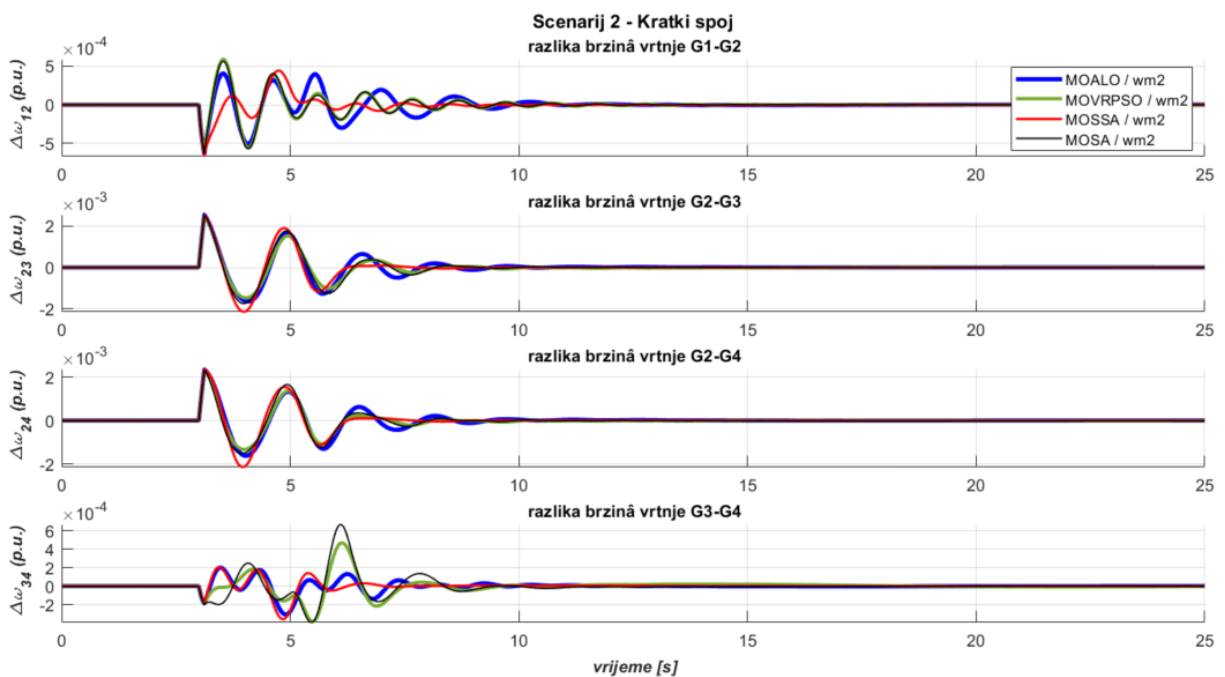
Slika 6.134. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



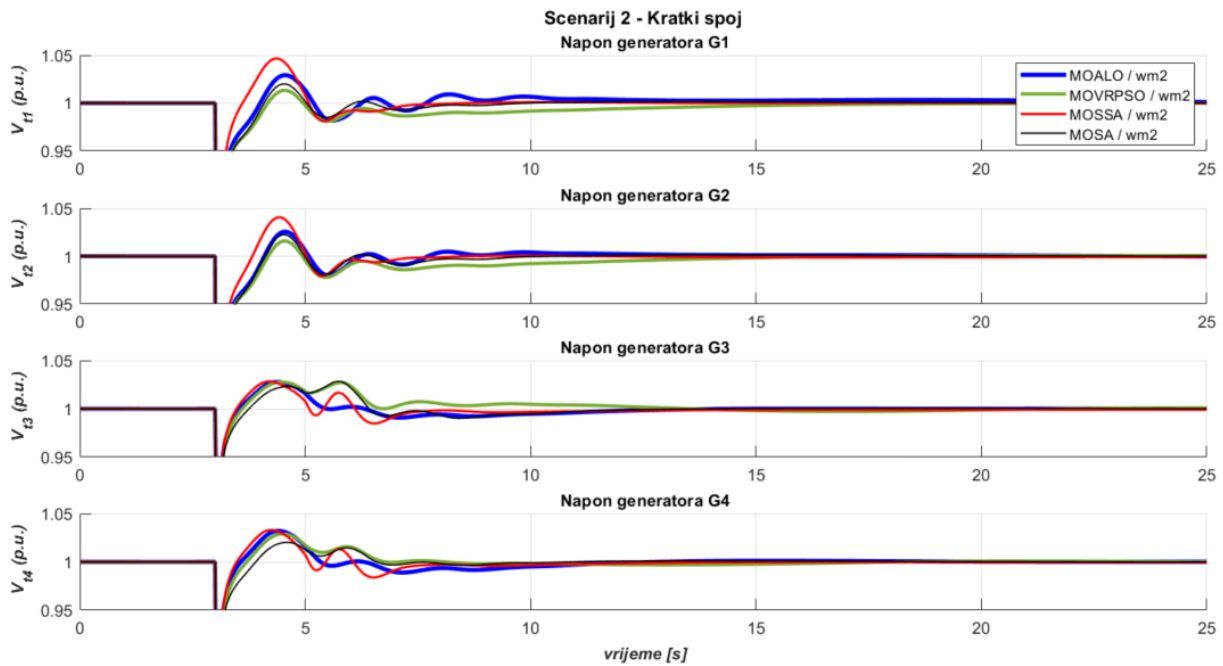
Slika 6.135. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



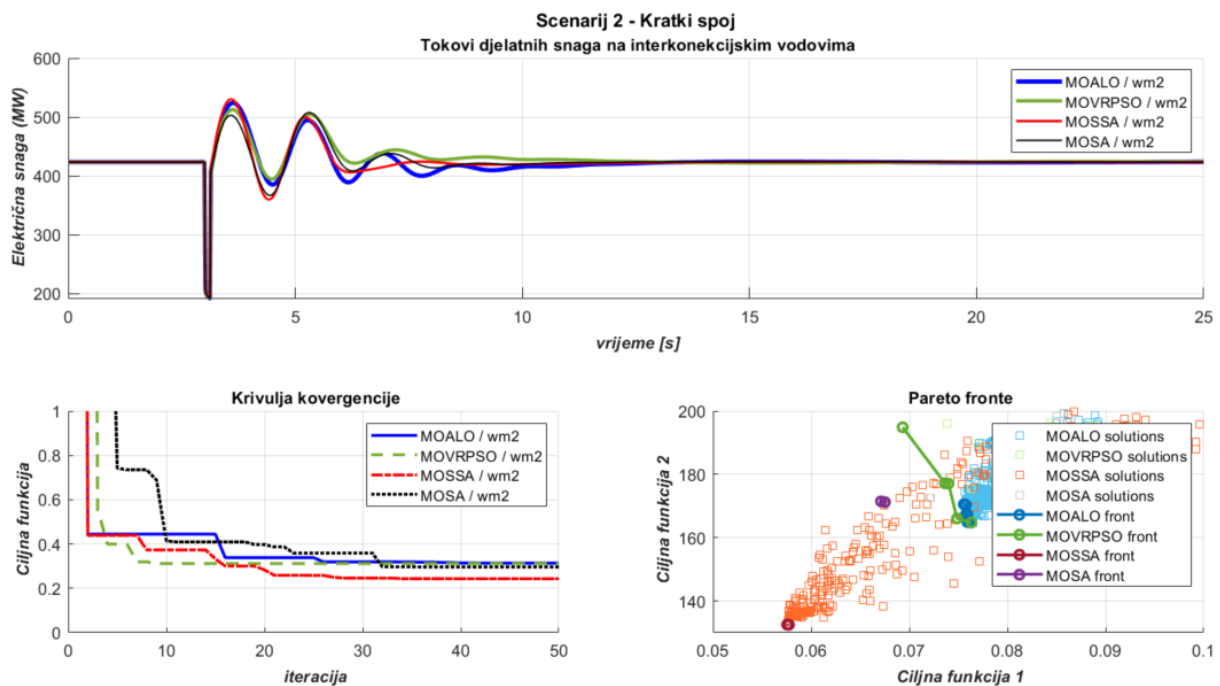
Slika 6.136. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jed višeciljnoj nociljnoj metodi wm2 (4.11)



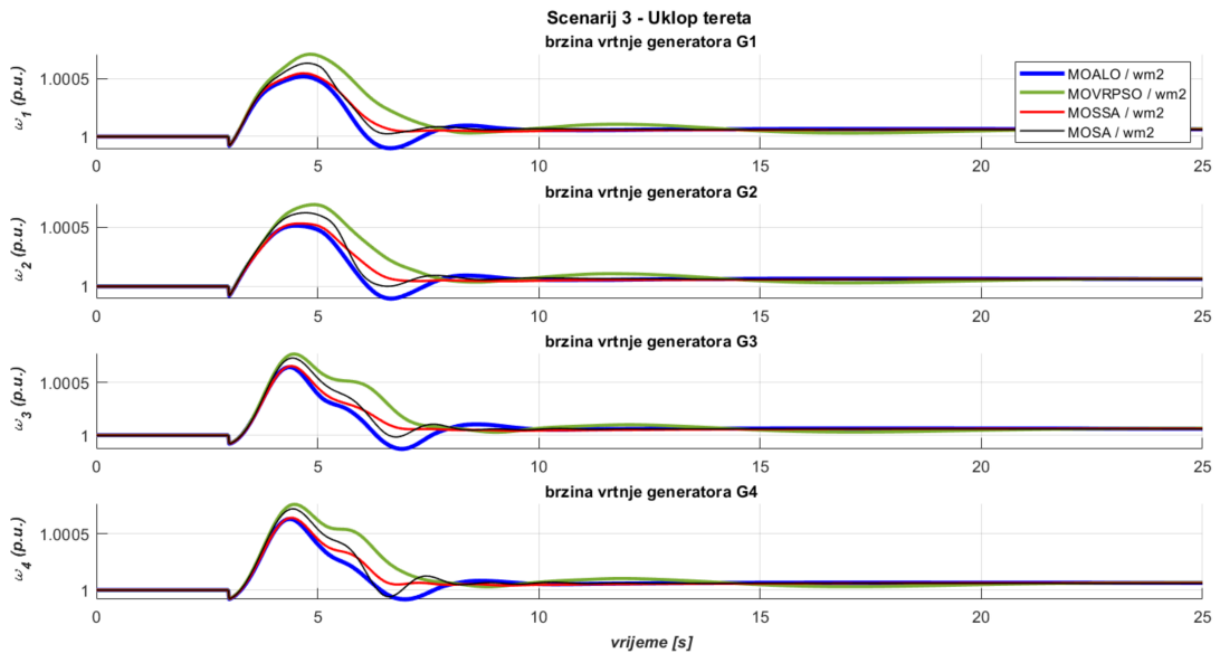
Slika 6.137. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



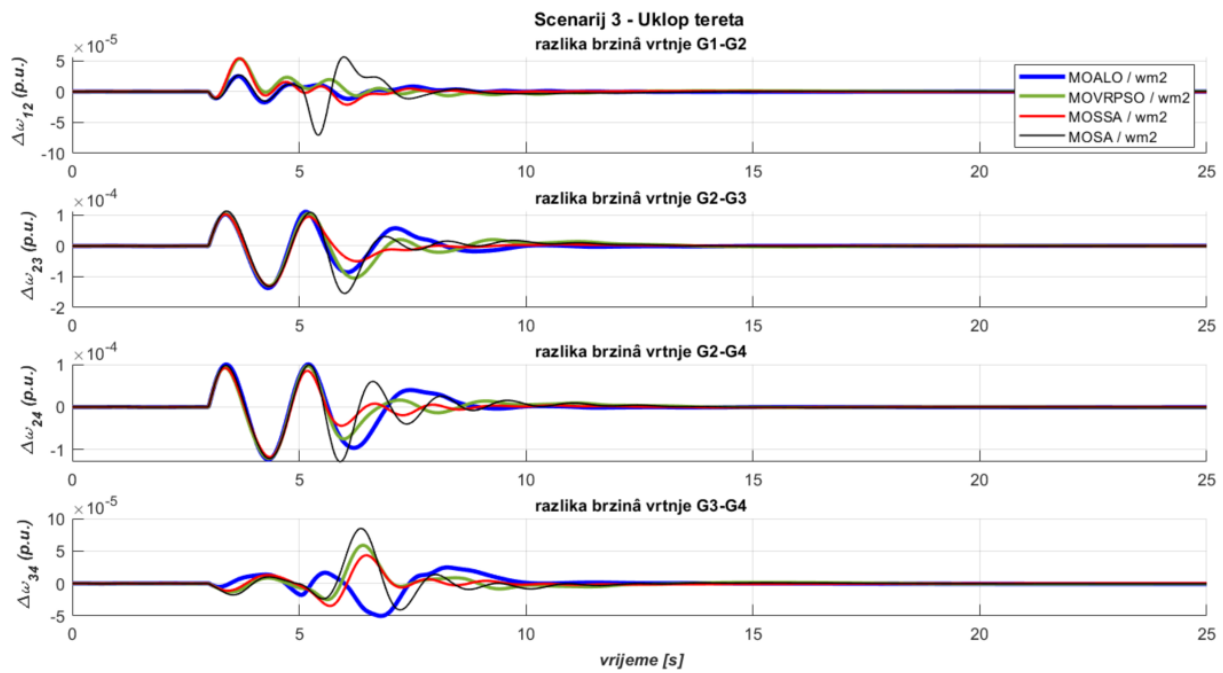
Slika 6.138. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



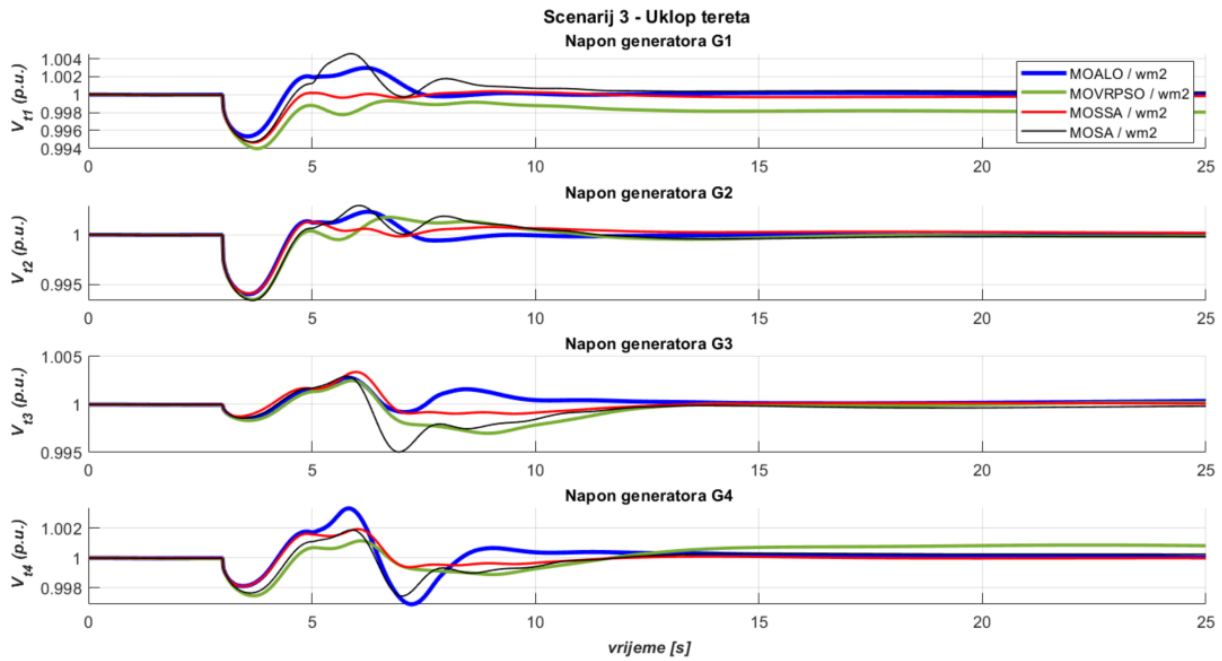
Slika 6.139. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



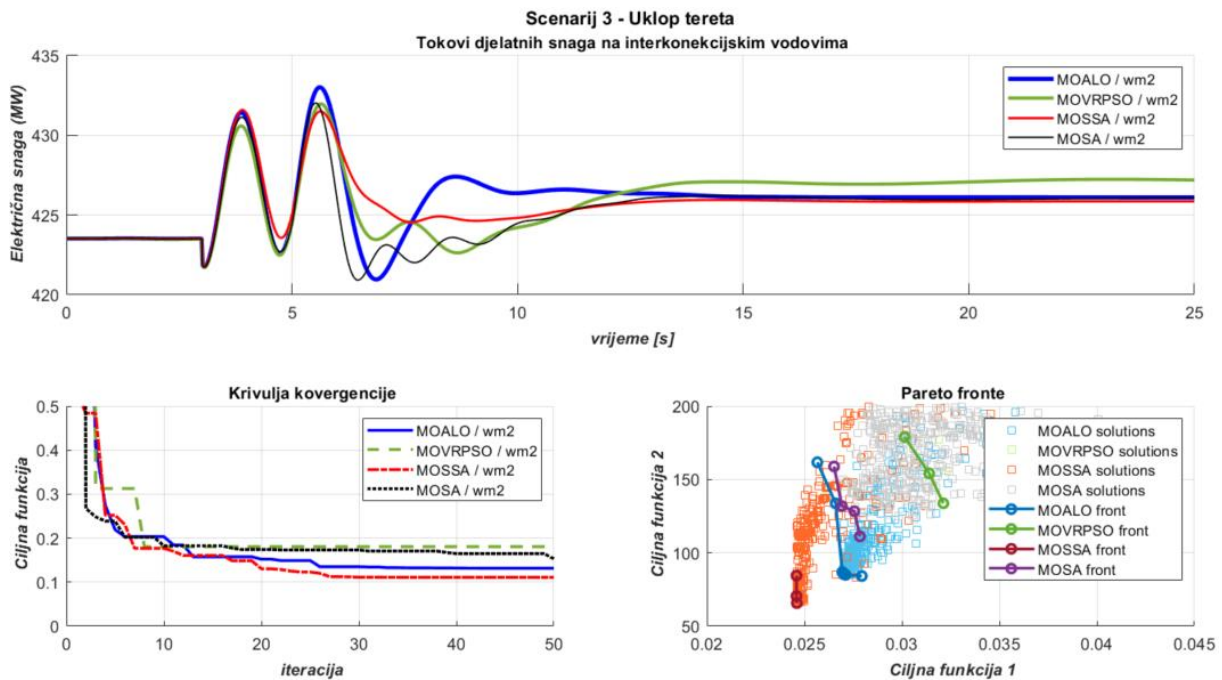
Slika 6.140. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



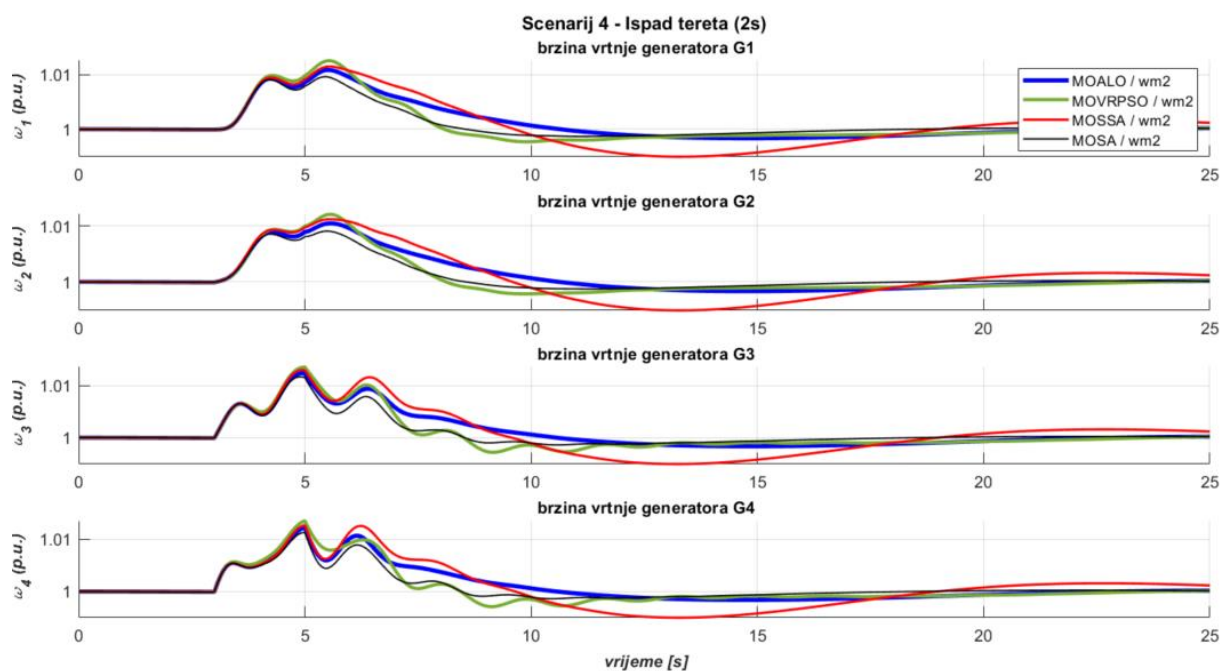
Slika 6.141. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



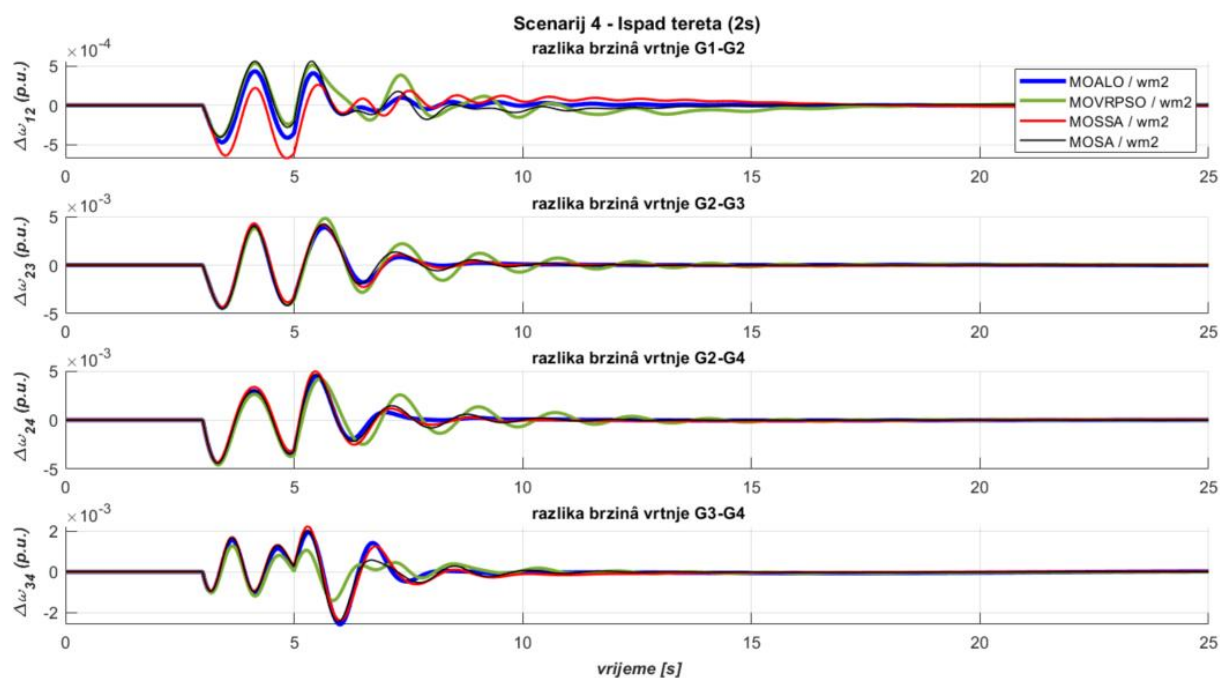
Slika 6.142. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



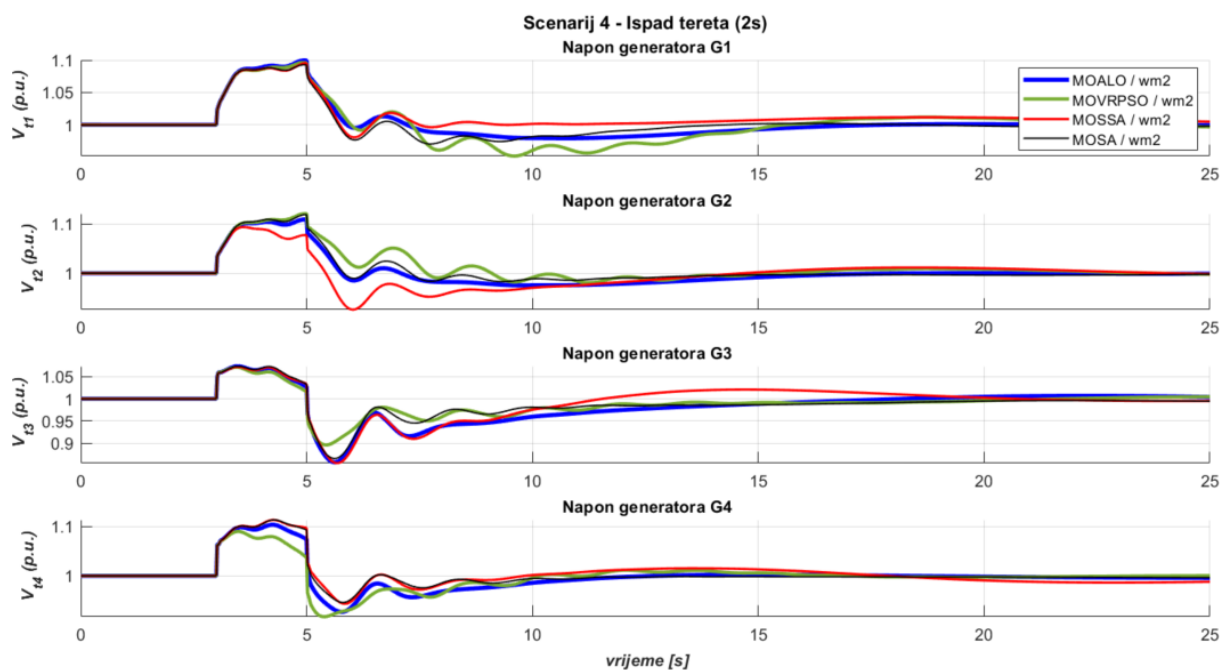
Slika 6.143. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višecilnoj metodi wm2 (4.11)



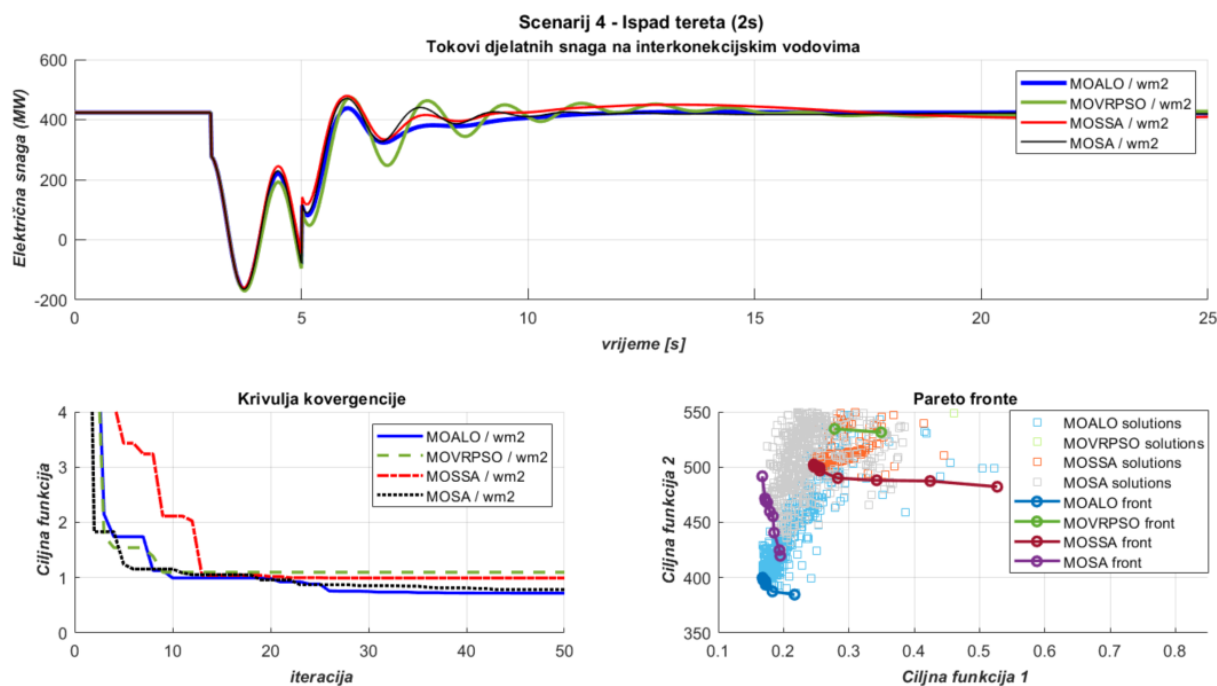
Slika 6.144. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.145. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.146. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Slika 6.147. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi wm2 (4.11)



Analiza grafičkih rezultata pokazuje uspješnost svih algoritama i metoda u minimizaciji oscilacija optimizacijskim metodama. Detaljnijim pregledom vidljivo je da kod algoritama bolju učinkovitost, kao i u prethodnim slučajevima, pokazuju algoritmi novije generacije MOSSA i MOALO, od klasičnih MOSA i MOVRPSO, koji je opet pokazao slabije optimizacijske performanse. Pregledom metoda primjetno je da težinske višeciljne metode daju rezultate manjih oscilacija kod svih veličina i bolje smirivanje dinamičkih pojava od neutralne metode. Neutralna metoda je nešto uspješnija po pitanju smirivanja oscilacija razlikâ brzina vrtnje, čime se vidi da je utjecaj druge ciljne funkcije znatniji od prve.

Numerička analiza rezultata za TAFM model polazi od tabličnog pregleda rezultata optimizacijskih procesa koji uključuju najbolje rješenje, granice Pareto fronti i broj rješenja Pareto skupa, prikazanih u tablici 6.10. MOSSA algoritam nudi najbolja rješenja u 50% ispitanih slučajeva, dok su po 25% u istom smislu uspješni algoritmi MOALO i klasični MOSA. Veće brojeve rješenja u pravilu nude noviji algoritmi, što je, uz učinkovitost, dodatni benefit u odnosu na klasične algoritme. Prikaz uspješnosti kroz najbolja rješenja je prikazan na slici 6.148.

Analiza kvalitete optimizacijskih procesa u tablici 6.11 pokazuje kao i u slučaju ispitivanja na WSCC modelu bolju moć konvergencije novijih algoritama u odnosu na klasične. Tu se posebno pouzdanim pokazuju novi algoritmi koji zadržavaju visoku stopu moći konvergencije i u slučajevima kada se ne pokazuju najboljima. To sugerira i da u svim probnim pokušajima imaju tendenciju težiti prema jednom rješenju, a kroz učinkovitost se pokazuje da najbolja rješenja koja nude ne zaostaju za najboljima u slučajevima kada sam algoritam ne nudi najbolje rješenje.

Općenito gledano u oba slučaja ispitnih modela novi višeciljni algoritmi nude bolja rješenja, šire Pareto skupove i jaču moć konvergencije od klasičnih algoritama, što ih čini pouzdanijim izborom za optimizaciju parametara AVR i PSS uređaja. Isti algoritmi usklađeni sa težinskim metodama daju odličnu učinkovitost i široke Pareto skupove u minimizaciji oscilacija u problemima vezanima za prijelaznu i stabilnost malih poremećaja u EES-u.

Tablica 6.10 Rezultati optimizacijskih procesa, TAFM model, višeciljna optimizacija

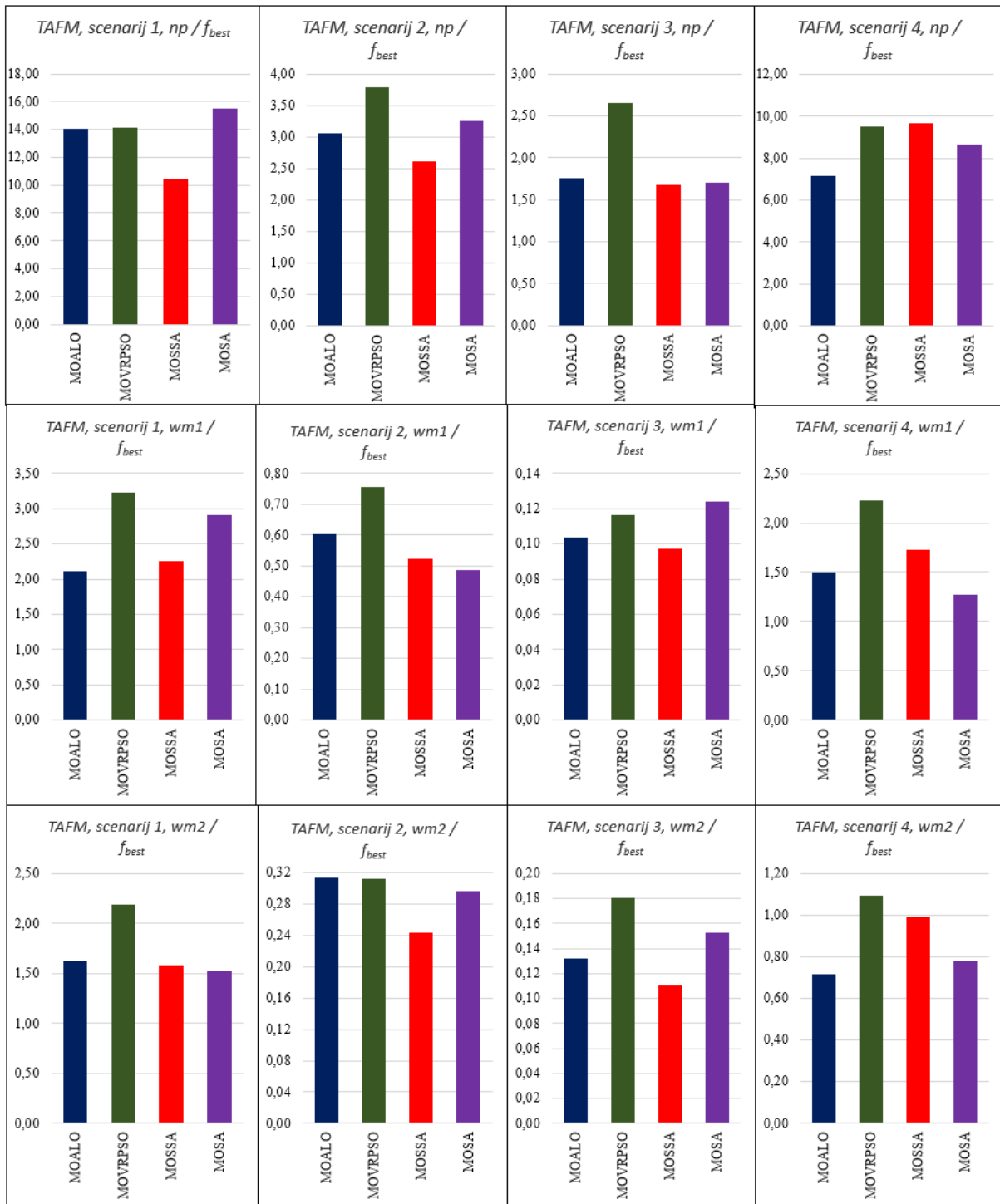
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj Pareto rješenja
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	np (4.9)	MOALO	14,02305	0,43196	0,72245	687,12915	1244,02922	34
		MOVRPSO	14,17269	0,46408	0,59511	694,46166	763,12267	4
		MOSSA	10,42223	0,44309	0,80945	510,68876	1301,45911	14
		MOSA	15,53316	0,49197	0,77542	761,12452	1322,86291	15
	wm1 (4.11)	MOALO	2,11762	0,24576	0,24838	1092,24819	1097,75502	26
		MOVRPSO	3,23318	0,39150	0,57816	1110,13561	1187,83248	3
		MOSSA	2,25833	0,26237	0,54912	618,94632	1162,30794	10
		MOSA	2,90171	0,34478	0,56983	1121,93643	1263,30253	3
	wm2 (4.11)	MOALO	1,62705	0,37208	0,62217	798,83383	929,78176	42
		MOVRPSO	2,18487	0,46567	0,60347	901,61086	1449,51549	4
		MOSSA	1,58097	0,28920	0,34127	1109,31842	1144,06337	10
		MOSA	1,52974	0,38964	0,38964	740,85882	740,85882	1
Scenarij 2: Kratki spoj	np (4.9)	MOALO	3,06305	0,07431	0,09481	150,08958	159,20295	26
		MOVRPSO	3,79594	0,10680	0,10680	186,00100	186,00100	1
		MOSSA	2,61890	0,05968	0,07332	128,32606	140,82035	28
		MOSA	3,25213	0,07118	0,12520	159,35447	168,74378	4
	wm1 (4.11)	MOALO	0,60204	0,07485	0,07634	162,48624	162,59067	6
		MOVRPSO	0,75426	0,09381	0,09381	202,79814	202,79814	1
		MOSSA	0,52195	0,06445	0,06483	143,37790	163,82426	10
		MOSA	0,48681	0,05946	0,06204	157,10591	163,39077	3
	wm2 (4.11)	MOALO	0,31352	0,07556	0,07628	164,79948	170,55383	14
		MOVRPSO	0,31172	0,06932	0,07634	164,79800	194,89045	5
		MOSSA	0,24329	0,05756	0,05773	132,48698	132,52937	8
		MOSA	0,29640	0,06712	0,06752	171,22306	171,46808	2
Scenarij 3: Uklop tereta	np (4.9)	MOALO	1,76348	0,02872	0,03793	86,41061	116,92852	26
		MOVRPSO	2,66346	0,02809	0,02809	130,50972	130,50972	1
		MOSSA	1,67518	0,03067	0,03635	82,08379	91,89887	30
		MOSA	1,70085	0,02661	0,02730	83,34173	91,71809	4
	wm1 (4.11)	MOALO	0,10346	0,00990	0,01021	108,18179	158,40128	26
		MOVRPSO	0,11631	0,01008	0,01008	162,78930	162,78930	1
		MOSSA	0,09724	0,00910	0,00928	113,93830	116,08307	13
		MOSA	0,12384	0,00991	0,01006	193,70624	225,65008	2
	wm2 (4.11)	MOALO	0,13153	0,02566	0,02794	84,15706	161,74099	54
		MOVRPSO	0,18061	0,03013	0,03212	133,73122	178,99538	3
		MOSSA	0,11078	0,02459	0,02461	65,68537	84,51417	13
		MOSA	0,15301	0,02652	0,02785	111,19224	158,87883	4
Scenarij 4: Ispad tereta (2s)	np (4.9)	MOALO	7,17688	0,30052	0,47813	351,66678	568,27242	26
		MOVRPSO	9,50442	0,26567	0,53090	465,71608	541,96504	2
		MOSSA	9,67601	0,36319	0,39985	474,12428	508,05303	7
		MOSA	8,63068	0,34516	0,59334	422,90277	568,37381	7
	wm1 (4.11)	MOALO	1,50204	0,18304	0,28498	459,04760	516,83017	33
		MOVRPSO	2,22459	0,27698	0,48096	546,87755	589,06612	3
		MOSSA	1,73155	0,21323	0,27400	504,46116	529,35064	11
		MOSA	1,27533	0,15498	0,29050	380,45278	451,90307	8
	wm2 (4.11)	MOALO	0,71945	0,16782	0,21680	384,59331	399,88026	64
		MOVRPSO	1,09645	0,27822	0,34941	531,51532	534,54458	2
		MOSSA	0,99218	0,24635	0,52716	482,18500	502,41744	43
		MOSA	0,78298	0,16741	0,19508	419,71393	491,70557	10

- zelene ćelije – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji

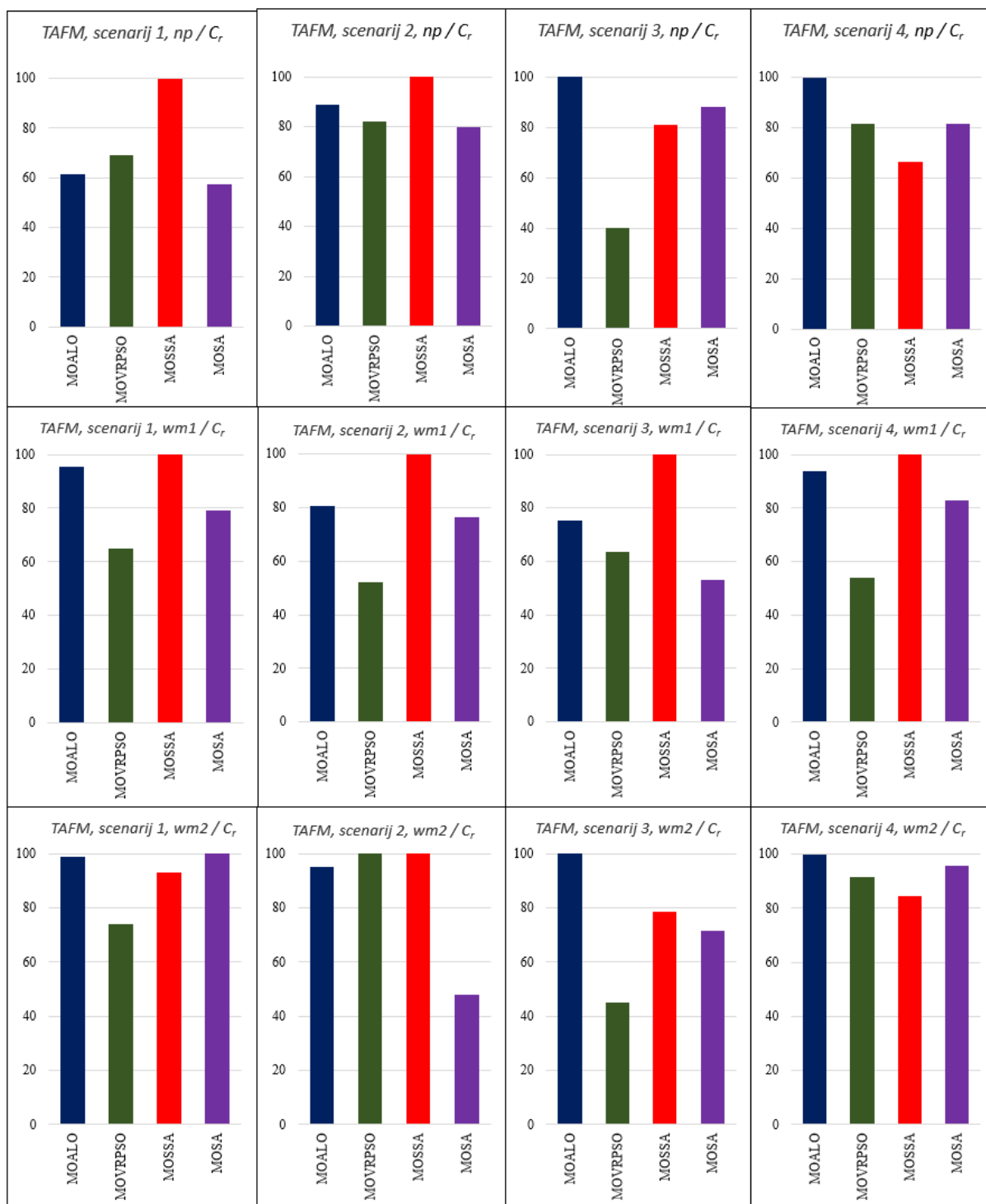
Tablica 6.11 Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, TAFM model, višeciljna optimizacija

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$ (6.4)	$\mu$ (6.5)	$\sigma$ (6.6)	$C_{A, mean}$ (6.8)	$C_{A, best}$ (6.9)	$C_r$ [%] (6.10)
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	np (4.9)	MOALO	14,02305	18,54649	3,56423	0,00116	0,00091	61,50997
		MOVRPSO	14,17269	20,85808	3,77672	0,00107	0,00102	69,14042
		<b>MOSSA</b>	<b>10,42223</b>	<b>14,33649</b>	<b>4,57113</b>	<b>0,00144</b>	<b>0,00147</b>	<b>100</b>
		MOSA	15,53316	19,54888	3,65829	0,00108	0,00085	57,43344
	wm1 (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>2,11762</b>	<b>2,84616</b>	<b>0,59268</b>	<b>0,00731</b>	<b>0,00697</b>	<b>95,38343</b>
		MOVRPSO	3,23318	3,98808	0,49421	0,00557	0,00474	64,93066
		MOSSA	2,25833	2,86771	0,4494	0,00706	0,0073	100
		MOSA	2,90171	3,23529	0,22316	0,00641	0,00578	79,12281
	wm2 (4.11)	MOALO	1,62705	1,74918	0,10079	0,01163	0,01235	99,13061
		MOVRPSO	2,18487	2,42084	0,20694	0,00917	0,00922	74,04013
		MOSSA	1,58097	1,68727	0,1277	0,01247	0,01162	93,30703
		<b>MOSA</b>	<b>1,52974</b>	<b>1,89091</b>	<b>0,22094</b>	<b>0,01108</b>	<b>0,01246</b>	<b>100</b>
Scenarij 2: Kratki spoj	np (4.9)	MOALO	3,06305	3,44755	0,21556	0,00603	0,00575	88,65138
		MOVRPSO	3,79594	5,312	2,2623	0,00464	0,00533	82,26915
		<b>MOSSA</b>	<b>2,61890</b>	<b>3,15395</b>	<b>0,35254</b>	<b>0,00612</b>	<b>0,00648</b>	<b>100</b>
		MOSA	3,25213	3,47411	0,21662	0,0058	0,00519	80,03628
	wm1 (4.11)	MOALO	0,60204	0,70287	0,06824	0,02734	0,02991	80,62026
		MOVRPSO	0,75426	0,95536	0,17901	0,0234	0,01939	52,2668
		MOSSA	0,52195	0,61891	0,07859	0,03237	0,0371	100
		<b>MOSA</b>	<b>0,48681</b>	<b>0,63354</b>	<b>0,07815</b>	<b>0,03041</b>	<b>0,02837</b>	<b>76,46326</b>
	wm2 (4.11)	MOALO	0,31352	0,33669	0,01735	0,05898	0,05565	94,93488
		MOVRPSO	0,31172	0,36532	0,04775	0,06029	0,05858	99,92169
		<b>MOSSA</b>	<b>0,24329</b>	<b>0,32076</b>	<b>0,04668</b>	<b>0,06326</b>	<b>0,05862</b>	<b>100</b>
		MOSA	0,29640	0,53515	0,19238	0,04056	0,02811	47,95845
Scenarij 3: Uklop tereta	np (4.9)	MOALO	1,76348	2,09329	0,22399	0,00826	0,01026	100
		MOVRPSO	2,66346	3,89014	0,98588	0,00563	0,0041	39,94676
		<b>MOSSA</b>	<b>1,67518</b>	<b>2,02719</b>	<b>0,25635</b>	<b>0,01005</b>	<b>0,00831</b>	<b>81,00445</b>
		MOSA	1,70085	2,49689	0,82526	0,0077	0,00902	87,89932
	wm1 (4.11)	MOALO	0,103456	0,115337	0,012928	0,154493	0,149846	75,22379
		MOVRPSO	0,116308	0,256273	0,146396	0,108049	0,126794	63,65157
		<b>MOSSA</b>	<b>0,097239</b>	<b>0,116197</b>	<b>0,021072</b>	<b>0,169276</b>	<b>0,1992</b>	<b>100</b>
		MOSA	0,123845	0,149336	0,013547	0,118434	0,105942	53,18395
	wm2 (4.11)	MOALO	0,13153	0,16604	0,02946	0,12336	0,14292	100
		MOVRPSO	0,18061	0,24275	0,06181	0,09447	0,0645	45,12658
		<b>MOSSA</b>	<b>0,11078</b>	<b>0,1479</b>	<b>0,02677</b>	<b>0,13669</b>	<b>0,11254</b>	<b>78,74458</b>
		MOSA	0,15301	0,18297	0,02924	0,10527	0,10236	71,61612
Scenarij 4: Ispad tereta (3s)	np (4.9)	<b>MOALO</b>	<b>7,17688</b>	<b>9,00777</b>	<b>1,38389</b>	<b>0,00228</b>	<b>0,00235</b>	<b>100</b>
		MOVRPSO	9,50442	13,13453	2,63594	0,00171	0,00192	81,70382
		MOSSA	9,67601	11,35138	1,299898	0,001669	0,001561	66,32681
		MOSA	8,63068	9,7677	0,99987	0,00208	0,00192	81,6498
	wm1 (4.11)	MOALO	1,50204	1,88043	0,41874	0,01046	0,01086	93,98303
		MOVRPSO	2,22459	3,00493	0,63113	0,00754	0,00623	53,94076
		MOSSA	1,73155	2,17594	0,3019	0,00957	0,01155	100
		<b>MOSA</b>	<b>1,27533</b>	<b>2,08341</b>	<b>0,42305</b>	<b>0,00988</b>	<b>0,00958</b>	<b>82,89036</b>
	wm2 (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>0,71945</b>	<b>0,86331</b>	<b>0,13699</b>	<b>0,02291</b>	<b>0,02149</b>	<b>100</b>
		MOVRPSO	1,09645	1,68339	0,54046	0,01405	0,01971	91,69899
		MOSSA	0,99218	1,07833	0,06864	0,01806	0,01815	84,45337
		MOSA	0,78298	0,97596	0,11411	0,02011	0,02057	95,70228

- podebljani font – najbolji algoritmi po ciljnoj funkciji za metodu i scenarij
- zelene ćelije – najbolji analitički pokazatelji konvergencije



Slika 6.148. TAFM – pregled najboljih rješenja  $f_{best}$  algoritama po scenarijima i metodama



Slika 6.149. TAFM – pregled moći konvergencije  $C_r$  algoritama po scenarijima i metodama

Tablica 6.12 TAFM – najbolja rješenja dobivena višeciljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama

	Scenarij 1 – APU+kratki spoj			Scenarij 2 – kratki spoj			Scenarij 3 – uklop tereta			Scenarij 4 – ispad tereta (2s)			
	np	wm1	wm2	np	wm1	wm2	np	wm1	wm2	np	wm1	wm2	
	MOALO	MOVRPFO	MOSSA	MOALO	MOVRPFO	MOSSA	MOALO	MOVRPFO	MOSSA	MOALO	MOVRPFO	MOSSA	
3.61843	0.00543	3.32189	22.39466	12.67123	1.22483	1.11888	1.64189	22.17909	19.44202	1.71792	0.04494	2.60798	27.44352
8.74125	0.00500	0.05079	1.00000	0.09178	0.05000	0.09178	0.00500	1.00000	0.05000	0.05000	0.00500	1.43781	1.00000
1.31630	0.00879	4.81440	142.46814	3.59422	12.66523	0.00710	3.49895	72.83514	0.98037	0.94347	4.42986	4.77931	73.06843
4.44899	0.00500	1.95081	129.43008	15.18287	0.05000	0.35620	1.21971	1.00000	4.52009	4.30397	3.36082	3.11666	84.22690
6.68012	0.08136	1.77315	32.15871	11.24427	6.12714	1.09886	0.89743	18.46717	22.74553	4.57938	0.00608	1.40012	60.58734
3.97456	0.04734	1.83060	45.60493	1.06810	8.41106	2.58722	0.84911	1.00000	5.23612	6.45627	1.48296	0.04400	1.00000
12.84078	4.46079	4.28137	2.07835	23.28169	13.15933	0.40265	4.50313	13.25738	24.59619	5.88463	0.11267	4.20831	32.16230
5.31730	0.27237	0.71602	114.81099	12.42778	3.56726	0.19759	1.08645	53.16901	0.05000	1.47468	0.22233	1.41786	9.09864
4.29447	0.01082	0.72920	23.75473	0.22762	0.49504	0.01205	1.06019	39.99736	2.31984	0.77021	0.86666	0.47863	1.85016
0.05000	1.00105	0.00500	1.00000	0.05000	0.05000	0.05000	0.62478	1.00000	3.54469	0.23795	0.00500	0.00500	1.00000
14.433973	3.30746	3.95279	1.10541	23.82923	12.86923	0.26421	3.62887	2.93285	0.08175	14.99876	3.61737	3.83419	102.26131
2.06694	0.02620	2.81392	33.74563	3.96067	7.46471	2.03346	2.50109	193.42811	0.86494	7.97171	0.28273	0.23896	20.19268
5.56918	0.00538	2.51884	28.78472	16.69756	4.62623	0.01008	0.10149	35.98956	0.05000	0.50476	0.19316	2.19965	20.84268
0.07966	0.10558	0.19358	1.00000	3.83412	0.05364	0.07741	0.07232	5.62371	0.57712	3.73554	0.08765	2.37302	11.05168
13.55185	2.82746	4.36567	1.58764	0.40329	1.39704	0.36154	2.07489	43.22092	0.50086	1.25378	0.02697	4.13192	3.83687
0.98801	0.07237	1.88859	7.61911	0.69756	0.62946	0.18190	0.20332	4.35843	17.81811	5.00789	1.51347	0.11818	56.09714
2.62424	0.06102	0.32979	20.46252	0.44337	0.07687	1.30666	0.23840	11.41959	0.25987	0.72912	0.02598	0.34430	3.22223
4.39207	3.43019	0.00500	1.00000	3.26905	0.20463	0.00500	0.74761	95.22131	0.05000	3.31852	0.79545	1.35296	1.00000
12.31796	2.24149	4.26978	1.00023	23.76624	5.61100	2.61970	4.80749	12.12836	24.56553	8.76319	0.03793	2.63437	10.84627
1.67786	0.14464	1.83155	7.40348	0.58989	0.34289	0.09871	0.08105	3.31682	8.90839	6.95247	0.28552	0.83740	4.82147
2.01904	0.60122	0.94609	3.69552	0.07127	0.13584	0.34295	0.08258	14.47876	0.05000	5.89389	0.38811	1.06311	17.40782
9.22014	0.17764	1.44121	1.00000	0.05000	0.05000	0.00500	0.00500	1.00000	0.05000	0.05000	0.00500	0.00500	1.00000
11.73224	0.10704	2.85709	28.58038	20.90457	14.79982	0.00505	0.89225	14.78025	0.05105	13.44913	2.31681	1.65974	1.00000
3.71048	0.03494	0.77561	8.17017	0.19953	0.13361	0.03360	0.03494	2.49230	2.06865	1.63915	0.03360	0.00500	2.49230
5.73826	0.00501	1.42404	67.77850	23.08224	1.06962	1.51897	3.67844	127.45320	14.27259	9.60218	4.93919	2.27990	1.00028
0.05000	0.00500	2.89521	31.07513	0.05000	0.05000	0.00500	0.34404	1.00000	0.05000	3.61679	1.88469	0.00500	1.00000
1.03580	0.01172	4.14879	243.39828	0.05179	13.89116	4.96891	0.02915	1.41622	24.88012	8.72766	4.49364	4.99987	249.81956
0.32340	0.01042	0.88565	55.41601	0.46477	3.75976	0.01042	0.46128	1.96756	0.05000	2.37138	2.45271	0.01042	140.18565
11.87210	0.04565	1.77870	1.09395	8.27328	3.15839	2.20493	0.72329	1.00412	20.59382	2.66209	0.01484	0.32453	6.57855
4.27940	0.00500	0.94358	5.04688	0.05000	0.05000	0.00500	1.52413	76.42406	0.05000	0.05000	1.29170	0.00500	1.00000
13.77852	0.02843	0.90275	61.32886	0.28983	12.97160	4.58094	1.54823	1.06519	19.61339	0.21682	0.37375	0.15719	1.00047
0.83194	0.00500	2.93453	55.13593	0.05000	0.34882	0.12259	1.09224	13.50479	1.73633	0.79535	0.37610	2.12315	12.93706
6.55163	0.09976	2.97290	53.29710	0.08016	1.00569	1.20821	0.32408	14.49933	19.70306	10.29608	1.48500	1.53783	20.50401
3.33047	0.00500	0.72241	10.97293	8.13837	0.05000	0.00500	0.60502	1.00000	6.01715	6.22128	1.56798	2.03634	50.06446
6.54690	0.00500	0.89105	82.56875	24.22491	3.08500	0.10175	3.12198	31.64461	9.52509	8.61644	1.16736	2.58909	9.11542
9.31261	0.00500	0.90332	48.30593	5.37709	4.46115	1.98438	0.35719	4.78482	20.18773	9.82750	0.00500	0.64798	208.09488
0.85222	0.01102	1.28932	74.06810	3.92021	0.69625	0.21857	0.19118	2.09295	9.28934	6.22128	0.56672	1.49539	8.82134
2.29315	0.09993	0.50302	30.56168	0.05000	0.05462	0.07908	0.09608	4.33045	0.05000	0.16999	0.10459	0.10023	1.00000
7.86081	0.11135	4.99778	3.06806	0.05042	9.91765	3.77601	0.07990	2.08321	22.26748	14.09956	0.45231	0.42499	225.34792
3.65103	0.00500	1.52680	4.81194	15.04284	4.58874	1.90837	3.44881	50.20203	13.62609	6.71425	2.50518	1.95683	14.52432
3.36034	0.00500	2.92852	18.14252	14.05184	2.98729	1.40673	0.26415	50.39322	12.33607	2.85559	0.00500	2.21539	24.63342
0.17800	0.09750	3.33270	7.01853	5.76856	0.57006	0.00500	0.00500	68.36907	0.05000	6.26572	0.00500	1.01086	1.00000
2.87689	0.41783	4.96683	1.00000	2.79293	0.31825	0.01801	96.12142	0.21342	0.58761	4.92036	4.92036	3.73482	1.05680
1.64137	0.11565	1.88729	3.16396	2.58297	1.91489	3.28762	1.71624	4.13793	8.32099	1.87988	0.09485	2.93513	3.07386
4.24133	0.03750	0.18157	6.66773	5.67978	7.35815	2.50179	0.71774	1.83174	12.66178	4.21193	0.94019	0.64159	2.83240
0.05000	0.00500	1.54275	7.09900	11.31328	0.05000	0.00500	0.00500	0.05000	0.05000	0.50128	0.00500	0.52284	1.00000
5.49365	1.05633	4.97624	1.00000	13.45864	14.92551	0.25924	4.99999	1.00000	7.48573	0.82446	4.62300	0.63442	80.66929
2.29464	0.00500	3.70319	34.57407	21.40224	0.18181	2.20012	0.25160	1.00000	16.86472	3.16132	0.00500	0.46269	16.97043



## 7. Usporedba učinkovitosti jednociljne i višeciljne optimizacije

Usporedba između jednociljnih i višeciljnih metoda uključuje analizu numeričkih rezultata kroz usporedbu najbolje dobivenih rezultata višeciljne i jednociljne metode optimizacije, raspoređene prema scenarijima, metodama i algoritmima. Analiza se vrši dvjema usporedbama: prema prvoj ciljnoj funkciji  $f_1(t)$ , a potom i prema drugoj ciljnoj funkciji  $f_2(t)$ .

Nakon tabličnog pregleda svih algoritama, za grafičke prikaze se odabiru najbolja jednociljna i višeciljna rješenja. Grafički prikazi za navedena najbolja rješenja uključuju odzive brzina vrtnje generatora, razlika brzina vrtnje generatora, napona armature i prijenosnih tokova snaga. Osim odziva promatra se i višeciljna Pareto fronta i smještaj jednociljnog rješenja na Pareto prikazu.

### 7.1 Usporedba učinkovitosti – WSCC model

U tablici usporedbe 7.1 prikazani su svi rezultati najboljih probnih pokušaja optimizacijskih procesa. Posebno su naznačeni oni koji su od interesa za promatranje kao najbolji rezultati. Poredbeni rezultati odziva i Pareto prikaza se nalaze na slikama 7.2 – 7.25.

Tablica 7.1 Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, WSCC model

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj rješenja
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,039186	0,039186	-	193,2979	-	1
		VRPSO	0,050554	0,050554	-	186,9113	-	1
		<b>SSA</b>	<b>0,034093</b>	<b>0,034093</b>	-	<b>173,4612</b>	-	<b>1</b>
		SA	0,038641	0,038641	-	182,2901	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	<b>ALO</b>	<b>108,1337</b>	<b>0,040945</b>	-	<b>108,1337</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	168,5447	0,082667	-	168,5447	-	1
		SSA	138,9335	0,058148	-	138,9335	-	1
		SA	148,6086	0,055953	-	148,6086	-	1
	$np$ (4.9)	MOALO	3,015279	0,041125	0,066683	147,7487	155,6985	14
		MOVPSO	3,349088	0,039824	0,051627	154,0581	176,9814	2
		MOSSA	2,539122	0,039313	0,057137	124,417	143,9939	28
		<b>MOSA</b>	<b>2,412729</b>	<b>0,025382</b>	<b>0,038976</b>	<b>110,9855</b>	<b>122,4561</b>	<b>17</b>
	$wm1$ (4.11)	MOALO	0,199571	0,022356	0,03108	119,5796	127,588	28
		MOVPSO	0,255936	0,028885	0,028885	157,2079	157,2079	1
		<b>MOSSA</b>	<b>0,194618</b>	<b>0,021997</b>	<b>0,024532</b>	<b>116,8846</b>	<b>118,55</b>	<b>6</b>
		MOSA	0,234315	0,026113	0,046713	132,5473	153,8798	10
	$wm2$ (4.11)	MOALO	0,144323	0,022959	0,036866	113,2306	115,9018	26
		MOVPSO	0,222754	0,036473	0,04409	164,2929	175,4294	3
		<b>MOSSA</b>	<b>0,134329</b>	<b>0,019841</b>	<b>0,022583</b>	<b>111,122</b>	<b>112,9681</b>	<b>9</b>
		MOSA	0,149964	0,023513	0,025548	116,5628	124,5171	9



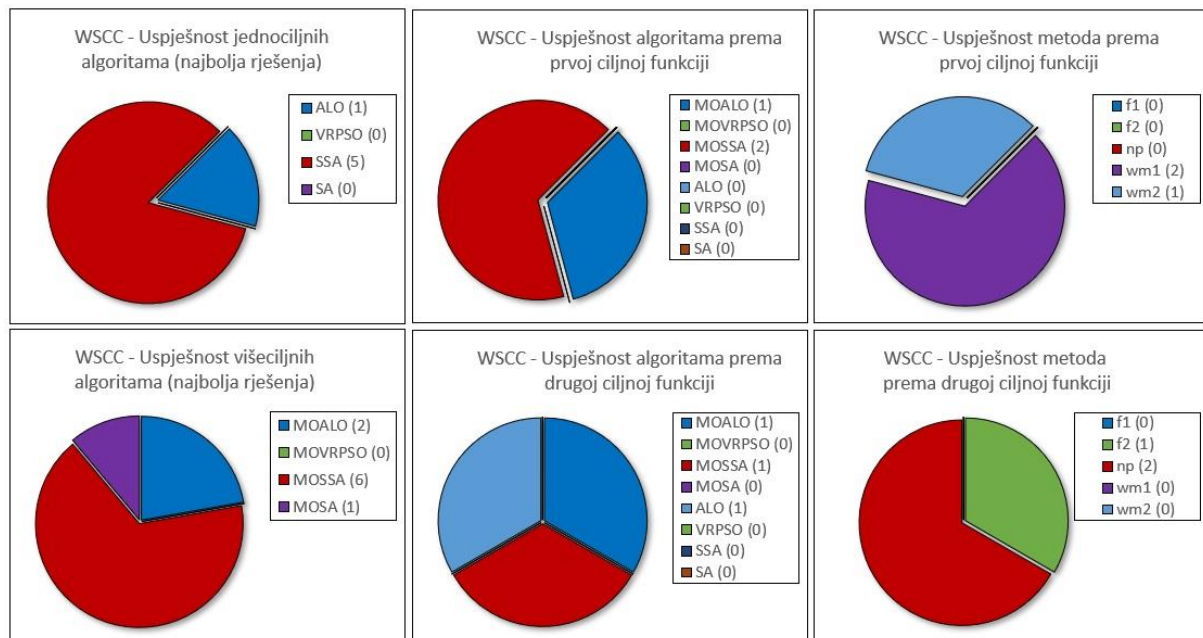
Tablica 7.1 Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, WSCC model (nastavak)

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj rješenja
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,103718	0,103718	-	794,8087	-	1
		VRPSO	0,150442	0,150442	-	849,8471	-	1
		<b>SSA</b>	<b>0,096927</b>	<b>0,096927</b>	-	<b>751,9784</b>	-	<b>1</b>
		SA	0,102657	0,102657	-	764,3595	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	738,6172	0,085017	-	738,6172	-	1
		VRPSO	784,9041	0,162942	-	784,9041	-	1
		<b>SSA</b>	<b>727,4316</b>	<b>0,097700</b>	-	<b>727,4316</b>	-	<b>1</b>
		SA	757,5326	0,123039	-	757,5326	-	1
	$np$ (4.9)	MOALO	15,82993	0,085949	0,09365	728,1768	730,3669	8
		MOVPSO	16,02588	0,08998	0,109426	737,1903	744,1361	5
		<b>MOSSA</b>	<b>15,70422</b>	<b>0,083016</b>	<b>0,085894</b>	<b>722,3941</b>	<b>730,0805</b>	<b>8</b>
		MOSA	16,02846	0,084208	0,103322	737,3093	745,5794	8
	$wm1$ (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>0,730962</b>	<b>0,072381</b>	<b>0,088763</b>	<b>747,2245</b>	<b>752,4638</b>	<b>14</b>
		MOVPSO	0,867256	0,090964	0,182758	735,1628	740,1016	4
		MOSSA	0,735814	0,0731	0,082034	737,5532	750,2597	25
		MOSA	0,737865	0,073264	0,074593	752,3426	753,5251	8
	$wm2$ (4.11)	MOALO	0,746292	0,073259	0,080887	749,7845	750,86	6
		MOVPSO	0,772336	0,089164	0,101079	728,4093	732,5663	4
		<b>MOSSA</b>	<b>0,742918</b>	<b>0,074264</b>	<b>0,078853</b>	<b>742,4146</b>	<b>743,7869</b>	<b>10</b>
		MOSA	0,748642	0,073966	0,075116	749,6081	751,8809	8
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,058059	0,058059	-	223,6409	-	1
		VRPSO	0,070961	0,070961	-	310,6560	-	1
		<b>SSA</b>	<b>0,052939</b>	<b>0,052939</b>	-	<b>176,6765</b>	-	<b>1</b>
		SA	0,065493	0,065493	-	275,979	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	136,0198	0,095926	-	136,0198	-	1
		VRPSO	266,9557	0,078459	-	266,9557	-	1
		<b>SSA</b>	<b>132,0239</b>	<b>0,061549</b>	-	<b>132,0239</b>	-	<b>1</b>
		SA	265,5998	0,066501	-	265,5998	-	1
	$np$ (4.9)	<b>MOALO</b>	<b>1,973699</b>	<b>0,067273</b>	<b>0,086742</b>	<b>90,79009</b>	<b>201,66</b>	<b>54</b>
		MOVPSO	2,731409	0,05627	0,061358	125,6448	167,1759	3
		MOSSA	2,323171	0,05647	0,065036	106,8659	112,949	43
		MOSA	2,204103	0,069471	0,120805	101,3887	111,6601	17
	$wm1$ (4.11)	MOALO	0,424063	0,050389	0,080078	162,2435	184,5731	14
		MOVPSO	0,520251	0,063543	0,064977	142,3236	174,7235	2
		<b>MOSSA</b>	<b>0,389686</b>	<b>0,046786</b>	<b>0,070409</b>	<b>147,8224</b>	<b>155,159</b>	<b>49</b>
		MOSA	0,470332	0,057182	0,068099	128,4695	165,8813	10
	$wm2$ (4.11)	MOALO	0,266901	0,054875	0,067154	159,2597	172,9533	12
		MOVPSO	0,264137	0,055028	0,07424	129,4641	176,4616	3
		<b>MOSSA</b>	<b>0,196213</b>	<b>0,044431</b>	<b>0,108638</b>	<b>102,2221</b>	<b>118,4247</b>	<b>18</b>
		MOSA	0,238507	0,056663	0,06753	114,6477	129,1307	5

- zelene ćelije – najbolji SO i MO algoritmi po prvoj ciljnoj funkciji  $f_1(t)$
- narančaste ćelije – najbolji SO i MO algoritmi po drugoj ciljnoj funkciji  $f_2(t)$
- podebljani font – najbolji algoritam za pojedinu metodu/scenarij

Ukoliko se promatraju algoritmi jednociljne optimizacije, vidljivo je da je SSA algoritam daje u najbolje rezultate. U slučaju višeciljne optimizacije MOSSA daje najviše najboljih rješenja. Usporedbom prve i druge ciljne funkcije kod algoritama najbolje su se

pokazali jednociljni i višeciljni noviji algoritmi (ALO i SSA), dok je kod metoda vidljiva sklonost težinskih višeciljnih funkcija davanju boljih rješenja prema prvoj ciljnoj funkciji, dok je neutralna višeciljna metoda nešto bolja u slučaju najboljih rezultata prema drugoj ciljnoj funkciji. Usporedba uspješnosti je prikazana na slici 7.1.

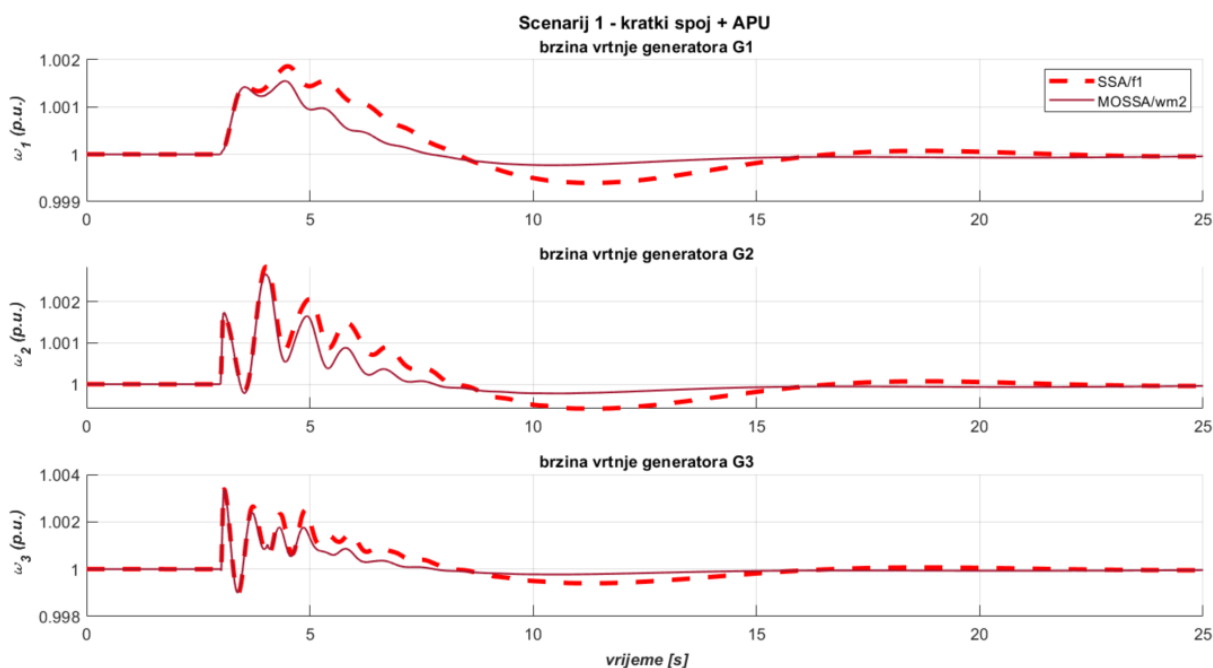


Slika 7.1. Usporedba uspješnosti po broju algoritama i metoda, WSCC model

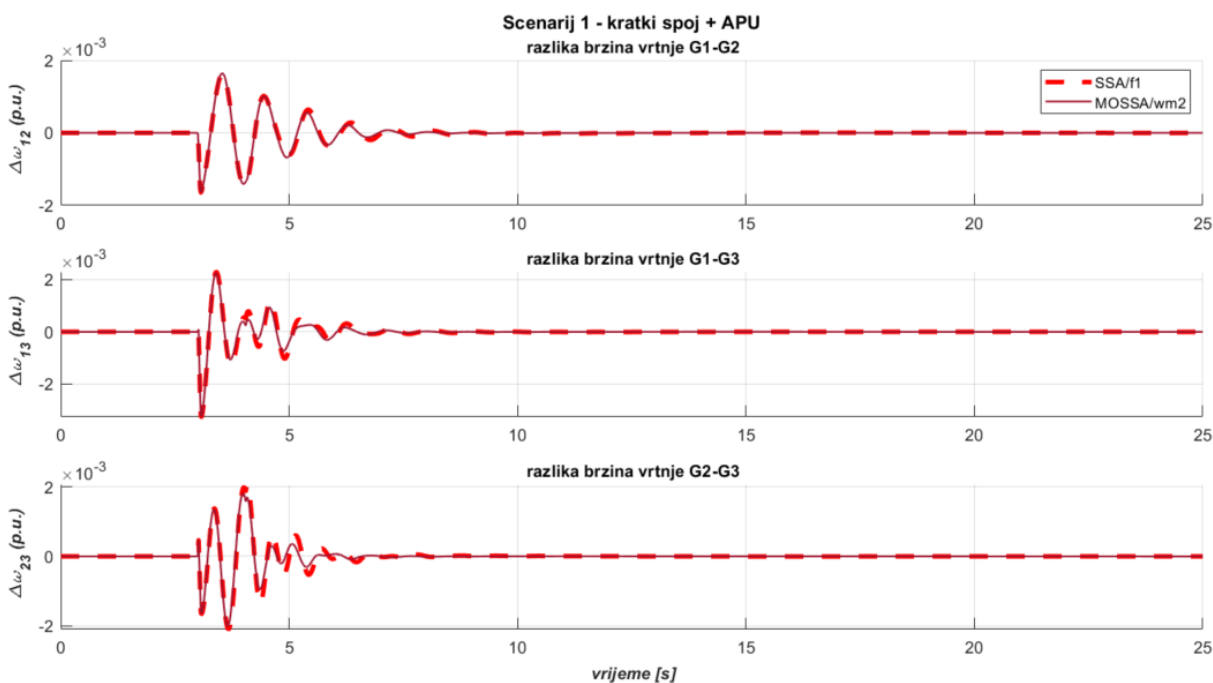
Detaljnijim pregledom rezultata u tablici 7.1 vidljivo je da za sva tri scenarija i sve algoritme višeciljne težinske metode daju gotovo uvijek bolje rezultate od jednociljnih po pitanju prve ciljne funkcije, dok usput imaju vrlo dobar učinak po pitanju druge ciljne funkcije.

Neutralne metode su učinkovitije po pitanju druge ciljne funkcije od ostalih metoda, ali generalno imaju nešto slabiji učinak obzirom na prvu ciljnu funkciju. Pregledom grafičkih rezultata vidljivo je da neutralne metode u malom broju slučajeva imaju sličan problem kao i jednociljne metode sa drugom ciljnom funkcijom, a to je manja učinkovitost u suzbijanju oscilacija vrlo niskih frekvencija od težinskih metoda, posebno kod snaga i brzina vrtnje.

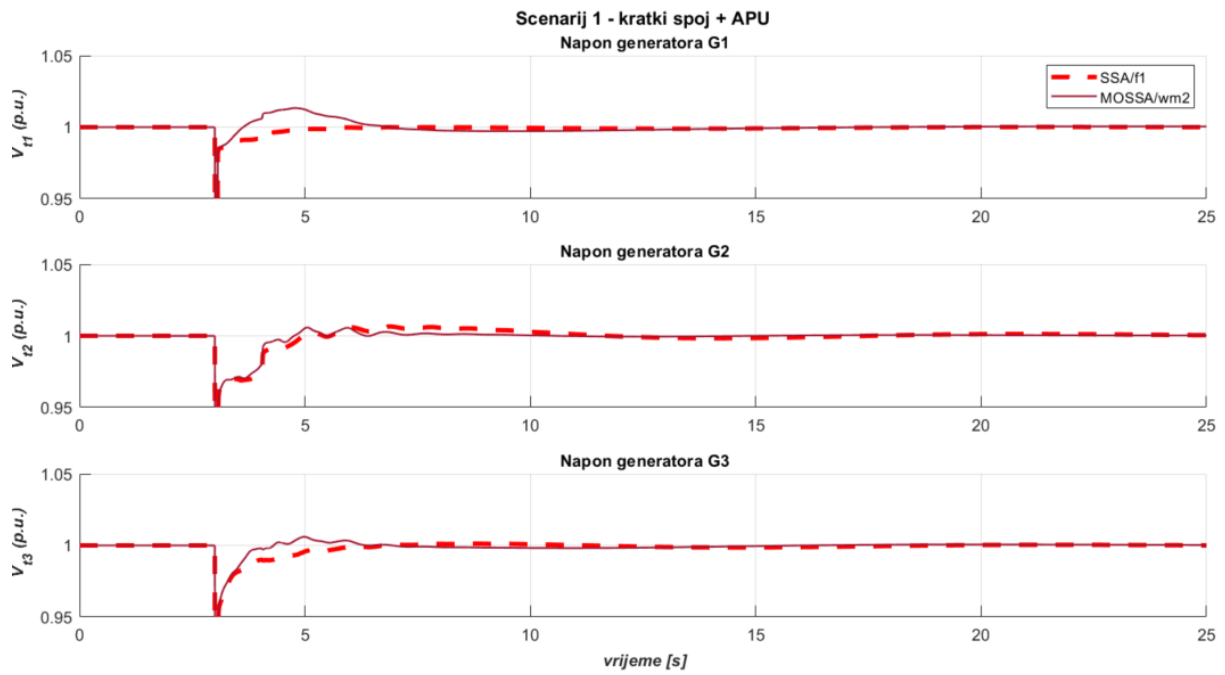
Noviji algoritmi u načelu daju i veći izbor u Pareto skupu rješenja, dok se analizom Pareto prikaza može vidjeti da je u tri od šest slučajeva jednociljno rješenje nije nedominantno obzirom na Pareto frontu, dok je u tri slučaja nedominantno, što čini višeciljne metode učinkovitijima.



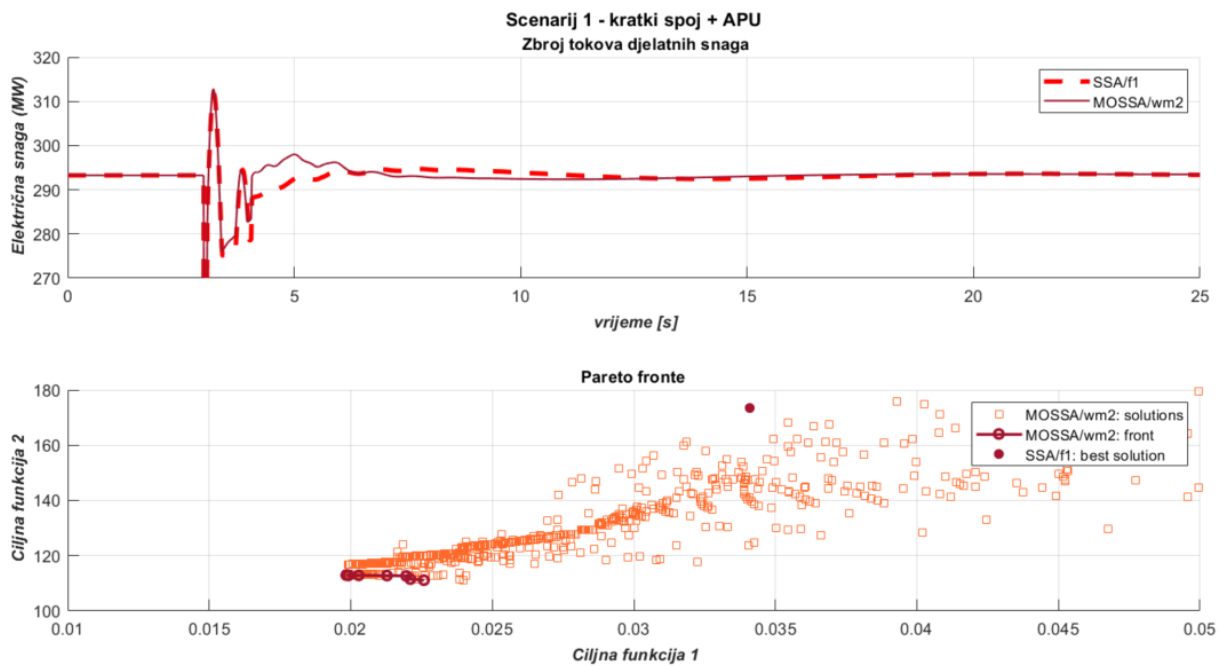
Slika 7.2. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



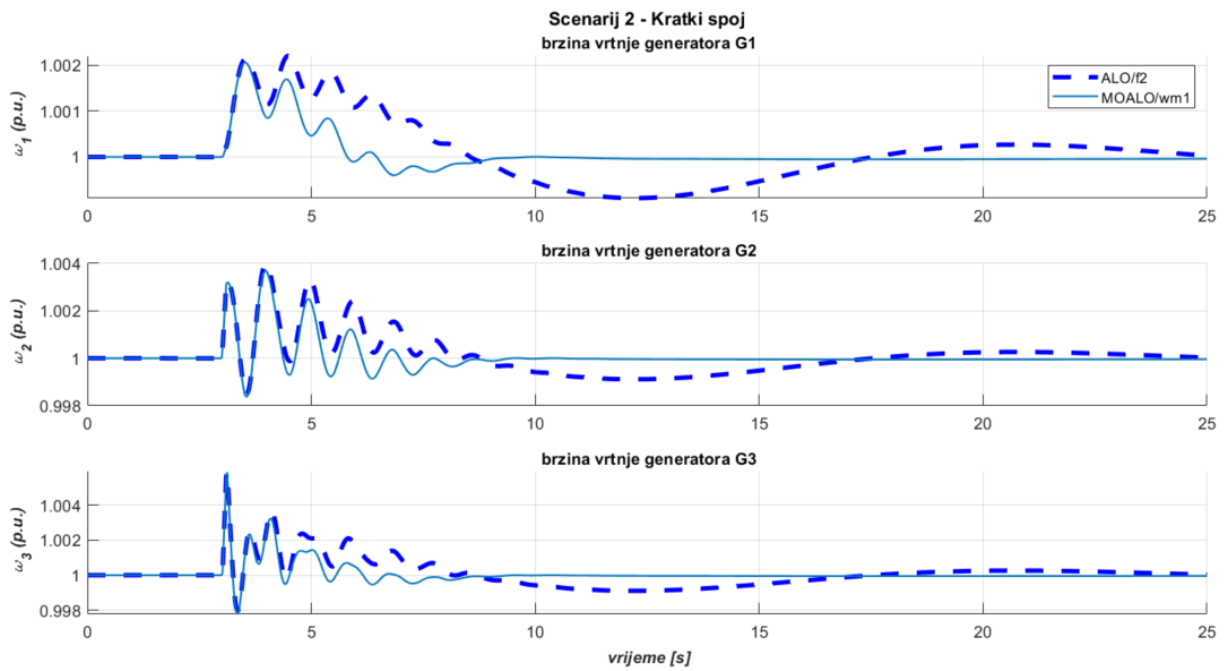
Slika 7.3. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



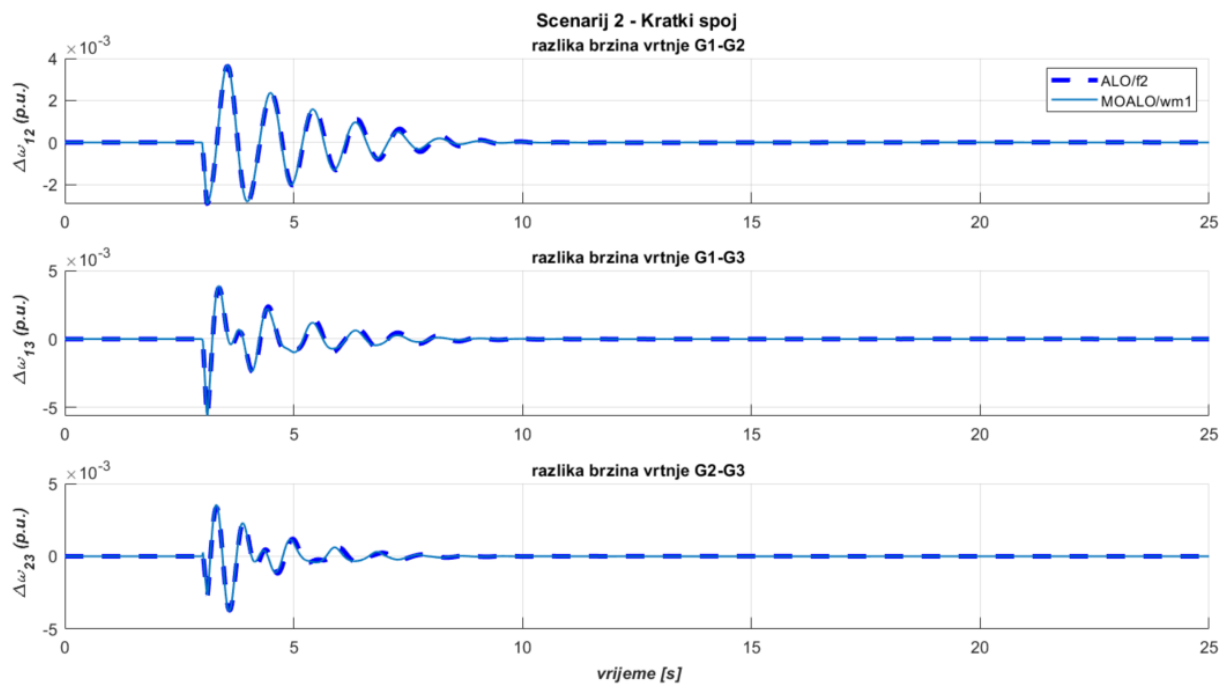
Slika 7.4. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



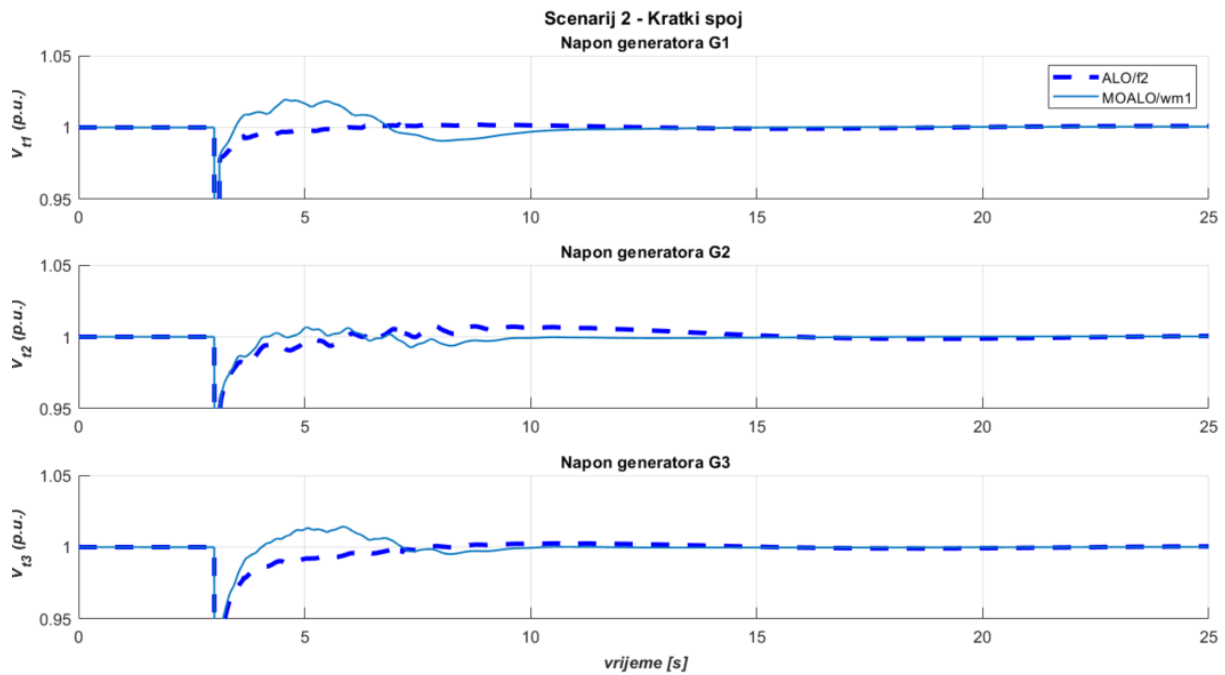
Slika 7.5. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



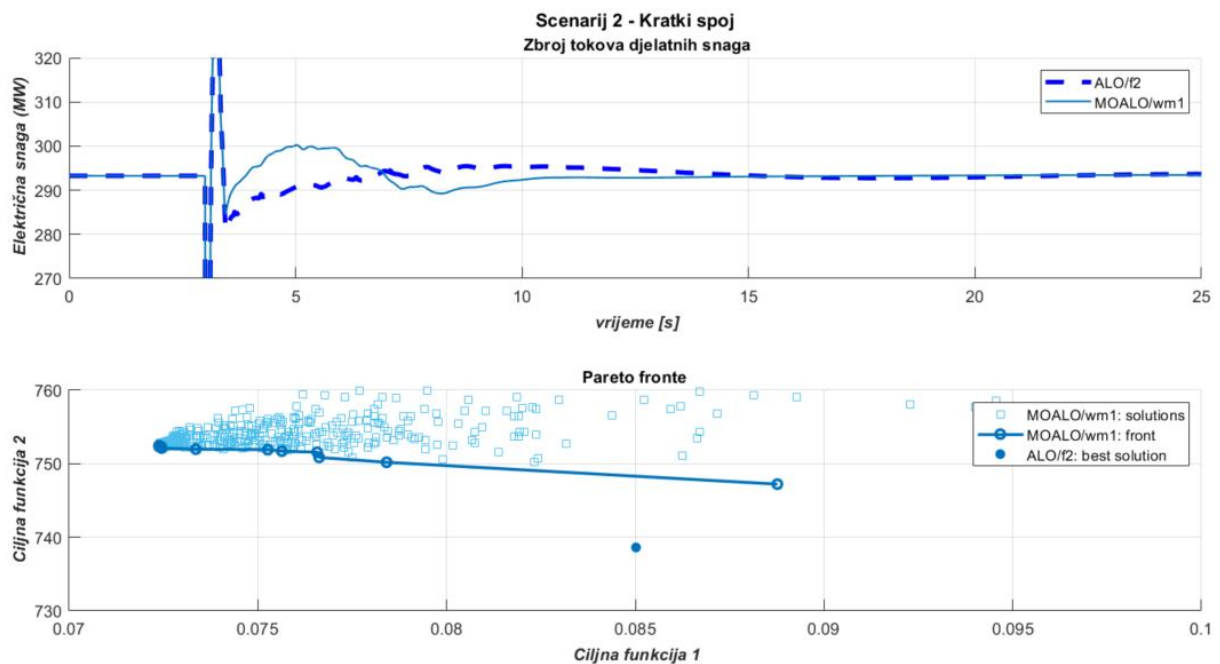
Slika 7.6. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



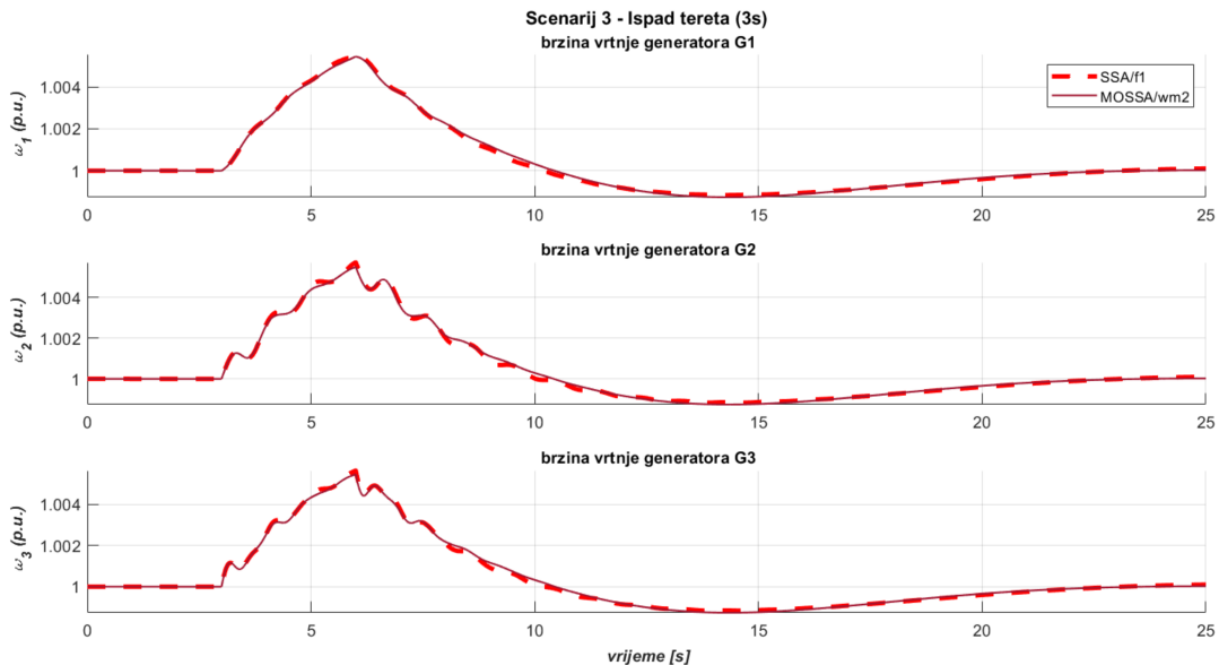
Slika 7.7. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



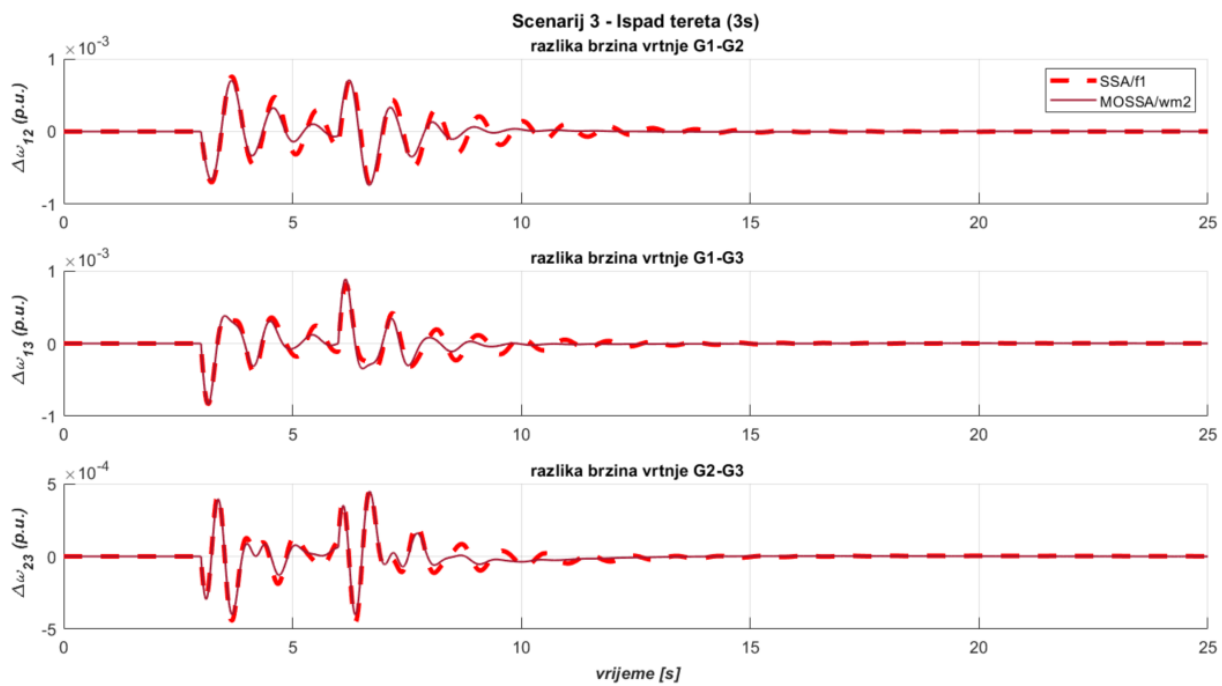
Slika 7.8. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



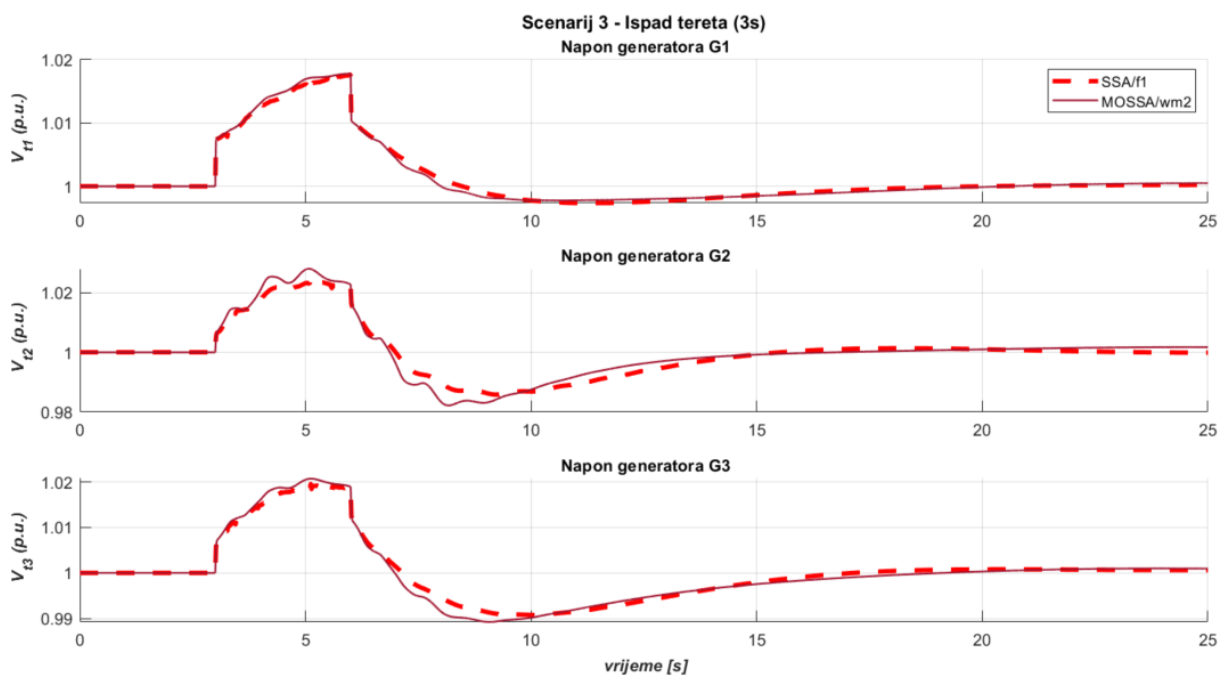
Slika 7.9. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



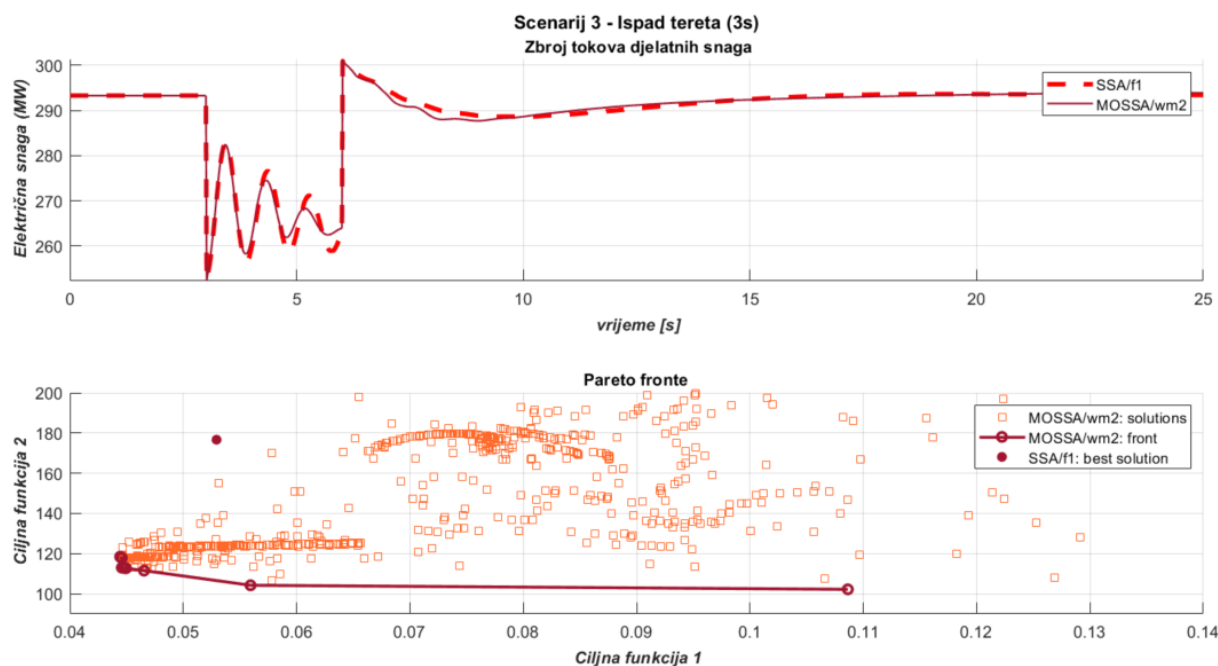
Slika 7.10. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



Slika 7.11. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora

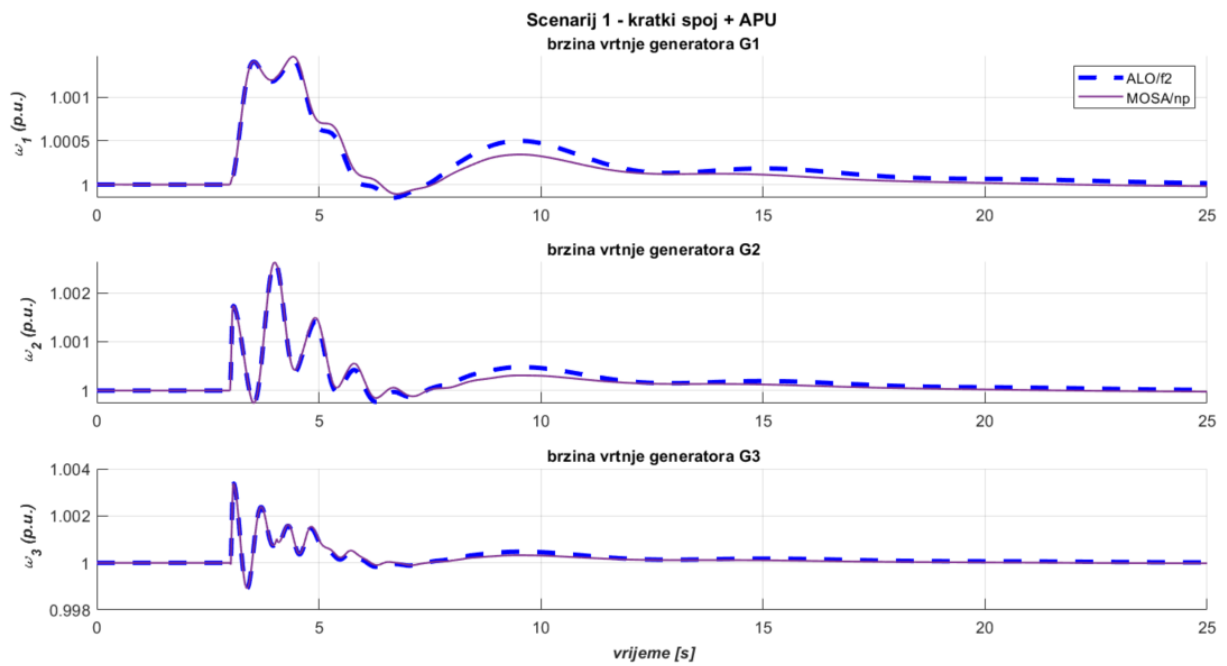


Slika 7.12. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora

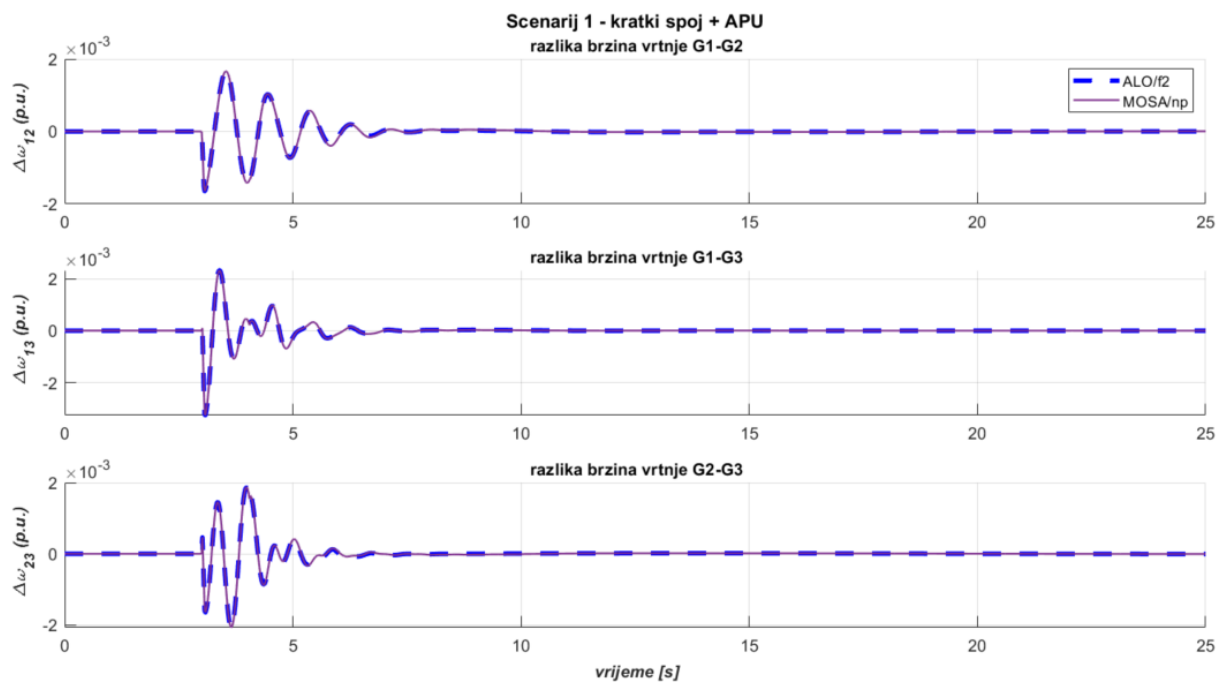


Slika 7.13. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz

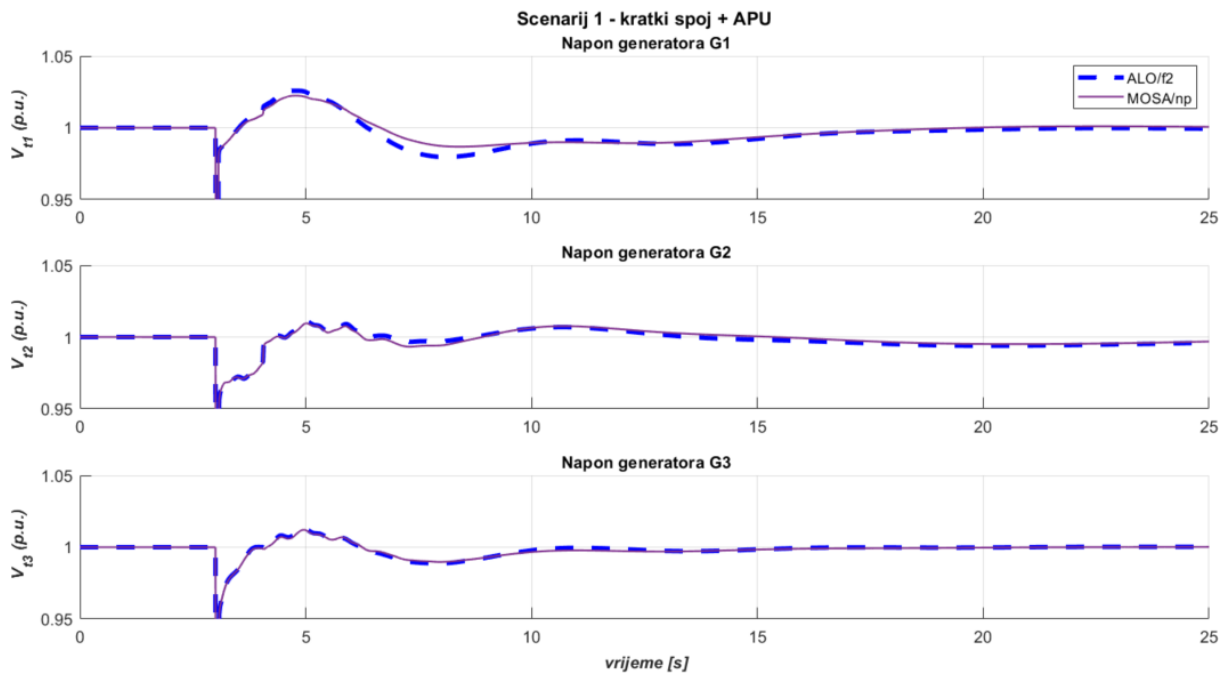




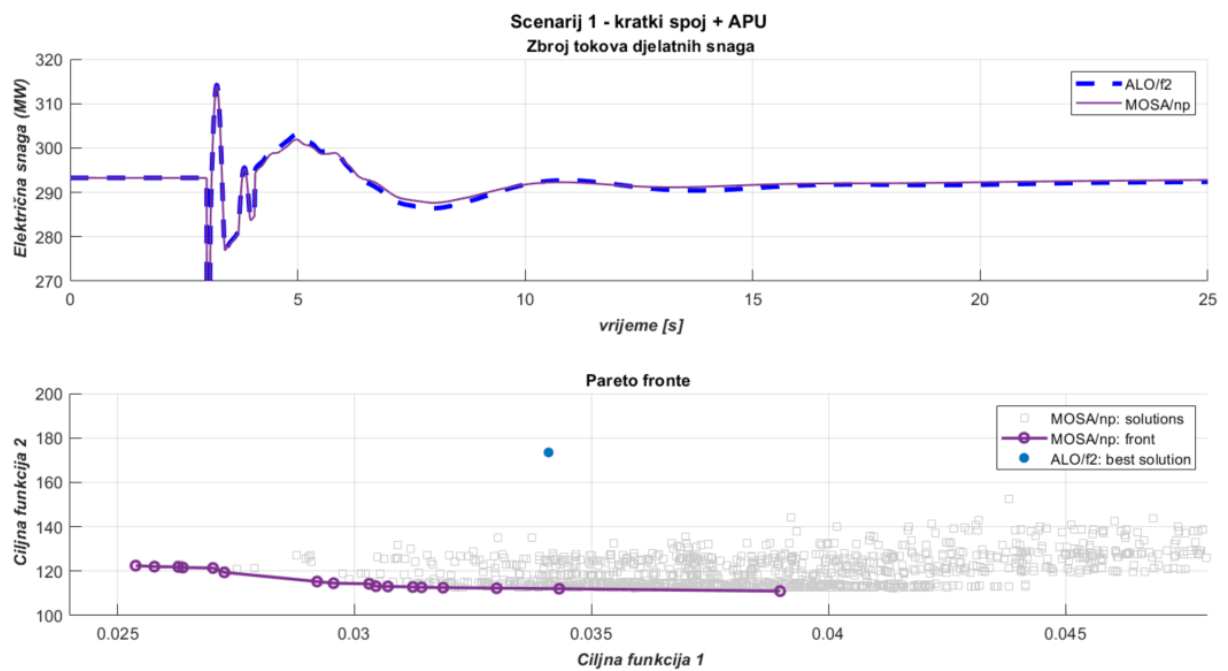
Slika 7.14. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



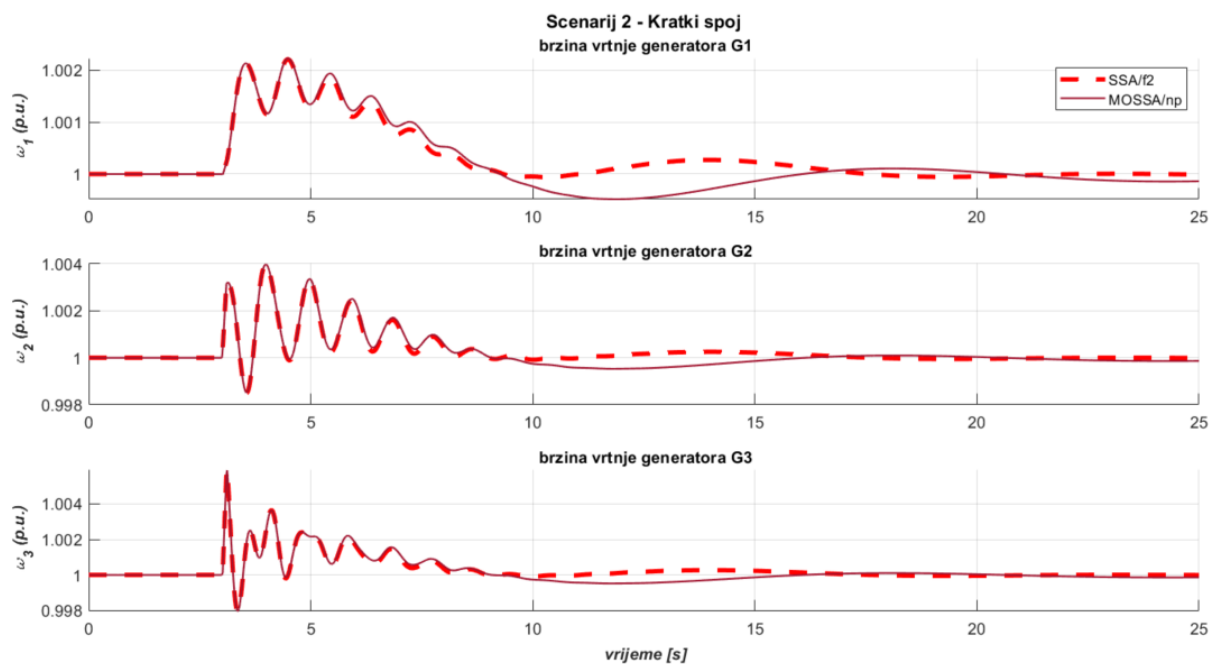
Slika 7.15. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



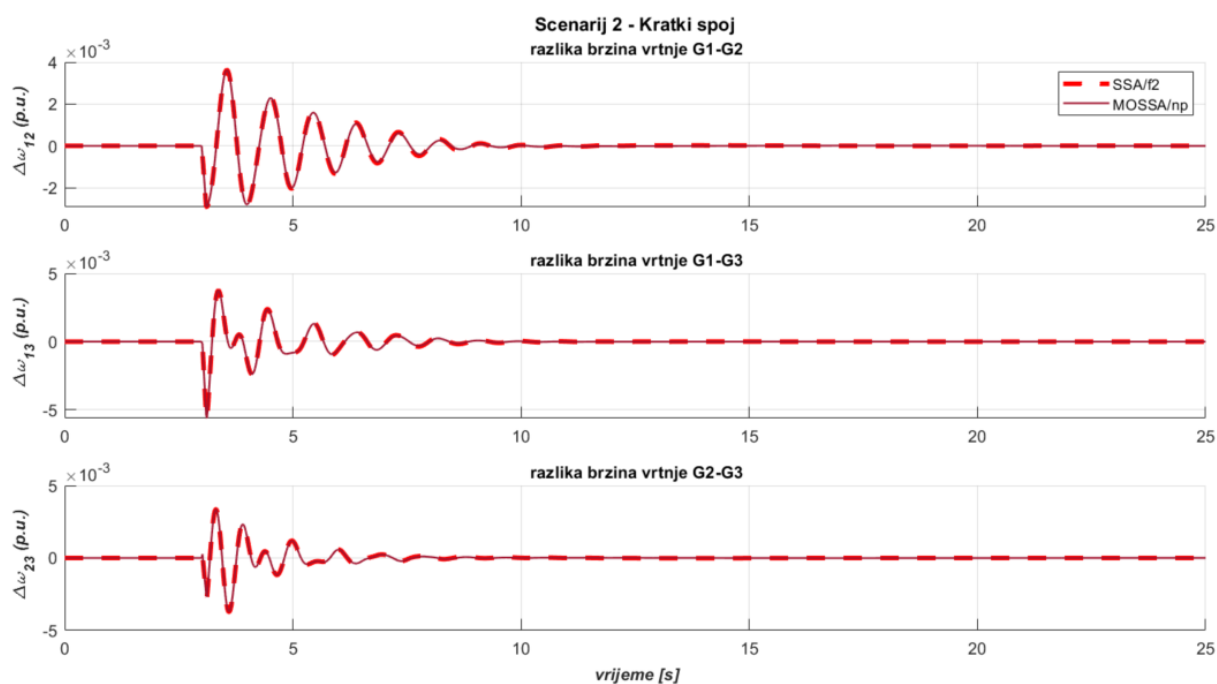
Slika 7.16. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



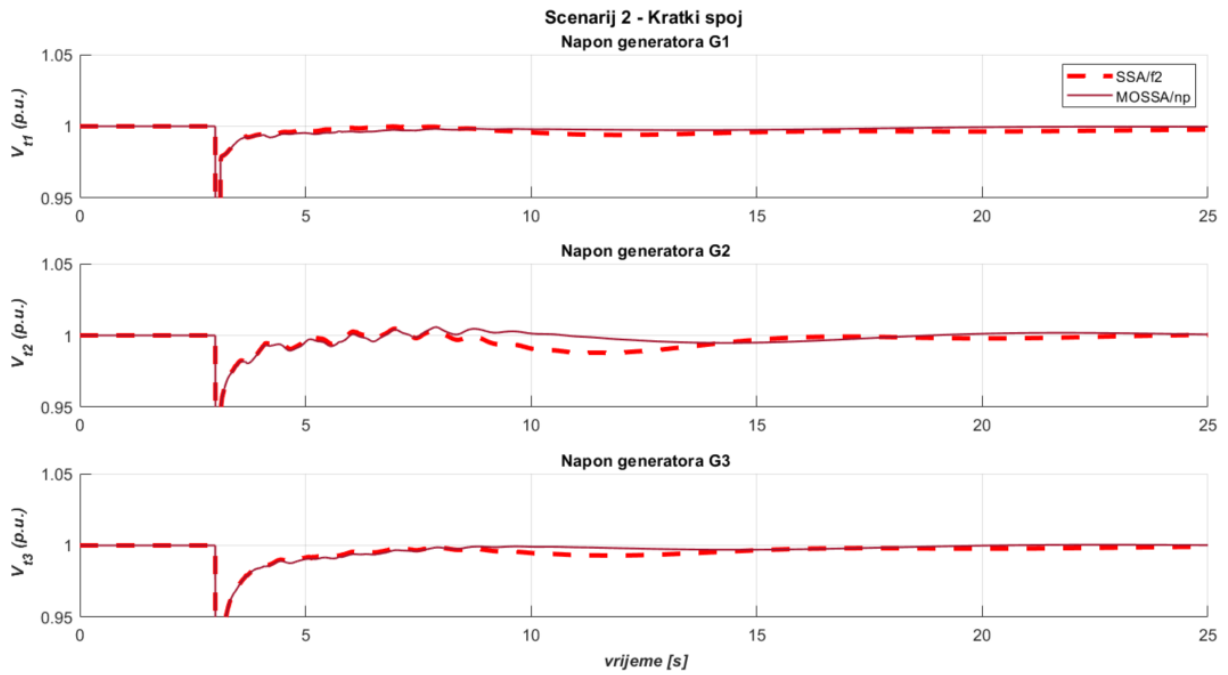
Slika 7.17. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



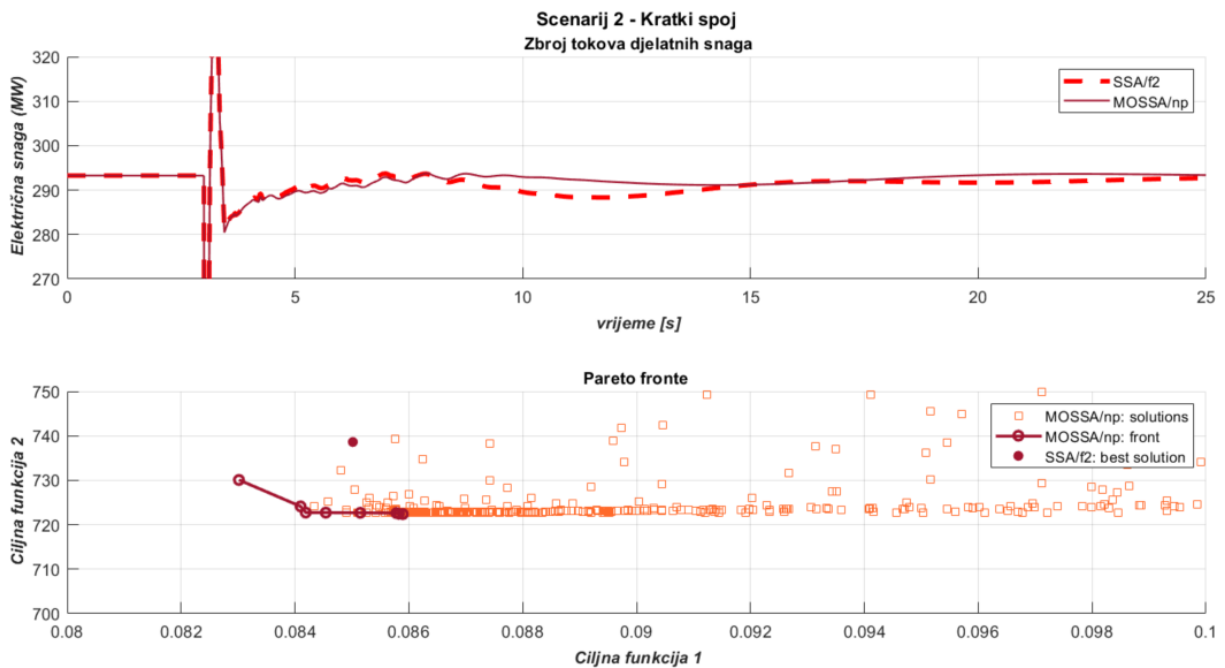
Slika 7.18. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



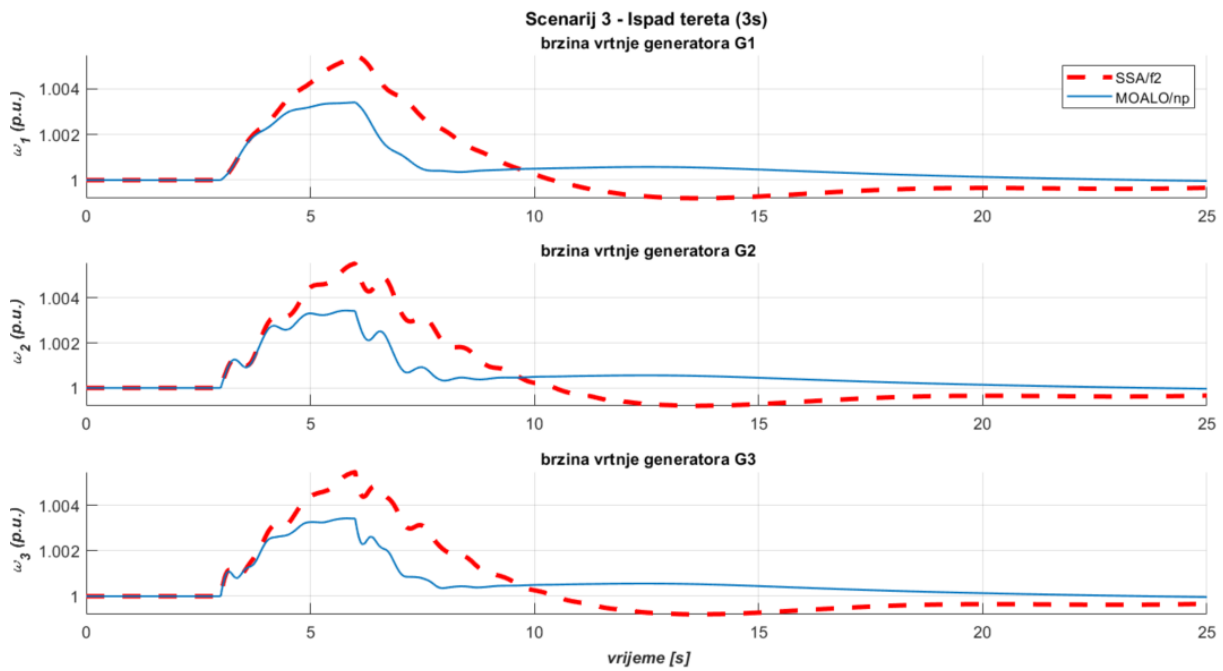
Slika 7.19. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



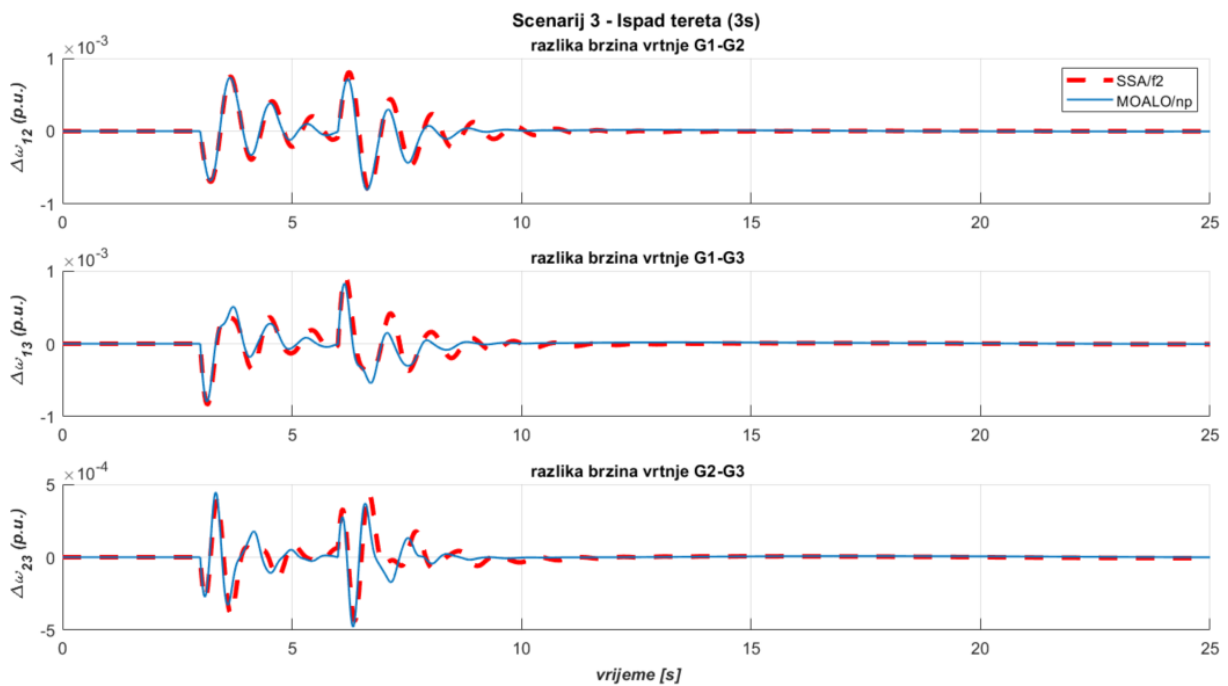
Slika 7.20. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode drugoj drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



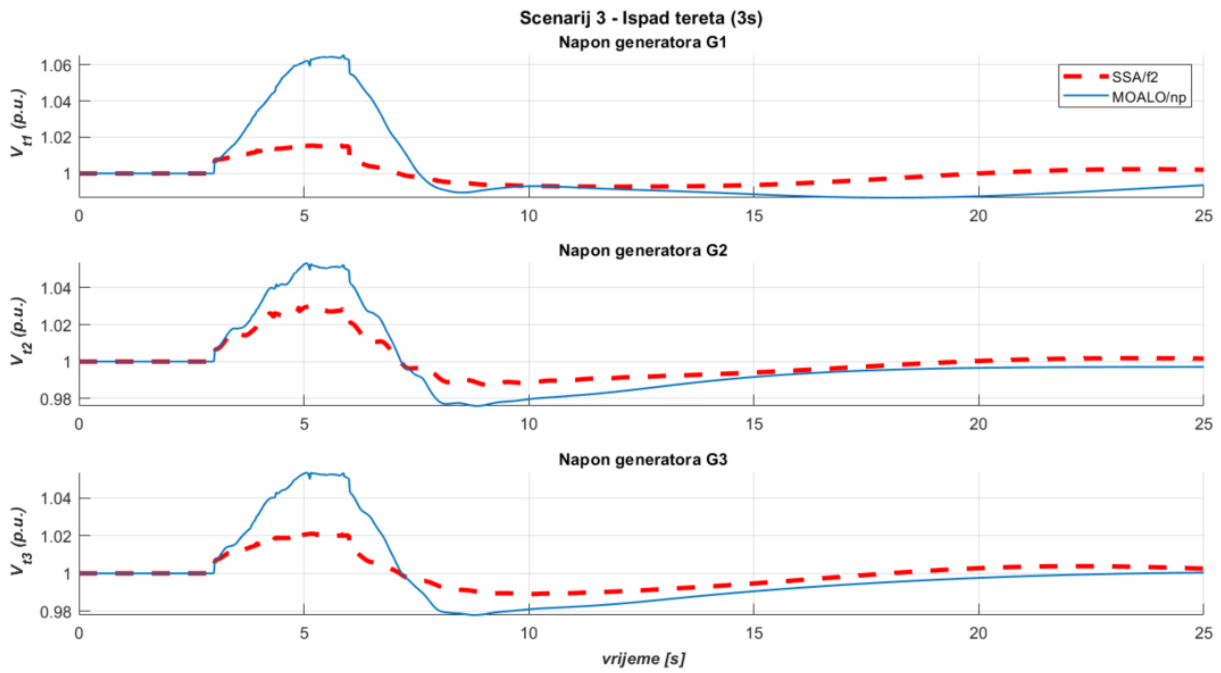
Slika 7.21. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



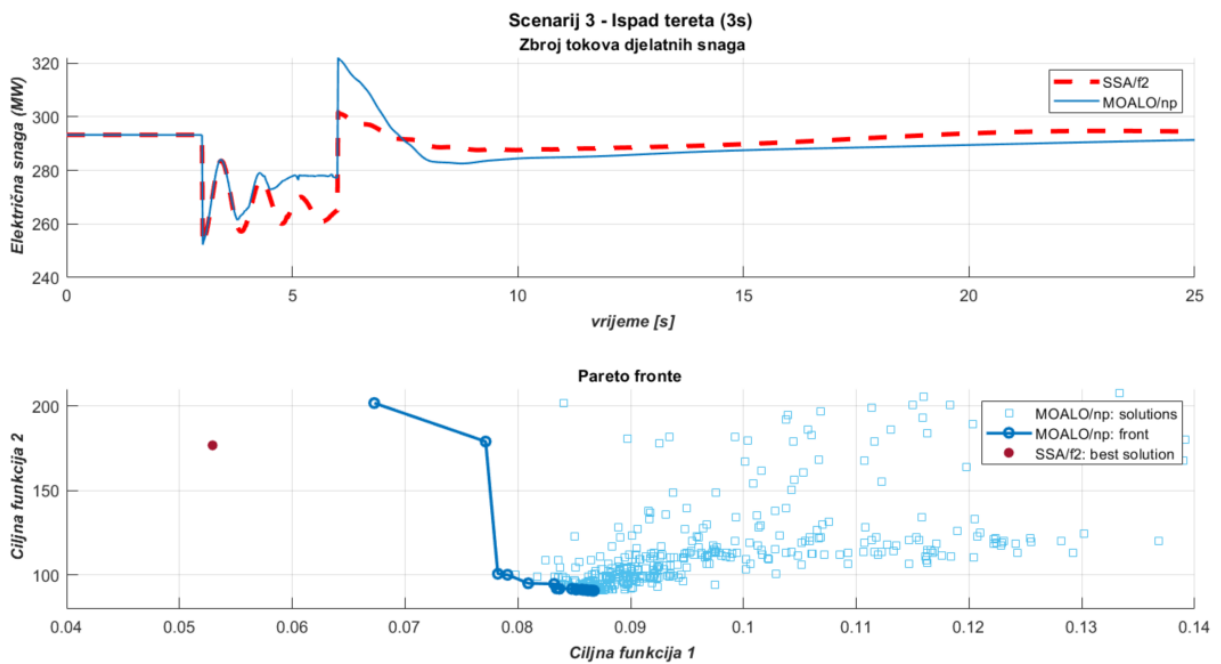
Slika 7.22. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



Slika 7.23. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



Slika 7.24. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



Slika 7.25. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz

## 7.2 Usporedba učinkovitosti – TAFM model

U tablici usporedbe 7.2 prikazani su svi rezultati najboljih probnih pokušaja optimizacijskih procesa, dok su posebno označeni oni koji su od interesa za promatranje kao najbolji rezultati. Poredbeni rezultati odziva i Pareto prikaza se nalaze na slikama 7.27 – 7.58.

Tablica 7.2 Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, TAFM model

Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj rješenja
Scenarij 1: Kratki spoj + APU	$f_1(t)$ (4.2)	<b>ALO</b>	<b>0,31545</b>	<b>0,31545</b>	-	<b>1170,340</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	0,45916	0,45916	-	1335,851	-	1
		SSA	0,31746	0,31746	-	1215,026	-	1
		SA	0,36964	0,36964	-	1153,046	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	701,7867	1,28578	-	701,7867	-	1
		VRPSO	1069,646	1,01456	-	1069,646	-	1
		<b>SSA</b>	<b>515,4889</b>	<b>1,37535</b>	-	<b>515,4889</b>	-	<b>1</b>
		SA	817,7141	0,93733	-	817,7141	-	1
	$np$ (4.9)	MOALO	14,02305	0,43196	0,72245	687,1291	1244,029	34
		MOVRPSO	14,17269	0,46408	0,59511	694,4616	763,1226	4
		<b>MOSSA</b>	<b>10,42223</b>	<b>0,44309</b>	<b>0,80945</b>	<b>510,6887</b>	<b>1301,459</b>	<b>14</b>
		MOSA	15,53316	0,49197	0,77542	761,1245	1322,862	15
	$wm1$ (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>2,11762</b>	<b>0,24576</b>	<b>0,24838</b>	<b>1092,248</b>	<b>1097,755</b>	<b>26</b>
		MOVRPSO	3,23318	0,39150	0,57816	1110,135	1187,832	3
		MOSSA	2,25833	0,26237	0,54912	618,9463	1162,307	10
		MOSA	2,90171	0,34478	0,56983	1121,936	1263,302	3
	$wm2$ (4.11)	MOALO	1,62705	0,37208	0,62217	798,8338	929,7817	42
		MOVRPSO	2,18487	0,46567	0,60347	901,6108	1449,514	4
		MOSSA	1,58097	0,28920	0,34127	1109,318	1144,063	10
		<b>MOSA</b>	<b>1,52974</b>	<b>0,38964</b>	<b>0,38964</b>	<b>740,8588</b>	<b>740,8588</b>	<b>1</b>
Scenarij 2: Kratki spoj	$f_1(t)$ (4.2)	ALO	0,07210	0,07210	-	171,7709	-	1
		VRPSO	0,08244	0,08244	-	183,1132	-	1
		SSA	0,06845	0,06845	-	157,7707	-	1
		<b>SA</b>	<b>0,06654</b>	<b>0,06654</b>	-	<b>171,0754</b>	-	<b>1</b>
	$f_2(t)$ (4.3)	<b>ALO</b>	<b>131,5678</b>	<b>0,11771</b>	-	<b>131,5678</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	171,9321	0,19586	-	171,9321	-	1
		SSA	168,5702	0,10188	-	168,5702	-	1
		SA	155,9309	0,09259	-	155,9309	-	1
	$np$ (4.9)	MOALO	3,06305	0,07431	0,09481	150,0895	159,2029	26
		MOVRPSO	3,79594	0,10680	0,10680	186,0010	186,0010	1
		<b>MOSSA</b>	<b>2,61890</b>	<b>0,05968</b>	<b>0,07332</b>	<b>128,3260</b>	<b>140,8203</b>	<b>28</b>
		MOSA	3,25213	0,07118	0,12520	159,3544	168,7437	4
	$wm1$ (4.11)	MOALO	0,60204	0,07485	0,07634	162,4862	162,5906	6
		MOVRPSO	0,75426	0,09381	0,09381	202,7981	202,7981	1
		MOSSA	0,52195	0,06445	0,06483	143,3779	163,8242	10
		<b>MOSA</b>	<b>0,48681</b>	<b>0,05946</b>	<b>0,06204</b>	<b>157,1059</b>	<b>163,3907</b>	<b>3</b>
	$wm2$ (4.11)	MOALO	0,31352	0,07556	0,07628	164,7994	170,5538	14
		MOVRPSO	0,31172	0,06932	0,07634	164,7980	194,8904	5
		<b>MOSSA</b>	<b>0,24329</b>	<b>0,05756</b>	<b>0,05773</b>	<b>132,4869</b>	<b>132,5293</b>	<b>8</b>
		MOSA	0,29640	0,06712	0,06752	171,2230	171,4680	2

Tablica 7.2 Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, TAFM model (nastavak)

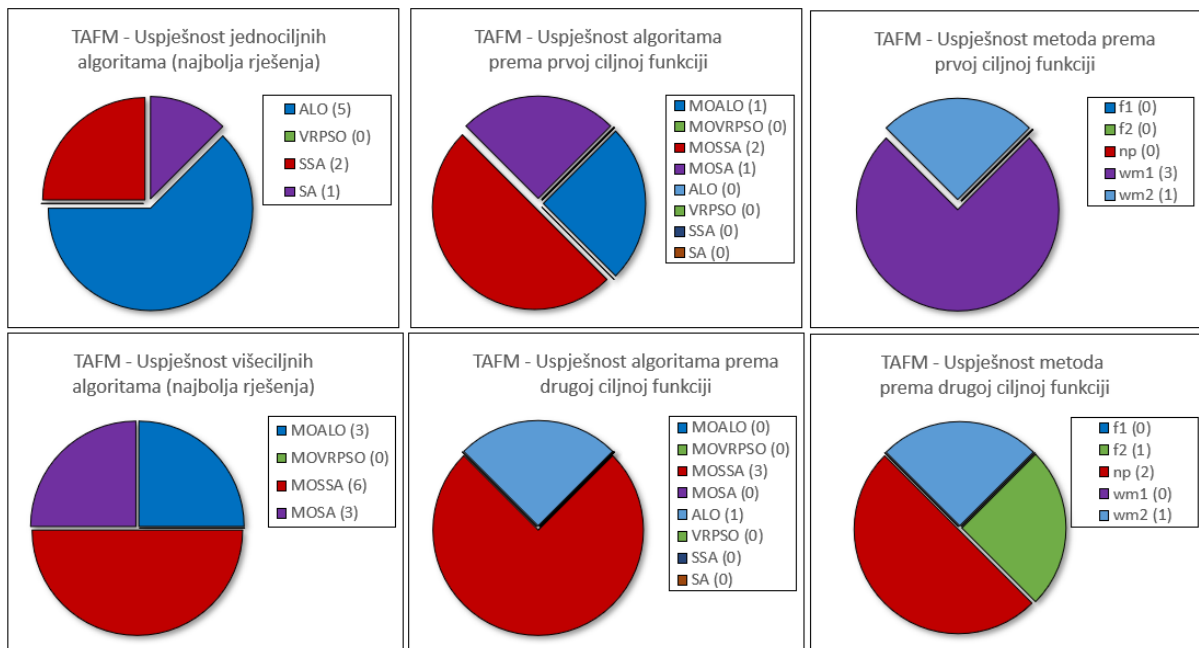
Scenarij	Metoda	Algoritam	$f_{best}$	$f_{1,min}$	$f_{1,max}$	$f_{2,min}$	$f_{2,max}$	Broj rješenja
Scenarij 3: Uklop tereta	$f_1(t)$ (4.2)	<b>ALO</b>	<b>0,02015</b>	<b>0,02015</b>	-	<b>148,7275</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	0,02761	0,02761	-	152,0718	-	1
		SSA	0,02097	0,02097	-	115,1606	-	1
		SA	0,02551	0,02551	-	124,2254	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	ALO	83,5679	0,31993	-	83,5679	-	1
		VRPSO	181,7034	0,07364	-	181,7034	-	1
		<b>SSA</b>	<b>62,1954</b>	<b>0,05943</b>	-	<b>62,1954</b>	-	<b>1</b>
		SA	94,0015	0,04804	-	94,0015	-	1
	$np$ (4.9)	MOALO	1,76348	0,02872	0,03793	86,4106	116,9285	26
		MOVPSO	2,66346	0,02809	0,02809	130,5097	130,5097	1
		<b>MOSSA</b>	<b>1,67518</b>	<b>0,03067</b>	<b>0,03635</b>	<b>82,0837</b>	<b>91,8988</b>	<b>30</b>
		MOSA	1,70085	0,02661	0,02730	83,3417	91,7180	4
	$wm1$ (4.11)	MOALO	0,10346	0,00990	0,01021	108,1817	158,4012	26
		MOVPSO	0,11631	0,01008	0,01008	162,7893	162,7893	1
		<b>MOSSA</b>	<b>0,09724</b>	<b>0,00910</b>	<b>0,00928</b>	<b>113,9383</b>	<b>116,0830</b>	<b>13</b>
		MOSA	0,12384	0,00991	0,01006	193,7062	225,6500	2
	$wm2$ (4.11)	MOALO	0,13153	0,02566	0,02794	84,1570	161,7409	54
		MOVPSO	0,18061	0,03013	0,03212	133,7312	178,9953	3
		<b>MOSSA</b>	<b>0,11078</b>	<b>0,02459</b>	<b>0,02461</b>	<b>65,6853</b>	<b>84,51417</b>	<b>13</b>
		MOSA	0,15301	0,02652	0,02785	111,1922	158,8788	4
Scenarij 4: Ispad tereta (2s)	$f_1(t)$ (4.2)	<b>ALO</b>	<b>0,17450</b>	<b>0,17450</b>	-	<b>478,9588</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	0,27353	0,27353	-	595,9309	-	1
		SSA	0,22601	0,22601	-	532,8252	-	1
		SA	0,20147	0,20147	-	549,6413	-	1
	$f_2(t)$ (4.3)	<b>ALO</b>	<b>338,0256</b>	<b>0,40719</b>	-	<b>338,0256</b>	-	<b>1</b>
		VRPSO	456,1209	0,42257	-	456,1209	-	1
		SSA	425,6749	0,57062	-	425,6749	-	1
		SA	408,1960	0,26306	-	408,1960	-	1
	$np$ (4.9)	<b>MOALO</b>	<b>7,17688</b>	<b>0,30052</b>	<b>0,47813</b>	<b>351,6667</b>	<b>568,2724</b>	<b>26</b>
		MOVPSO	9,50442	0,26567	0,53090	465,7160	541,9650	2
		MOSSA	9,67601	0,36319	0,39985	474,1242	508,0530	7
		MOSA	8,63068	0,34516	0,59334	422,9027	568,3738	7
	$wm1$ (4.11)	MOALO	1,50204	0,18304	0,28498	459,0476	516,8301	33
		MOVPSO	2,22459	0,27698	0,48096	546,8775	589,0661	3
		MOSSA	1,73155	0,21323	0,27400	504,4611	529,3506	11
		<b>MOSA</b>	<b>1,27533</b>	<b>0,15498</b>	<b>0,29050</b>	<b>380,4527</b>	<b>451,9030</b>	<b>8</b>
	$wm2$ (4.11)	<b>MOALO</b>	<b>0,71945</b>	<b>0,16782</b>	<b>0,21680</b>	<b>384,5933</b>	<b>399,8802</b>	<b>64</b>
		MOVPSO	1,09645	0,27822	0,34941	531,5153	534,5445	2
		MOSSA	0,99218	0,24635	0,52716	482,1850	502,4174	43
		MOSA	0,78298	0,16741	0,19508	419,7139	491,7055	10

- zelene ćelije – najbolji SO i MO algoritmi po prvoj ciljnoj funkciji  $f_1(t)$
- narančaste ćelije – najbolji SO i MO algoritmi po drugoj ciljnoj funkciji  $f_2(t)$
- podebljani font – najbolji algoritam za pojedinu metodu/scenarij

Pregledom algoritama jednociljne optimizacije za TAFM model, vidljivo je da je SSA algoritam daje u najbolje rezultate. U slučaju višeciljne optimizacije MOSSA daje najviše najboljih rješenja. Usporedbom prve i druge ciljne funkcije kod algoritama najbolje su se



pokazali jednociljni i višeciljni noviji algoritmi (ALO i SSA), ovaj put uz doprinos i klasičnog SA algoritma. Kod metoda je vidljiva sklonost težinskih višeciljnih funkcija davanju boljih rješenja prema prvoj ciljnoj funkciji, dok je neutralna višeciljna metoda nešto bolja u slučaju najboljih rezultata prema drugoj ciljnoj funkciji. Usporedba uspješnosti se nalazi na slici 7.26.

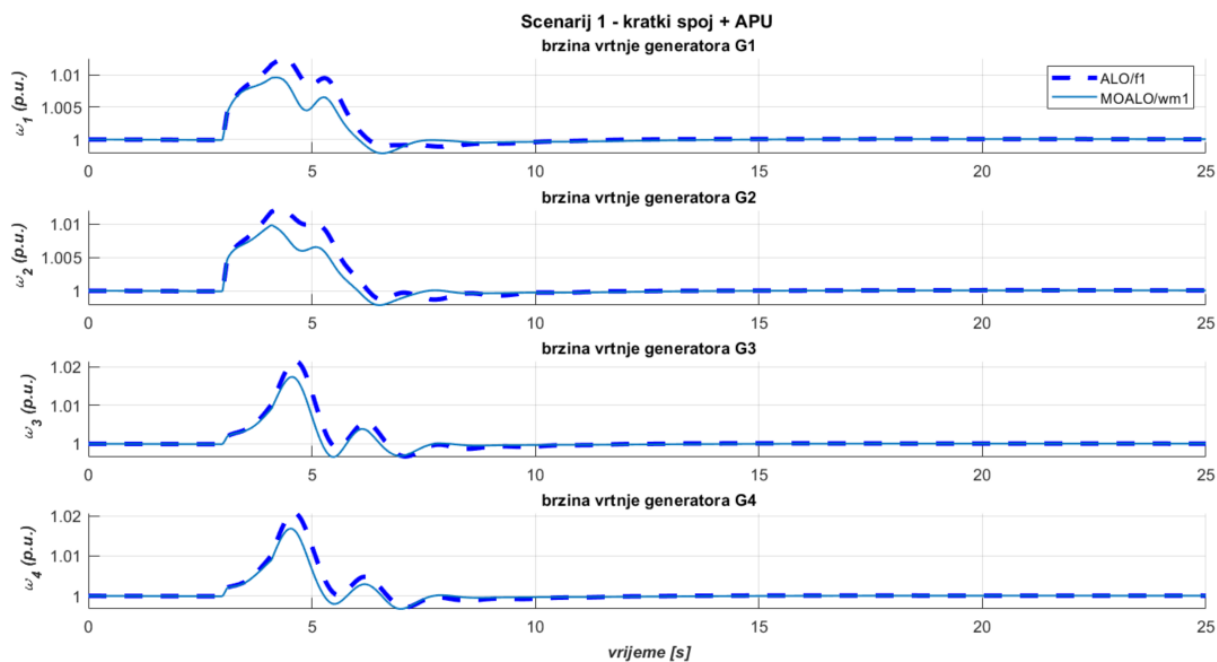


Slika 7.26. Usporedba uspješnosti po broju algoritama i metoda, TAFM model

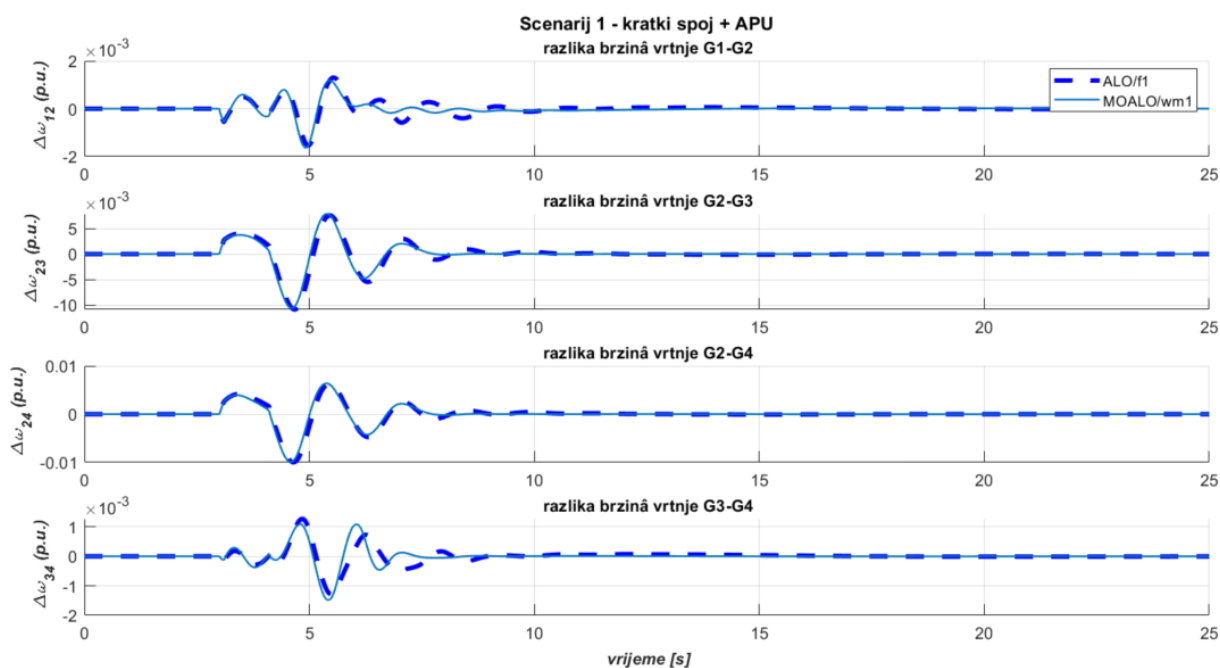
Pregledom rezultata u tablici 7.2 vidljivo je da za sva tri scenarija i sve algoritme višeciljne težinske metode daju gotovo uvijek bolje rezultate od jednociljnih po pitanju prve ciljne funkcije, dok usput imaju vrlo dobar učinak po pitanju druge ciljne funkcije.

Neutralne metode su učinkovitije po pitanju druge ciljne funkcije od ostalih metoda, ali generalno imaju nešto slabiji učinak obzirom na prvu ciljnu funkciju. Pregledom grafičkih rezultata vidljivo je da neutralne metode u malom broju slučajeva opet imaju manje učinkovitost u suzbijanju oscilacija vrlo niskih frekvencija od težinskih metoda, posebno kod snaga i brzina vrtnje, što je posebno vidljivo u scenariju 1, za najbolje rješenje po drugoj ciljnoj funkciji (naponi armature i snage prijenosa).

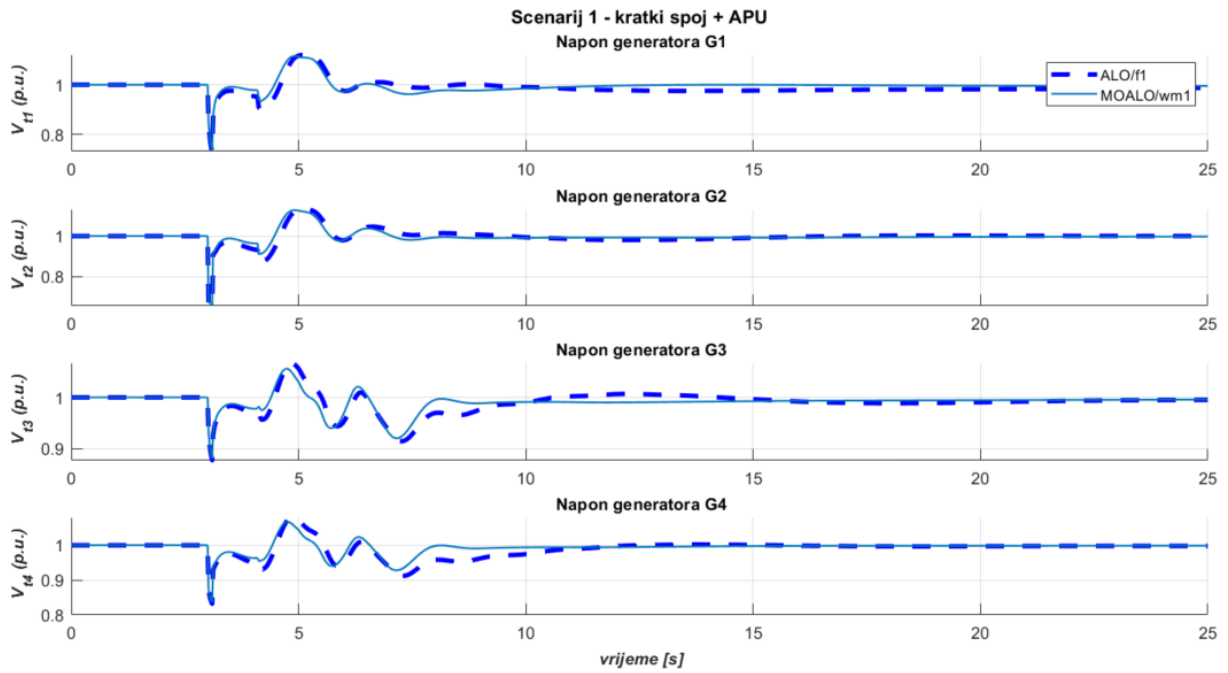
Noviji algoritmi daju veći izbor u Pareto skupu rješenja, dok se analizom Pareto prikaza može vidjeti da u pet od osam slučajeva jednociljno rješenje nije nedominantno obzirom na Pareto frontu, dok je u tri slučajeva nedominantno, što čini višeciljne metode učinkovitijima.



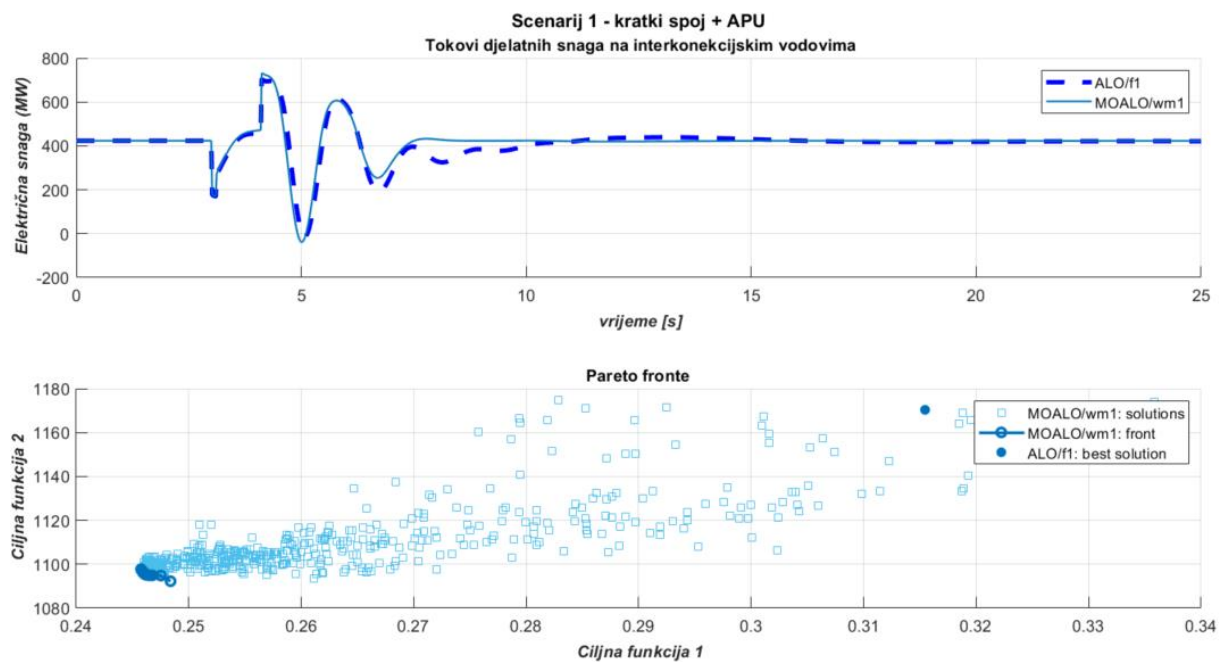
Slika 7.27. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



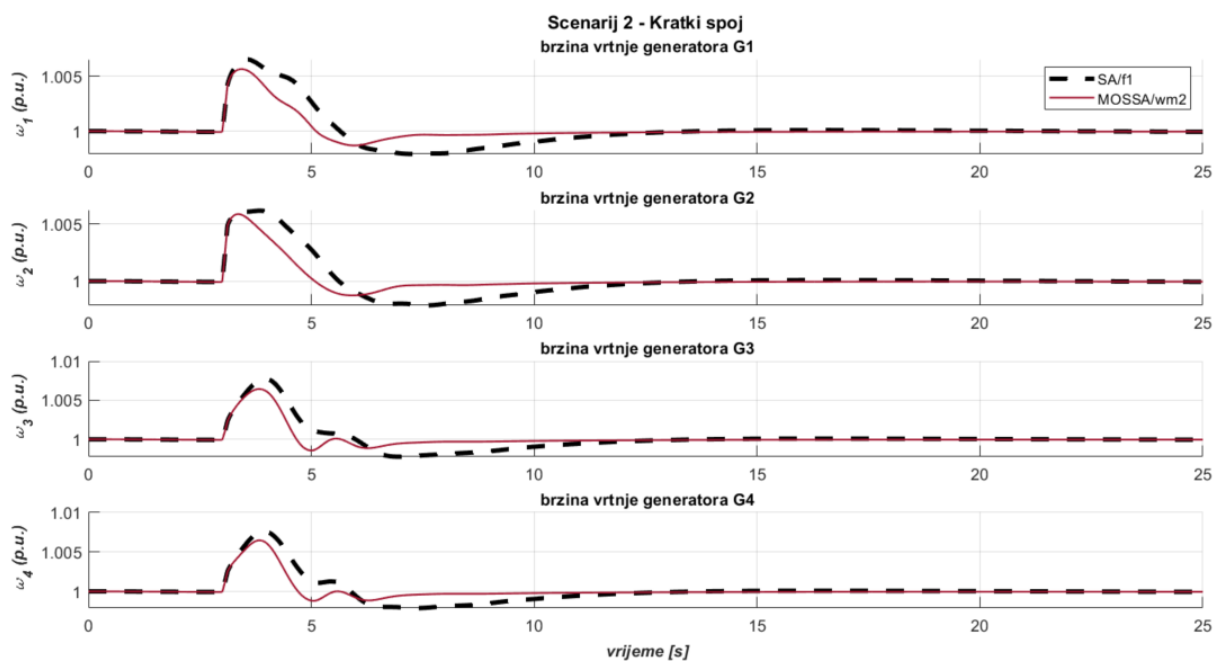
Slika 7.28. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



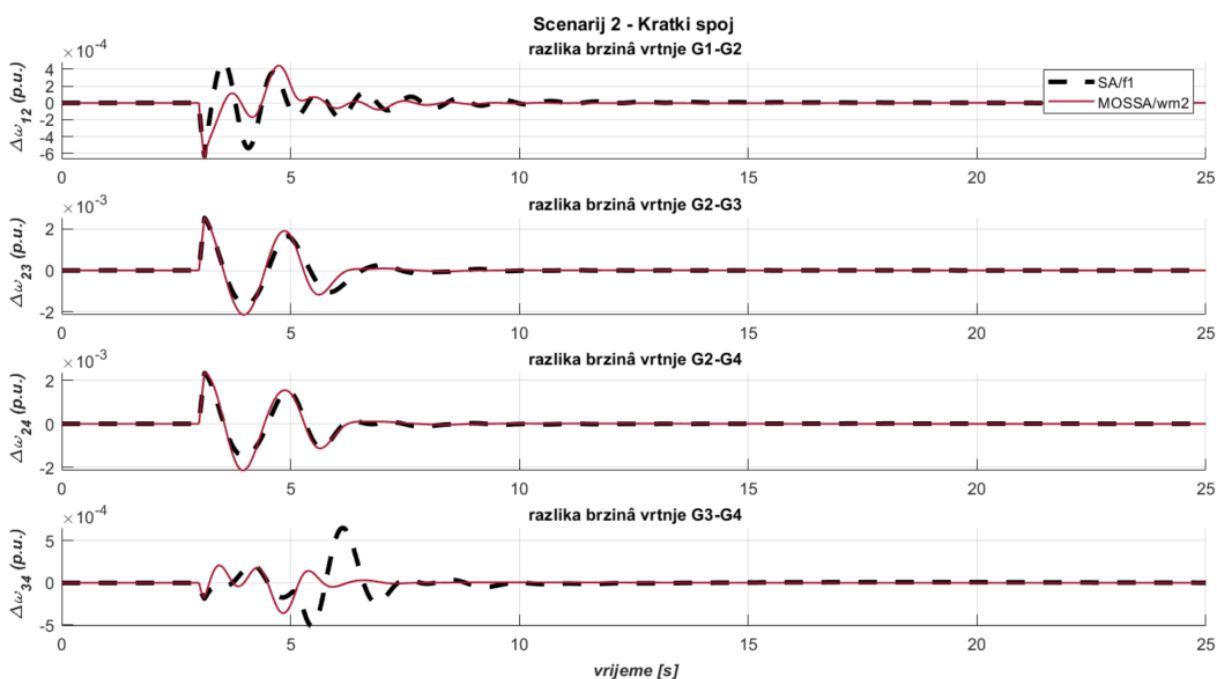
Slika 7.29. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



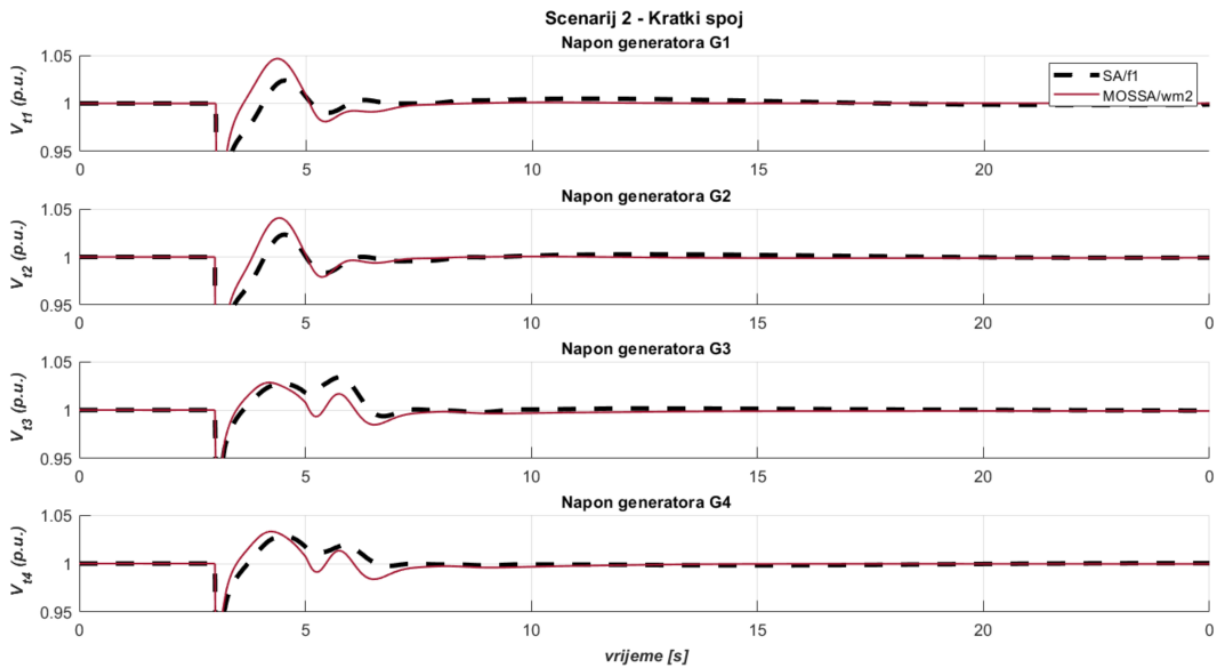
Slika 7.30. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



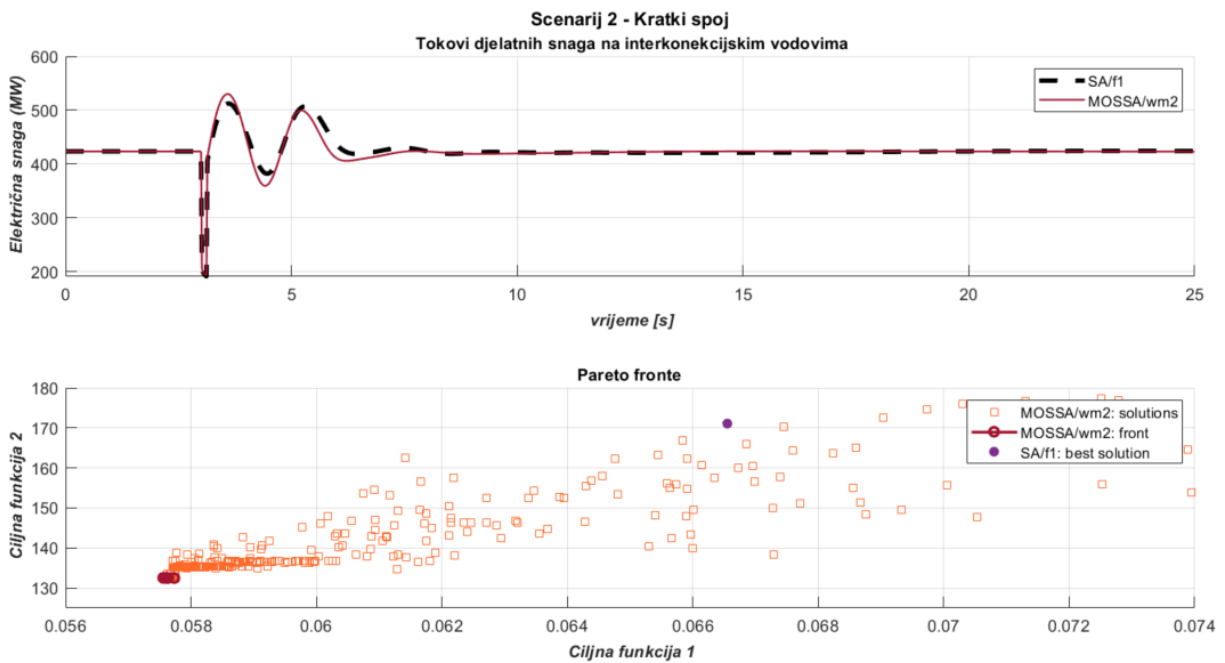
Slika 7.31. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



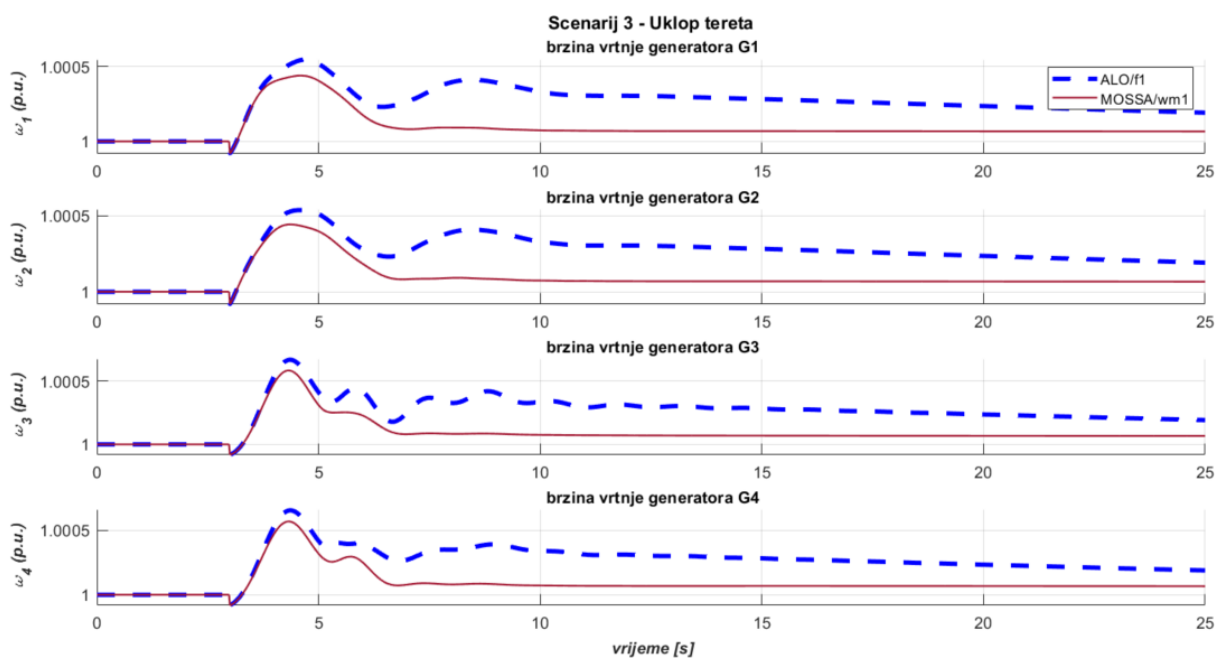
Slika 7.32. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



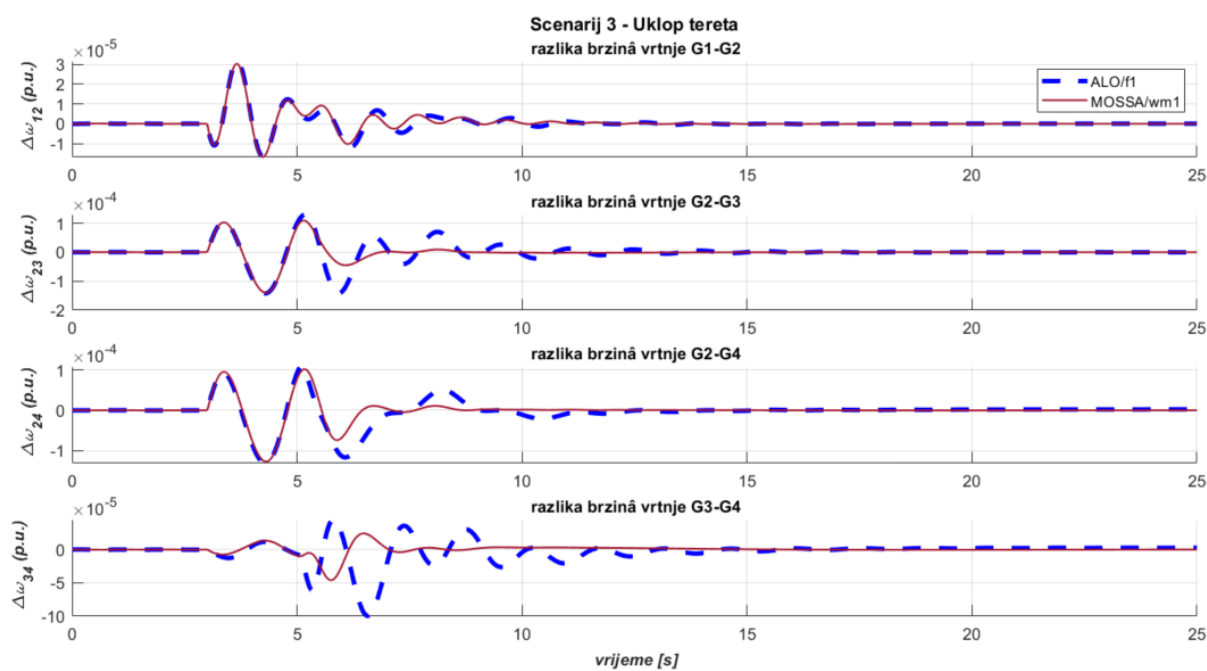
Slika 7.33. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



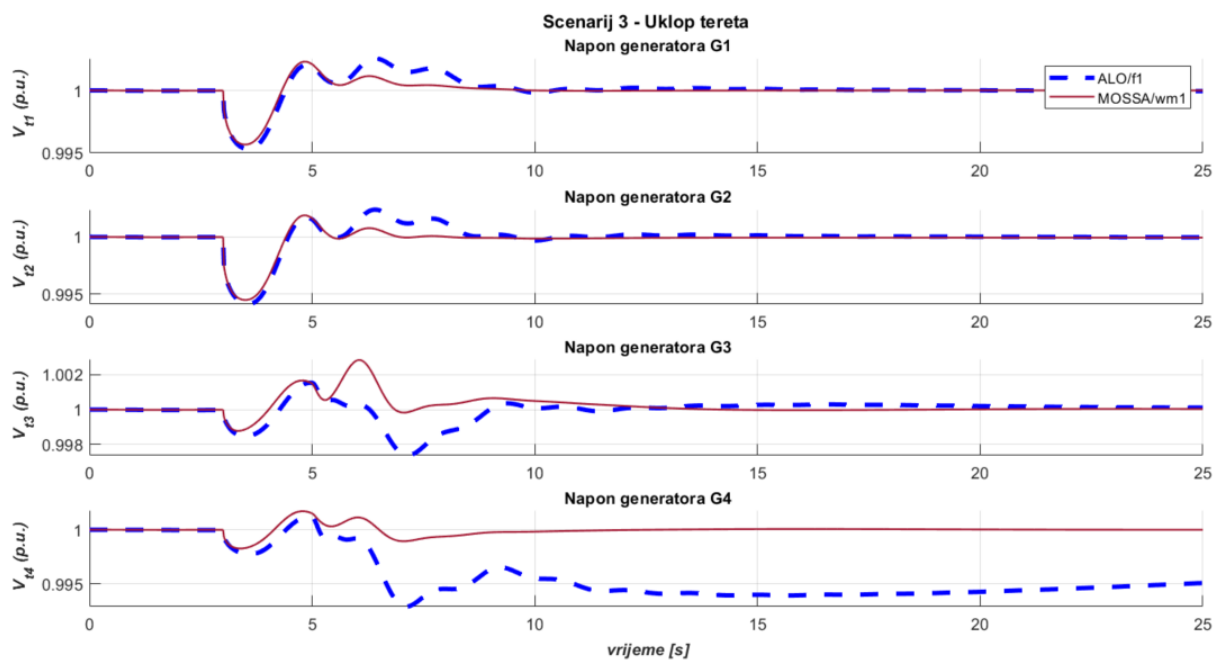
Slika 7.34. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



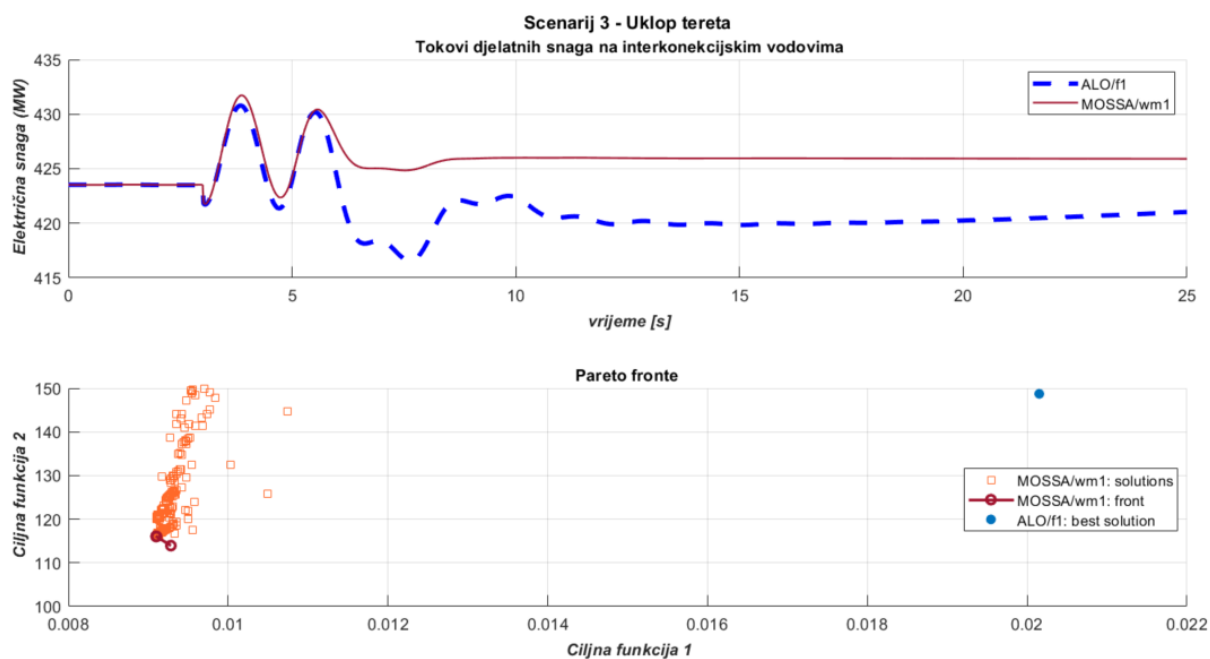
Slika 7.35. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



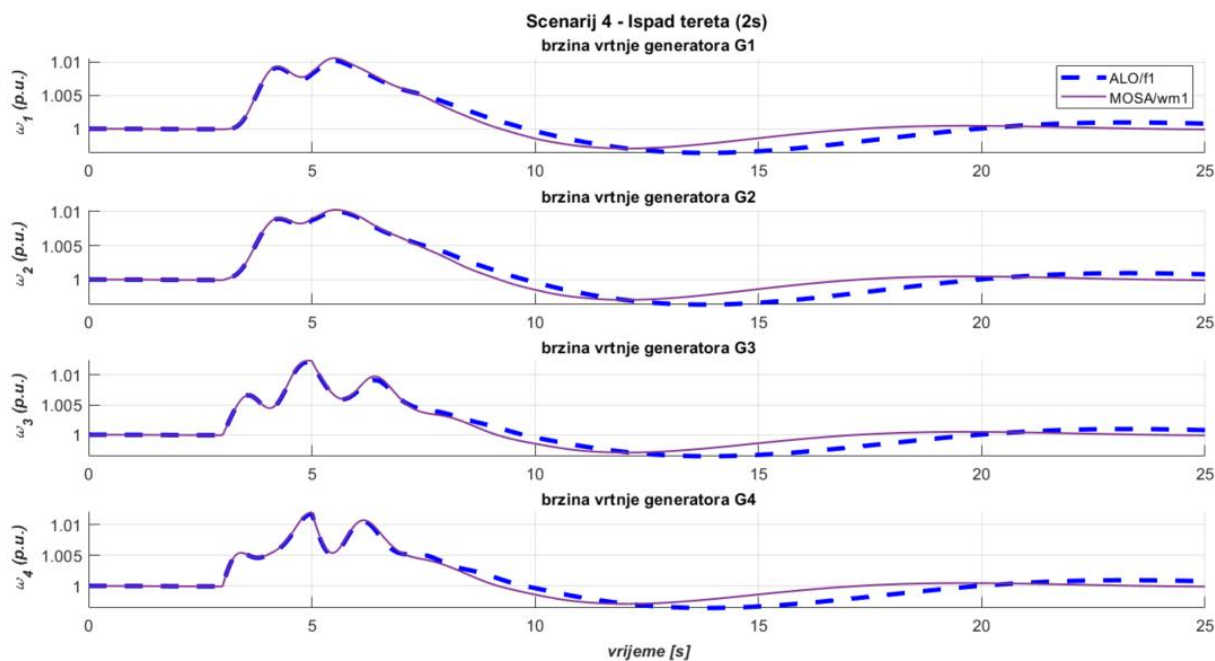
Slika 7.36. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



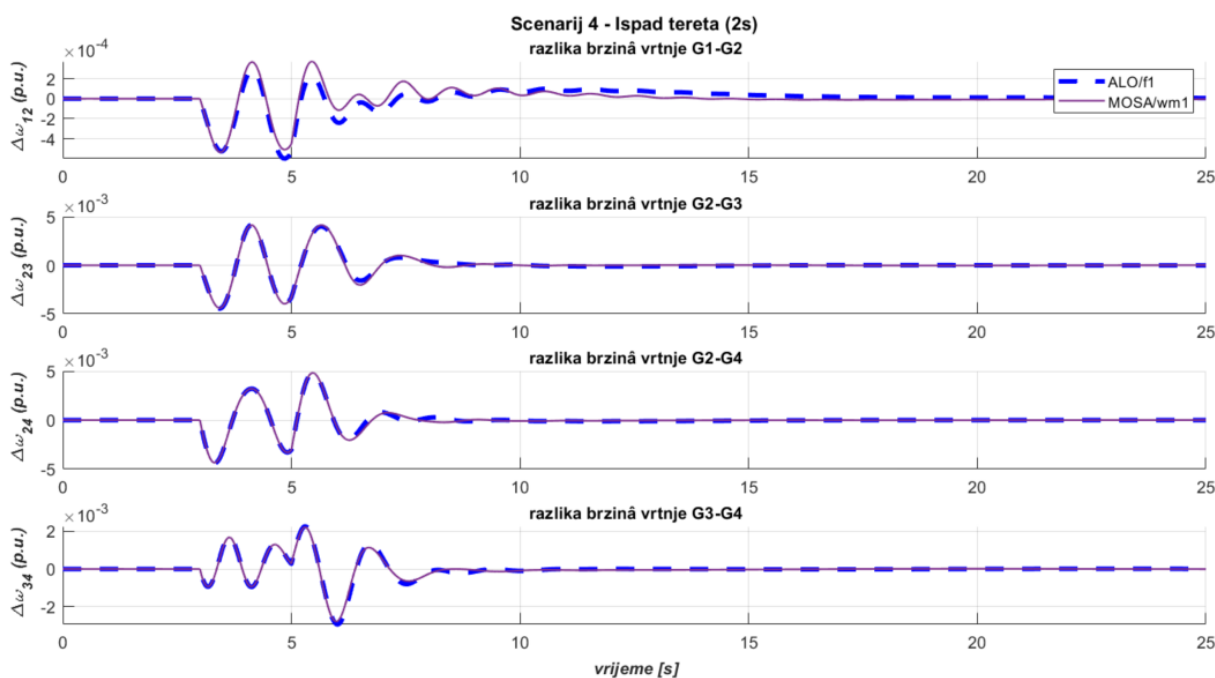
Slika 7.37. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



Slika 7.38. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz

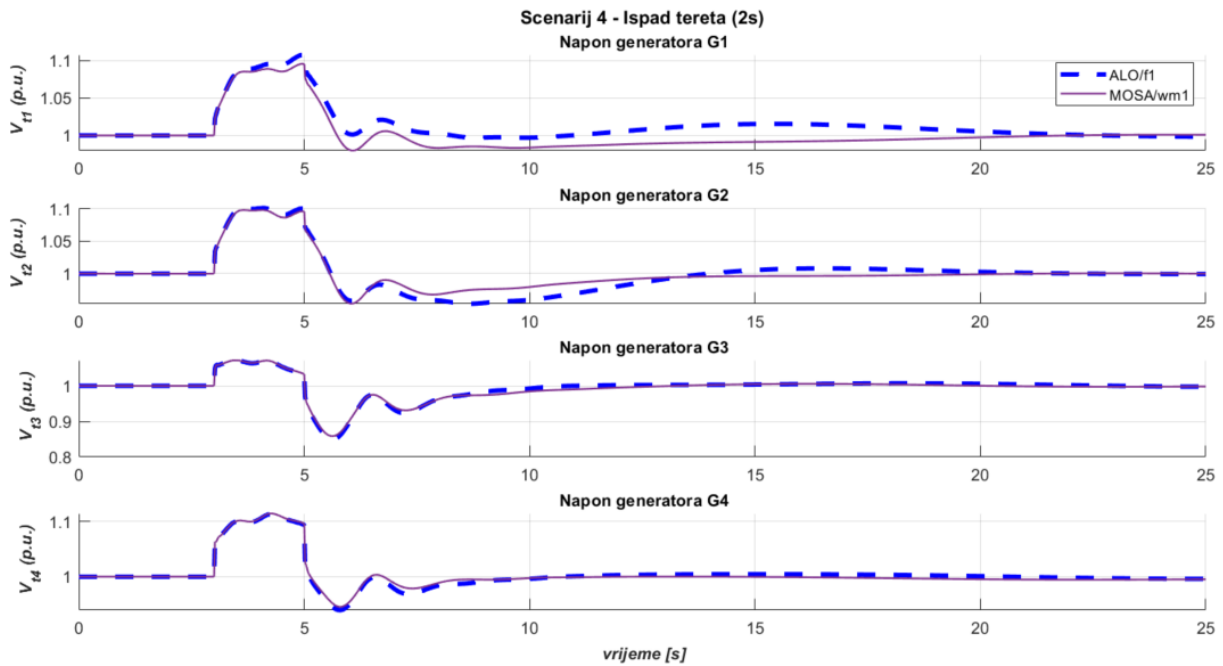


Slika 7.39. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora

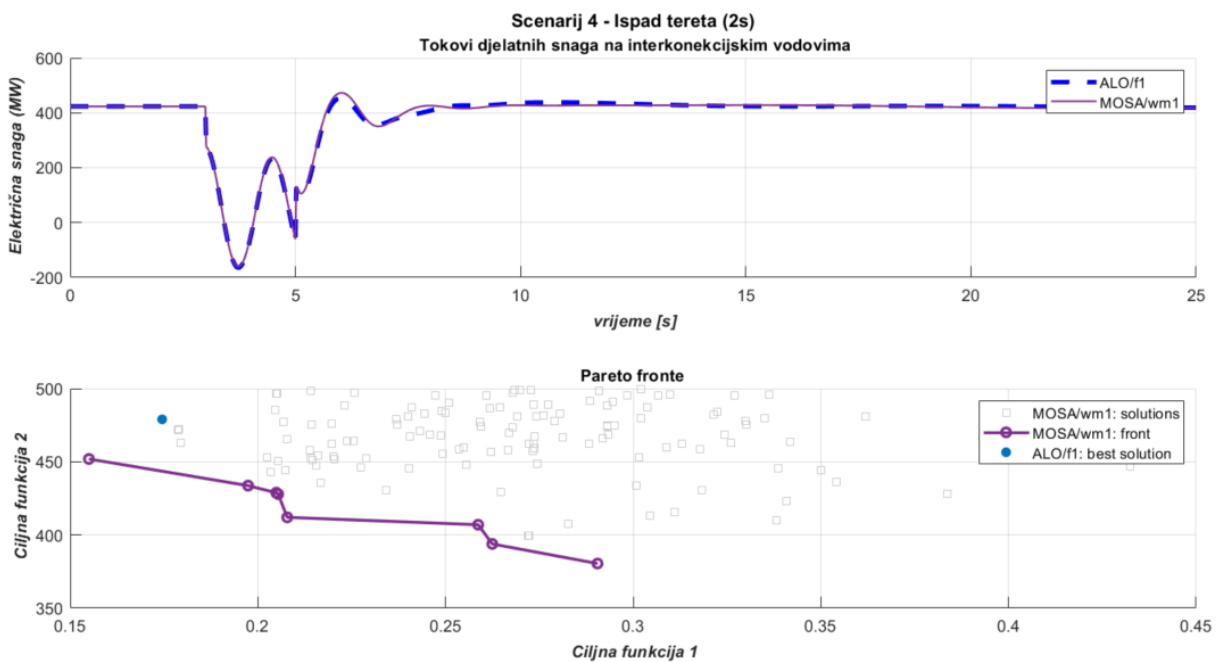


Slika 7.40. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora

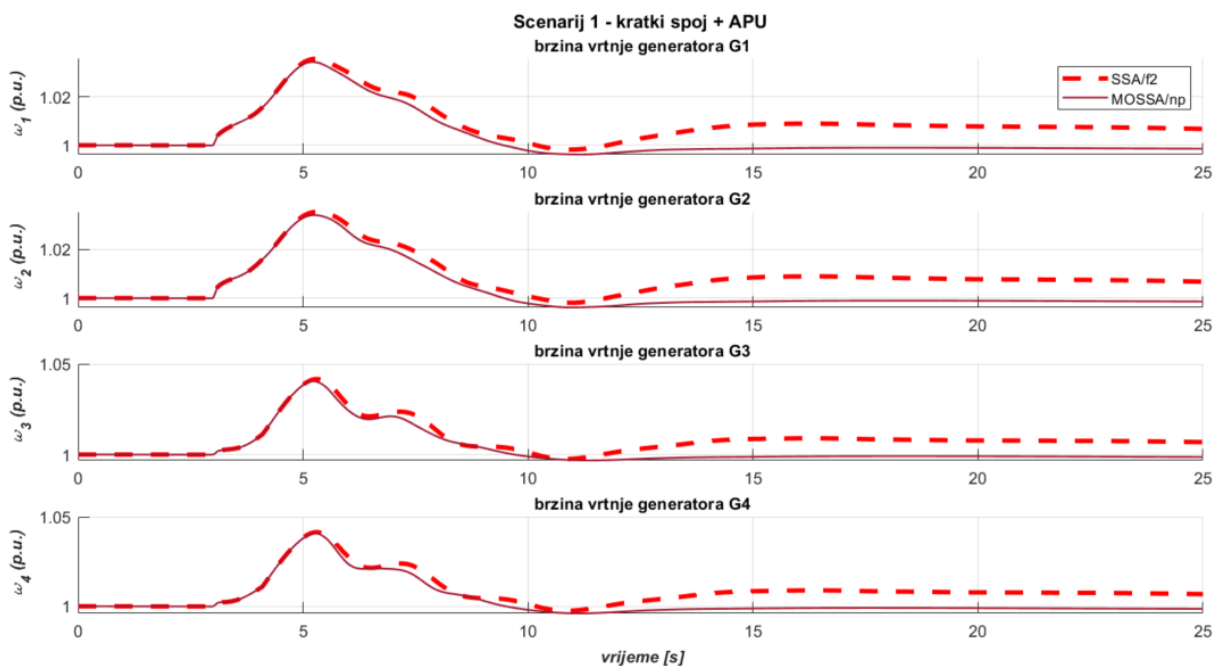




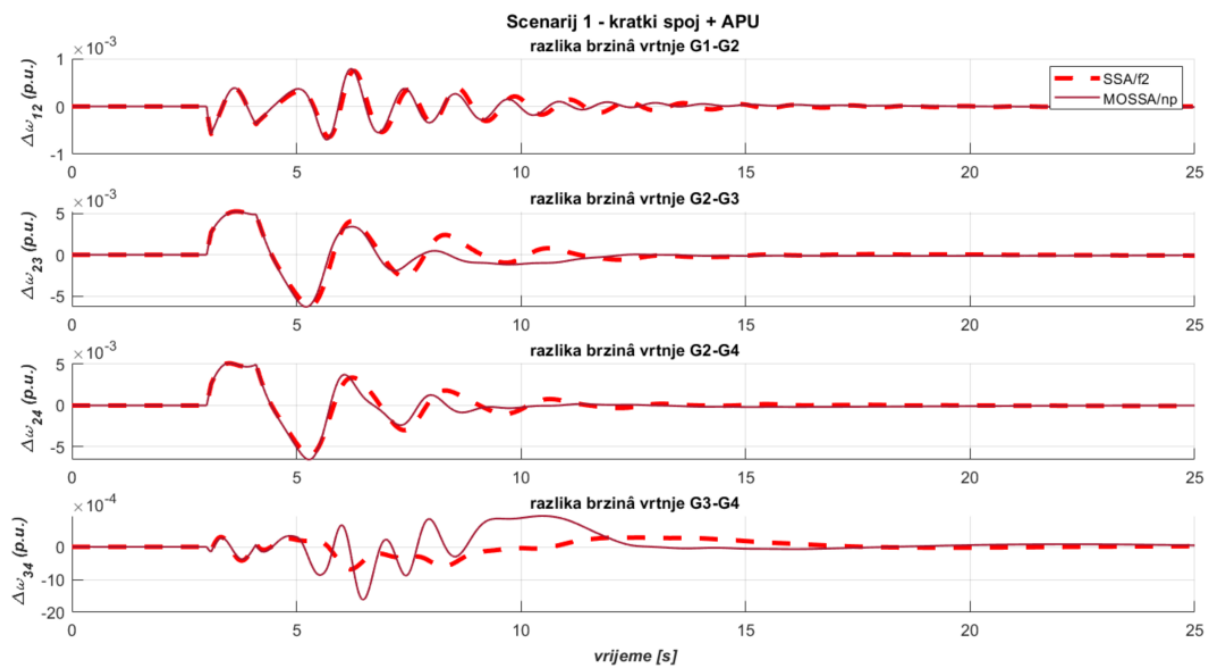
Slika 7.41. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



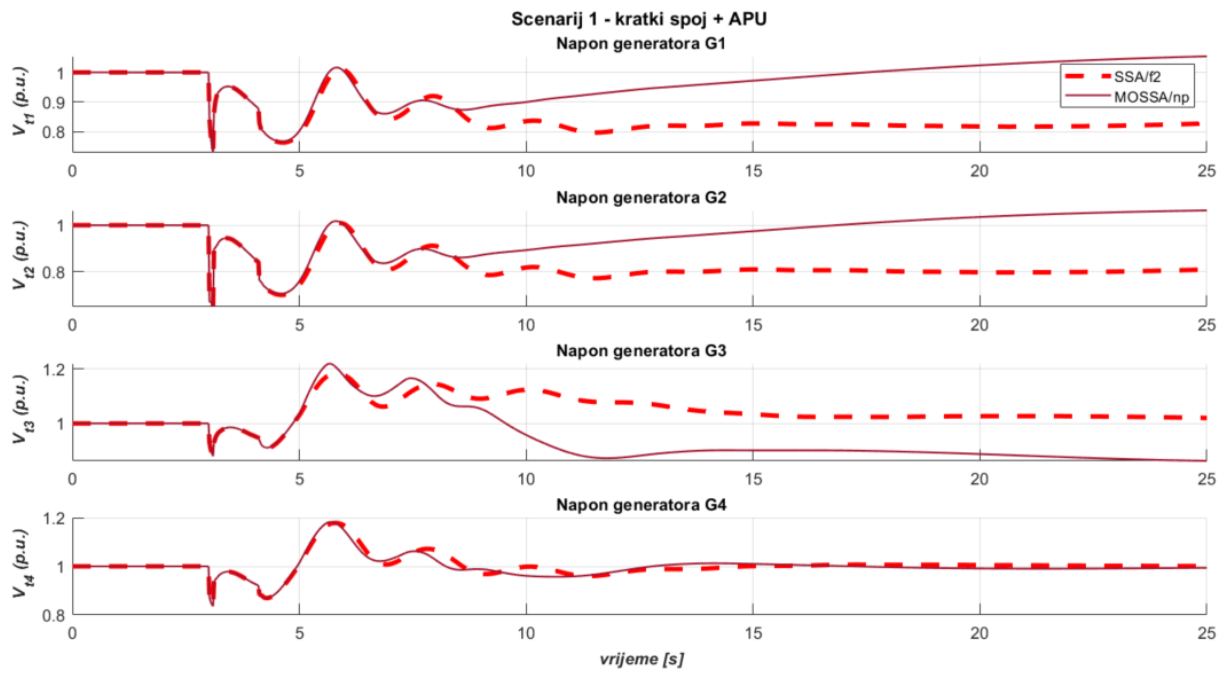
Slika 7.42. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



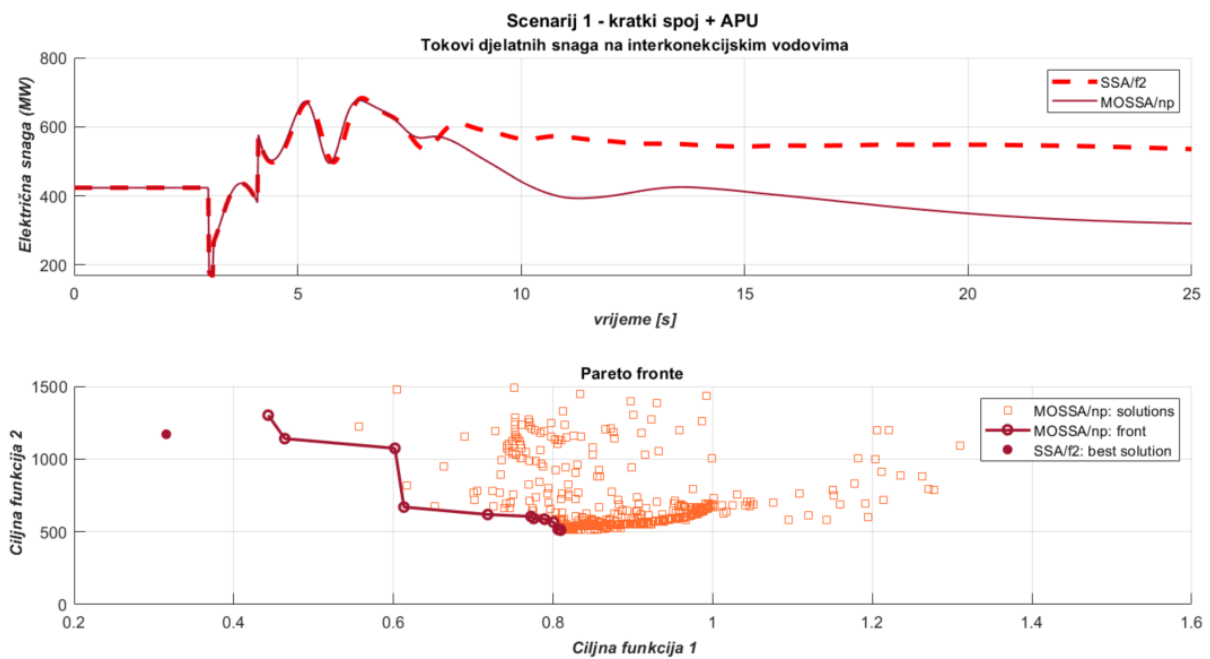
Slika 7.43. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



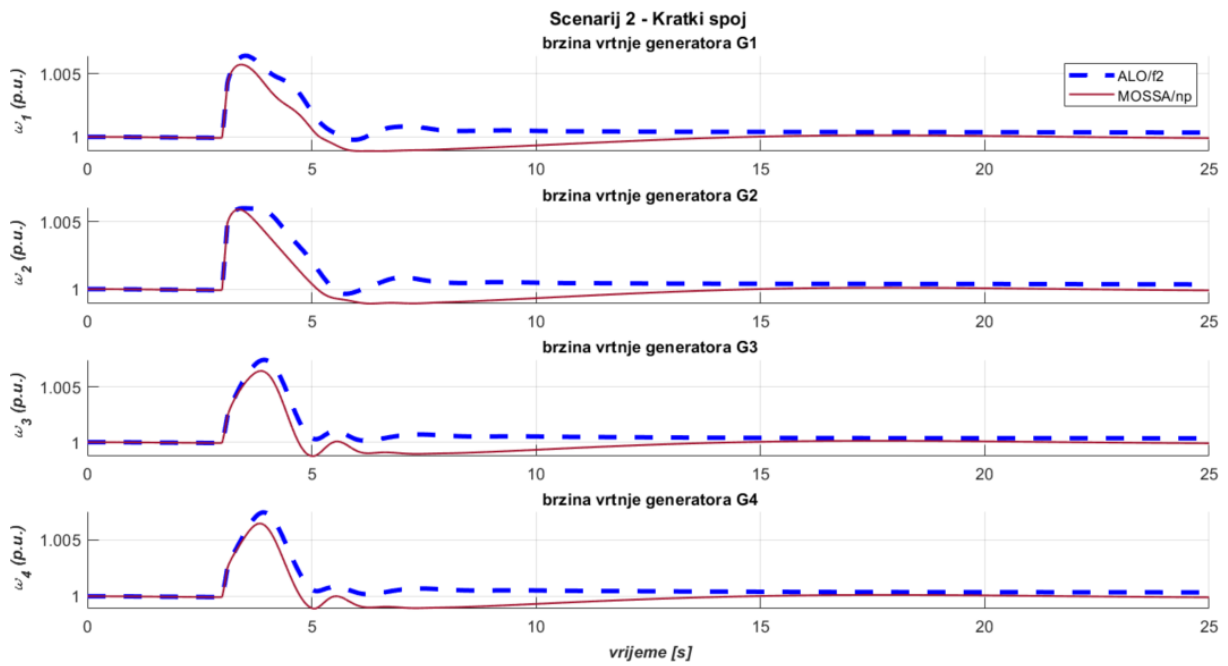
Slika 7.44. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



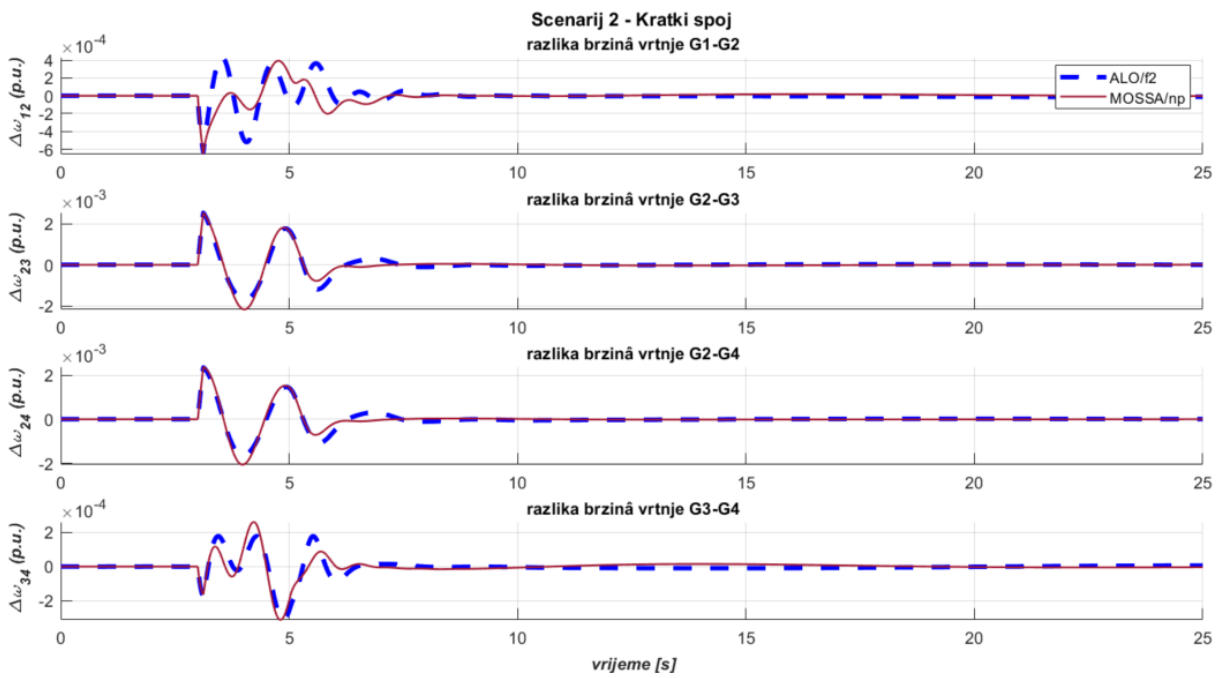
Slika 7.45. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



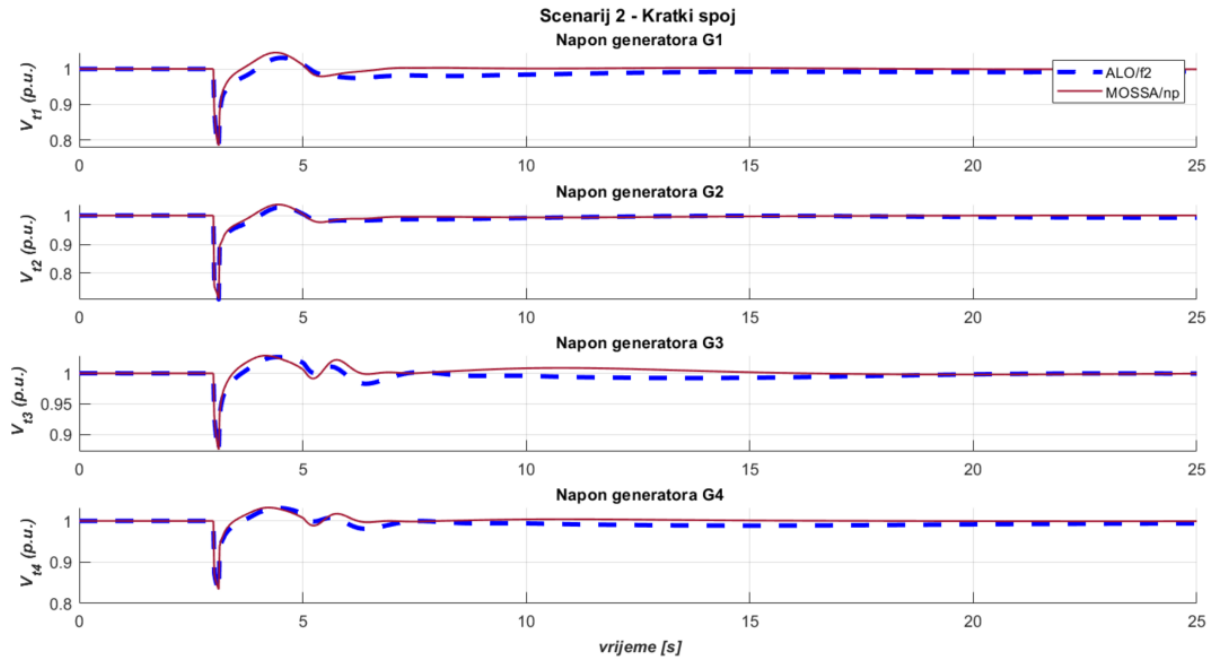
Slika 7.46. TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



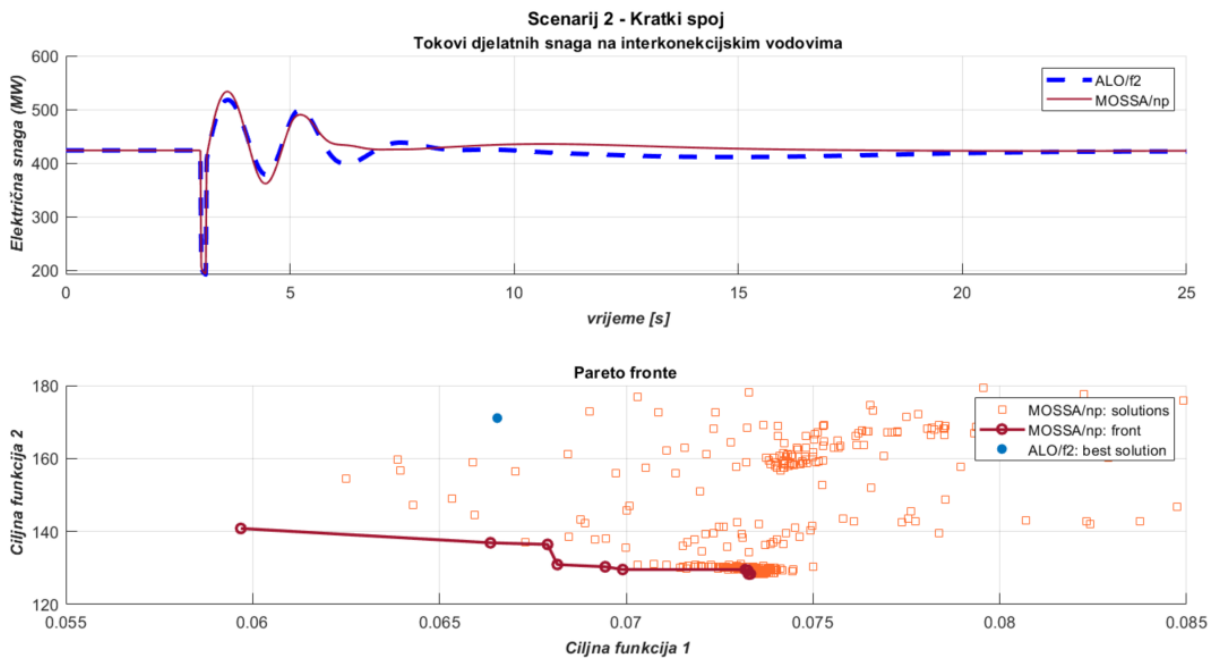
Slika 7.47. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



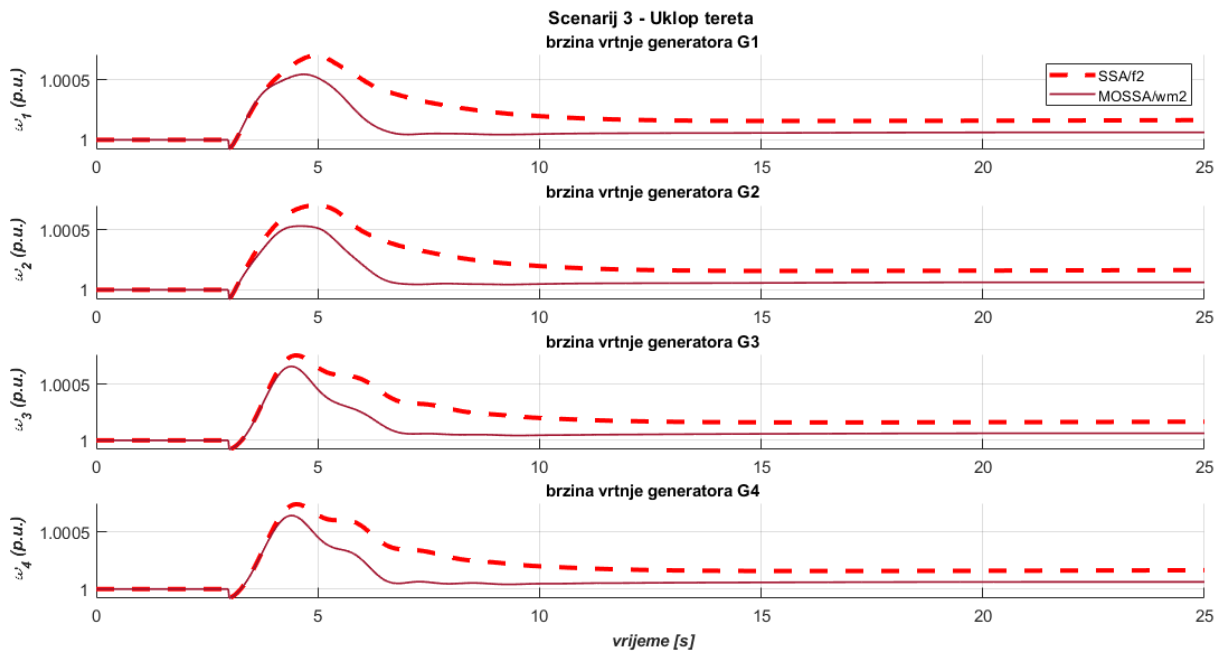
Slika 7.48. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



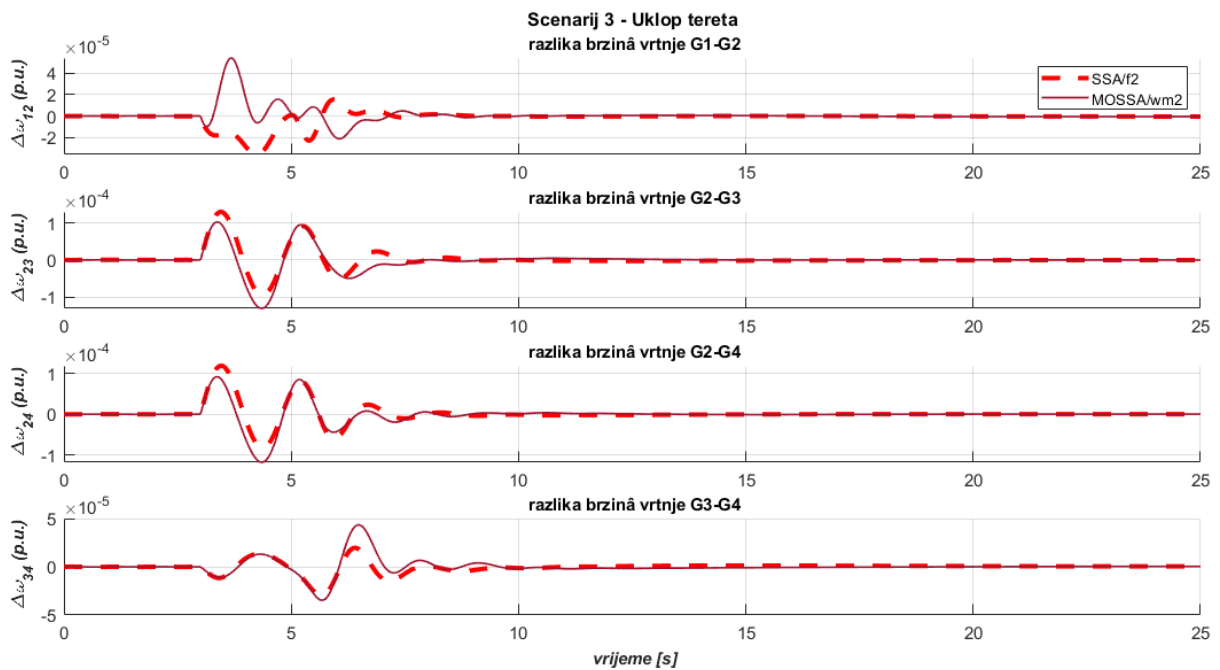
Slika 7.49. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



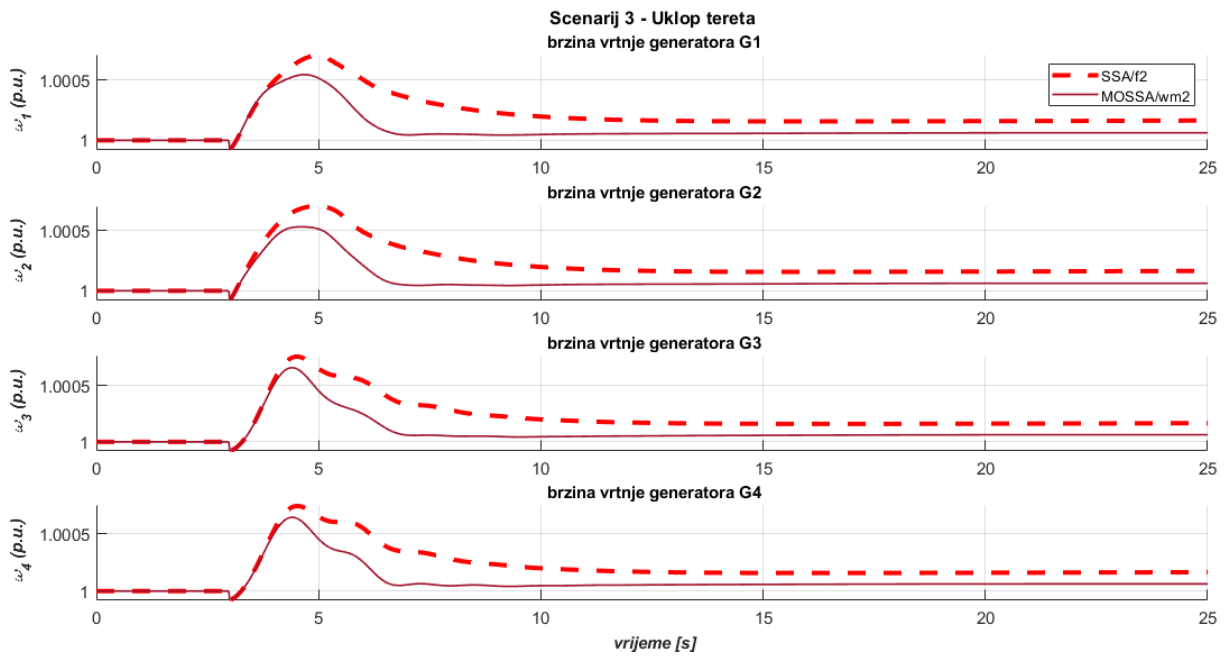
Slika 7.50. TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz



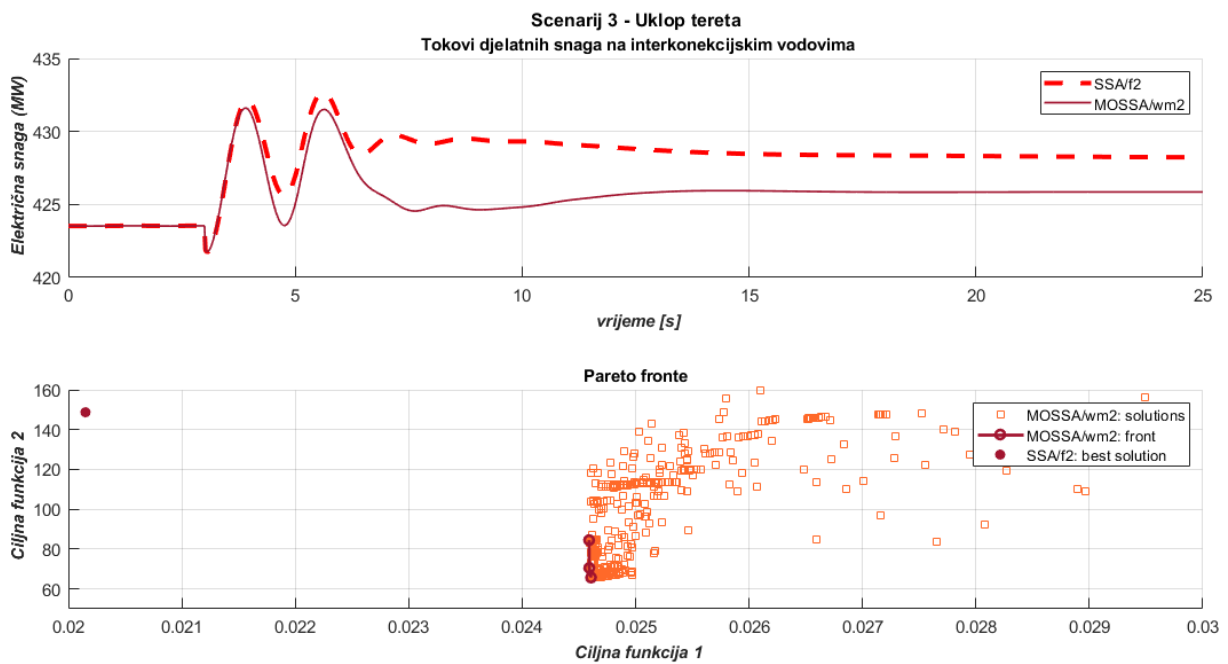
Slika 7.51. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora



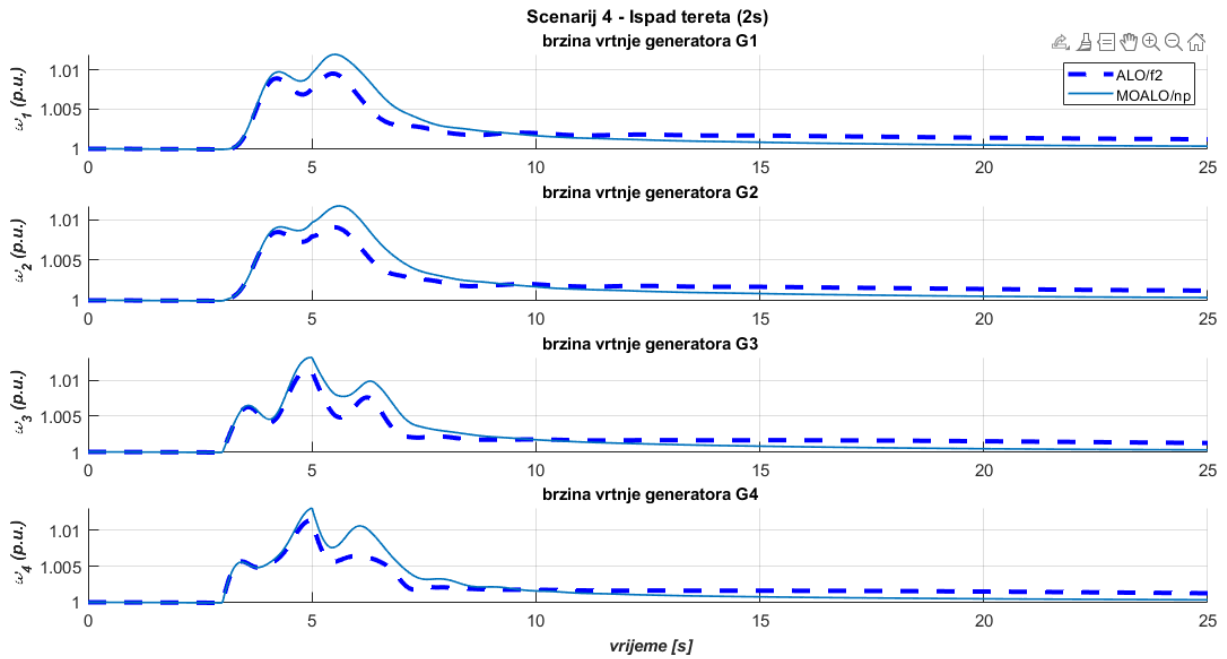
Slika 7.52. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora



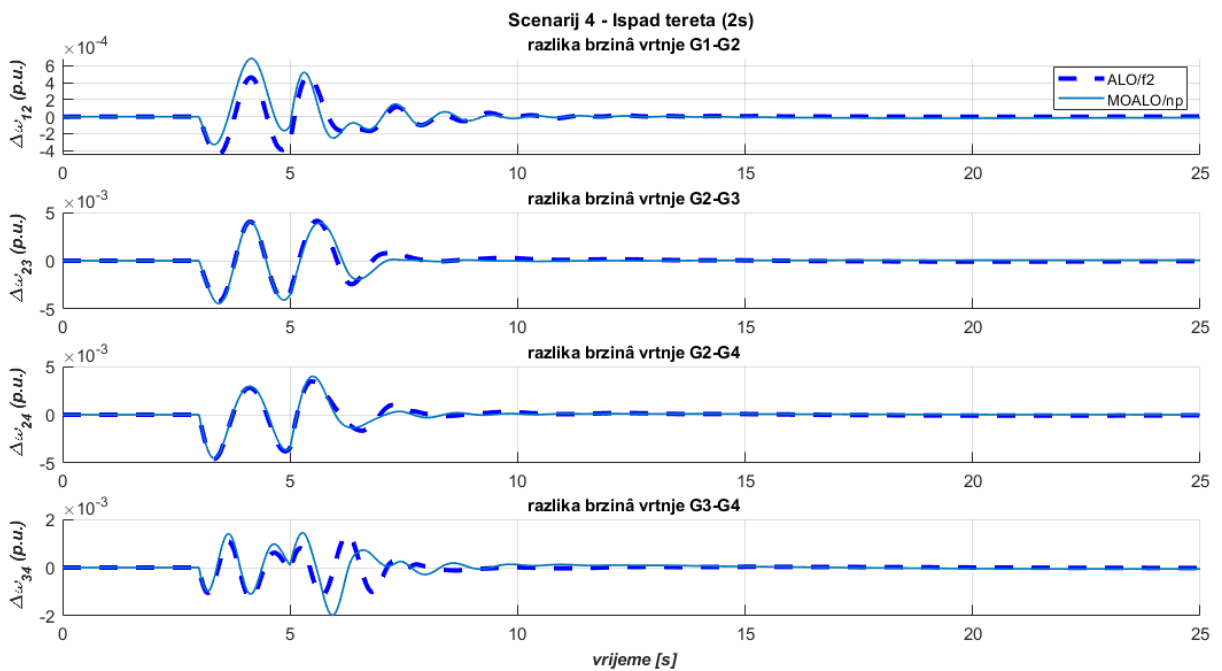
Slika 7.53. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



Slika 7.54. TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz

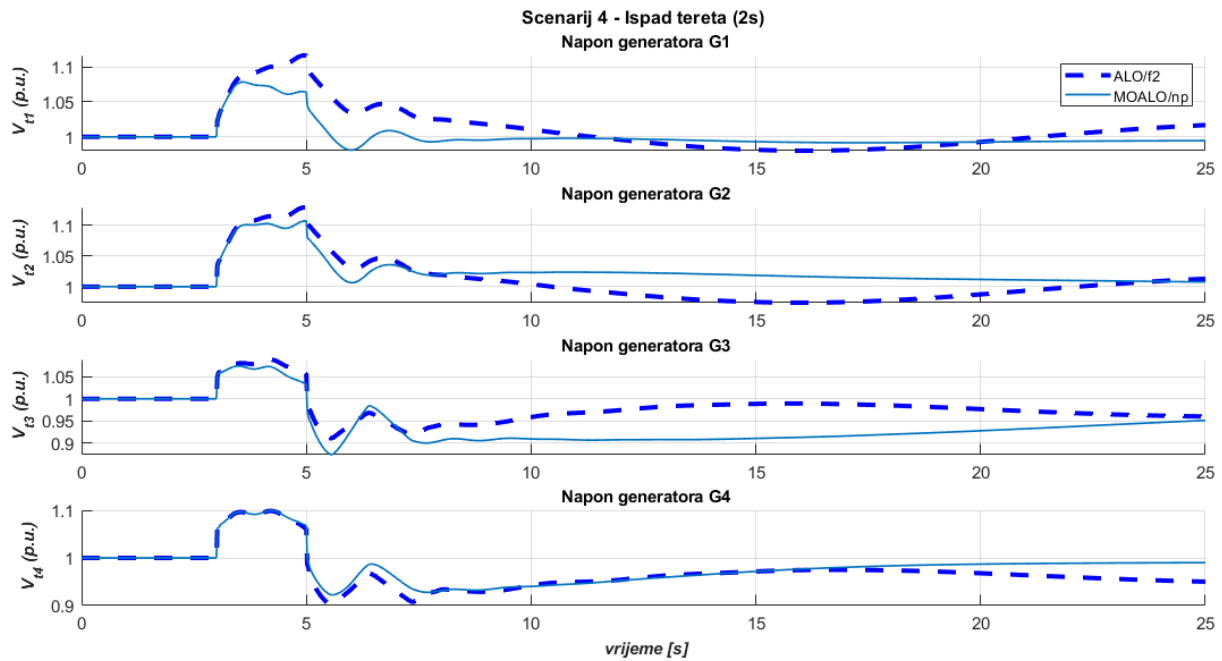


Slika 7.55. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzina vrtnje generatora

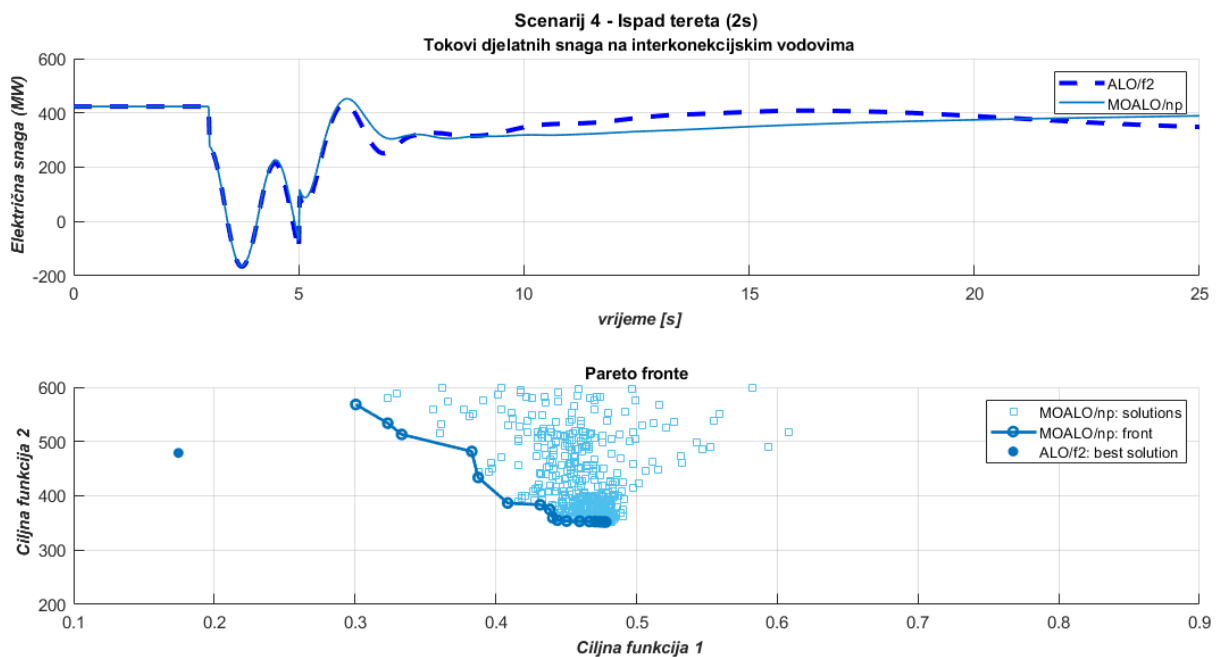


Slika 7.56. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlika brzina vrtnje generatora





Slika 7.57. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora



Slika 7.58. TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz

## 8. Zaključak

Stabilnost EES-a je pojam široke tematike koji obuhvaća analitički i iskustveni pristup rješavanju problema nelinearnih sustava elektroenergetskih mreža. Taj pojam podrazumijeva razgranatu strukturu za istraživanje koja se bazira na dinamici i tipovima poremećaja koji se mogu dogoditi u sustavu. Obzirom na brzu dinamiku poremećaja kao što su kratki spojevi, promjene opterećenja i prorade zaštite istraživačka podstruktura stabilnosti koja se oslanja na dinamičke matematičke modele elemenata EES-a definira se kao kutna stabilnost. Kutna stabilnost se opet dijeli obzirom na promatrano konačno stanje na prijelaznu i stabilnost malih poremećaja.

U postporemećajnim stanjima karakterističnima za brzu dinamiku pojavljuju se neželjene oscilacije i tada važnu ulogu imaju regulacijski uređaji uzbuđenog upravljačkog sustava generatora: AVR i PSS. Budući da u kompleksnom nelinearnom sustavu elektroenergetske mreže dolazi i do interakcije među generatorima, bitno je da regulacijski uređaji budu kvalitetno parametrirani kako bi generatorski sustav kojim upravljaju mogao izdržati njihanja sebi svojstvenih električnih veličina. Adekvatno podešeni AVR i PSS pritom pomažu i u smirivanju njihanja tokova snaga, što je posebno važno za interkonekcijske vodove među područjima kao "krhkom" dijelu mreže.

Ovaj rad stavlja u fokus novi pristup u parametriranju regulacijskih uređaja uzbude generatora kroz simultano promatranje oscilacija karakterističnih veličina više generatora i kritičnih prijenosnih vodova. Takav pristup definira interaktivno parametriranje AVR i PSS uređaja uz iterativno simuliranje i algoritamsko pronalaženje zadovoljavajućih rješenja (parametara) kroz paradigmu višeciljne metaheurističke optimizacije (djela znanstvenog polja računalne umjetne inteligencije). Metaheuristički algoritmi su od svojih početaka na raznim matematičkim i inženjerskim problemima pokazali kvalitetne rezultate primjene, pa tako i u primjeni raznih proračuna vezanih za elektroenergetske mreže, najviše za stacionarna stanja.

U problematici koja iziskuje promatranje nekoliko različitih ciljeva u složenijim ispitnim okruženjima višeciljna metaheuristika je evoluirala kao logičan nastavak jednociljne optimizacije. Ispitivanje postporemećajne dinamike i adekvatno rješavanje oscilacija, posebno lokalnih i međupodručnih, se nametnulo kao adekvatna testna podloga za algoritamske proračune višeciljne optimizacije. Uz glavni cilj zadovoljavajuće minimizacije oscilacija ovdje se kao dva ispitna cilja postavljaju što brže anuliranje zbroja integralnih vremenskih pogrešaka karakterističnih veličina i što bolje postizanje kvalitetnih odziva razlikâ brzinâ vrtnje

proizvodnih jedinica, pritom dajući mogućnost odabira iz Pareto skupa nedominantnih rješenja. Polazna pretpostavka istraživanja je i da algoritmi višeciljne optimizacije uzimaju u obzir i kvalitetu obaju navedenih ciljeva, sa mogućnošću davanja većeg izbora i kvalitetnijih rješenja od jednociljne optimizacije. Veći izbor je dodatni benefit rezultata jer daje mogućnost odabira prema preferenciji određenog cilja samome donositelju krajnje odluke (operateru sustava u slučaju upravljanja EES-om) koje parametre uređaja koristiti.

U prvome dijelu rada ukratko je opisan pojmovnik i grane stabilnosti EES-a sa naglaskom na stabilnost malih poremećaja i prijelaznu stabilnost kao grane kutne stabilnosti koja je orijentirana na postporemećajne opservacije pri brznoj dinamici sustava. Kroz pojednostavljene topologije prikazan je i način promatranja i evaluacije spomenutih grana stabilnosti. Treće poglavlje donosi detaljni topološki prikaz standardnih ispitnih modela koji se koriste u svrhu istraživanja dinamike EES-a, matematičke modele proizvodnih jedinica i regulacijskih uređaja čiji varijabilni parametri se podešavaju optimizacijom. Regulatori čiji su modeli opisani i koji se koriste u ispitivanjima su AVR PT1 tipa sa fiksnim TGR blokom i dva različita PSS uređaja: MB-PSS (ispitan na tropodručnom modelu) i generički PSS (ispitan na dvopodručnom modelu). Teorijski dio zatim nastavlja opis metaheurističke paradigme: jednociljne i višeciljne optimizacije, višeciljnih metoda (neutralna i težinska) i predloženih općenitih formi ciljnih funkcija. Konačno, teorijski uvod završava detaljnim opisom predloženih i korištenih algoritama čestične optimizacije baziranih na biološkim zajednicama i fizikalnim stanjima. Za ALO, VRPSO, SSA i SA algoritme prikazani su opisi rada algoritama, njihove jednadžbe, dijagrami tokova i pseudokodovi kao uvod u rad u okružju MATLAB-a i interakciju sa grafičkim sučeljem Simulink-a i pripadajućeg modela EES-a.

Ispitni dio rada koji je prikazan u šestom poglavlju prvo postavlja inicijalne uvjete za rad algoritama, opise poremećaja, granice parametara regulatora i jednadžbe za predložena ispitivanja kvalitete optimizacijskih algoritama u zadanom procesu parametriranja. Jednociljna i višeciljna ispitivanja su odijeljena potpoglavljima sa zasebnim odjeljcima koji daju detalje ispitivanja za pojedine modele. Grafički dio uključuje prikaze odziva brzina vrtnje, razlika brzina vrtnje i napona armature generatorskih jedinica, te ukupnog toka snaga u interkonekcijskom prijenosnom području. Tabličnim prikazom su potom definirane najbolje postignute funkcije, njihovi agensi koji predstavljaju parametre i pokazatelji kvalitete konvergencije. Svrha ispitivanja je postignuta rezultirajućim zaključcima: grafički odzivi pokazuju zadovoljavajuće smirivanje oscilacija, sa nešto većim izuzetkom pojave prigušenih oscilacija kod jednociljne optimizacije i u vrlo malom broju slučajeva kod neutralne metode

višeciljne optimizacije. Težinske višeciljne metode u svim ispitanim slučajevima postporemećajne dinamike nude jednoznačna rješenja/parametre koji su sposobni potpuno prigušiti oscilacije, uz dodanu vrijednost mogućnosti odabira rješenja iz Pareto skupa prema preferencijama odgovarajućem donositelju odluka.

Dodatna validacija rezultata predstavljena je u posljednjem poglavlju usporedbe jednociljne i višeciljne optimizacije. Numerički najbolja rješenja prema prvoj, a potom i drugoj ciljnoj funkciji odabrana su od najuspješnijih jednociljnih i višeciljnih algoritama. Simulirani su odzivi sa ponuđenim parametrima, analitički su obrađeni numerički rezultati, i definiran je smještaj najboljeg jednociljnog rješenja i odgovarajuće Pareto fronte na Pareto prikazu. Dobiveni rezultati su pokazali da prema vremenskoj integralnoj grešci težinske metode daju isključivo najbolje numeričke rezultate, dok uspješnost prema drugoj ciljnoj funkciji (pokazatelji kvalitete prijelaznog procesa kod razlikâ brzina vrtnje svih generatora u sustavu) stoji većinom na strani neutralne metode. Usporedbom jednociljnog i skupa višeciljnih rješenja moguće je primijetiti da jednociljno rješenje nikada nije dominantno u odnosu na potpunu Pareto frontu. U većini slučajeva višeciljna rješenja pokazuju dominaciju prema definiciji Pareto dominantnosti u odnosu na jednociljna rješenja.

Vizualnim pregledom grafičkih odziva i analitičkim pregledom numeričkih rezultata može se zaključiti da je težinska metoda u potpunosti uspješna u smirivanju/minimiziranju oscilacija tokom ispitnog perioda unutar 15 sekundi za svaki promatrani poremećaj te da postigne zadovoljavajuće rezultate u postizanju novih stanja jednakih početnima (stabilnost malih poremećaja) ili novih stabilnih stanja (prijelazna stabilnost). Naglasak u uspješnosti i sposobnosti konvergencije treba pritom posebno staviti na algoritme novije generacije: MOALO i MOSSA.

Budući da su mogućnosti u ispitivanju metaheuristike i stabilnosti vrlo široke, treba napomenuti i da je moguće ovaj rad koristiti i kao prvi korak ka proširivanju analize na druge algoritme, mogućnosti ograničavanja prostora rješenja funkcijama penalizacije, druge metoda odlučivanja, druge tipove regulatora i druge modele sustava. Proširivanje obzora istraživanja problema parametriranja AVR-a i PSS-a moguće je sagledati i kroz korištenje drugih metoda umjetne inteligencije (strojno ili duboko učenje) i kombinacijom istih sa čestičnom inteligencijom uz potencijalno brže dobivanje zadovoljavajućih rezultata.



## *Literatura*

- [1] Kundur P., *"Power System Stability and Control"*, McGraw Hill Inc, USA, 1994.
- [2] Anderson P. M., Fouad A. A., *"Power System Stability and Control"*, IEEE Series on Power Engineering, USA, 1977.
- [3] Sauer P. W., Mai P. A., *"Power System Dynamics and Stability"*, 2nd ed., Prentice-Hall, USA, 2002.
- [4] Eremia M., Shahidehpour M., *"Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability and Control"*, John Wiley & Sons, SAD, 2013.
- [5] Kundur P., Paserba J., Ajarapu V., Andersson G., Bose A., Canizares C., Hatziargyriou N., Hill D., Stankovic A., Taylor C., Van Cutsem T., Vittal V., *"Definition and Classification of Power System Stability"*, IEEE CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, 2004., pp. 1387–1401
- [6] Gibbard M. J., Pourbeik P., Vowles D. J., *"Small Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power System"*, University of Adelaide Press, Australia, 2015.
- [7] Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A., *"Power System Small Signal Stability Analysis and Control"*, Elsevier Inc., USA, 2014.
- [8] Wang H., Wu D., *"Analysis and Damping Control of Power System Low-Frequency Oscillations"*, Springer, USA, 2016.
- [9] Rogers G., *"Power System Oscillations"*, Springer, USA, 2000.
- [10] Mesina A. R. (editor), *"Inter-Area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective"*, Springer, USA, 2009.
- [11] Klein M., Roger G. J., Kundur P., *"A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, 1991., pp. 914-921
- [12] J. J. Dai, A. A. Ghandakly, *"A Decentralized Adaptive Control Algorithm and the Application in Power System Stabilizer (PSS) Design"*, IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, vol.2, 1995., pp. 1641-1648
- [13] Lahdhiri T., Alouani A. T., *"On the Modeling of Multimachine Power Systems"*, Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95, vol.3, 1995., pp. 2038-2039
- [14] Zhao Q., Jiang J., *"Robust Controller Design for Generator Excitation Systems"*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, 1995., no. 2, pp. 201-209
- [15] Pugliese P., Sbrizzai R., Trovato M., La Scala M., *"Intelligent control of inter-area oscillations in power systems"*, Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96), pp. 737-741, vol.2, 1996.
- [16] Breulmann, H., Grebe E., Lösing M., Winter G. W., Witzmann R., Dupuis P., Houry M. P., Margotin T., Dudzik J., Machowski J. Martín P. L., Rodríguez J. M., *"Analysis and*

- Damping of Inter Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System*", paper no. 38-113, Cigre Session 2000, France, 2000.
- [17] Elices A., Rouco L., Bourles H., Margotin T., "*Design of Robust Controllers for Damping Interarea Oscillations: Application to the European Power System*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, 2004., pp. 1058-1067
- [18] Liu G., Xu Z., Huang Y., Pan W., "*Analysis of Inter-area Oscillations in the South China Interconnected Power System*", Electric Power Systems Research, Volume 70, Issue 1, 2004., pp. 38-45
- [19] Kezunović M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V., "*Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks*", Springer Science and Business Media, New York, 2014.
- [20] Savulescu S. C., "*Real Time Stability Assesment in Modern Power System Control Centers*", John Wiley & Sons, USA, 2009.
- [21] Požar H., "*Visokonaponska Rasklopna Postrojenja*", 5. izdanje, Tehnička Knjiga Zagreb, Hrvatska, 1990.
- [22] Ožegović M., Ožegović K., "*Električne Mreže III*", FESB, Split, SR Hrvatska, 1982.
- [23] Ožegović M., Ožegović K., "*Električne Energetske Mreže II*", FESB, Split, Hrvatska, 1997.
- [24] Jadrić M., Frančić B., "*Dinamika Električnih Strojeva*", Graphis, Zagreb, Hrvatska, 1995.
- [25] Ribeiro B., Albrecht R. F., Dobnikar A., Pearson D. W., Steele N. C. (editors), "*Adaptive and Natural Computing Algorithms: Proceedings of the International Conference in Coimbra, Portugal, 2005*", Springer, Austria, 2005.
- [26] Brownlee J., "*Clever Algorithms: Nature-inspired Programming Recipes*", Lulu.com, Australia, 2011.
- [27] Yang X. S., Cui Z., Xiao R., Gandomi A. H., Karamanoglu M. (editors), "*Swarm Intelligence and Bio-inspired Computation – Theory and Applications*", Elsevier, USA, 2013.
- [28] Mirjalili S., Dong J. S., Lewis A. (editors), "*Nature-inspired Optimizers: Theories, Literature Reviews and Applications*", Springer, Switzerland, 2020.
- [29] Okwu M. O., Tartibu L. K., "*Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms, Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications*", Springer, Switzerland, 2020.
- [30] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G., "*Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*", Oxford University Press, UK, 1999.
- [31] Coello Coello C. A., Lamont G. B., Van Veldhuizen, "*Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems*", 2nd ed., Springer, Switzerland, 2007
- [32] Deb K., "*Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*", Wiley, USA, 2001.
- [33] Chankong V., Haimes Y. Y., "*Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*", Elsevier, USA, 1983.

- [34] Fister Jr. I., Yang X. S., Fister I., Brest J., Fister D., "*A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization*", *Elektrotehniški Vestnik* 80(3), English Edition, 2013., pp. 1-7
- [35] Mirjalili S., "*The Ant Lion Optimizer*", *Advances in Engineering Software*, vol. 83, 2015., pp. 80-98
- [36] Mirjalili S., Jangir P., Saremi S., "*Multi-objective Ant Lion Optimizer: A Multi-objective Optimization Algorithm for Solving Engineering Problems*", *Applied Intelligence*, vol. 46, July 2016, pp. 79-95
- [37] Kumar S., Amit K., "*A Brief Review on Antlion Optimization Algorithm*", 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN), 2018., pp. 236-240
- [38] Abualigah L., Shehab M., Al Shinwan M., Mirjalili S., Elsayed Abd Elaziz M. "*Ant Lion Optimizer: A Comprehensive Survey of Its Variants and Applications*", *Archives of Computational Methods in Engineering* 2021,28(3), 2021., pp. 1397-1416
- [39] Kennedy J., Eberhart R., "*Particle Swarm Optimization*", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, IEEE Press, 1995., pp. 1942-1948
- [40] Liu Y., Qin Z., Xu Z. L., He X. S., "*Using Relaxation Velocity Update Strategy to Improve Particle Swarm Optimization*", *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol.4, 2004., pp. 2469-2472
- [41] Shami T. M., El-Saleh A. A., Alswaiti M., Al-Tashi Q., Summakieh A., Mirjalili S., "*Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey*", *IEEE Access*, vol. XX, 2017., pp. 1-32
- [42] Mirjalili S., Gandomi A. H., Mirjalili S. Z., Saremi S., Faris H., Mirjalili S. M., "*Salp Swarm Algorithm: A Bio-Inspired Optimizer for Engineering Design Problems*", *Advances in Engineering Software*, Vol. 114, December 2015, 2015., pp. 163-191
- [43] Kirkpatrick S., Gelatt Jr., C. D., Vecchi M.P., "*Optimization by simulated annealing*", *Science*, vol. 220, no. 4598, 1983., pp. 671-680
- [44] Laarhoven, P J. M, and E H. L. Aarts., "*Simulated Annealing: Theory and Applications*", Kluwer Academic Publishers, USA, 1987.
- [45] Radosavljević J., "*Metaheuristic Optimization in Power Engineering*", The Institution of Engineering and Technology, UK, 2018.
- [46] Hassan L. H., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F., "*Power System Stabilization Based on Artificial Intelligent Techniques: A review*", 2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), Malaysia, 2009.
- [47] Gaing Z. L., "*A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system*", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, 2004., pp. 384-391
- [48] Zamani M., Karimi-Ghartemani M., Sadati N., Parniani M., "*Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization*", *Control Engineering Practice*, Volume 17, Issue 12, 2009., pp. 1380-1387
- [49] Soundarrajan A., Sai S., Sundar C., "*Particle Swarm Optimization Based LFC and AVR of Autonomous Power Generating System*", *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 37, no. 1, 2010.



- [50] Rahimian M., Raahemifar K., "Optimal PID Controller Design for AVR System Using Particle Swarm Optimization Algorithm", 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE), 2011., pp. 337-340
- [51] Shayeghi, H., Dadashpour, J., "Anarchic Society Optimization Based PID Control of an Automatic Voltage Regulator (AVR) System", Electrical and Electronic Engineering, vol.2 (4), 2012., pp. 199-207
- [52] Bhat V. K., Bhongade S., "Design Of PID Controller In Automatic Voltage Regulator (AVR) System Using PSO Technique", International Journal of Engineering Research, vol. 3, issue 4., 2013., pp. 1480-1485
- [53] Mouayad A. S., Bestoun S. A., "A New Multiobjective Performance Criterion Used in PID Tuning Optimization Algorithms", Journal of Advanced Research, Vol. 7, Issue 1 , 2016., pp. 125-134
- [54] Lodhi R.S., Saraf A., "MATLAB/Simulink of Automatic Voltage Regulator Using PSO-PID Controller", IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, vol 5., no. 11, 2016., pp. 40-43
- [55] Pradhan, R., Majhi, S.K., Pati, B.B., "Design of PID Controller for Automatic Voltage Regulator System Using Ant Lion Optimizer", World Journal of Engineering, Vol. 15 No. 3, 2018., pp. 373-387
- [56] Bourouba B., Ladaci S., Schulte H., "Optimal Design of Fractional Order PID $\mu$  Controller for an AVR System Using Ant Lion Optimizer", 9th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control, MIM'19, 2019.
- [57] Naceri A., "Advanced Hybrid Control Techniques Applied on the AVR-PSS to Enhance Dynamics Performances of Electrical Networks", Journal of Electrical Engineering, Vol. 11, No. 4, 2011
- [58] Mukherjee V., Ghoshal S. P., "Velocity Relaxed Swarm Intelligent Tuning of Fuzzy Based Power System Stabilizer", IEEE Power India Conference, India, 2006., pp 108-115
- [59] Aboelela, M. A. S., Soliman H. M., "Towards a Robust Fractional Order PID Stabilizer for Electric Power Systems", Fractional Order Control and Synchronization of Chaotic Systems, Springer, 2017., pp. 253-275
- [60] Mahmoud M., Soliman H., "Design of Robust Power System Stabilizer Based on Particle Swarm Optimization", Circuits and Systems, Vol. 3 No. 1, 2012., pp. 82-89
- [61] Shafiullah M., Rana M. J., Abido M. A., "Power System Stability Enhancement Through Optimal Design of PSS Employing PSO", Proceedings of the 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2017., pp. 26-31
- [62] Falehi A. D., Rostami M., Mehrjardi H., "Transient Stability Analysis of Power System by Coordinated PSS-AVR Design Based on PSO Technique", Engineering, vol.3, 2011., pp 478-484
- [63] Eslami M., Shareef H., Mohamed A., "Optimal Tuning of Power System Stabilizers Using Modified Particle Swarm Optimization", Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Egypt, 2010., pp. 386-391
- [64] Hasanović A., Feliachi A., "Genetic Algorithm Based Inter-area Oscillation Damping Controller Design Using MATLAB", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol.3, USA, 2002., pp. 1136-1141

- [65] Shewtahul H. K., King R. T. F. A., Rughooputh H. C. S., *"Optimization of AVR Parameters of a Multi-machine Power System Using Particle Swarm Optimization"*, University of Mauritius Research Journal, vol. 6, 2010, pp. 14-28
- [66] Shayeghi H., Safari A., Shayanfar H. A., *"Multimachine Power System Stabilizers Design Using PSO Algorithm"*, International Journal of Energy and Power Engineering, vol. 2., 2008, pp. 934-941.
- [67] Yassami H., Darabi A., Rafiei M., *"Power System Stabilizer Design Using Strength Pareto Multi-objective Optimization Approach"*, Electric Power Systems Research, vol.80., 2010., pp. 838-846
- [68] Shayeghi H., Ghasemi A., Shayanfar H. A., *"PID Stabilizer Design for Multi Machine Power System Using IPSO Procedure"*, Computer Science and Engineering 2011, vol 1(2), 2011., pp. 36-42
- [69] Shayeghi H., Shayanfar H. A., Jalilzadeh S., Safari, A., *"TCSC Robust Damping Controller Design Based on Particle Swarm Optimization for a Multi-machine Power System"*, Energy conversion and management, vol. 51, 2010., pp. 1873-1883
- [70] Gholipour E., Nosratabadi S. M., *"A New Coordination Strategy of SSSC and PSS Controllers in Power System Using SOA Algorithm Based on Pareto Method"*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 67, 2015., pp. 462–471.
- [71] Mekhanet M., Mokrani L., Arif. S., *"Damping Small Oscillations by Robust PSS Using Two Parallel Hybridization Methods"*, Electrotehnică, Electronică, Automatică, vol. 64(3), 2016., pp. 107-114
- [72] Rout U. K., Sahu R. K., Panda S., *"Design and Analysis of Differential Evolution Algorithm Based Automatic Generation Control for Interconnected Power System"*, Ain Shams Engineering Journal, vol. 4, 2013., pp. 409-421
- [73] Peres W., Silva Júnior I. C., Passos Filho J. A., *"Gradient Based Hybrid Metaheuristics for Robust Tuning of Power System Stabilizers"* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 95, 2018., pp. 47–72
- [74] Liu C., Yokoyama R., Koyanagi K., Lee K. Y., *"PSS Design for Damping of Inter-area Power Oscillations by Coherency-based Equivalent Model"*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 26(7), 2004., pp. 535–544
- [75] Teeuwsen S. P., Erlich I., El-Sharkawi M. A., *"Neural Network Based Classification Method for Small-signal Stability Assessment"*, IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, vol 3., 2003, pp. 1-6
- [76] Tang K., Venayagamoorthy G. K., *"Adaptive Inter-area Damping Controller for Multi-machine Power System"*, Electric Power Systems Research, vol. 134, 2016., pp. 105-113
- [77] Abdlrahem A., Saraf P., Balasubramaniam K., Hadidi R., Karimi A., Makram E., *"Design of a Fixed-Order Robust Controller to Damp Inter-Area Oscillations in Power Systems"*, Journal of Power and Energy Engineering, vol. 4, 2016., pp. 61-70.
- [78] Trentini R., Kutzner R., Hofmann L., *"State-space Generalized Minimum Variance Controller Based PSS for Damping of Interarea Modes"*, Proceedings of the 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2016., pp. 1-6
- [79] Murali D., Rajaram M., *"Comparison of Damping Performance of Conventional and Neuro-fuzzy Based Power System Stabilizers Applied in Multi-machine Power Systems"*, Journal of Electrical Engineering, vol. 64(6), 2013., pp. 366-370

- [80] Marić P., Kljajić R., Chamorro H. R., Glavaš H., *"Power System Stabilizer Tuning Algorithm in a Multimachine System Based on S-Domain and Time Domain System Performance Measures"*, *Energies* 14, no. 18:5644, 2021.
- [81] Lyapunov A. M., *"General Problem of The Stability of Motion"*, Taylor & Francis, London, 1992.
- [82] *"IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses"*, IEEE Standard 1110-2019 (Revision of IEEE Standard 1110-2002), pp. 1-92, 2020.
- [83] *"IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies"*, IEEE Standard 421.5-2016 (Revision of IEEE Standard 421.5-2005), pp. 1-207, 2016.
- [84] Hwang C., Masud A. S. M., *"Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey"*, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- [85] Delavari A., Kamwa I., Brunelle P., *"Simscape Power Systems Benchmarks for Education and Research in Power Grid Dynamics and Control,"* 2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE), 2018, pp. 1-5

## Popis slika

Slika 2.1.	Kategorizacija stabilnosti EES-a [5] .....	10
Slika 2.2.	SMIB model EES-a za testiranje kutne stabilnosti (jedna faza).....	11
Slika 2.3.	Krivulja $P - \delta$ (lijevo), proširena verzija krivulje (desno) [6] .....	12
Slika 2.4.	Karakteristični odzivi sustava na male poremećaje [1].....	15
Slika 2.5.	Karakteristični odzivi sustava na velike poremećaje [1].....	17
Slika 3.1.	Blok shema regulacije uzbuđenoga sustava generatora .....	19
Slika 3.2.	Električni krugovi rotora i statora sinkronog stroja [1].....	20
Slika 3.3.	Nadomjesna shema direktne osi sinkronog stroja [1].....	20
Slika 3.4.	Nadomjesna shema poprečne osi sinkronog stroja [1].....	21
Slika 3.5.	Pojednostavljene nadomjesne reaktancije za stacionarno, prijelazno i početno stanje [4] .....	23
Slika 3.6.	Blok dijagram uzbuđenog upravljačkog sustava sinkronog generatora [6] .....	25
Slika 3.7.	Blok dijagram uzbuđenog upravljačkog sustava sa TGR kompenzacijom [6].....	26
Slika 3.8.	Aproksimacijska krivulja amplitudne karakteristike za AVR sa TGR-om[6] .....	26
Slika 3.9.	Prikaz uzbuđenog sustava u Simulink sučelju .....	27
Slika 3.10.	Pojednostavljena blok shema generičkog PSS-a u uzbuđenom upravljačkom sustavu [1] .....	28
Slika 3.11.	Model generičkog PSS-a u Simulink sučelju .....	28
Slika 3.12.	Pojednostavljena blok shema MB-PSS-a [83] .....	30
Slika 3.13.	Model MB-PSS-a u Simulink sučelju .....	30
Slika 3.14.	IEEE 9bus model.....	31
Slika 3.15.	IEEE 9bus sustav u Simulink sučelju.....	32
Slika 3.16.	Podsustav područja 1 sa naznačenim upravljačkim podsustavom .....	33
Slika 3.17.	Podsustav upravljačkih sustava generatora .....	33
Slika 3.18.	TAFM model.....	34
Slika 3.19.	TAFM model u Simulink sučelju .....	35
Slika 3.20.	Podsustav područja 1 sa naznačenim upravljačkim podsustavom .....	35
Slika 3.21.	Podsustav upravljačkih sustava generatora .....	35
Slika 4.1.	Primjer Pareto skupa i Pareto fronte za dvije ciljne funkcije .....	40
Slika 4.2.	Primjer određivanja najboljeg rješenja $x_{best}$ kod neutralne metode .....	42
Slika 4.3.	Primjeri Pareto skupova i Pareto fronti za dvije optimizacije linearnom skalarizacijom i različitim težinskim faktorima .....	44
Slika 5.1.	Primjeri tri slučaja nasumičnih kretanja plijena [35] .....	46
Slika 5.2.	Odabir pojedinca kroz funkciju jednostavnog generacijskog odabira .....	48
Slika 5.3.	Dijagrami toka za ALO (lijevo) i MOALO (desno).....	50
Slika 5.4.	Dijagrami toka za SSA (lijevo) i MOSSA (desno) .....	52
Slika 5.5.	Dijagrami toka za VRPSO (lijevo) i MOVRPSO (desno) .....	54

Slika 5.6.	Dijagrami toka za SA (lijevo) i MOSA (desno).....	57
Slika 6.1.	Proces ispitivanja optimizacijskih metoda za parametrisiranje AVR i PSS uređaja u višestrojnom okruženju .....	60
Slika 6.2.	WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	65
Slika 6.3.	WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	65
Slika 6.4.	WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	66
Slika 6.5.	WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	66
Slika 6.6.	WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	67
Slika 6.7.	WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	67
Slika 6.8.	WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	68
Slika 6.9.	WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	68
Slika 6.10.	WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	69
Slika 6.11.	WSCC, scenarij 3 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	69
Slika 6.12.	WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	70
Slika 6.13.	WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	70
Slika 6.14.	WSCC, scenarij 1 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	71
Slika 6.15.	WSCC, scenarij 1 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	71
Slika 6.16.	Scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	72
Slika 6.17.	WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	72
Slika 6.18.	WSCC, scenarij 2 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	73
Slika 6.19.	WSCC, scenarij 2 – odzivi razlika brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	73
Slika 6.20.	WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	74
Slika 6.21.	WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	74
Slika 6.22.	WSCC, scenarij 3 – odzivi brzina vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	75

Slika 6.23.	WSCC, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	75
Slika 6.24.	WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	76
Slika 6.25.	WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	76
Slika 6.26.	WSCC – pregled najboljih rješenja $f_{best}$ algoritama po scenarijima i metodama .....	78
Slika 6.27.	WSCC – pregled moći konvergencije $C_r$ algoritama po scenarijima i metodama .....	78
Slika 6.28.	TAFM, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	82
Slika 6.29.	TAFM, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	82
Slika 6.30.	TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	83
Slika 6.31.	TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	83
Slika 6.32.	TAFM, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	84
Slika 6.33.	TAFM, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	84
Slika 6.34.	TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	85
Slika 6.35.	TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	85
Slika 6.36.	TAFM, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	86
Slika 6.37.	TAFM, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	86
Slika 6.38.	TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	87
Slika 6.39.	TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	87
Slika 6.40.	TAFM, scenarij 4 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	88
Slika 6.41.	TAFM, scenarij 4 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	88
Slika 6.42.	TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2) .....	89
Slika 6.43.	TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f1t$ (4.2).....	89
Slika 6.44.	TAFM, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	90

Slika 6.45.	TAFM, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	90
Slika 6.46.	TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	91
Slika 6.47.	TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	91
Slika 6.48.	TAFM, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	92
Slika 6.49.	TAFM, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	92
Slika 6.50.	TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	93
Slika 6.51.	TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	93
Slika 6.52.	TAFM, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	94
Slika 6.53.	TAFM, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	94
Slika 6.54.	TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	95
Slika 6.55.	TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	95
Slika 6.56.	TAFM, scenarij 4 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	96
Slika 6.57.	TAFM, scenarij 4 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	96
Slika 6.58.	TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3) .....	97
Slika 6.59.	TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga i krivulje konvergencije prema algoritmu i jednociljnoj metodi $f2t$ (4.3).....	97
Slika 6.60.	TAFM – pregled najboljih rješenja $f_{best}$ algoritama po scenarijima i metodama .....	99
Slika 6.61.	TAFM – pregled moći konvergencije $C_r$ algoritama po scenarijima i metodama .....	99
Slika 6.62.	WSCC, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	104
Slika 6.63.	WSCC, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	104
Slika 6.64.	WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	105
Slika 6.65.	WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	105
Slika 6.66.	WSCC, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	106

Slika 6.67.	WSCC, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	106
Slika 6.68.	WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	107
Slika 6.69.	WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	107
Slika 6.70.	WSCC, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	108
Slika 6.71.	WSCC, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	108
Slika 6.72.	WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	109
Slika 6.73.	WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	109
Slika 6.74.	WSCC, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	110
Slika 6.75.	WSCC, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	110
Slika 6.76.	WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	111
Slika 6.77.	WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	111
Slika 6.78.	WSCC, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	112
Slika 6.79.	WSCC, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	112
Slika 6.80.	WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	113
Slika 6.81.	WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	113
Slika 6.82.	WSCC, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	114
Slika 6.83.	WSCC, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	114
Slika 6.84.	WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	115
Slika 6.85.	WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	115
Slika 6.86.	WSCC, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11) .....	116



Slika 6.87.	WSCC, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	116
Slika 6.88.	WSCC, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	117
Slika 6.89.	WSCC, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11).....	117
Slika 6.90.	WSCC, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jed višeciljnoj nociljnoj metodi $wm2$ (4.11).....	118
Slika 6.91.	WSCC, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	118
Slika 6.92.	WSCC, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	119
Slika 6.93.	WSCC, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11).....	119
Slika 6.94.	WSCC, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	120
Slika 6.95.	WSCC, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	120
Slika 6.96.	WSCC, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11) .....	121
Slika 6.97.	WSCC, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11).....	121
Slika 6.98.	WSCC – pregled najboljih rješenja $f_{best}$ algoritama po scenarijima i metodama .....	124
Slika 6.99.	WSCC – pregled moći konvergencije $C_r$ algoritama po scenarijima i metodama .....	125
Slika 6.100.	TAFM, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	128
Slika 6.101.	TAFM, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	128
Slika 6.102.	TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	129
Slika 6.103.	TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	129
Slika 6.104.	TAFM, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	130
Slika 6.105.	TAFM, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	130
Slika 6.106.	TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi $np$ (4.9) .....	131

Slika 6.107. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	131
Slika 6.108. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	132
Slika 6.109. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	132
Slika 6.110. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	133
Slika 6.111. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	133
Slika 6.112. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	134
Slika 6.113. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	134
Slika 6.114. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	135
Slika 6.115. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>np</i> (4.9) .....	135
Slika 6.116. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	136
Slika 6.117. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	136
Slika 6.118. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	137
Slika 6.119. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	137
Slika 6.120. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	138
Slika 6.121. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	138
Slika 6.122. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	139
Slika 6.123. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	139
Slika 6.124. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	140
Slika 6.125. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	140
Slika 6.126. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11) .....	141

Slika 6.127. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11).....	141
Slika 6.128. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11).....	142
Slika 6.129. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11).....	142
Slika 6.130. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11).....	143
Slika 6.131. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm1</i> (4.11).....	143
Slika 6.132. TAFM, scenarij 1 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	144
Slika 6.133. TAFM, scenarij 1 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	144
Slika 6.134. TAFM, scenarij 1 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	145
Slika 6.135. TAFM, scenarij 1 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	145
Slika 6.136. TAFM, scenarij 2 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i jed višeciljnoj nociljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	146
Slika 6.137. TAFM, scenarij 2 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	146
Slika 6.138. TAFM, scenarij 2 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	147
Slika 6.139. TAFM, scenarij 2 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	147
Slika 6.140. TAFM, scenarij 3 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	148
Slika 6.141. TAFM, scenarij 3 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	148
Slika 6.142. TAFM, scenarij 3 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	149
Slika 6.143. TAFM, scenarij 3 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	149
Slika 6.144. TAFM, scenarij 4 – odzivi brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	150
Slika 6.145. TAFM, scenarij 4 – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	150
Slika 6.146. TAFM, scenarij 4 – odzivi napona generatora prema algoritmu i višeciljnoj metodi <i>wm2</i> (4.11).....	151

Slika 6.147. TAFM, scenarij 4 – odzivi ukupnih tokova snaga, krivulje konvergencije i Pareto fronte prema algoritmu i višeciljnoj metodi $wm2$ (4.11).....	151
Slika 6.148. TAFM – pregled najboljih rješenja $f_{best}$ algoritama po scenarijima i metodama .....	155
Slika 6.149. TAFM – pregled moći konvergencije $C_r$ algoritama po scenarijima i metodama .....	156
Slika 7.1. Usporedba uspješnosti po broju algoritama i metoda, WSCC model .....	161
Slika 7.2. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	162
Slika 7.3. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	162
Slika 7.4. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	163
Slika 7.5. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	163
Slika 7.6. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	164
Slika 7.7. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	164
Slika 7.8. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	165
Slika 7.9. WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	165
Slika 7.10. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	166
Slika 7.11. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	166
Slika 7.12. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	167
Slika 7.13. WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	167
Slika 7.14. WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	168

Slika 7.15.	WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	168
Slika 7.16.	WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	169
Slika 7.17.	WSCC, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	169
Slika 7.18.	WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj drugoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	170
Slika 7.19.	WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	170
Slika 7.20.	WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode drugoj drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	171
Slika 7.21.	WSCC, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	171
Slika 7.22.	WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	172
Slika 7.23.	WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	172
Slika 7.24.	WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	173
Slika 7.25.	WSCC, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	173
Slika 7.26.	Usporedba uspješnosti po broju algoritama i metoda, TAFM model .....	176
Slika 7.27.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	177
Slika 7.28.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	177
Slika 7.29.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	178
Slika 7.30.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	178

Slika 7.31.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	179
Slika 7.32.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora .....	179
Slika 7.33.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	180
Slika 7.34.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz .....	180
Slika 7.35.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	181
Slika 7.36.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora .....	181
Slika 7.37.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	182
Slika 7.38.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz .....	182
Slika 7.39.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	183
Slika 7.40.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora .....	183
Slika 7.41.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	184
Slika 7.42.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema prvoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz .....	184
Slika 7.43.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	185
Slika 7.44.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora .....	185
Slika 7.45.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	186

Slika 7.46.	TAFM, scenarij 1 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	186
Slika 7.47.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	187
Slika 7.48.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	187
Slika 7.49.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	188
Slika 7.50.	TAFM, scenarij 2 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	188
Slika 7.51.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	189
Slika 7.52.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	189
Slika 7.53.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	190
Slika 7.54.	TAFM, scenarij 3 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	190
Slika 7.55.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi brzinâ vrtnje generatora .....	191
Slika 7.56.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi razlikâ brzinâ vrtnje generatora.....	191
Slika 7.57.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi napona generatora .....	192
Slika 7.58.	TAFM, scenarij 4 – usporedba najboljeg jednociljnog i višeciljnog algoritma/metode prema drugoj ciljnoj funkciji – odzivi tokova snaga i Pareto prikaz.....	192

## ***Popis tablica***

Tablica 3.1	Tehničke karakteristike elemenata IEEE 9bus modela .....	31
Tablica 3.2	Tehničke karakteristike elemenata TAFM modela .....	34
Tablica 6.1	Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, WSCC model, jednociljna optimizacija.....	77
Tablica 6.2	WSCC – najbolja rješenja dobivena jednociljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama.....	79
Tablica 6.3	Usporedba efikasnosti ciljnih funkcija algoritama, WSCC model, jednociljna optimizacija.....	81
Tablica 6.4	Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, TAFM model, jednociljna optimizacija.....	98
Tablica 6.5	TAFM – najbolja rješenja dobivena jednociljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama.....	100
Tablica 6.6	Usporedba efikasnosti ciljnih funkcija algoritama, TAFM model, jednociljna optimizacija.....	102
Tablica 6.7	Rezultati optimizacijskih procesa, WSCC model, višeciljna optimizacija .....	122
Tablica 6.8	Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, WSCC model, višeciljna optimizacija .....	122
Tablica 6.9	WSCC – najbolja rješenja dobivena višeciljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama.....	126
Tablica 6.10	Rezultati optimizacijskih procesa, TAFM model, višeciljna optimizacija .....	153
Tablica 6.11	Numerički pokazatelji kvalitete optimizacijskih procesa, TAFM model, višeciljna optimizacija .....	154
Tablica 6.12	TAFM – najbolja rješenja dobivena višeciljnom optimizacijom, po algoritmima i metodama.....	157
Tablica 7.1	Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, WSCC model.....	159
Tablica 7.2	Rezultati usporedbe, jednociljna i višeciljna optimizacija, TAFM model.....	174





## Popis oznaka i kratica

### Oznake (elektrotehnika, stabilnost EES-a)

$e_d$	elektromotorna sila armature, direktna komponenta
$e_{fd}$	elektromotorna sila uzbude, direktna komponenta
$e_q$	elektromotorna sila armature, inverzna komponenta
$e_0$	elektromotorna sila armature, nulta komponenta
$E_g$	elektromotorna sila generatora
$f$	frekvencija
$D$	konstanta prigušnog momenta
$H$	inercijska konstanta generatora
$i_{1d}$	struja 1. prigušnog namota u direktnoj osi
$i_{1q}$	struja 1. prigušnog namota u poprečnoj osi
$i_{2q}$	struja 2. prigušnog namota u poprečnoj osi
$i_d$	struja armature, direktna komponenta
$i_{fd}$	struja uzbude, direktna komponenta
$i_q$	struja armature, poprečna komponenta
$i_0$	struja armature, nulta komponenta
$K_A, K_a$	pojačanje AVR uređaja
$K_G$	generalno pojačanje MB-PSS-a
$K_L, K_I, K_H$	pojačanja pojaseva niskih, srednjih i visokih frekvencija MP-PSS-a
$F_L, F_I, F_H$	frekvencijske postavke pojaseva niskih, srednjih i visokih frekvencija MP-PSS-a
$K_{PSS}$	pojačanje generičkog PSS-a
$K_T$	prijelazno pojačanje sustava AVR-a sa TGR blokom
$L_{1d}$	rasipni induktivitet prigušnog namota, direktna os
$L_{1q}$	rasipni induktivitet 1. prigušnog namota, poprečna os
$L_{2q}$	rasipni induktivitet 2. prigušnog namota, poprečna os
$L_{fd}$	rasipni induktivitet uzbudnog i prigušnog namota, direktna os
$L_{fd}$	rasipni induktivitet uzbudnog namota, direktna os
$L_l$	rasipni induktivitet statorskog namota
$L_{md}$	induktivitet magnetiziranja, direktna os
$L_{mq}$	induktivitet magnetiziranja, poprečna os
$P$	djelatna snaga
$P_e$	električna snaga prijenosa
$P_{tie}$	električna snaga prijenosa na interkonektivnim vodovima
$P_m$	mehanička snaga turbine
$R_{1d}$	otpor prigušnog namota u direktnoj osi
$R_{1q}$	otpor 1. prigušnog namota u poprečnoj osi
$R_{2q}$	otpor 2. prigušnog namota u poprečnoj osi
$R_a$	otpor armaturnog namota
$R_{fd}$	otpor uzbudnog namota
$Q$	jalova snaga
$t$	vrijeme
$t_0$	početno vrijeme

$T_{1n}, T_{1d}$	vremenske konstante prvog bloka generičkog PSS-a
$T_{2n}, T_{2d}$	vremenske konstante drugog bloka generičkog PSS-a
$T_A, T_a$	vremenska konstanta AVR-a
$T_B, T_C$	vremenske konstante prijenosne funkcije TGR bloka
$T'_d$	prijelazna kratkospojna vremenska konstanta, direktna os
$T''_d$	početna kratkospojna vremenska konstanta, direktna os
$T'_{d0}$	prijelazna vremenska konstanta otvorenog kruga, direktna os
$T''_{d0}$	početna vremenska konstanta otvorenog kruga, direktna os
$T'_q$	prijelazna kratkospojna vremenska konstanta, poprečna os
$T''_q$	početna kratkospojna vremenska konstanta, poprečna os
$T'_{q0}$	prijelazna vremenska konstanta otvorenog kruga, poprečna os
$T''_{q0}$	početna vremenska konstanta otvorenog kruga, poprečna os
$T_D$	koeficijent prigušnog momenta
$T_e$	elektromagnetski moment stroja
$T_m$	mehanički moment stroja
$T_S$	koeficijent momenta sinkronizma
$T_W$	vremenska konstanta ulaznog visokopropusnog filtra generičkog PSS-a
$v_s$	izlazni signal napona PSS-a
$V_{H,min}, V_{H,max}$	granice izlaznog signala visokofrekvencijske grane MB-PSS-a
$V_{I,min}, V_{I,max}$	granice izlaznog signala srednjefrekvencijske grane MB-PSS-a
$V_{L,min}, V_{L,max}$	granice izlaznog signala niskofrekvencijske grane MB-PSS-a
$V_{s,min}, V_{s,max}$	granice izlaznog signala PSS-a
$X_{1d}$	reaktancija prigušnog namota, direktna os
$X_{1q}$	reaktancija 1. prigušnog namota, poprečna os
$X_{2q}$	reaktancija 2. prigušnog namota, poprečna os
$X_d$	stacionarna reaktancija generatora, direktna os
$X'_d$	prijelazna reaktancija generatora, direktna os
$X''_d$	prijelazna reaktancija generatora, direktna os
$X_{fd}$	reaktancija uzbuđenog namota, direktna os
$X_g$	reaktancija generatora
$X_l$	reaktancija statorskog namota
$X_{md}$	reaktancija magnetiziranja, direktna os
$X_{mq}$	reaktancija magnetiziranja, poprečna os
$X_{mreža}$	reaktancija krute mreže
$X_q$	stacionarna reaktancija generatora, poprečna os
$X'_q$	prijelazna reaktancija generatora, poprečna os
$X''_q$	prijelazna reaktancija generatora, poprečna os
$X_T$	reaktancija transformatora
$X_v$	reaktancija prijenosnog voda
$\delta$	kut opterećenja generatora
$\psi_{1d}$	rasipni ulančani magnetski tok prigušnog namota u direktnoj osi
$\psi_{1q}$	rasipni ulančani magnetski tok 1. prigušnog namota u poprečnoj osi
$\psi_{2q}$	rasipni ulančani magnetski tok 2. prigušnog namota u poprečnoj osi
$\psi_d$	ulančani magnetski tok rotora i statora, direktna komponenta
$\psi_{fd}$	rasipni ulančani magnetski tok uzbude, direktna komponenta

$\psi_q$	ulančani magnetski tok rotora i statora, poprečna komponenta
$\psi_0$	ulančani magnetski tok rotora i statora, nulta komponenta
$\omega_1, \omega_2$	frekvencijske granice prijelaznog dijela TGR bloka
$\omega, \omega_r$	brzina vrtnje generatora
$\omega_b$	bazna brzina vrtnje
$\omega_0$	sinkrona brzina vrtnje generatora

### ***Oznake (računarstvo, metaheuristika)***

$ant$	pozicija plijena, ALO algoritam
$antlion$	pozicija grabežljivca, ALO algoritam
$c_1, c_2, c_3$	kontrolni parametri metaheurističkih algoritama (PSO, SSA)
$c, d$	funkcije adaptivne promjene granica prostora rješenja, ALO algoritam
$C_A$	moć konvergencije, apsolutni iznos
$C_r$	moć konvergencije, relativni iznos
$d$	dimenzija jednog rješenja (broj parametara AVR/PSS)
$e$	energija stanja, SA algoritam
$f$	ciljna funkcija
$f_{best}$	najbolja vrijednost ciljne funkcije
$F$	pozicija izvora hrane, SSA algoritam
$f_1$	prva ciljna funkcija
$f_{1,max}, f_{2,max}$	gornje granice prostora rješenja ciljnih funkcija, neutralna višeciljna metoda
$f_2$	druga ciljna funkcija
$f_{3,NP}$	ciljna funkcija, neutralna višeciljna metoda
$f_{3,WS}$	ciljna funkcija, težinska višeciljna metoda
$f_{norm}$	normalizacijsko preslikavanje
$I$	iterativno promjenjivi faktor, ALO algoritam
$K_1, K_2$	faktori korekcije prve i druge ciljne funkcije, težinska višeciljna metoda
$lb$	vektor donjih granica rješenja
$N$	ukupni broj iteracija
$n$	broj rješenja, veličina ispitne populacije čestica
$np$	neutralna višeciljna metoda
$w_{m1}$	težinska višeciljna metoda ( $w_1 = 0.75$ )
$w_{m2}$	težinska višeciljna metoda ( $w_1 = 0.25$ )
$os$	prvo nadvišenje
$P$	vjerojatnosna funkcija promjene stanja, SA algoritam
$P_s$	Pareto fronta optimalnih rješenja
$P_s$	Pareto skup optimalnih rješenja
$R_A, R_E$	funkcije nasumičnog kretanja plijena, ALO algoritam
$rand$	funkcija nasumičnih brojeva u skupu $[0,1]$ , uniformna distribucija
$s$	energetsko stanje, SA algoritam
$ub$	vektor gornjih granica rješenja
$us$	prvo podvišenje
$tr$	broj probnih pokušaja
$ts$	vrijeme smirivanja tranzijenata
$T$	temperatura, SA algoritam
$T_0$	početna temperatura, SA algoritam

$v$	brzina u promjeni položaja čestice, PSO algoritam
$w_1, w_2$	težinski faktori, višeciljna težinska metoda
$w_{OS}$	korekcijski faktor druge ciljne funkcije za prvo nadvišenje
$w_{US}$	korekcijski faktor druge ciljne funkcije za prvo nadvišenje
$w_P$	korekcijski faktor prve ciljne funkcije za promjene tokova radnih snaga
$w_V$	korekcijski faktor prve ciljne funkcije za promjene napona generatora
$\vec{x}$	čestica, agent, vektor parametara AVR/PSS
$\vec{z}^{ideal}$	vektor idealnih iznosa ciljnih funkcija
$\alpha$	adaptivni faktor promjene temperature, SA algoritam
$\mu$	faktor vjerojatnosti mutacije stanja, SA algoritam
	analitički pokazatelj kvalitete optimizacije: srednja vrijednost najbolje ciljne funkcije
$\sigma$	faktor ranga mutacije stanja, SA algoritam
	analitički pokazatelj kvalitete optimizacije: srednja vrijednost najbolje ciljne funkcije

## ***Kratice***

AI	eng. <i>Artificial Intelligence</i>
AGC	eng. <i>Automatic Generation Control</i>
ALO	eng. <i>Ant Lion Optimizer</i>
APU	Automatski Ponovni Uklop
AVR	eng. <i>Automatic Voltage Regulator</i>
BFOA	eng. <i>Bacteria Foraging Optimization Algorithm</i>
DE	eng. <i>Differential Evolution</i>
DM	eng. <i>Decision Maker</i>
dq0	eng. <i>direct-quadrature-zero</i>
EES	Elektroenergetski Sustav
FOPID	eng. <i>Fractional Order Proportional Integral Derivative</i>
GA	eng. <i>Genetic Algorithm</i>
GMVSS	eng. <i>General Minimum Variance State Space</i>
HVDC	eng. <i>High Voltage Direct Current</i>
IEEE	eng. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MB-PSS	eng. <i>Multi Band Power System Stabilizer</i>
MCDM	eng. <i>Multi-objective criteria decision making</i>
MOALO	eng. <i>Multi-objective Ant Lion Optimizer</i>
MOPSO	eng. <i>Multi-objective Particle Swarm Optimization</i>
MOSA	eng. <i>Multi-objective Simulated Annealing</i>
MOSSA	eng. <i>Multi-objective Salp-Swarm Algorithm</i>
MOVRPSO	eng. <i>Multi-objective Velocity Relaxed Particle Swarm Optimization</i>
p.u.	eng. <i>per-unit</i>
PID	eng. <i>Proportional Integral Derivative</i>
PMU	eng. <i>Phasor Measurement Unit</i>
PSO	eng. <i>Particle Swarm Optimization</i>
PSS	eng. <i>Power System Stabilizer</i>
SA	eng. <i>Simulated Annealing</i>
SMIB	eng. <i>Single Machine Infinite Bus</i>
SOA	eng. <i>Seeker Optimization Algorithm</i>
SPEA	eng. <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SSA	eng. <i>Salp-Swarm Algorithm</i>
SSSC	eng. <i>Static Synchronous Series Compensator</i>
SVC	eng. <i>Static VAR Compensator</i>
TAFM	eng. <i>Two Area Four Machine</i>
TCSC	eng. <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
TGR	eng. <i>Transient Gain Reduction</i>
TS	eng. <i>Taboo Search</i>
VRPSO	eng. <i>Velocity Relaxed Particle Swarm Optimization</i>
WAMS	eng. <i>Wide Area Monitoring System</i>
WSCC	eng. <i>Western Standard Coordinated Council</i>



## ***Životopis***

Tomislav Špoljarić rođen je u Zagrebu 1982. godine. Završio je osnovnu školu i opću gimnaziju u Sesvetama. Diplomirao je 2006. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Od 2007. godine zaposlen je na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu.

Glavna područja znanstvenog istraživanja i stručnog rada su primjena metaheurističke inteligencije, stabilnost elektroenergetskog sustava i primjena raznih upravljačkih metoda u rashladnim postrojenjima. Autor je i koautor 13 znanstvenih i stručnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima i na međunarodnim znanstvenim i stručnim skupovima.

## ***Popis objavljenih radova***

- **Znanstveni radovi objavljeni u međunarodnim časopisima:**

- 1) Špoljarić T., Pavić I., Alinjak T., *"Performance Comparison of No-preference and Weighted Sum Objective Methods in Multi-Objective Optimization of AVR-PSS Tuning in Multi-machine Power System"*, Tehnički Vjesnik, 2022.

- **Znanstveni i stručni radovi u zbornicima skupova s recenzijom:**

- 1) Pavić I., Tešnjak S., Špoljarić T., *"Power Flow Redistribution in Croatian Power System using Phase-Shifting Transformer"*, POWERGRID Europe 2010, Amsterdam, Netherlands, 2010.
- 2) Fruk M., Vujisić G., Špoljarić T., *"Parameter Identification of Transfer Functions using MATLAB"*, Proceedings of 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2013., pp. 697-702
- 3) Špoljarić T., Fruk M., Vujisić G., *"Program Solutions for the Complex Cooling Process via LADDER Logic"*, Proceedings of 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2014., pp. 1221-1226
- 4) Jagetić G., Habazin M., Špoljarić T., *"PLC/SCADA Systems in Automation Control Design for Individual Quick Freezing Process in Cooling Tunnels"*, Proceedings of 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2015., pp. 1896-1903





- 5) Špoljarić T., Špoljarić M., "*LADDER Program Solution for Multi-Probe Monitoring and Control in Simple Cooling Process*", Proceedings of 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2016., pp. 1339-1347
- 6) Jozić A., Špoljarić T., Gadže D., "*Laboratory Model of an Elevator: Control with Three Speed Profiles*", Proceedings of 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2016., pp. 1889-1894
- 7) Balug M. A., Špoljarić T., Vujisić G., "*Laboratory Model of the Elevator Controlled by ARDUINO Platform*", Proceedings of 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2017., pp. 1814-1817
- 8) Špoljarić T., Pavić I., "*Performance Analysis of an Ant Lion Optimizer in Tuning Generators' Excitation Controls in Multi Machine Power System*", Proceedings of 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2018., pp. 1210-1215
- 9) Špoljarić T., Lušetić C., Šimović V., "*Optimization of PID controller in AVR system by using ant lion optimizer algorithm*", Proceedings of 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2018., pp. 1768-1772
- 10) Špoljarić T., Pavić I., "*AVR and PSS Coordination Strategy by Using Multi-objective Ant Lion Optimizer*", Proceedings of 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2020., pp. 1151-1156
- 11) Šulekić I., Milinković D., Špoljarić T., "*Decision Tree Algorithm for Control of Compressor Multiset in Refrigeration Industry*", Proceedings of 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2020., pp. 1314-1318
- 12) Cvitaš Lj., Vuletić-Komljen B., Miletić M., Špoljarić T., Malčić G., "*Electronic Unit for Controlling the Operation of the Device with a Flooded Evaporator*", 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May, 2022.



## *Curriculum Vitae*

Tomislav Špoljarić was born in Zagreb in 1982. He completed elementary school and high school in Sesvete. He graduated in 2006 at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb. Since 2007 he has been employed at the University of Applied Sciences in Zagreb.

The main areas of scientific research and professional work are application of swarm intelligence in power system's stability and control methods in cooling industry. He is the author and co-author of 13 scientific and technical papers published in international journals and at international scientific and technical meetings.