

Razvoj metode za optimalnu raspodjelu radne i jalove snage na agregate u hidroelektrani

Gregov, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:168:703015>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 109

**RAZVOJ METODE ZA OPTIMALNU RASPODJELU RADNE I
JALOVE SNAGE NA AGREGATE U HIDROELEKTRANI**

Josip Gregov

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 109

**RAZVOJ METODE ZA OPTIMALNU RASPODJELU RADNE I
JALOVE SNAGE NA AGREGATE U HIDROELEKTRANI**

Josip Gregov

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 109

Pristupnik: **Josip Gregov (0036523779)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor: prof. dr. sc. Damir Sumina

Zadatak: **Razvoj metode za optimalnu raspodjelu radne i jalove snage na agregate u hidroelektrani**

Opis zadatka:

Potrebno je proučiti postojeća rješenja za raspodjelu referentnih vrijednosti radne i jalove snage na agregate u hidroelektrani. Za odabrani primjer hidroelektrane potrebno je izraditi simulacijski model. Na temelju simulacijskog modela potrebno je razviti algoritam optimalne raspodjele referentnih vrijednosti radne i jalove snage na agregate. Raspodjelu je potrebno realizirati ovisno o dostupnosti i nazivnoj snazi agregata. Djelovanje algoritma treba ispitati simulacijski. Zatim, algoritam je potrebno implementirati u jedan od industrijski primjenjivih sustava i ispitati njegovo djelovanje.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Sadržaj

1.	UVOD.....	1
2.	OPIS PROBLEMATIKE.....	3
3.	ANALIZIRANI OBJEKTI.....	5
3.1.	Hidroelektrana 1 – generator s Kaplan turbinom	5
3.2.	Hidroelektrana 2 – generator s Francis turbinom	10
3.3.	Hidroelektrana 3 – generator s Pelton turbinom.....	14
4.	FUNKCIJSKI BLOKOVI VEZANI UZ UPRAVLJANJE BROJA AGREGATA	17
4.1.	<i>Droop</i> regulacija.....	17
4.2.	Logički uvjeti za pokretanje i zaustavljanje agregata.....	20
4.3.	Računanje maksimalne rotirajuće rezerve.....	21
4.4.	Sumacija snaga JC agregata	22
4.5.	Računanje preostalih snaga u hidroelektrani	23
4.6.	Računanje trenutne rotirajuće rezerve	23
4.7.	Prioriteti pokretanja i zaustavljanja	25
4.8.	Računanje točaka prelaska na više ili manje agregata.....	25
4.9.	Brojanje agregata u određenim stanjima	28
4.10.	Uspoređivanje limita sa zadanom referentnom snagom.....	28
4.11.	Limit za zaustavljanje posljednjeg agregata.....	30
4.12.	Prioriteti pokretanja i zaustavljanja	31
4.13.	Računanje potrebnog broja agregata	32
4.14.	Logika pokretanja agregata	33
4.15.	Logika zaustavljanja agregata	34
5.	RASPODJELA RADNE SNAGE.....	36
5.1.	Selektiranje jednog agregata za regulaciju	36

5.2.	Blok provjere dostizanja maksimuma JC agregata.....	37
5.3.	Odabir referentne vrijednosti za agregat	37
6.	ODZIVI	39
6.1.	Simulacija odziva na promjenu frekvencije i pokretanja agregata koji nije u zajedničkom upravljanju	40
6.2.	Simulacija promjene broja agregata zbog promjene ukupne referentne snage ...	41
7.	ZAKLJUČAK.....	44
	LITERATURA.....	46
	SAŽETAK.....	47
	ABSTRACT	48

1. UVOD

Hidroelektrane (HE) su važan izvor obnovljive energije koji za proizvodnju električne energije koristi energiju vode. Dva osnovna dijela hidroelektrane su turbina koju voda pokreće te generator kojeg pokreće osovina turbine. Proces pretvorbe je jedan od ekoloških najprihvatljivijih što se tiče emisije stakleničkih plinova, obnovljivosti, dugotrajnosti, mogućnosti skladištenja energije (reverzibilne HE), itd. Ove pozitivne karakteristike dolaze do velikog izražaja kada su u pitanju HE većih kapaciteta u zemljama izrazito bogatim vodom poput Kine, Brazila, Kanade i SAD-a.

Radi iskorištavanja što većeg danog potencijala vode, razvijeni su različiti tipovi turbina za određene protoke i tlakove pod kojima voda prenosi svoju potencijalnu energiju. U ovom radu će se fokusirati na tri najčešća tipa turbina: Pelton, Francis i Kaplan.

Optimum rada zajedničkog upravljanja hidroelektranom bitan je za pokrivanje različitih zahtjeva ovog kompleksnog elektroenergetskog sustava (EES) tako da su razvijeni različiti tipovi upravljanja. Predmet ovog rada je usporedna analiza dva najčešća tipa upravljanja hidroelektranom, selekcija jednog od njih te njegova implementacija u razvojnom okruženju TIA portala. Zatim će se prikazati i analizirati rezultati testiranja i simulacije.

Dva spomenuta tipa upravljanja tiču se raspodjele snage na agregate. Najčešći je slučaj elektrane s agregatima istih snaga. Time bi prvi logičan izbor bio podjednaka raspodjela snage tj. opterećenja na sve agregate jer je jednostavna izvedba, upuštanje u rad, praćenje tijekom proizvodnog režima rada, detekcija odstupanja ili anomalija bilo kakve vrste itd. Ako postoji zahtjev za 8 MW na dva agregata od 5 MW, svaki će proizvoditi 4 MW. Drugi tip upravljanja bio bi postaviti jedan agregat na nazivnu ili najveću moguću snagu, a drugi koristiti za regulaciju. Ako postoji isti zahtjev kao u prethodnom slučaju od 8 MW, prvi će proizvoditi 5 MW, a drugi 3 MW. Naravno, u drugom tipu sam model upravljanja raste i grana se eksponencijalno s brojem agregata.

Postoji realna potreba tri projekta na kojima bi se trebao implementirati algoritam. U svakome od njih je slučaj s dva agregata pa će se analiza ograničiti na dva agregata, dok će kôd biti univerzalan za modifikaciju i do četiri agregata. Dalje u tekstu prvi tip upravljanja nazvat će se „podjednako raspodijeljena referentna snaga“, a drugi tip „praćenje referentne vrijednosti snage jednim agregatom“.

U kvalitativnost tipa upravljanja hidroelektranom, naravno neće ulaziti isključivo korisnosti agregata nego i drugi faktori poput stabilnosti statičkih i dinamičkih stanja, generičnost odnosno modularnost koda, kao i samog projekta. Ti zahtjevi trenutno su većom mjerom ispunjeni primjenom upravljanja prema modelu kada se referentna vrijednost prati jednim agregatom, a drugi radi na maksimalnoj konstantnoj snazi ili nešto manje ispod. Isto je dobro imat na umu da će mogućnost izbora između tipova upravljanja operaterima biti od velike koristi.

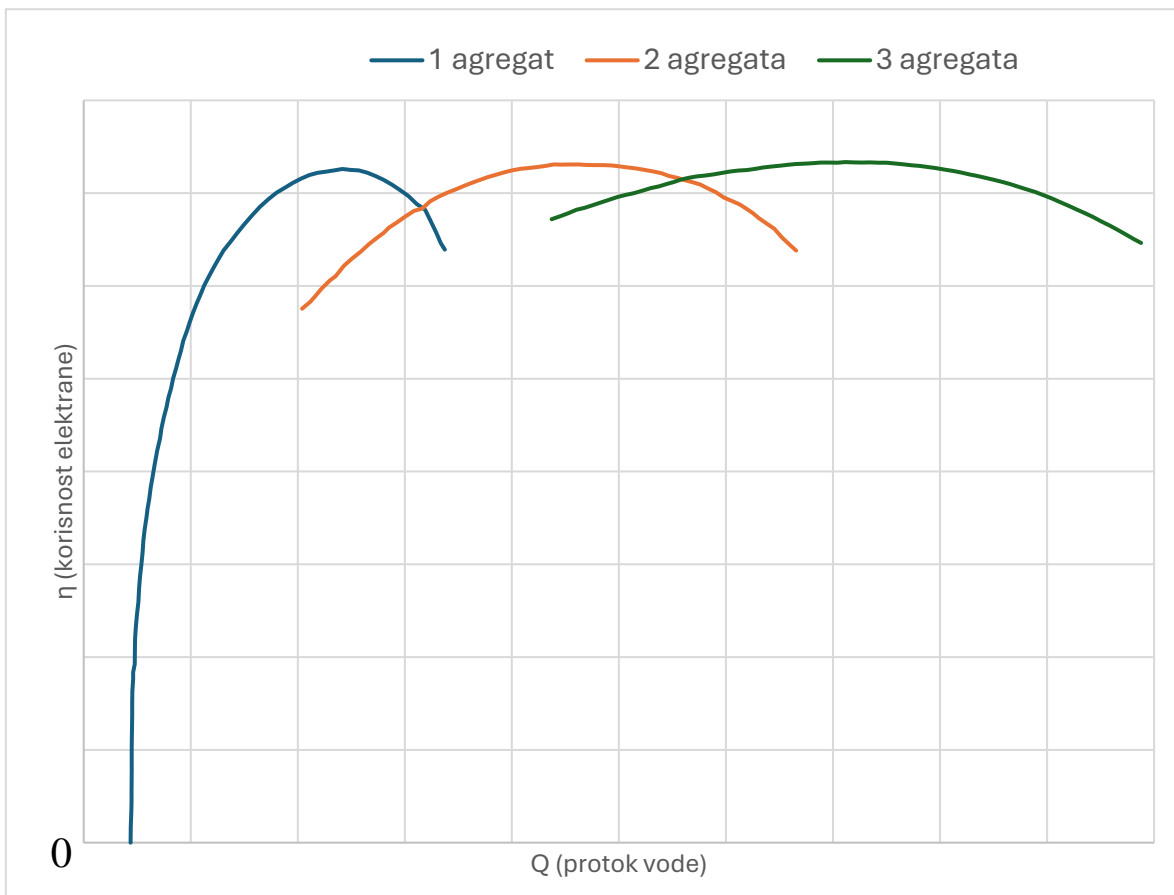
Iako je u naslovu spomenuta raspodjela jalove snage, ona će biti predmet budućeg rada.

2. OPIS PROBLEMATIKE

Formula za ukupnu snagu u određenom trenutku iznosi:

$$P = Q * \rho * g * H_n * \eta_g \eta_t = Q * p * \eta_g \eta_t \quad (1)$$

Kako će se analiza fokusirati na korisnost, posebno u pogledu korisnosti turbine i generatora, važno je imati na umu sliku 2.1, koja pruža osnovni uvid u korisnost hidroelektrane u odnosu na protok tj. snagu te broj aktivnih agregata. Slika nema definirane vrijednosti na apscisi i ordinati jer prave vrijednosti ovise o tipovima turbina i veličini hidroelektrane.



Slika 2.1. Stupanj djelovanja hidroelektrane [2]

Hidroelektrane igraju ključnu ulogu u elektroenergetskom sustavu zbog svoje sposobnosti brzog prilagođavanja referentne snage te brzog uključivanja i isključivanja u usporedbi s drugim elektranama. Iako to ovisi o snazi pojedine elektrane, općenito gledajući elektrane sličnih snaga, nuklearne su elektrane najsporije u upravljanju. Njihov radni režim se nakon pokretanja minimalno mijenja, jer se teže održavaju konstantne snage. Termoelektrane

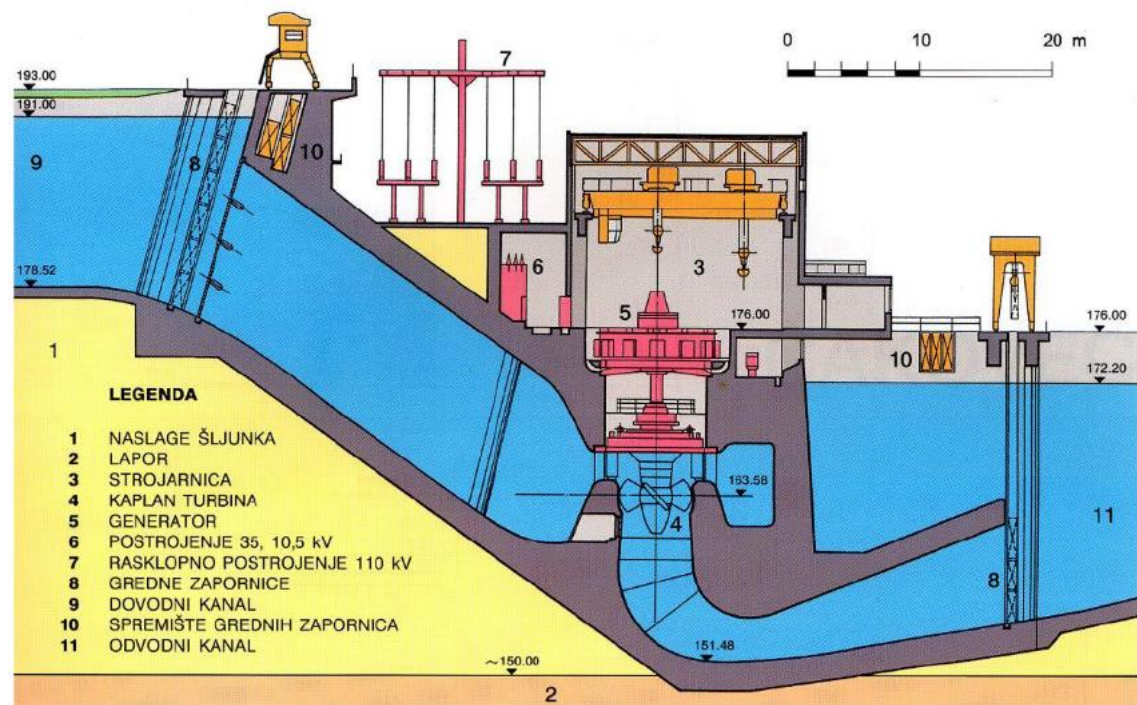
također zahtijevaju vrijeme za sinkronizaciju te imaju visoke troškove energije prilikom pokretanja. Hidroelektrane, s druge strane, najpogodnije su za brzo puštanje u pogon.

3. ANALIZIRANI OBJEKTI

U ovom poglavlju nalaze se analize tri prava objekta, svaki sa svojim tipom turbina: Kaplan, Francis i Pelton.

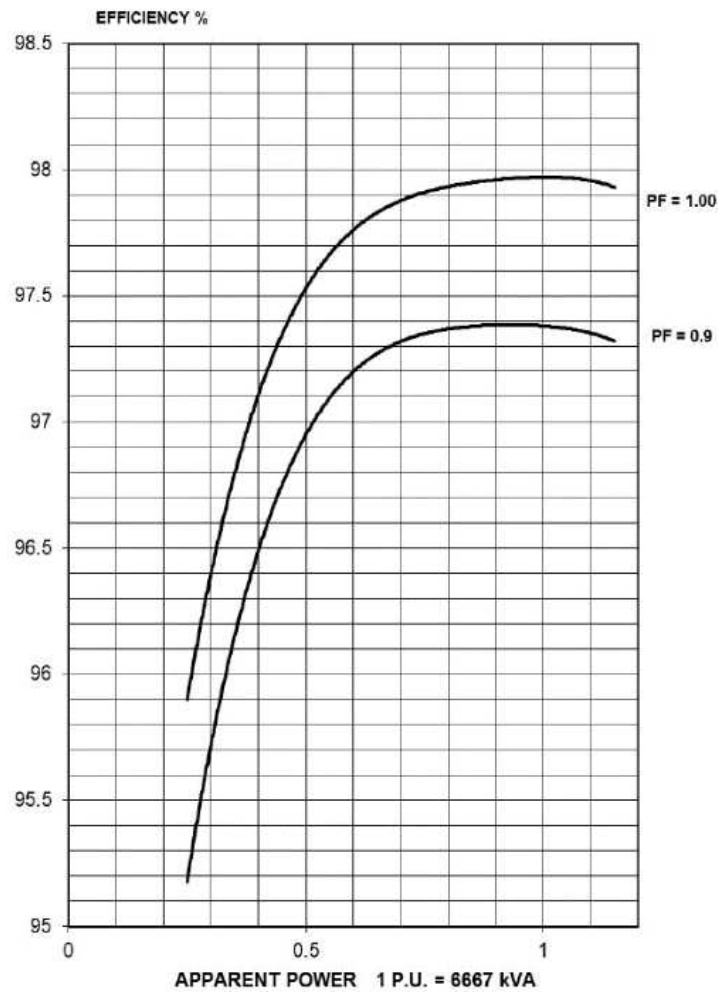
3.1. Hidroelektrana 1 – generator s Kaplan turbinom

Kaplan turbina dizajnirana je za veliku korisnosti iskorištavanja energije vode pri niskim padovima s povećim protokom. Zakretanjem lopatica turbine upravlja se izlaznom snagom, ali sporije dinamike u odnosu na Pelton turbinu. To znači da za turbine sa sporijim odzivom moraju imati spore promjene referentnih vrijednosti kako bi se izbjegle oscilacije i mehanička naprezanja te time povećala stabilnost sustava. Dana je slika 3.1. kako bi se bolje predočila sljedeća pojava bitna za numeričku analizu.



Slika 3.1. Hidroagregat s vertikalnom Kaplan turbinom [4]

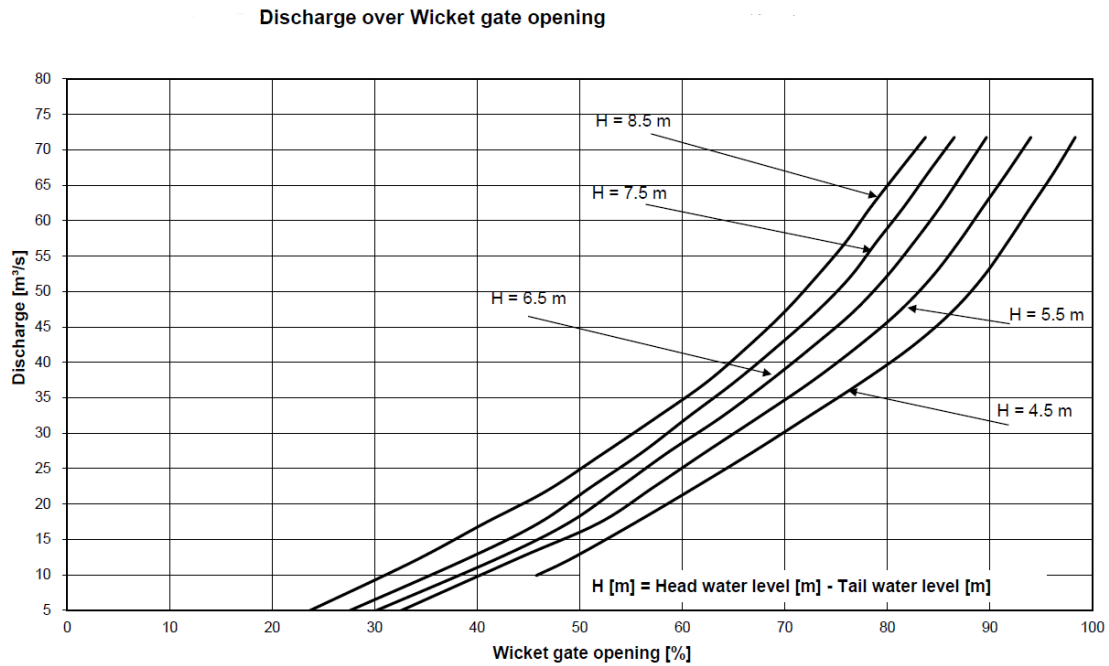
U radu s velikim protokom vode, donji nivo značajno se povisi te su zato uzeti podaci turbine u radu s najmanjom visinom pada. To se događa u slučajevima kada dizajn HE ne uključuje mjere preljeva poput dodatnih kanala. Na slici 3.2. prikazan je graf s korisnosti generatora.



Slika 3.2. Graf korisnosti generatora [2]

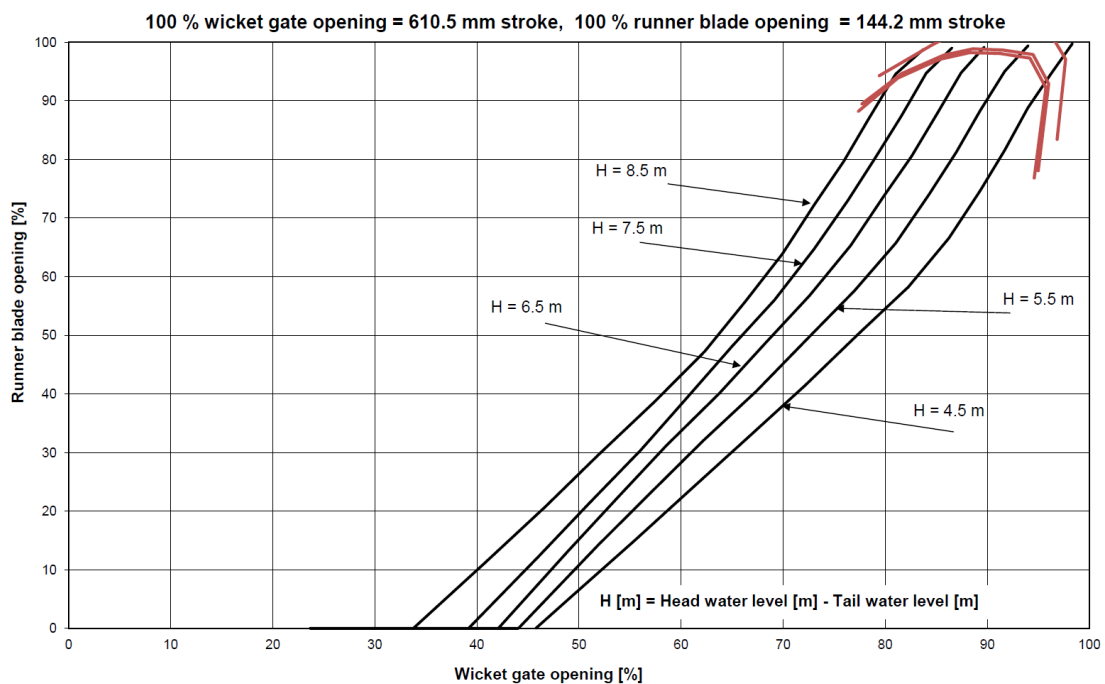
Sva tri promatrana objekta unutar ovog rada imaju dva generatora pojedinačne nazivne snage 5 MW čiji je graf korisnosti prikazan na slici 2.2. Korisnost se uzima u obzir prilikom analize te će se uzeti krivulja faktora snage 1 (PF = 1.00).

Slika 3.3. prikazuje graf protoka ovisno o otvorenosti privodnog kola i padu vode.



Slika 3.3. Graf protoka ovisno o otvorenosti privodnog kola i padu vode [2]

Slika 3.3. nije potrebna za analizu, ali je dobar primjer za ukratko spomenuti način postizanja radnih točaka turbine te mehaničke granice koje su propisane od strane proizvođača. Na 2D grafu se zapravo pokušava prikazati 3D prostor tri varijable gdje se, iz zadanih referentnih vrijednosti snage i izmjereni pad vode, računa protok te se očitava vrijednost otvora privodnog kola (engl. *wicket gate*). Slika 3.4. prikazuje odnose pada vode, privodnog i radnog kola.



Slika 3.4. Odnos pada vode, privodnog i radnog kola [2]

Za radno kolo (engl. *runner blade*) slika 3.4. prikazuje kako se dobivaju vrijednosti otvorenosti kola za postizanje zadanih referentnih vrijednosti snage ili protoka.

Što se tiče granica dozvoljenog rada, za objekt 1 definirane su maksimalne i minimalne vrijednosti pada vode, protoka turbine te snage generatora i turbine. Kod Kaplan i Francis turbina, najveći prioritet u određivanju radnih granica ima pojava kavitacije, koja značajno smanjuje vijek trajanja turbina i mora se izbjeći u svakom slučaju. Kavitacija nastaje zbog velikih razlika u tlaku tijekom rada turbine, što dovodi do erozije lopatica, buke, vibracija i smanjenja korisnosti.

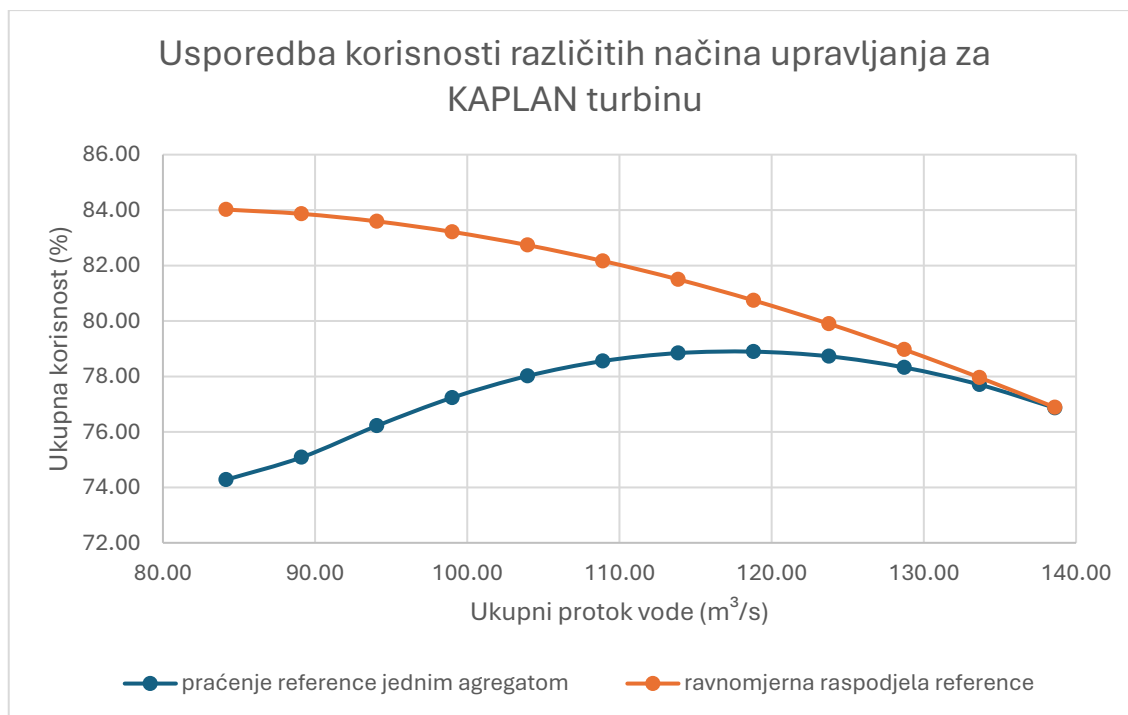
U tablici 3.1. analizirani su stupci koji prikazuju visinu vode, protok i snagu turbine, pri čemu je u snazi već uračunata korisnost turbine. Izvršena je usporedba dvaju tipova upravljanja na sljedeći način:

- prvi agregat drži se na maksimalnoj snazi odnosno protoku
- drugi agregat prolazi kroz ostale točke
- računa se ukupna izlazna snaga uzimajući u obzir korisnost generatora
- za isti ukupni protok, računa se ekvivalentna snaga u slučaju podjednako raspodijeljenog protoka, odnosno snage na agregate.

H	Q	Runner stroke	Runner opening	Runner opening	Gate stroke	Gate opening	Gate opening	Turbine power
[m]	[m ³ /s]	[mm]	[°]	[%]	[mm]	[°]	[%]	[kW]
4								
	71.78	142.9	31.2	99.1	610.5	79.0	100.0	2209
	66.83	137.1	29.8	95.1	602.3	77.9	98.7	2119
	61.88	128.3	27.8	89.0	589.0	76.2	96.5	2012
	56.93	118.1	25.4	81.9	575.6	74.5	94.3	1892
	51.98	108.5	23.2	75.3	561.7	72.7	92.0	1757
	47.03	96.6	20.4	67.0	543.1	70.3	89.0	1610
	42.08	84.4	17.6	58.6	518.7	67.2	85.0	1452
	37.13	73.1	15.0	50.7	489.3	63.5	80.2	1284
	32.18	60.6	12.1	42.0	457.0	59.5	74.9	1105
	27.23	48.0	9.1	33.3	423.3	55.4	69.3	918
	22.28	35.0	6.1	24.3	389.4	51.0	63.8	723
	17.33	21.8	3.1	15.1	356.9	47.0	58.5	526
	12.38	0.0	-2.0	0.0	301.0	40.0	49.3	343
	9.90	0.0	-2.0	0.0	279.4	37.3	45.8	30

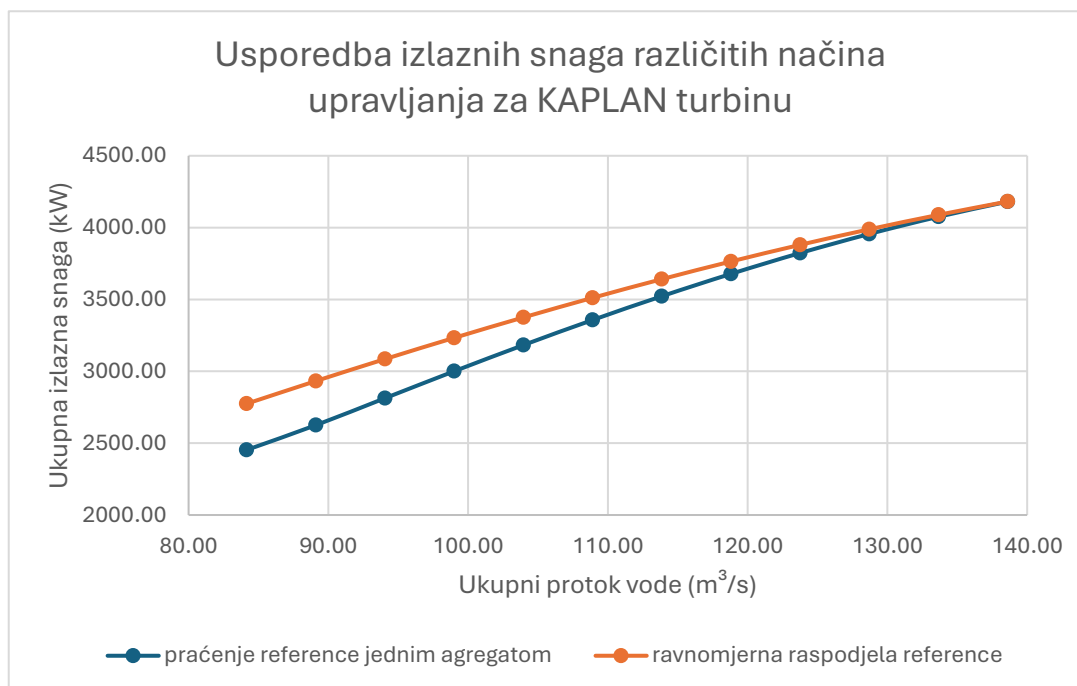
Tablica 3.1. Odnos snage o protoku za najmanji pad vode [2]

Rezultati ovako provedene analize daju sljedeća dva grafa prikazana slikama 2.5 i 2.6.



Slika 3.5. Graf korisnosti za različite protoke

Na slici 3.5. je pri nižim protocima razlika korisnosti veća, ali pri većim protocima se smanjuju razlike u raspodijeljenoj snazi te se korisnosti izjednačavaju. Zbog držanja neto pada konstantnim, vrijednosti protoka na apscisi su se mogle preračunati u ulaznu snagu vode te bi onda graf korisnosti, ovisno o ulaznoj snazi, imao identične odzive i oblik grafa.

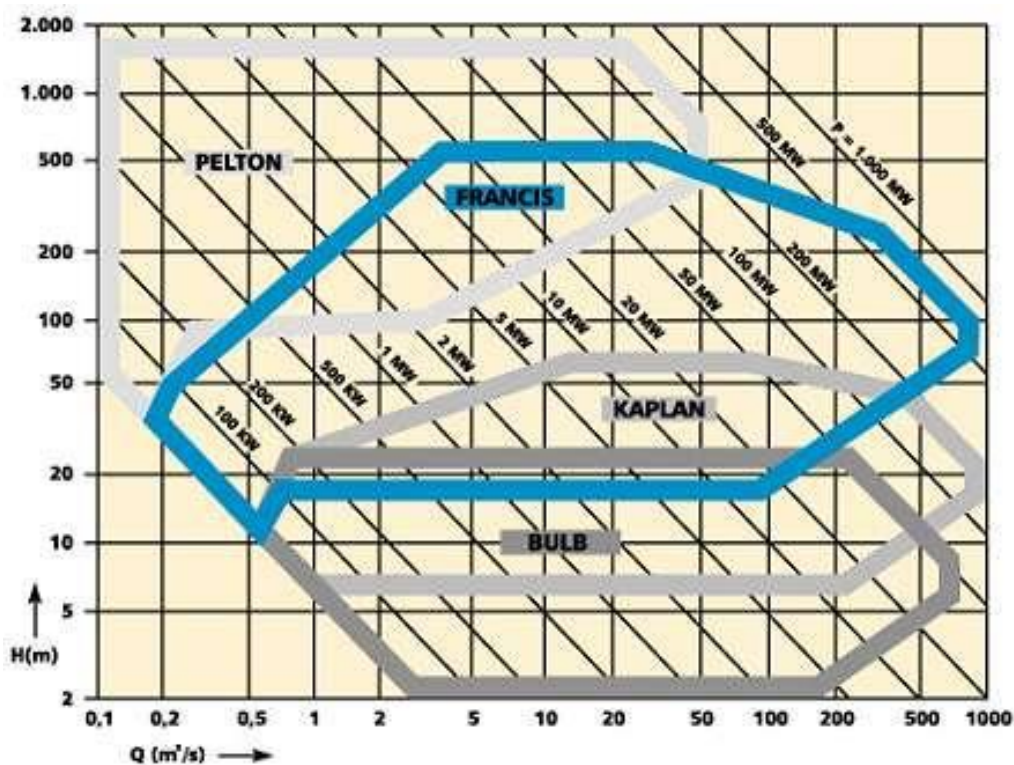


Slika 3.6. Graf ukupne proizvedene snage ovisne o protoku

Za graf izlazne snage to znači da razlika snaga također mora biti veća na početku kao na slici 3.6. U konačnici odabir načina rada s većom korisnošću značio bi smanjenje protoka vode za maksimalno $10 \text{ m}^3/\text{s}$ za ovaj objekt. Dugoročno gledajući to može biti jedan od većih faktora u odluci upravljanja hidroelektranom.

3.2. Hidroelektrana 2 – generator s Francis turbinom

Francisova turbina, za razliku od Kaplanove, dizajnirana je za veće padove i manje protoke. Njeni radni uvjeti obuhvaćaju padove od približno 50 do 400 metara i protoke od 2 do 800 m^3/s . To je zbog znatno veće korisnosti koju Kaplanova turbina ne može postići u tim uvjetima. Na slici 3.7. prikazana je gruba podjela turbina prema raspoloživim protocima i neto padovima rijeka, pri čemu su kod pravaca konstantne snage, neto visina i protok u odnosu obrnute proporcionalnosti.



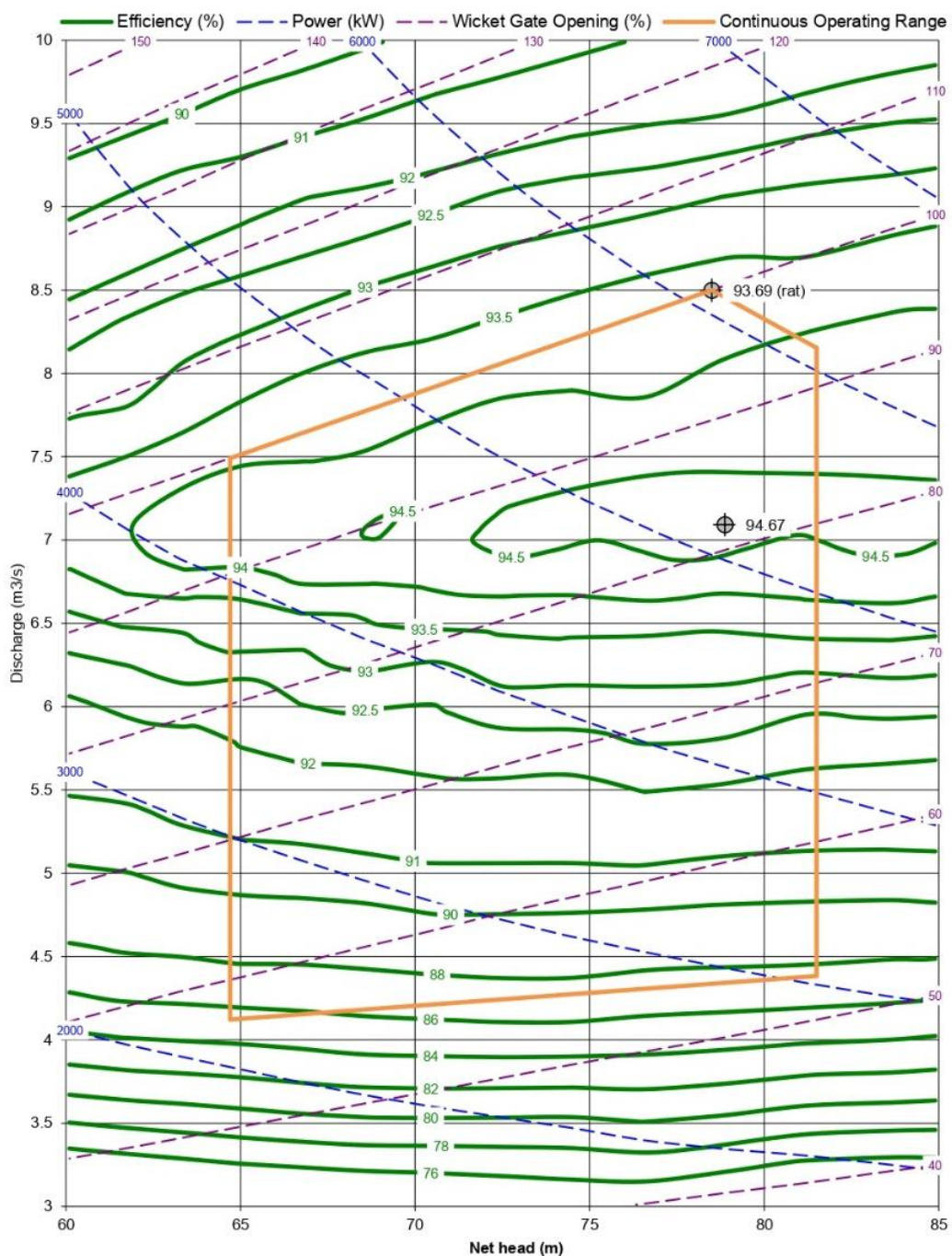
Slika 3.7. Izbor turbine prema Voest Alpine [4]

Što se tiče upravljanja, Francisova turbina nema radno kolo nego se dinamika postiže zakretanjem samo privodnog kola, sličnog kao kod Kaplanove turbine. Zbog toga se također izbjegavaju nagle promjene referentnih vrijednosti kako bi se osigurala stabilnost sustava.

Za razliku od tabličnog prikaza Hillovog dijagrama objekta 1, za objekt 2 dan je isključivo graf Hillovog dijagrama. S definiranom referentnom snagom npr. snage te poznatim neto

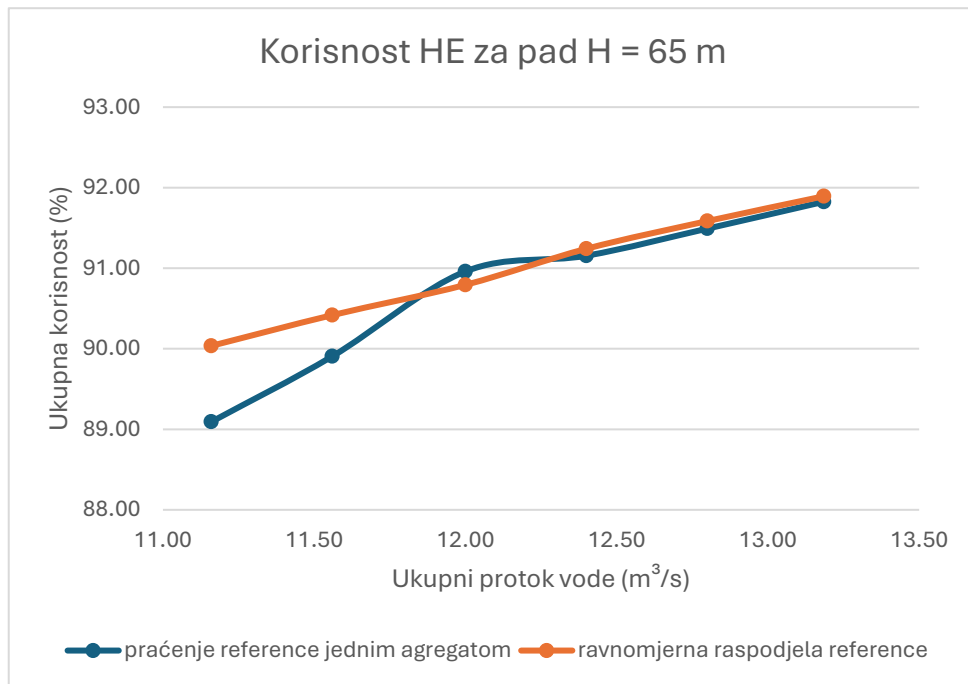
padom vode, može se dobiti iznos potrebnog otvora privodnog kola, a dodatnom ekstrapolacijom dobiju se preostale raspoložive veličine. Žuto područje označava dozvoljeni trajni rad agregata uzimajući u obzir sve pojave koje su navedene za Kaplan turbinu u prijašnjem poglavlju. Korisnost se utvrđuje eksperimentalno s pomoću formule (2) za što više radnih točaka čiji rezultati se povežu obliku grafa kao na slici 3.8.

$$\eta = \frac{P_{turbine}}{\rho * g * H * Q} \quad (2)$$

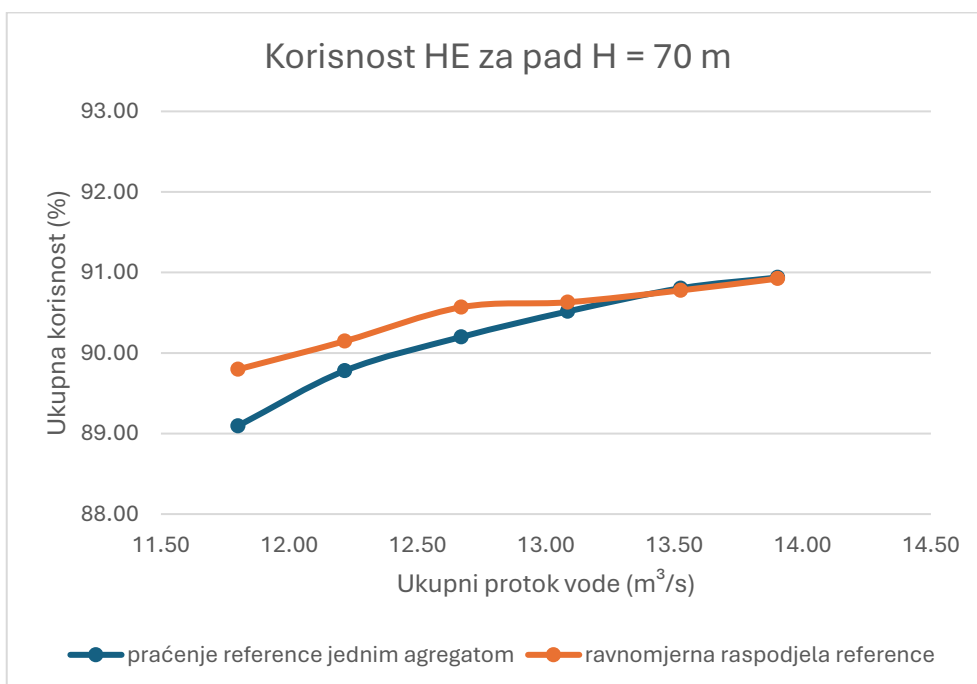


Slika 3.8. Hilov dijagram Francis turbine s hidroelektrane 2 [2]

Pristup analizi tipa upravljanja provodi se na isti način kao za objekt 1 (bez uzimanja u obzir povišenja donjeg nivoa), a bit će identičan i za treći objekt. Rezultati su prikazani grafovima za 4 različita neto pada vode kako bi se uzelo u obzir što više mogućih stanja (slike 3.9. do 3.12.)

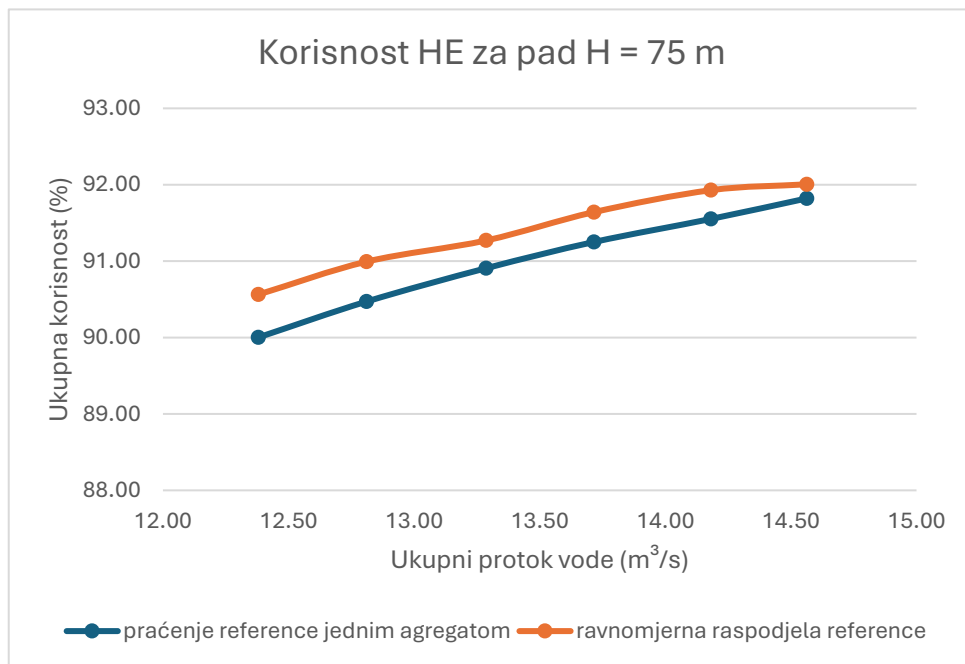


Slika 3.9 Korisnost HE ovisna o protoku za neto vode 65 m

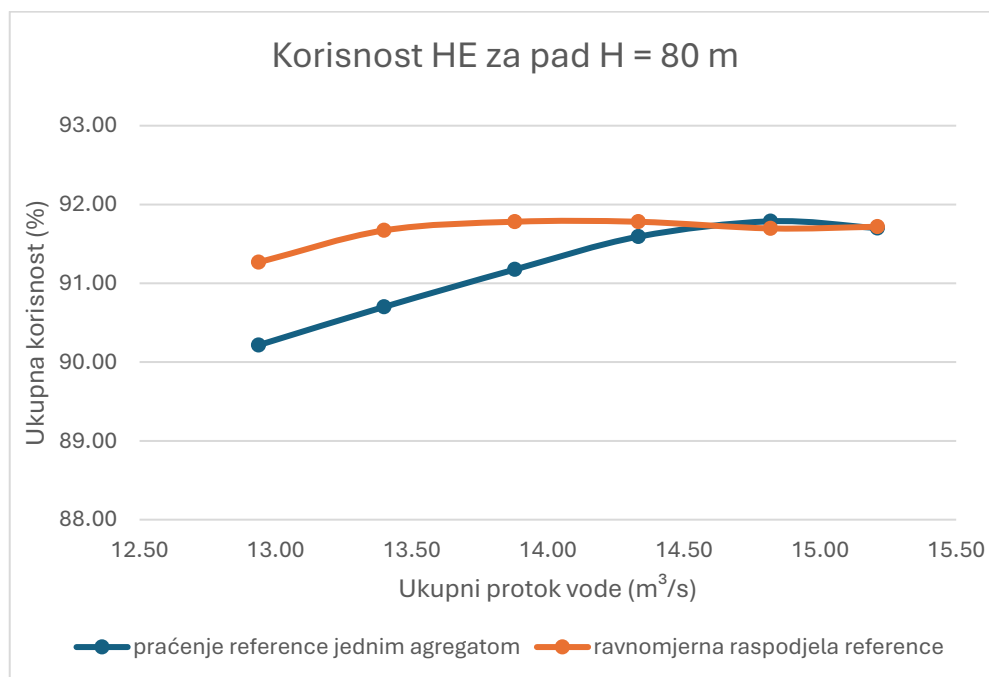


Slika 3.10 Korisnost HE ovisna o protoku za neto vode 70 m

Grafovi sa slika 3.9. i 3.10. daju blagu prednost ravnomjernoj raspodjeli referentne snage, ali razlike korisnosti od 1 % su drastično manje nego kod agregata s Kaplan turbinom gdje razlika ide do 10 % pri nižim protocima/snagama (za tu hidroelektranu). U manjim hidroelektranama poput naša tri objekta, ovakve razlike ne moraju uvijek bit od značaja. Ovisi od objekta do objekta. Kod velikih hidroelektrana to je svakako slučaj za dodatno razmatranje.



Slika 3.11 Korisnost HE ovisna o protoku za neto vode 75 m



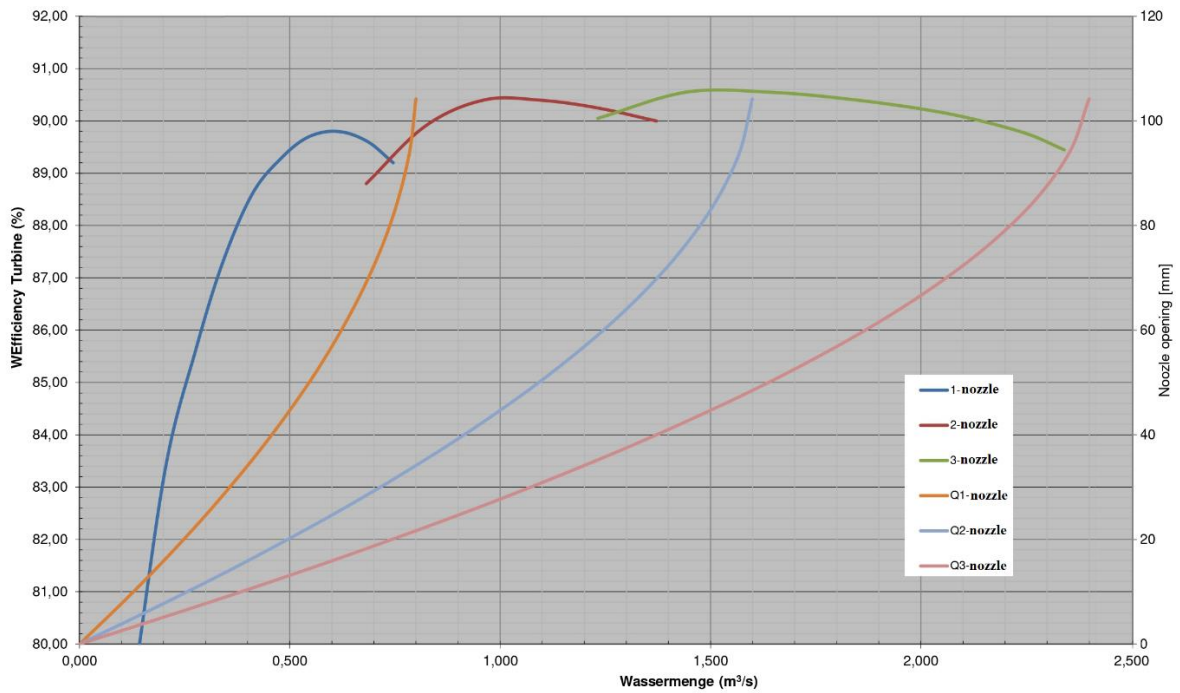
Slika 3.12 Korisnost HE ovisna o protoku za neto vode 80 m

Sveukupno rezultati se podudaraju s objektom 1 glede veće razlike u korisnosti pri manjim snagama, a pri većim snagama se izjednačavaju. Pri većim padovima korisnost je naravno veća što se da naslutiti iz korisnosti u Hillovom grafu sa slike 3.8. te grafu korisnosti generatora sa slike 3.2. Bilo bi zanimljivo vidjeti analizu za 3 ili 4 agregata, no podaci nijednog objekta u ovom radu nisu dani za manipuliranje i stvaranje alternativnih slučajeva.

3.3. Hidroelektrana 3 – generator s Pelton turbinom

Pelton turbina dizajnirana je za visoku korisnost iskorištavanja energije vode pri uvjetima visokih padova, u rasponu od 300 do 1500 metara, i manjih protoka, od 0,5 do 20 m³/s. Koristi impulsni princip rada, gdje se mlaz vode pod visokim pritiskom usmjerava na lopatice rotora, stvarajući rotacijsku snagu. Zahvaljujući svojoj konstrukciji i brzom odzivu, Pelton turbina može brzo prilagoditi izlaznu snagu promjenama hidrauličkih uvjeta putem igala (mlaznica). Ova brzina odziva omogućava učinkovito upravljanje promjenama opterećenja te održavanje stabilnosti sustava bez značajnih oscilacija i mehaničkih naprezanja.

Prvi set podataka za Pelton turbinu (slika 3.13.) prikazuje korisnost turbine u ovisnosti o protoku vode i broju igala u radu. Krivulje su na mjestima preklapanja produžene zbog postizanja histereze. Time se suzbija učestalo pokretanje i zaustavljanje igala. Oblik grafa sa slike 2.13. dosta nalikuje na graf korisnosti ovisno o snazi i broju aktivnih agregata sa slike 1.1. Istovremeno su na grafu dane vrijednosti otvorenosti igala za postizanje željenog protoka vode na desnoj vertikalnoj osi. To je bitno parametriranje sustava turbinske regulacije.

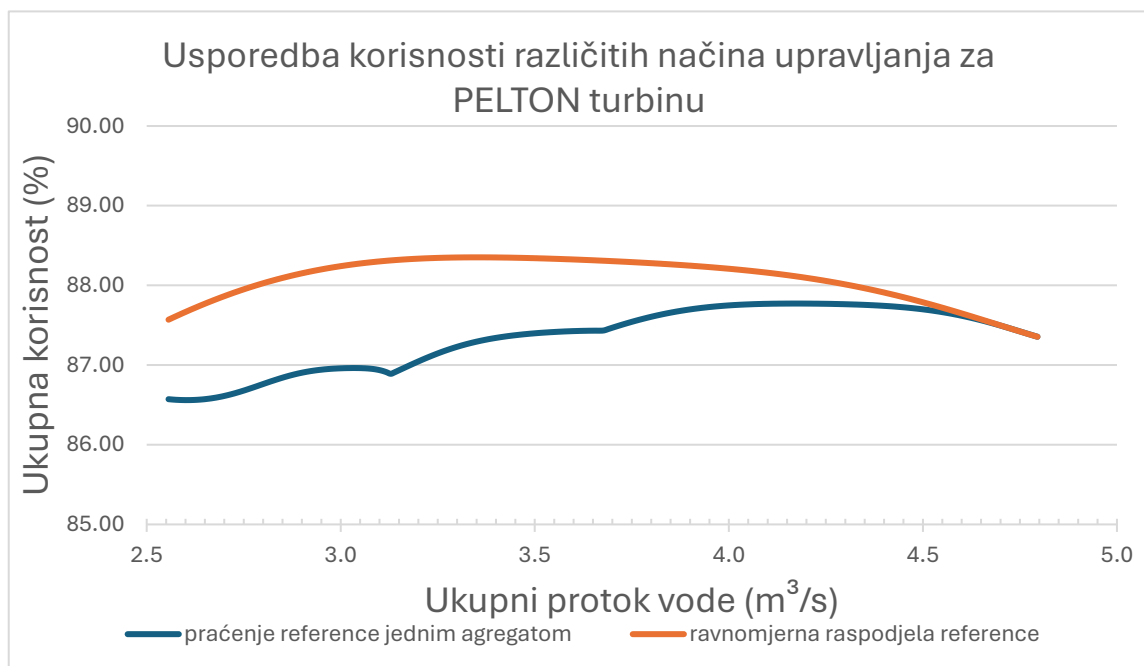


Slika 3.13. Graf korisnosti i otvorenosti igala Pelton turbine za različite protoke i brojeve igala [2]

Za svaki stupanj otvorenosti igala, računa se dobiveni protok. S vrijednošću protoka može se iz grafa sa slike 3.13. izvući korisnost, dok je tlak vode zadana konstanta od proizvođača na kojoj će raditi agregati ($p = 23,32 \text{ bar}$). Na kraju snaga slijedi iz formule (3):

$$P = Q * p * \eta_g \eta_t \quad (3)$$

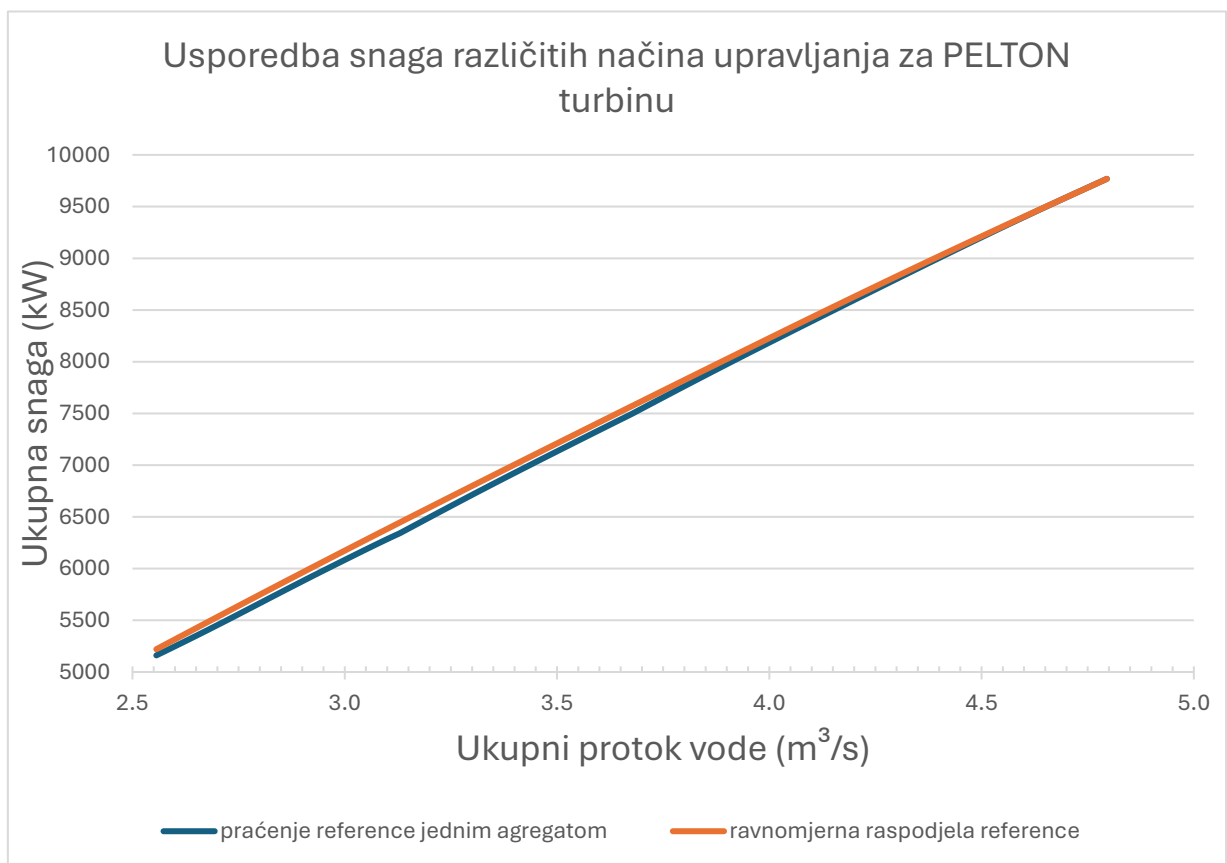
Rezultati izračuna prikazani su grafom slici 2.14.



Slika 3.14. Graf korisnosti ovisno o protoku vode Pelton turbine

Kao što je vidljivo na slici 3.14. ravnomjernom raspodjelom referentnih vrijednosti postiže se veća korisnost, ali isto do 1.5 % slično kao i kod objekta s Francis turbinama. Dodatno, izglađenost krivulje ukazuje na veći interval bez pokretanja i zaustavljanja dodatnih igala u odnosu na krivulju praćenja reference jednim agregatom gdje se krivulja na dva mjesta „lomi“. To međutim nije toliki problem koliko je problem često pokretanje i zaustavljanje cijelog agregata.

Usporedba različitih načina upravljanja Pelton turbinom prikazana je na slici 3.15. Spomenuta jako niska razlika u korisnosti te činjenica da se radi o hidroelektranama malih snaga, dovode do zaključka da ni za jedan od tri analizirana objekta, praćenje referentne vrijednosti jednim agregatom neće dovesti do značajne razlike u gubitcima raspoložive količine energije vode.



Slika 3.15. Graf ukupne snage ovisne o protoku vode

Idejno rješenje za optimizaciju pružili su Bortoni, Bastos i Souza 2007. u članku *Optimal load distribution between units in a power plant* [1] gdje se pokušava agregate s većom učinkovitošću više opteretiti. Dobivanje optimalnih točaka dobiva se iterativnim procesom gdje se dovoljno malim definiranim korakom odmiče od zadanih pojedinačnih referentnih vrijednosti. Razvijeni model može sadržati do 10 aktivnih agregata.

4. FUNKCIJSKI BLOKOVI VEZANI UZ UPRAVLJANJE BROJA AGREGATA

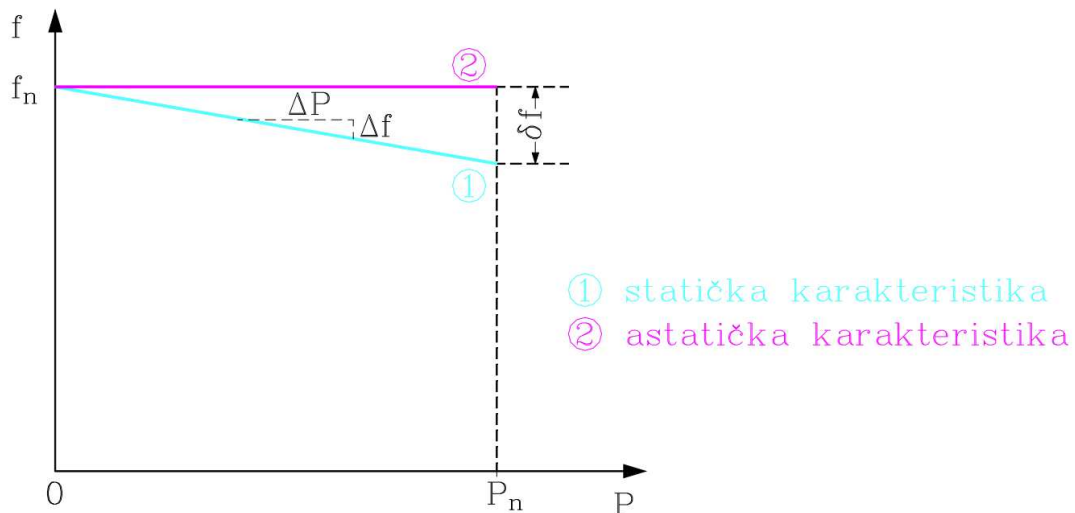
Za upravljanje hidroelektranom najbitnije je prvo odabrati koji će točno agregati biti u radu. To upravljanje izvršavaju funkcijski blokovi koji su međusobno povezani svojim izlazima i ulazima. Blokovi će se opisivati redom kako su numerirani i pozivani u ciklusu izvođenja, bez obzira je li to u svakom slučaju najbolje osmišljeno ili ne.

4.1. *Droop* regulacija

Prvi blok na redu je regulacija frekvencije. Uslijed nejednakosti u potrošnji i proizvodnji te nepostojanja njene regulacije, dolazi do velike mogućnosti ispadanja agregata iz dozvoljenog područja rada. Samim time se ugrožavaju agregati i elektroenergetski sustav (EES). Drugi uzročnici ispadanja agregata kojima se ovaj blok koda ne bavi su težih oblika poput ispadanje jednog ili više proizvodnih, prijenosnih i potrošačkih elemenata.

Postizanje stabilnosti agregata u vezi balansiranja proizvedene i potrošene energije vrši se regulacijom frekvencije jer je njeno odstupanje od nazivnih vrijednosti direktna korelacija spomenute neravnoteže. U suprotnom agregati bi ubrzavali ili usporavali do granice ispadanja ako su u otopnom režimu. Posljedice nedostatka regulacije frekvencije su dodatni gubitci kod asinkronih strojeva i transformatora zbog velikih struja magnetiziranja. Dodatno, uređaji koji ovise o frekvenciji poput električnih satova mjernih uređaja i sl. gube svoju preciznost, a u slučaju većeg odstupanja gube funkcionalnost.

Droop regulacija je način upravljanja frekvencijom s osnovnim principom porasta izlazne snage sa smanjenjem frekvencije i obratno. Kako doći do pravih vrijednosti vezano za pojačanja regulatora objašnjeno je slikom 4.1.



Slika 4.1. Regulacija frekvencije korigiranjem proizvedene snage [3]

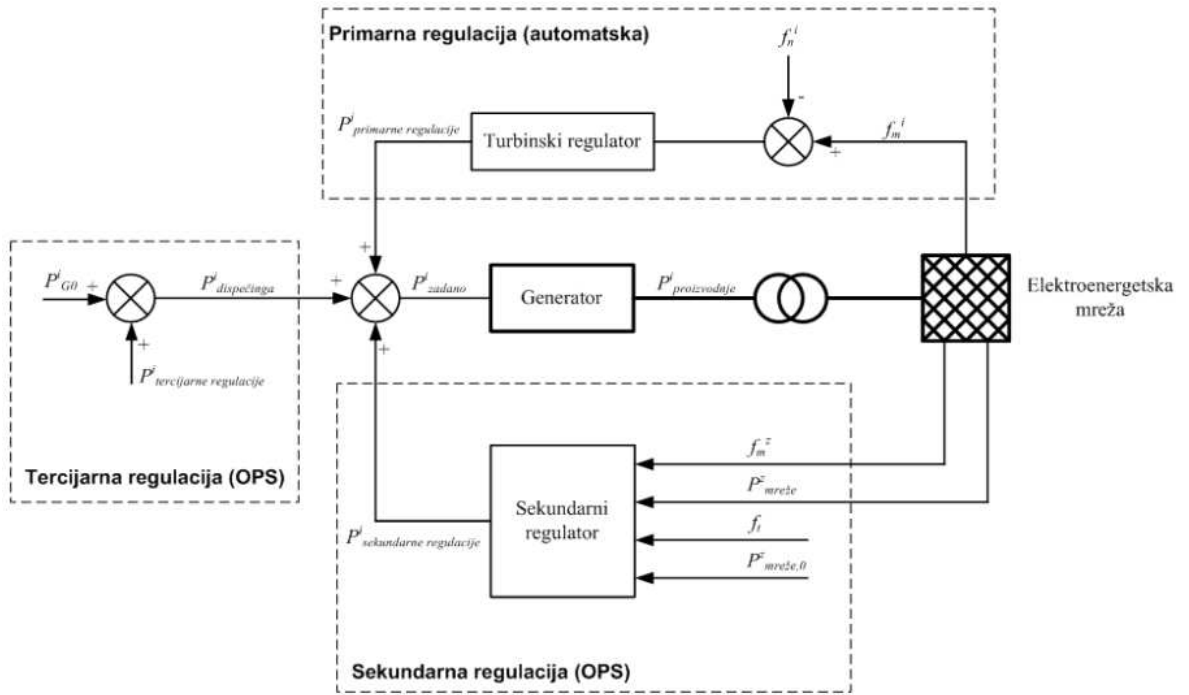
U slučaju 1 (statička karakteristika) nije strogo regulirana frekvencija na zadani iznos već je linearno ovisna o opterećenju agregata. Statičnost ili postotni stupanj nejednolikosti b_p utvrđuje se eksperimentalno sljedećim izrazom (4).

$$b_p \% = \frac{\delta f}{f_n} * 100\% \quad (4)$$

To znači da se odstupanje od 5 % odražava promjenom izlazne snage za 100 %.

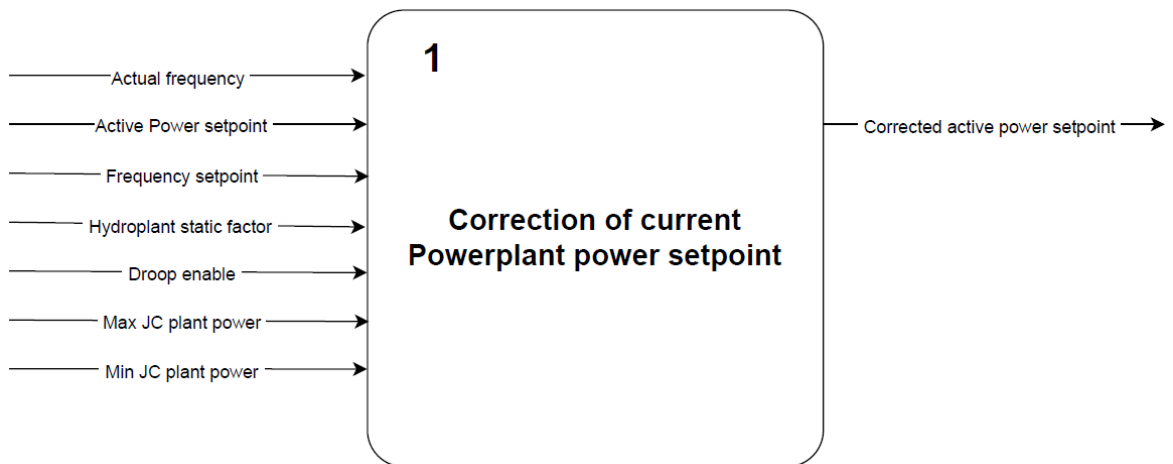
Za potrebe raspodjele opterećenja na više paralelnih generatora, nije poželjan astatički regulator s integralnim članom jer bi se regulatori svakog agregata međusobno borili dovesti frekvenciju sustava na vlastitu zadanu vrijednost. Preostaje raspodjeljivanje opterećenja po krivulji 1 sa slike 4.1. za sve agregate u paralelnom radu. U slučaju otočnog rada astatički regulator je najbolji izbor.

Slika 4.2. prikazuje regulaciju frekvencije među regulacijskim petljama.



Slika 4.2 Razine regulacija f-P u EES-u [3]

Iako je na slici 4.2. prikazana regulacijska petlja za samo jedan agregat, regulacija se vrši na razini hidroelektrane te i dalje spada pod primarnu regulaciju koja prva reagira na poremećaje u ravnoteži proizvedene i potrošene električne energije u mreži. Slika 4.3. prikazuje ulazne i izlazne parametre prvog funkcijskog bloka (FB).



Slika 4.3. Parametri FB regulacije frekvencije

Realiziran kôd prikazan je na slici 4.4. s mogućnošću uključivanja i isključivanja primarne regulacije.

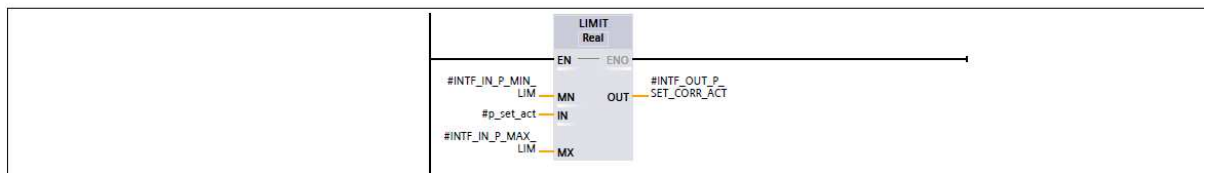
Network 1: [P_SET] correction calculations

biranje opcije droop control-a i računanje regulirane veličine

```
0001 IF #INTF_IN_DROOP_ENB THEN
0002   #freq_act_perc := #INTF_IN_FREQ_ACT / #INTF_IN_FREQ_SET * 100;
0003   #p_set_act := #INTF_IN_P_SET + (100.0 - #freq_act_perc) / #INTF_IN_P_DROOP * #INTF_IN_JC_P_MAX_TOT
0004   ;
0005   ;
0006 ELSE
0007   #p_set_act := #INTF_IN_P_SET;
0008   ;
0009 END_IF;
0010
0011
```

Network 2: [P_SET] setpoint limit

limitiranje izlaza

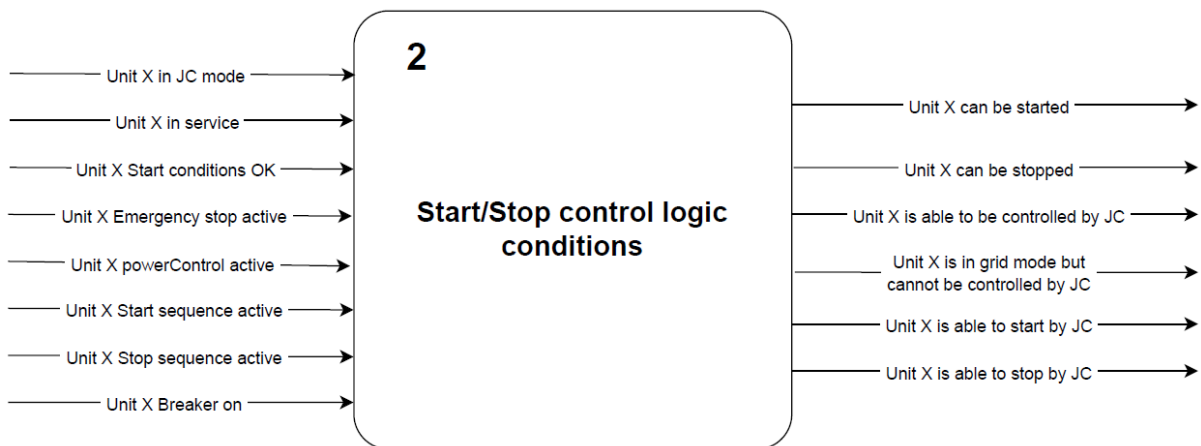


Slika 4.4. Kod FB regulacije frekvencije

Primjena formule (4) vidljiva je u trećem redu koda FB regulacije frekvencije koji će se koristiti kao ulaz za druge blokove.

4.2. Logički uvjeti za pokretanje i zaustavljanje agregata

Signali spremnosti agregata za pokretanje, zaustavljanje i zajedničko upravljanje (engl. *Joint Control – JC*) računaju se po shemi prikazanoj na slici 4.5.



Slika 4.5. FB Start/Stop control logic conditions

Upravljački signali pokretanja, zaustavljanja, parametri zadavanja referentne snage itd. se često koriste u drugim blokovima jer je nužno raspolaganje informacijama poput koji agregati su dostupni, koji su trenutno nezavisni u radu, koji se mogu zaustaviti, kojima zajedničko upravljanje (JC) može zadavati referentnu vrijednost. Unatoč implementiranoj

logici bloka 2, potrebno je cijelo vrijeme voditi računa o stanjima pojedinih agregata te kako će se sustav ponašati u slučaju bilo kakvih promjena kako bi ostao stabilan i održiv.

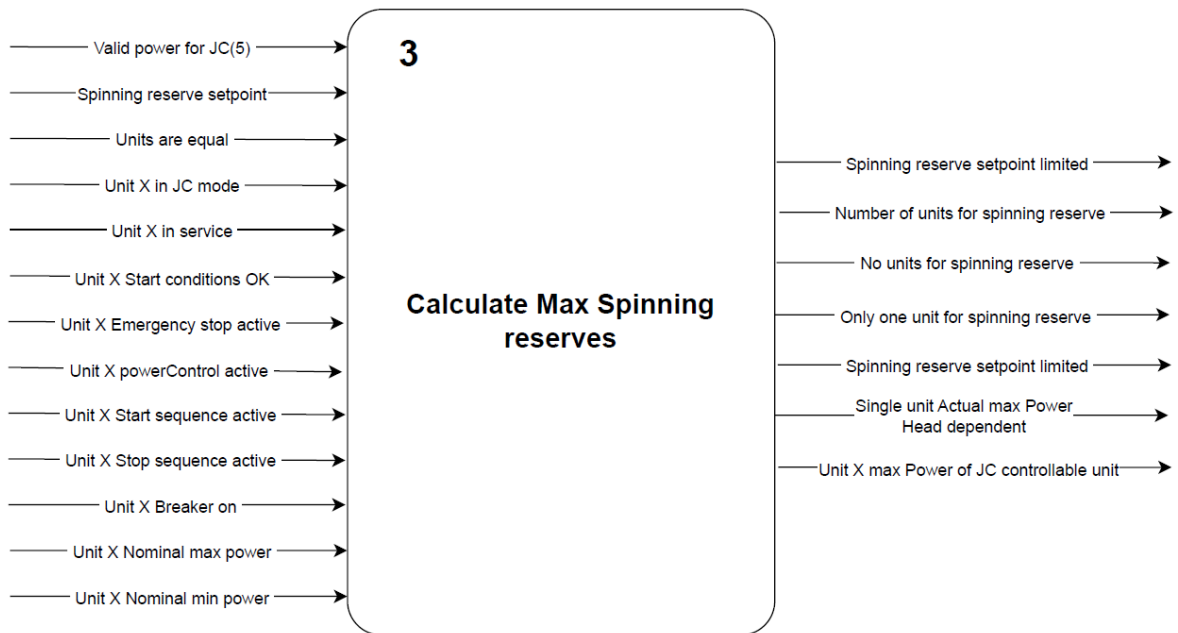
4.3. Računanje maksimalne rotirajuće rezerve

Rotirajuća rezerva je, ukratko rečeno, ukupna neiskorištena snaga agregata koji su spojeni na mrežu i u najkraćem roku mogu utjecati na proizvedenu radnu snagu. Padom frekvencije raste potreba proizvodne snage koja, ako nije osigurana, narušava integritet sustava. Slika 4.6. prikazuje kako postoje neke granice na koje sustav mora adekvatno reagirati kada se one prijeđu. Rotirajuća rezerva s regulacijom frekvencije spada pod „Područje frekvencije na kojem se aktivira rotirajuća pričuva“ (slika 4.6.).



Slika 4.6. Stanja sustava ovisna o frekvenciji [3]

Maksimalna rotirajuća rezerva koju HE može ostvariti ovisi o raspoloživosti agregata, njihovim snagama te trenutno dostupnoj snazi vode. S njom se limitira trenutna referentna vrijednost rezerve da se elektrana ne bi trudila ispuniti nešto što ne može. U poglavlju 4.6. objašnjeno je kako se računa rotirajuća rezerva, a parametri bloka prikazani su slikom 4.7.

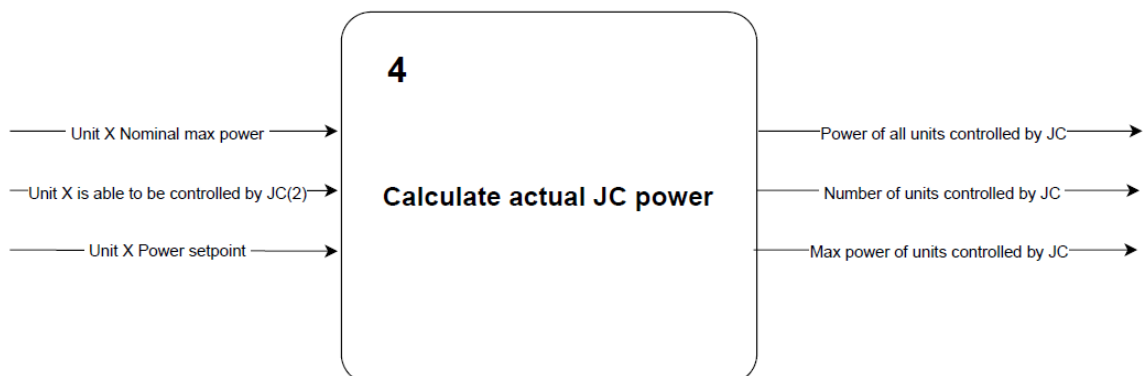


Slika 4.7. FB Calculate Max Spinning reserves

Uz maksimalno rotirajuću rezervu, blok računa i signale stanja vezanih uz upravljanje rotirajućom rezervom.

4.4. Sumacija snaga JC agregata

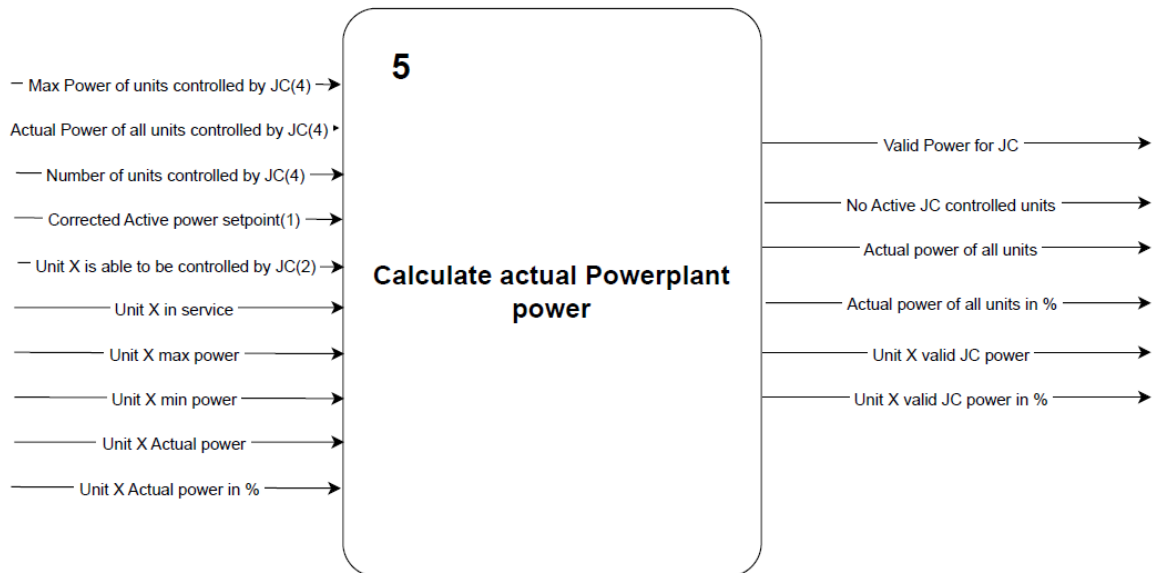
Izlazni parametri sljedećeg funkcijskog bloka (FB) prikazanih na slici 4.8. bit će suma trenutnih zadanih referentnih vrijednosti i suma maksimalnih snaga agregata koji sudjeluju u zajedničkom upravljanju (JC). Oni su nužni za računanje raspoložive snage koja će se raspodjeljivati na agregate već u sljedećem poglavlju.



Slika 4.8 FB Calculate actual JC power

4.5. Računanje preostalih snaga u hidroelektrani

Na popisu izlaznih parametara sa slike 4.9. pojavljuje se parametar „Unit X Valid JC power“ koji će biti podjednako raspodijeljena referenca svakog agregata.

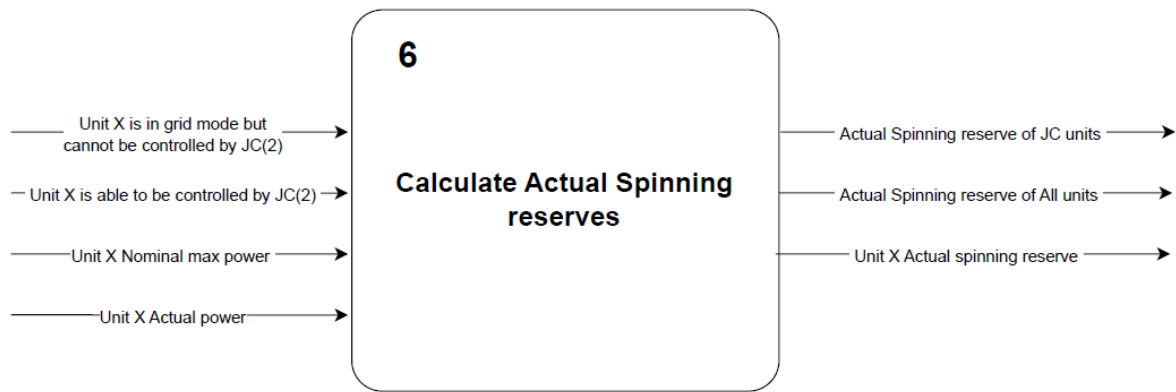


Slika 4.9. Calculate actual Powerplant power

Izlazni signal Valid Power for JC je referentna vrijednost koja će najviše pridonijeti odluci o potrebnom novom pokretanju agregata ili zaustavljanju. U slučaju kada nema agregata spojenog na mrežu u neovisnom radu, validna snaga je jednaka ukupnoj referentnoj snazi HE. Postotna vrijednost raspodijeljene reference agregata se zasebno računa i sprema, a skalira se od minimalne do maksimalne snage agregata.

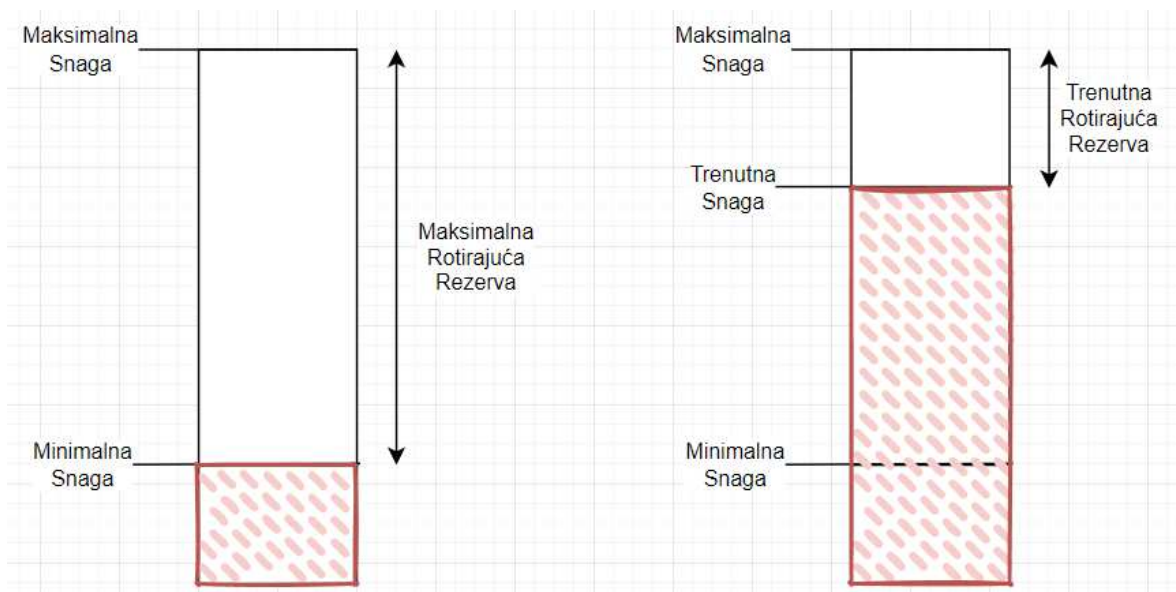
4.6. Računanje trenutne rotirajuće rezerve

Maksimalna rotirajuća rezerva bila je potrebna za ograničavanje referentne vrijednosti rezerve dok izračunom trenutne rotirajuće rezerve JC aktivnih i neaktivnih agregata provjeravamo u kojoj mjeri je ispoštovana referentna vrijednost tj. sam zahtjev HE. Funkcija bloka 6 sa slike 4.10. je samo davanje informacije o trenutnoj količini rezerve.



Slika 4.10. FB Calculate Actual Spinning reserves

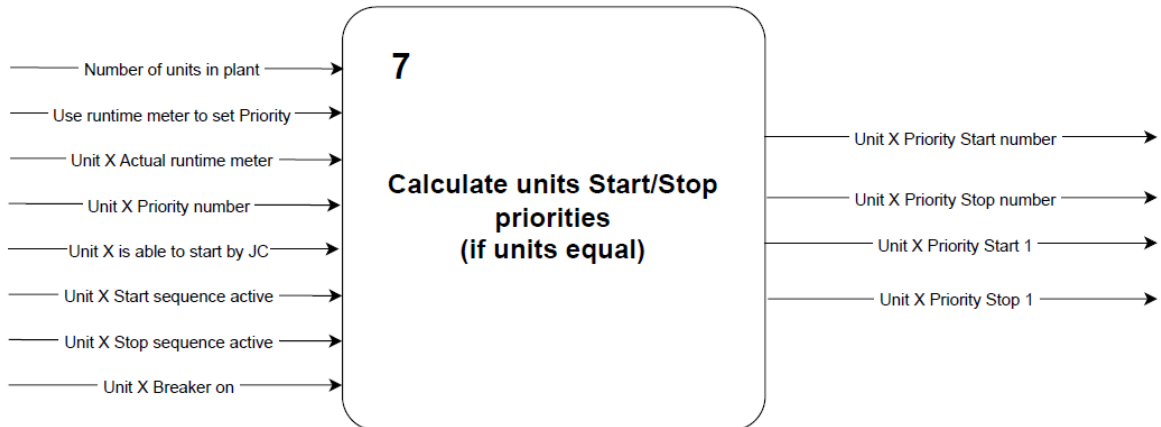
Slika 4.11. prikazuje navedene odnose, a veličine se mogu interpretirati na razini jednog agregata i na razini cijele HE. Izračun za trenutnu rotirajuću rezervu bio bi razlika maksimalne snage koju agregat može proizvesti i trenutne snage koju proizvodi, a ukupna trenutna rotirajuća rezerva je time suma svih rezervi agregata koji su u JC. Maksimalna rotirajuća rezerva za FB 3 iz poglavlja 4.3 se računa kao da je trenutna snaga svih agregata minimalna.



Slika 4.11. Rotirajuće rezerve agregata

4.7. Prioriteti pokretanja i zaustavljanja

U slučaju naloga za pokretanjem novog ili zaustavljanjem nekog od trenutno aktivnih agregata, prioritet će odrediti izlazni parametar sa slike 4.12. „Unit X Priority Start 1“ odnosno „Unit X Priority Stop 1“ gdje X označava redni broj agregata.



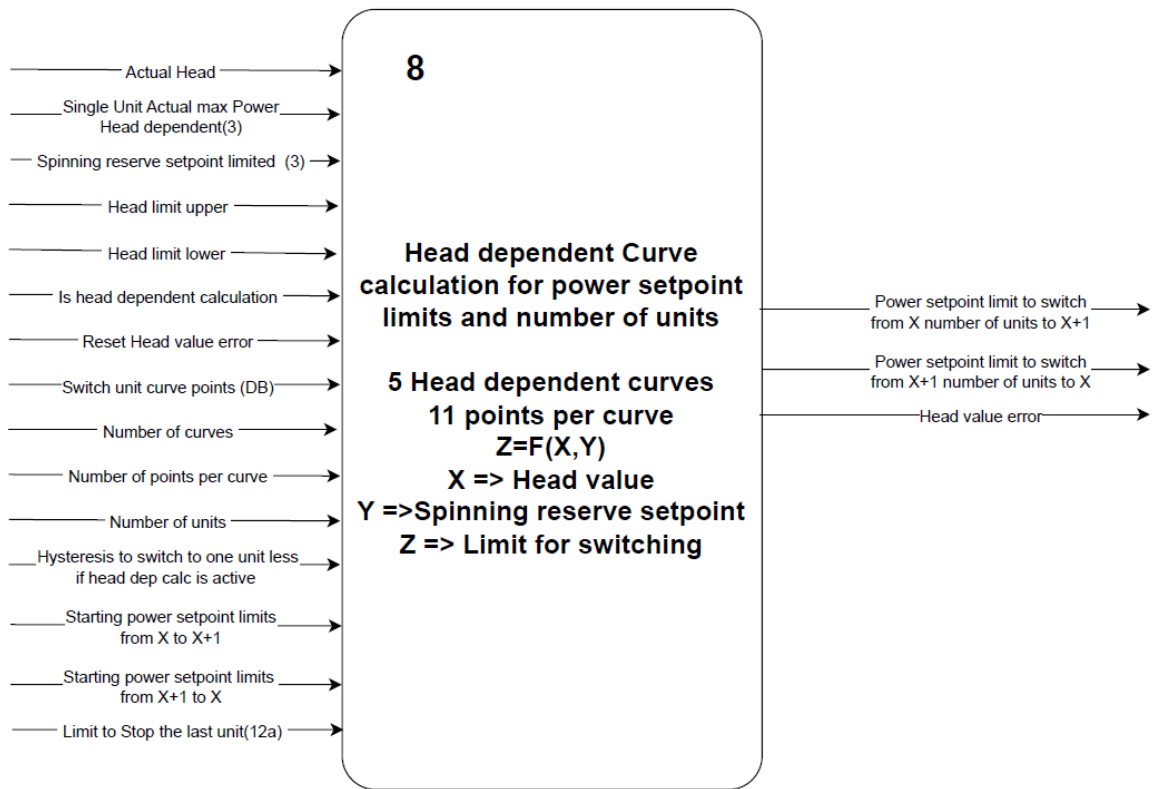
Slika 4.12. FB Calculate units Start/stop priorities

Ako su svi agregati jednaki, cilj ih je podjednako opteretiti. To znači da će se uspoređivati broj radnih sati te će prioritet imat onaj s najmanje sati. Ostaje naravno opcija da se ručno zada lista prioriteta putem ulaza Unit X Priority number. Kako bi agregat imao najviši prioritet pokretanja ili zaustavljanja, mora biti JC upravljiv. U slučaju da agregati nisu isti, drugim blokom će se kasnije odrediti prioritet.

4.8. Računanje točaka prelaska na više ili manje agregata

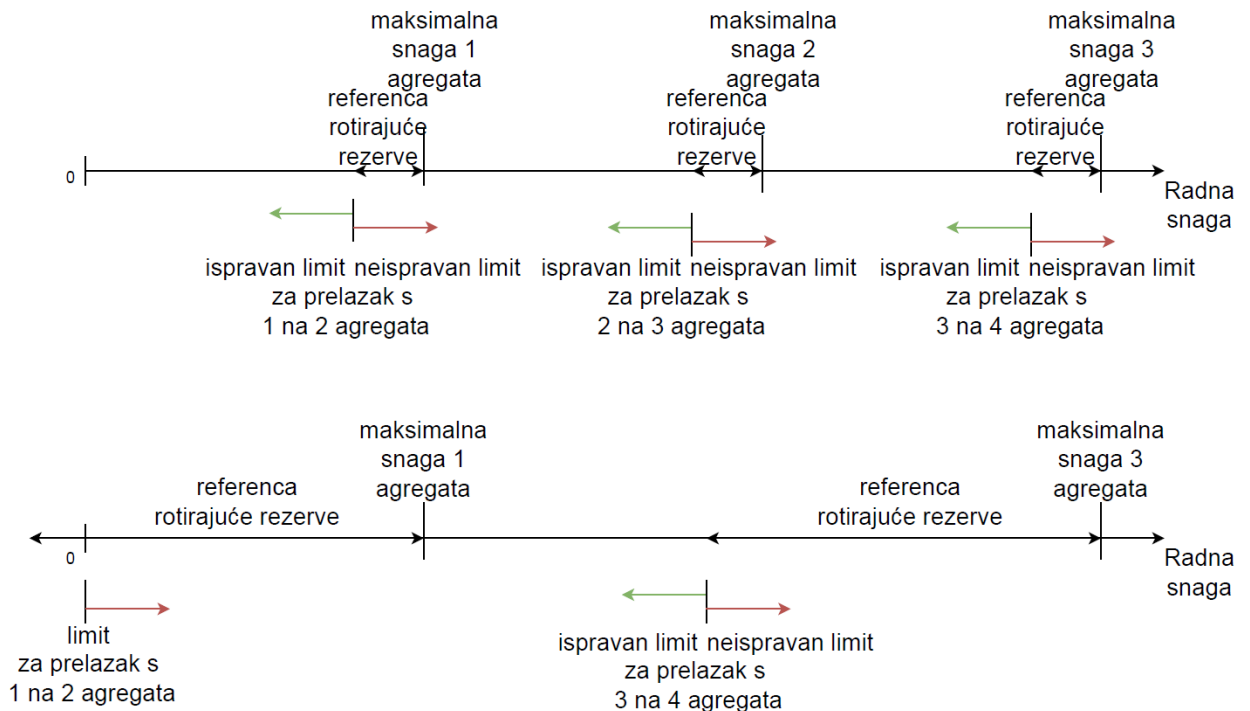
Povećanjem referentne snage približava se točki povećanja broja agregata. Te točke određene su limitima koji se u jednostavnijoj varijanti mogu ručno zadati. Njihova provjera uključuje da li broj agregata, određen tom intervalu, može zadovoljiti trenutnu referentnu snagu i rotirajuću rezervu. U složenijoj izvedbi uzima se u obzir i raspoloživa snaga vode te limiti odjednom postaju funkcija dviju varijabli.

Slika 4.13. prikazuje sve ulaze potrebne za ispravne vrijednosti limita za pokretanje i zaustavljanje agregata.



Slika 4.13. FB Head dependent curve calculation for power setpoint limits

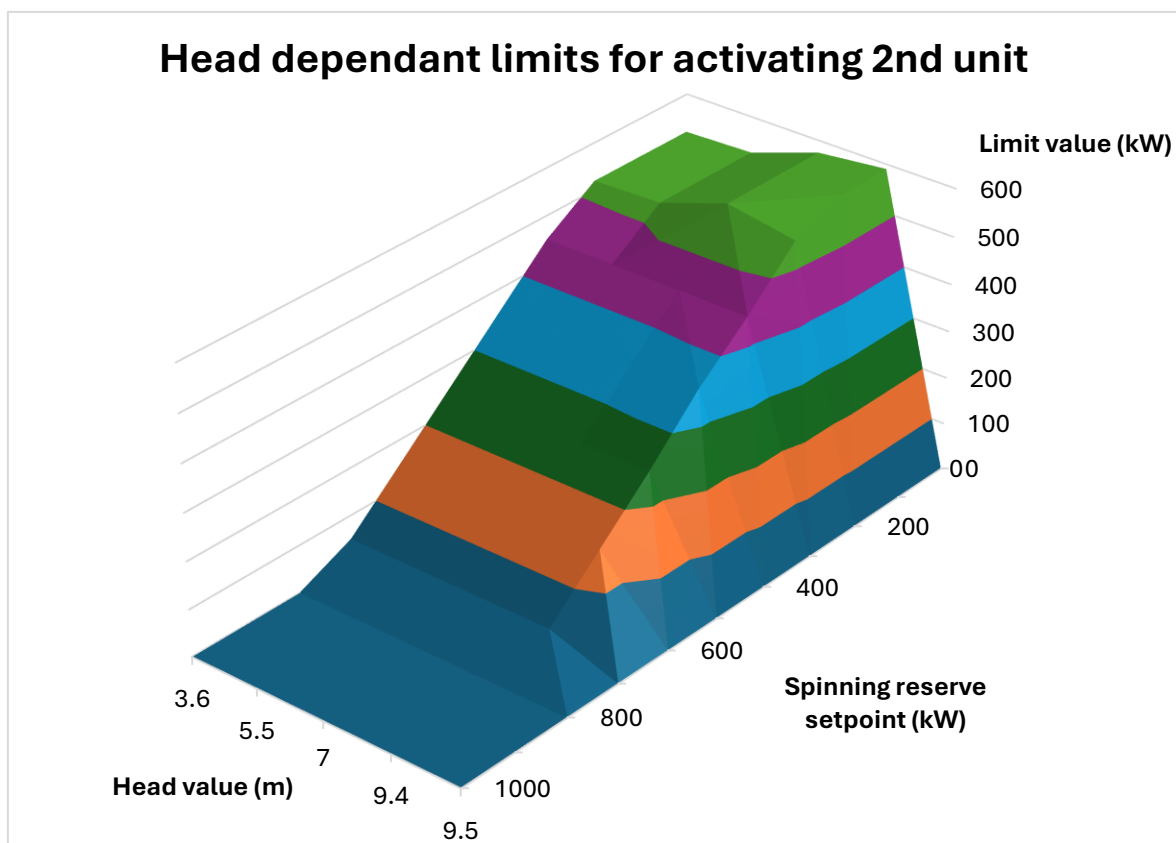
Provjeru ručno zadanih limita izvršava jedna od unutarnjih funkcija (FC CalcSwitchPoints) čiji je koncept prikazan slikom 4.14.



Slika 4.14. Provjera valjanosti vanjskog limita za pokretanje ili zaustavljanje agregata

Prema konceptu sa slike 3.14. nedovoljno niski limiti postavljaju se na maksimalnu moguću vrijednost u kojoj se može doseći referentna snaga i da se zadovolji referentna rotirajuća rezerva. U slučaju negativne maksimalne moguće vrijednosti, limit se postavlja na nulu. Konačna logika za izdavanje naloga za pokretanje ili zaustavljanje će uskoro biti opisana, a u suštini samo provjerava je li referentna snage veća ili manja naspram zadanih ili izračunatih limita.

U drugoj spomenutoj varijanti, limiti se zadaju preko krivulja ovisnih o rotirajućoj rezervi te dodatno i o raspoloživoj snazi vode. Metoda dobivanja tih točaka nije potpuno jasna niti će se u ovom radu to istraživati. Graf na slici 4.15. prikazuje moguće vrijednosti funkcije dviju varijabli, referentna rotirajuća rezerva i neto visina pada vode. Vidi se ranije objašnjena obrnuta proporcionalnost, što je veća potrebna rotirajuća rezerva to su manji limiti. Uglavnom, ako se točka referentne snage nalazi iznad same površine grafa, potrebno je pokrenuti sljedeći agregat s najvišim prioritetom.



Slika 4.15. Limiti ovisni o neto padu vode i referentnoj vrijednosti rotirajuće rezerve

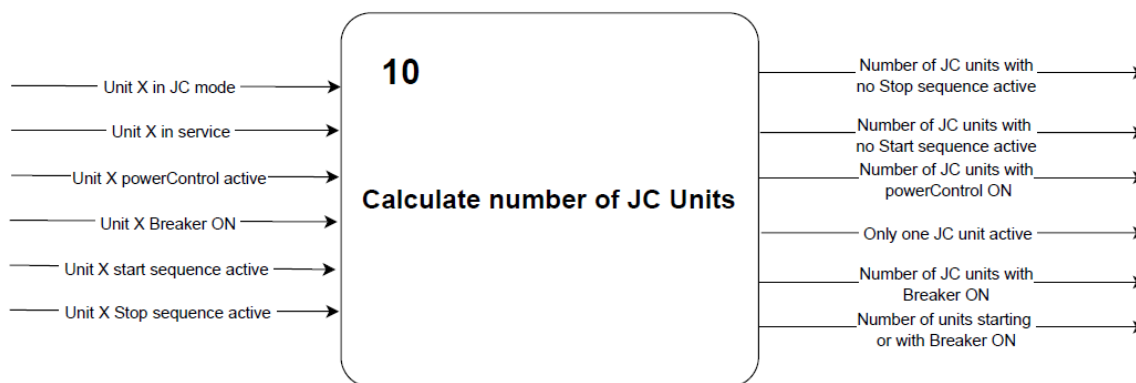
S obzirom na to da će se prave vrijednosti visine vode i referentna vrijednost rotirajuće rezerve nalaziti između točaka krivulja, potrebno je napraviti 3D interpolaciju za dobivanje željenih vrijednosti limita.

Kretanje referentne vrijednosti ukupne snage oko limita bi značilo učestalo pokretanje i zaustavljanje agregata koje se izbjegava u situacijama gdje nema potrebe. Zato je potrebno osigurati histerezu limita za zaustavljanje agregata. Računa se umanjivanjem limita pokretanja agregata za iznos histereze. Razlika limita zaustavljanja s dva na jedan agregat, odnosno pokretanja s jedan na dva agregata, je iznos prve histereze. Za sljedeći limite po redu (s tri na dva i s dva na tri agregata) iznos histereze je pomnožen s 2, a iznos histereze idućeg para limita bit će pomnožen s 3, itd. Povećanje iznosa histereze s brojem agregata proizlazi iz razloga što veći broj agregata ima veću količinu rotirajuće rezerve koja se neće tako brzo iscrpiti kao kod slučaja s manjim brojem agregata u radu.

Na kraju bloka sprema se zadnja valjana vrijednost visine vode u slučaju da u sljedećem ciklusu dođe vrijednost visine vode s kojom blok ne može računati, tj. ne nalazi se na 3D grafu.

4.9. Brojanje agregata u određenim stanjima

Svrha FB 10 je mogućnost baratanja informacijama o broju raspoloživih agregata cijele HE. Sami nazivi izlaznih parametara sa slike 4.16. daju objašnjenje o kojoj vrijednosti se radi.

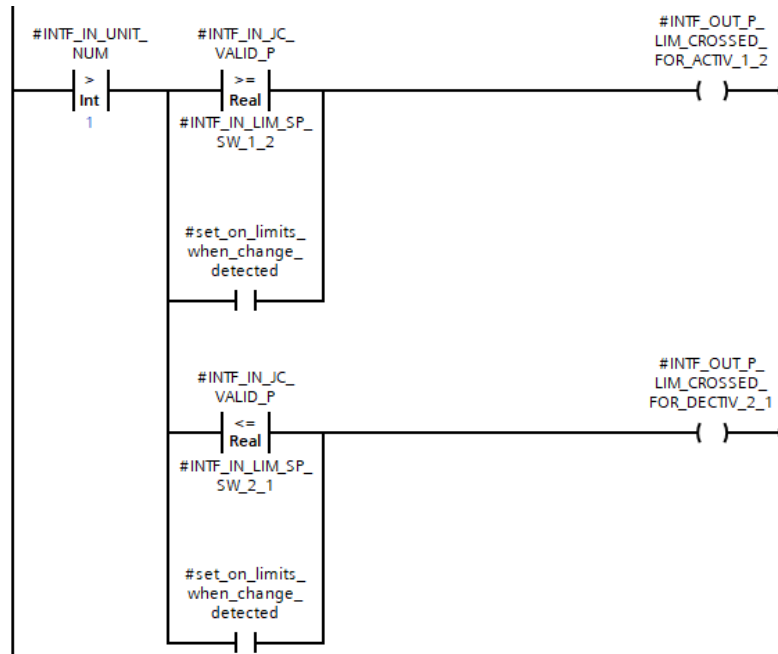


Slika 4.16. FB Calculate number of JC Units

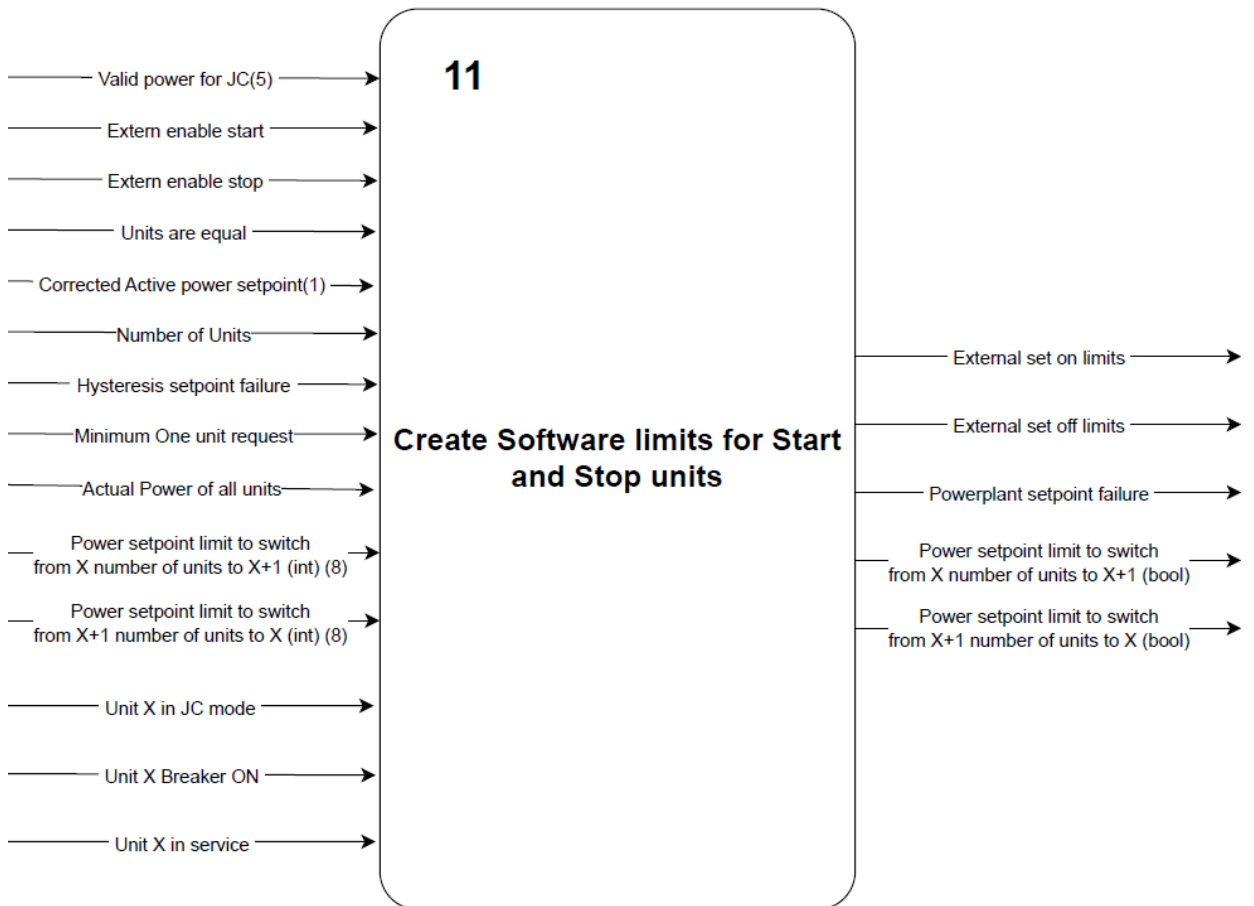
4.10. Uspoređivanje limita sa zadanom referentnom snagom

FB 11 na temelju ulaznih limita i referentne snage za JC aktivne agregate (Valid Power for JC) daje izlaze tipa bool. Ako je referentna snaga za JC agregate veća od limita za pokretanje npr. četvrtog agregata, izlaz za pokretanje četvrtog agregata je aktivan (slika 4.17.). Četvrti

u ovom kontekstu označava posljednji agregat s najnižim prioritetom koji može biti bilo koji u nizu.

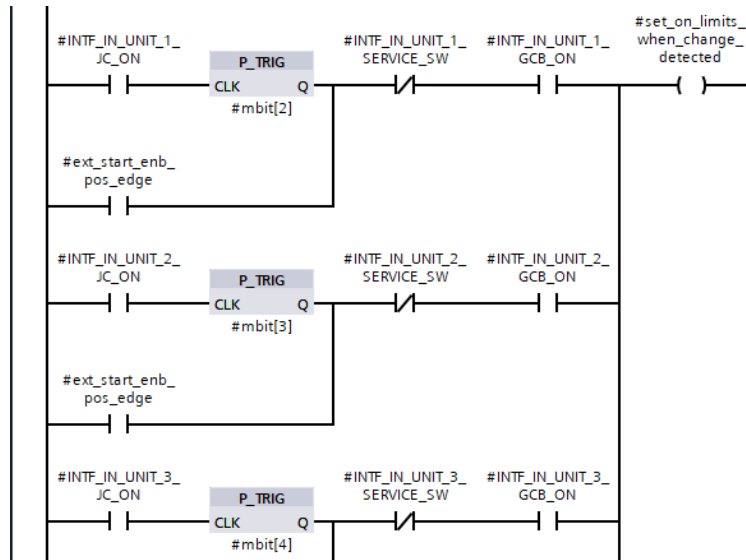


Slika 4.17. Dio koda FB 11 koji provjerava odnos referentne snage i limita



Slika 4.18. FB Calculate Software limits for Start and Stop units

Na slici 4.18. među izlaznim parametrima nalazi se signal „Powerplant setpoint failure“ koji će u aktivnom stanju sprječavati neispravne referentne vrijednosti te zadržati zadnje ispravne.

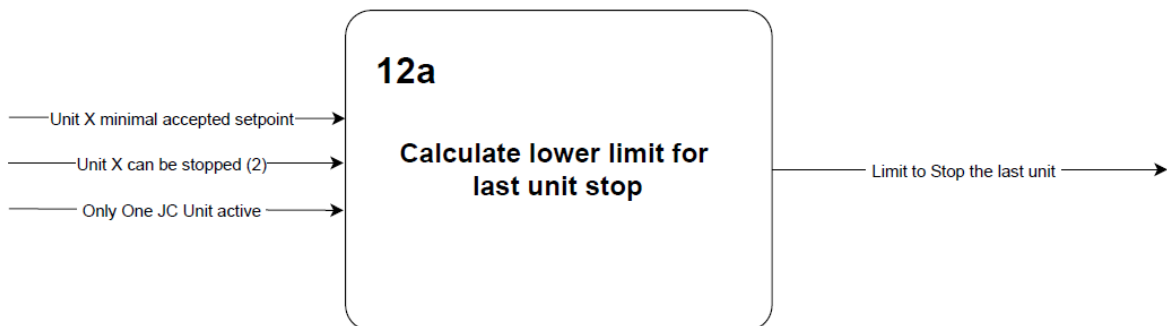


Slika 4.19. Dio koda FB 11 koji zaobilazi uvjete odnosa referentne snage i limita

Dodatnu stvar na koju pazi ovaj FB je slučaj u kojem agregat spojen na mrežu, a JC neaktivan, odjednom postane JC aktivan. Dozvoljava se pokretanje i zaustavljanje bez obzira na limite jedan ciklus PLC-a zbog naglih promjena referentne vrijednosti Valid Power for JC (izlaz bloka 5) te Power of all units controlled by JC (izlaz bloka 4). Dio tog koda je na slici 4.19.

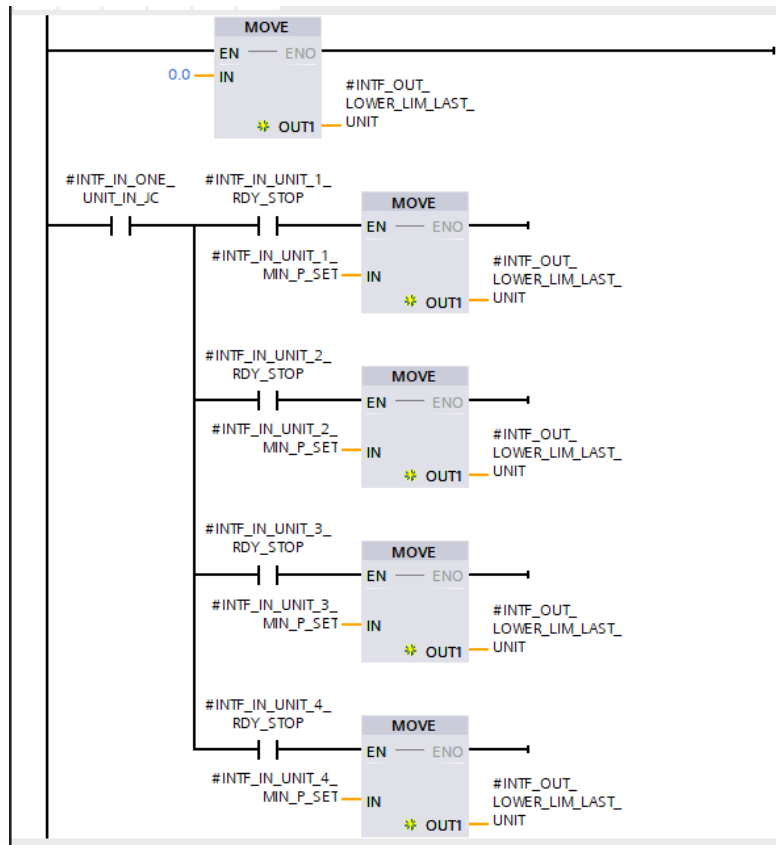
4.11. Limit za zaustavljanje posljednjeg agregata

Blok ukratko radi ono što mu ime kaže, a to je da od zadnjeg agregata koji je u radu vrati minimalnu dozvoljenu referentnu snagu ispod koje će se zaustaviti (slika 4.20.).



Slika 4.20. FB Calculate lower limit for last unit stop

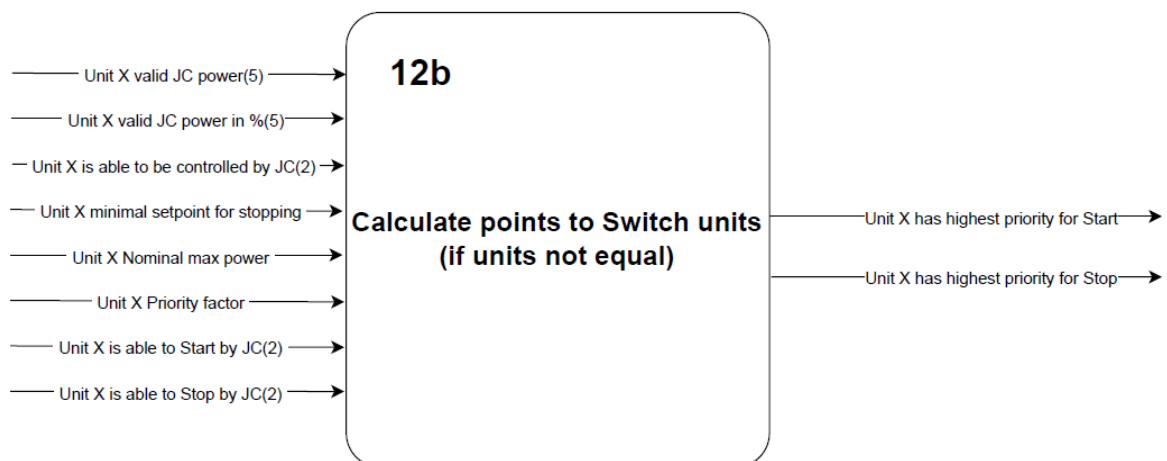
Kod mu je dosta sažet i stane cijeli u jednu sliku (slika 4.21.)



Slika 4.21. Dio koda FB 12a za dobivanje limita zaustavljanja zadnjeg JC agregata

4.12. Prioriteti pokretanja i zaustavljanja

Blok 7 „Calculate Units Start/Stop Priorities“ već je izračunao prioritete agregata. U ovom slučaju agregati su različiti i nije cilj podjednako ih opteretiti. Blok 12b (slika 4.22.) računa prioritete pokretanja agregata gdje se najveći prioritet daje agregatu s najmanjom maksimalnom snagom.



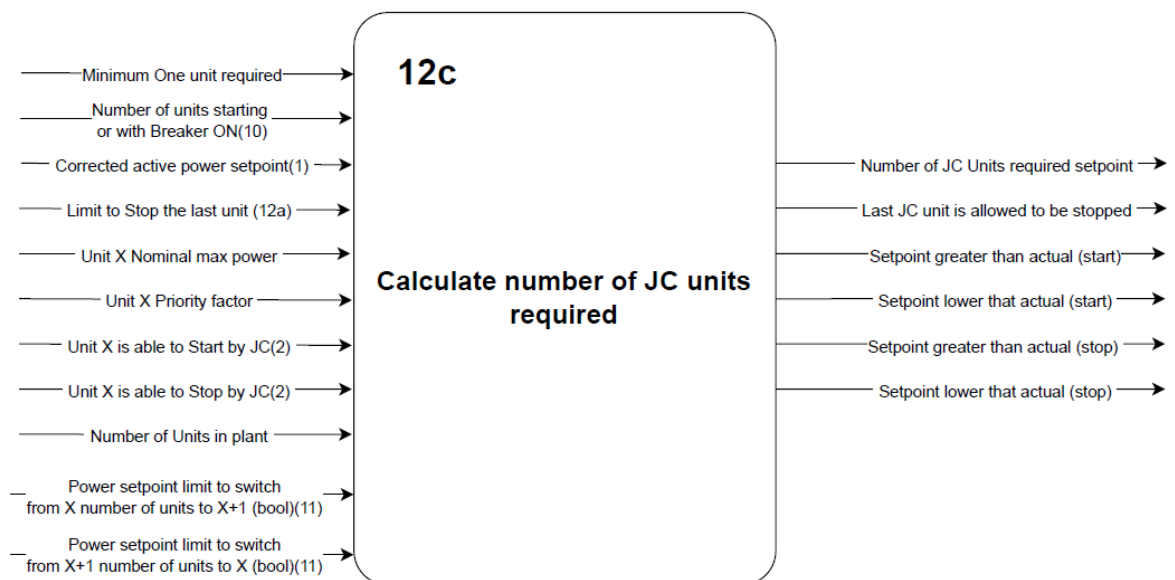
Slika 4.22. FB Calculate points to Switch units

Takav je slučaj kada je svima vrijednost ulaznog parametra „Unit X Priority factor“ jednaka 1. Izmjenom tih vrijednosti moguće je uvažiti neke druge faktore ili zahtjeve HE koje se teže kvantificiraju, a trebale bi se uvažiti pri samoj odluci dodjeljivanja prioriteta.

4.13. Računanje potrebnog broja agregata

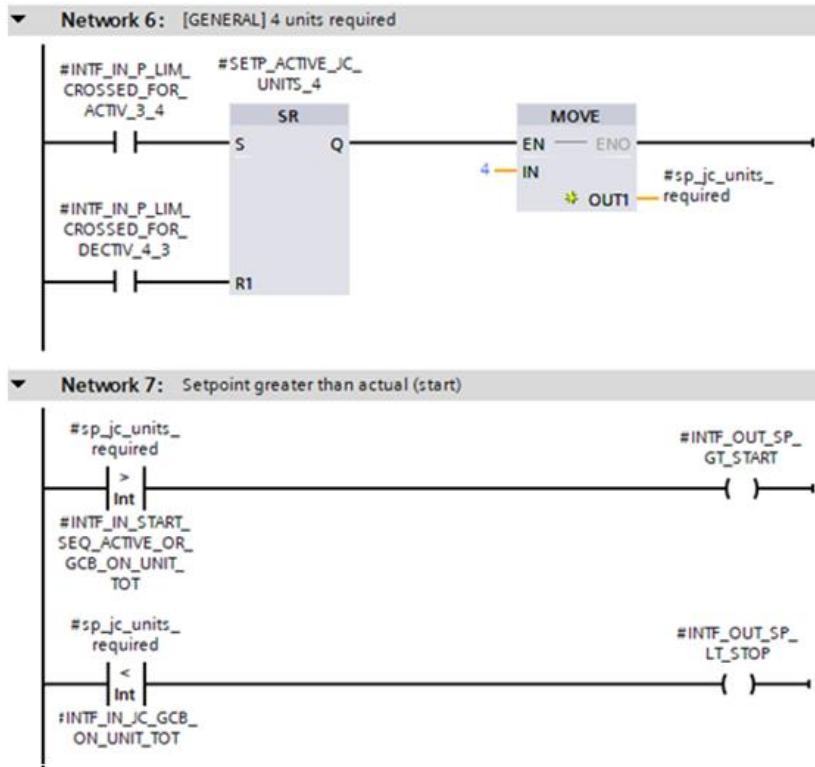
Izračun potrebnog broja agregata, nakon do sada dobro definiranih i kodiranih blokova, svodi se na setiranje (trajno postavljanje izlaza u 1) i resetiranje (trajno postavljanje izlaza u 0) bistabila. Bez pamćenja prijašnjeg stanja ne može se ostvariti željeno ponašanje histereze.

Slika 4.23. prikazuje ulazne i izlazne parametre za računanje potrebnog broja agregata za postizanje željene snage i rotirajuće rezerve.



Slika 4.23. FB Calculate number of JC units required

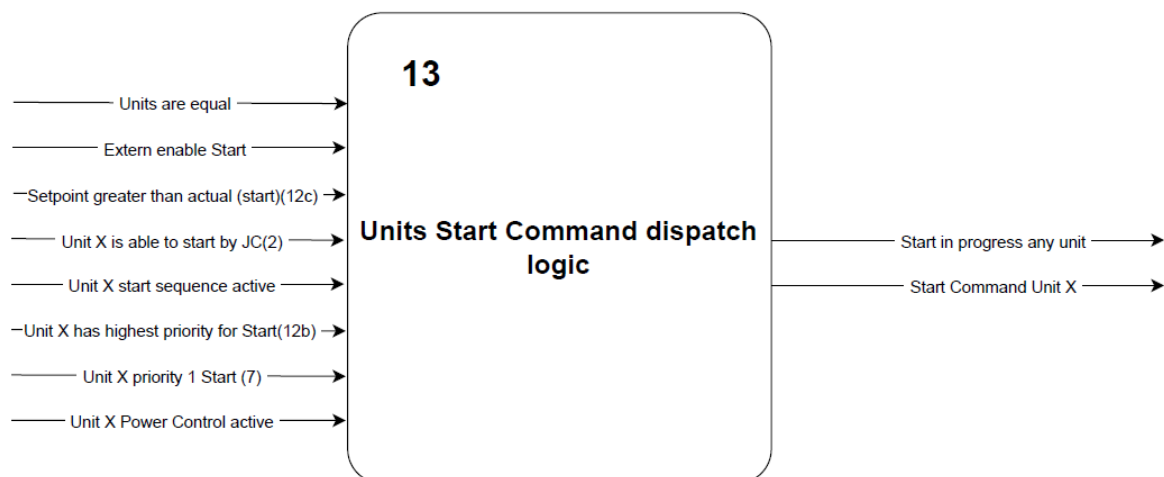
Uspoređujući konačno dobiveni broj potrebnih agregata s trenutnim stanjem, ispunjava se uvjet za pokretanje dodatnog ili zaustavljanje jednog od trenutnih agregata. Na slici 4.24. prikazan je dio koda za računanje potrebnog broja agregata.



Slika 4.24. Dio koda FB 12c za provjeru potrebnog i trenutnog broja agregata

4.14. Logika pokretanja agregata

Svi dosadašnji blokovi bili su potrebni za donošenje konačne odluke koji agregati i kada će se pokretati i zaustavljati. Za to će biti odgovorna sljedeća dva bloka prikazana na slikama 4.25. i 4.27.



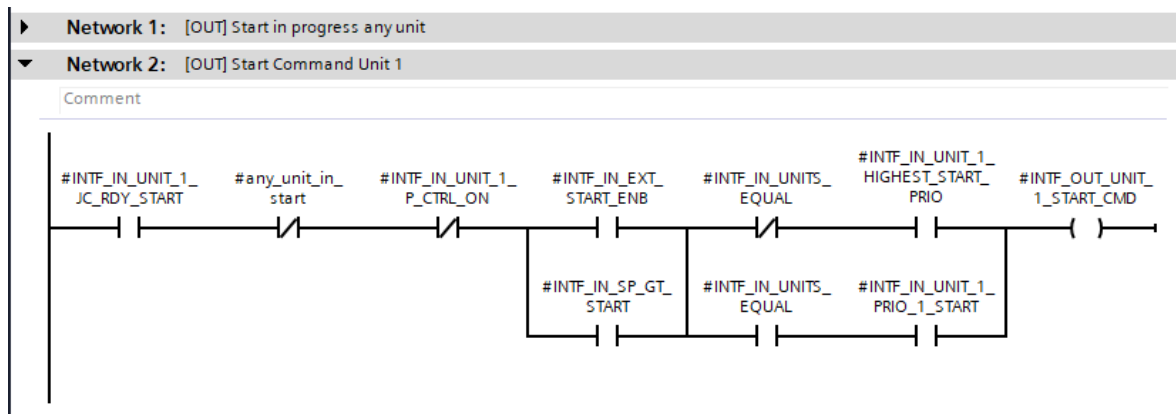
Slika 4.25. FB Units Start Command dispatch logic

Kao što se vidi na slici 4.25. konačni blok, koji će agregatu spremnom za primanje i izvršavanje naredbe poslati zahtjev za pokretanje, ima jednostavnu, ali bitnu logiku s ulaznim parametrima iz prethodnih blokova.

Agregat se pokreće ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti navedenim redoslijedom: 1. agregat je spreman za primanje naloga iz bloka JC_RDY_START, 2. Niti jedan drugi agregat nije trenutno u procesu pokretanja, 3. Agregat nije u regulaciji snage, 4. Zadovoljen je limit za pokretanje, tj. sinkroniziranje, 5. Agregat je sljedeći na redu po prioritetu.

Može se uočiti još i signal EXT_START_ENB koji zaobilazi sve prijašnje proračune limita, rotirajuće rezerve, broj agregata i sl. Takvi prečaci tipični su za ručna upravljanja.

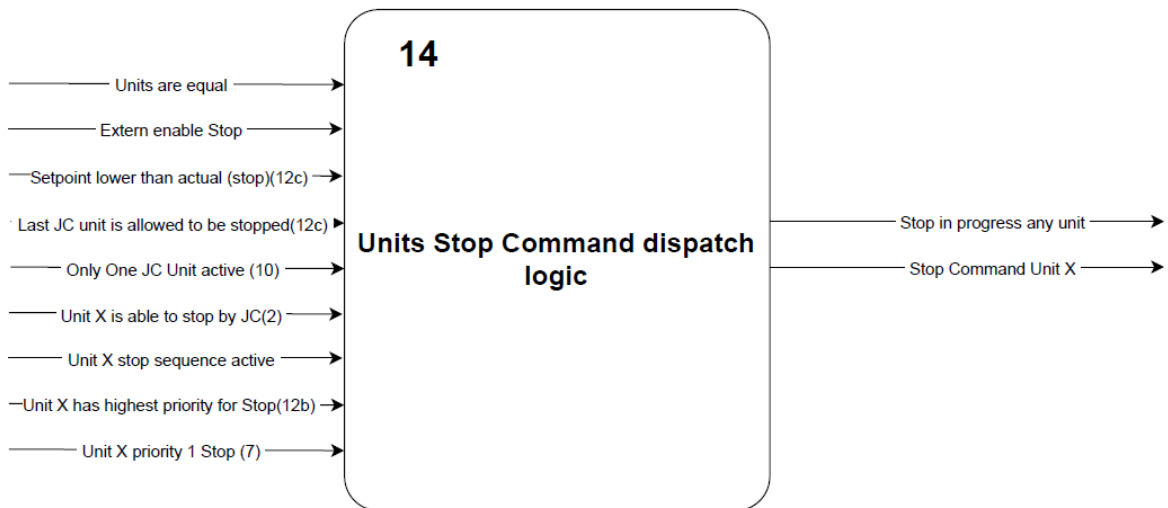
Dio koda FB 13 za pokretanje agregata broj br. 1 prikazan je na slici 4.26.



Slika 4.26. Dio koda FB 13 za pokretanje agregata broj br. 1

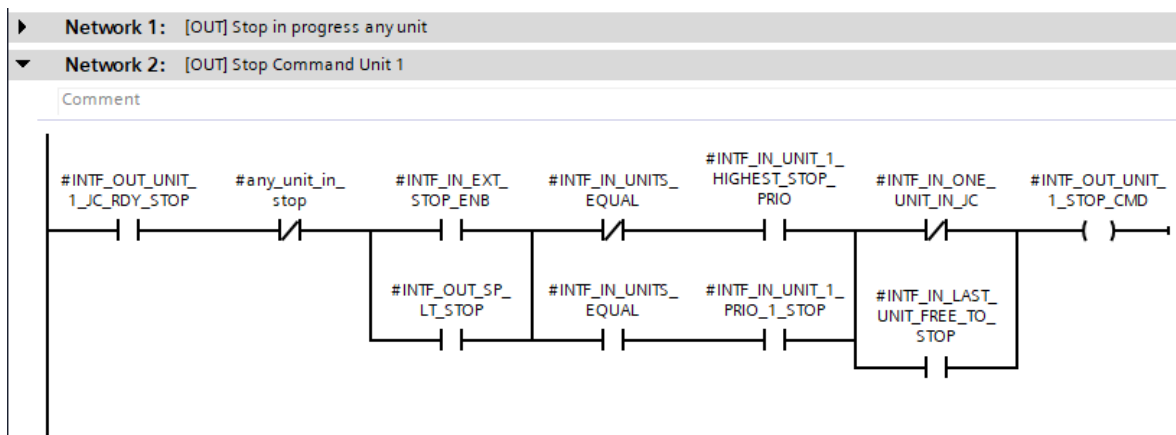
4.15. Logika zaustavljanja agregata

Logika zaustavljanja agregata je slična logici pokretanja, gdje isto postoji mogućnost zaobilaženja uvjeta, ali uz jedan dodatni uvjet. Razlika je, naime, u provjeri je li ostao samo jedan agregat aktivan i smije li se i on zaustaviti, tj. smije li HE ostati bez ijednog aktivnog agregata. Slika 4.27. prikazuje ulazne i izlazne parametre bloka zaustavljanja.



Slika 4.27. FB Units Stop Command dispatch logic

Istovremeno zaustavljanje, kao i istovremeno pokretanje, više agregata nije moguće zbog negiranog signala „any_unit_in_stop“ u grani na slici 4.28.



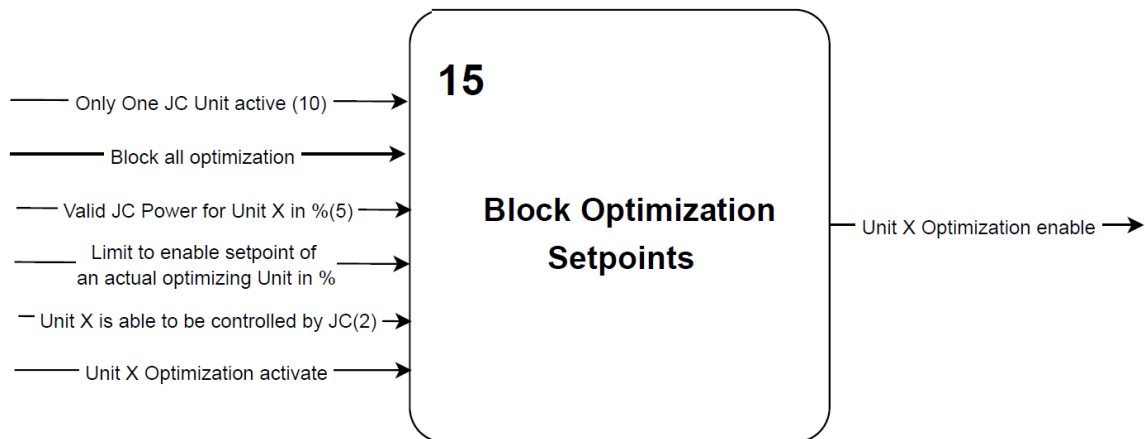
Slika 4.28. Dio koda FB 14 za zaustavljanje agregata br. 1

5. RASPODJELA RADNE SNAGE

Analiza provedena na početku rada dovela je do zaključka da podjednaka raspodjela referentne vrijednosti snage na agregate ima nešto veću korisnost. Također je spomenuto da ta razlika korisnosti u načinima upravljanja nije toliko drastična tako da bi modularnost koda promjenom i nadopunom određenih parametara trebala omogućiti oba tipa upravljanja.

5.1. Selektiranje jednog agregata za regulaciju

Funkcijski blok 15 služi za odabir agregata koji će biti u optimizaciji, odnosno regulaciji referentne vrijednosti. Ovisno o zadnjem aktivnom nalogu za optimizaciju, uvijek će samo jedan agregat biti u optimizaciji. U slučaju naloga za više agregata, aktivan će biti samo prvi po redu te ih mora biti minimalno dva kako bi jedan od njih bio u optimizaciji. Slika 5.1. prikazuje blok za optimizaciju raspodjele snage agregata.

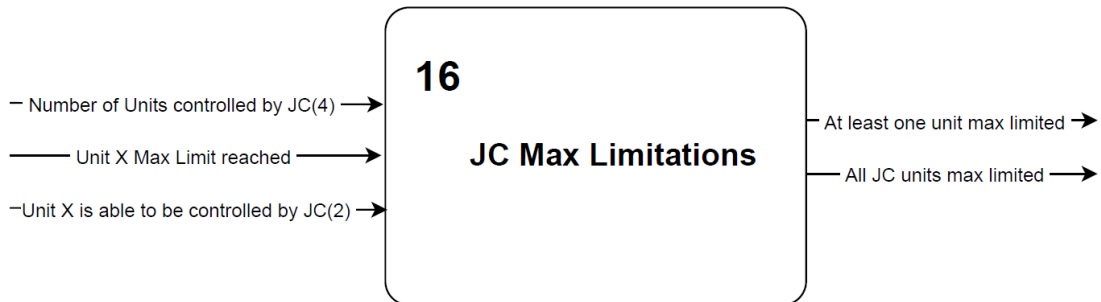


Slika 5.1. FB Block Optimization Setpoints

Na slici 5.1. među ulaznim parametrima nalazi se limit koji razlika trenutne referentne snage i početne referentne snage ne smije prekoračiti. Time se pokriva slučaj u kojem bi agregat za regulaciju trpio prevelike fluktuacije u referenci, pa bi se stoga snage ipak trebale podjednako raspodijeliti.

5.2. Blok provjere dostizanja maksimuma JC agregata

Blok provjere dostizanja maksimuma JC agregata (slika 5.2.) je kratak blok koji daje potrebne signale za konačnu logiku upravljanja raspodjelom, a to su: signal da je samo jedan agregat dosegao gornji limit te signal da su limit dosegli svi JC agregati.

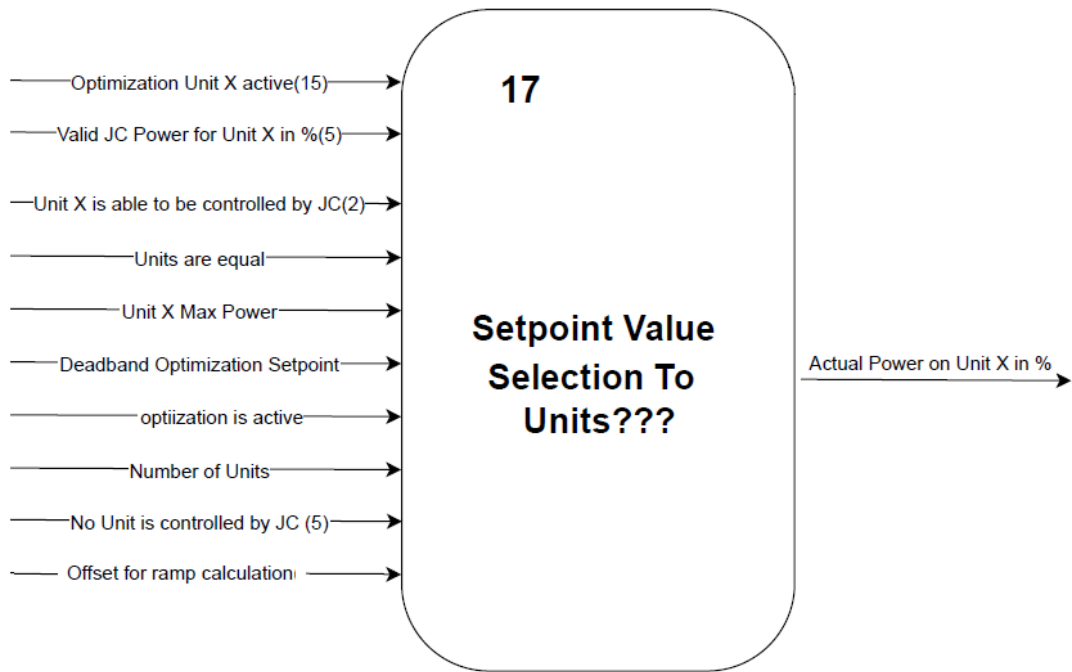


Slika 5.2. FB Joint Control Max Limitations

5.3. Odabir referentne vrijednosti za agregat

Ideja bloka odabira referentne vrijednosti je prosljeđivanje izračunate referentne vrijednosti za onaj tip upravljanja koji je selektiran. Konačni korak, koji nije uspio ući u opseg rada, bio bi odabranu referencu postepeno mijenjati po ulaznoj ili silaznoj rampi za stabilnije prijelaze i izbjegavanje naglih skokova.

Na slici 5.3. prikazan je blok odabira konačne vrijednosti referentne snage pojedinih agregata.



Slika 5.3. FB Setpoint Value Selection to Units

Za konačno rješenje problema trebalo bi razraditi još nekoliko funkcijskih blokova poput „JC Min limited“ koji detektira je li dosegnut minimum ijednog agregata te istovremeno limitira referencu u slučaju da je preniska. Jedan od većih blokova bio bi „Calculate power offsets to Units“ koji pokušava raspodijeliti referentnu snagu na što manje agregata postavljajući ih na maksimalne dozvoljene vrijednosti.

6. ODZIVI

Za kompletno rješenje početnog problema, zbog nedostatka potrebnih informacija i odluka, prikazani kod nije u cijelosti dovršen te postoje pojave koje opseg ovog rada ne pokriva, a zahtijevaju detaljnu analizu. Simulacija je izvedena samo nad funkcijskim blokovima vezanim uz upravljanje brojem agregata, prikazanim u 4. poglavlju. Parametri su postavljeni unutar globalnog podatkovnog bloka INTF_DB (slika 6.1.) te se u Main [OB1] (slika 6.2.) pozivaju spomenuti funkcijski blokovi.

32		INTF_IN_UNIT_3_GCB_ON	Bool	false	FALSE
33		INTF_IN_UNIT_4_JC_ON	Bool	false	FALSE
34		INTF_IN_UNIT_4_SERVICE_SW	Bool	false	FALSE
35		INTF_IN_UNIT_4_START_COND_OK	Bool	false	FALSE
36		INTF_IN_UNIT_4_ESD	Bool	false	FALSE
37		INTF_IN_UNIT_4_P_CTRL_ON	Bool	false	FALSE
38		INTF_IN_UNIT_4_SEQ_START_ACTIVE	Bool	false	FALSE
39		INTF_IN_UNIT_4_SEQ_STOP_ACTIVE	Bool	false	FALSE
40		INTF_IN_UNIT_4_GCB_ON	Bool	false	FALSE
41		INTF_OUT_UNIT_1_RDY_START	Bool	false	FALSE
42		INTF_OUT_UNIT_1_RDY_STOP	Bool	false	FALSE
43		INTF_OUT_UNIT_1_JC_RDY	Bool	false	TRUE
44		INTF_OUT_UNIT_1_ONLINE_NOT_IN_JC	Bool	false	FALSE
45		INTF_OUT_UNIT_1_JC_RDY_START	Bool	false	FALSE
46		INTF_OUT_UNIT_1_JC_RDY_STOP	Bool	false	FALSE
47		INTF_OUT_UNIT_2_RDY_START	Bool	false	FALSE
48		INTF_OUT_UNIT_2_RDY_STOP	Bool	false	FALSE
49		INTF_OUT_UNIT_2_JC_RDY	Bool	false	FALSE

Slika 6.1. Prikaz djela podatkovnog bloka INTF_DB

U simulaciji ako agregat sljedeći na redu za pokretanje ili zaustavljanje ima zadovoljene uvjete te mu je izdan nalog za pokretanje, on se istog trena pokreće ili zaustavlja te mu je odziv radne snage simuliran PT1 članom. Slika 6.2. prikazuje primjer pozivanja prvog funkcijskog bloka.

```
Network 2: 01_DROOP CONTROL
Comment
1 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_FREQ_ACT := "INTF_DB".INTF_IN_FREQ_ACT;
2 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_P_SET := "INTF_DB".INTF_IN_P_SET;
3 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_FREQ_SET := "INTF_DB".INTF_IN_FREQ_SET;
4 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_P_DROOP := "INTF_DB".INTF_IN_P_DROOP;
5 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_DROOP_ENB := "INTF_DB".INTF_IN_DROOP_ENB;
6 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_P_MAX_LIM := "INTF_DB".INTF_IN_P_MAX_LIM;
7 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_P_MIN_LIM := "INTF_DB".INTF_IN_P_MIN_LIM;
8 "DROOP_CONTROL".INTF_IN_JC_P_MAX_TOT := "INTF_DB".INTF_OUT_JC_P_MAX_TOT;
9
10 "DROOP_CONTROL" ();
11
12 "INTF_DB".INTF_OUT_P_SET_CORR_ACT := "DROOP_CONTROL".INTF_OUT_P_SET_CORR_ACT;
```

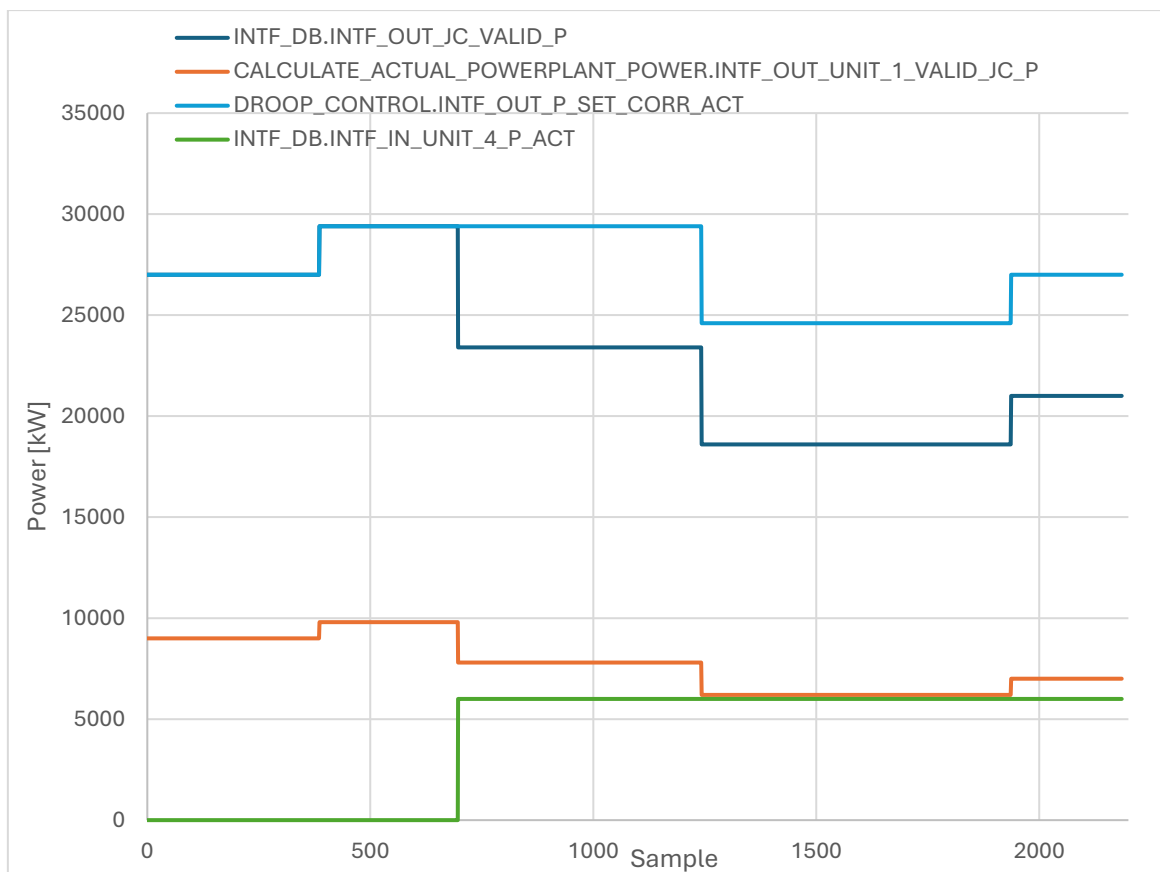
Slika 6.2. Prikaz pozivanja FB-a 1 u Main[OB1]

6.1. Simulacija odziva na promjenu frekvencije i pokretanja agregata koji nije u zajedničkom upravljanju

Ova simulacija pokazuje kako se podjednako raspodjeljuje snaga u slučajevima promjene frekvencije te u slučaju kada se priključi agregat koji nije u JC-u. Svi agregati su jednaki.

Odziv na slici 5.3. započinje referentom snagom HE od 27 MW gdje su 3 agregata aktivna i snaga im je 9 MW (maksimalna snaga je 10 MW). Frekvencija zatim pada na 49,8 Hz što odgovara promjeni referentne snage za dodatnih 2,4 MW (Droop faktor je iznosa 5 %). Novi agregat pokreće se kada se dosegne maksimum, a jedan od agregata će se zaustaviti kada referentna snaga agregata padne ispod 50 % njegovog maksimuma. U ovoj simulaciji te granice se neće doseći.

Slika 6.3. prikazuje odziv prve simulacije.



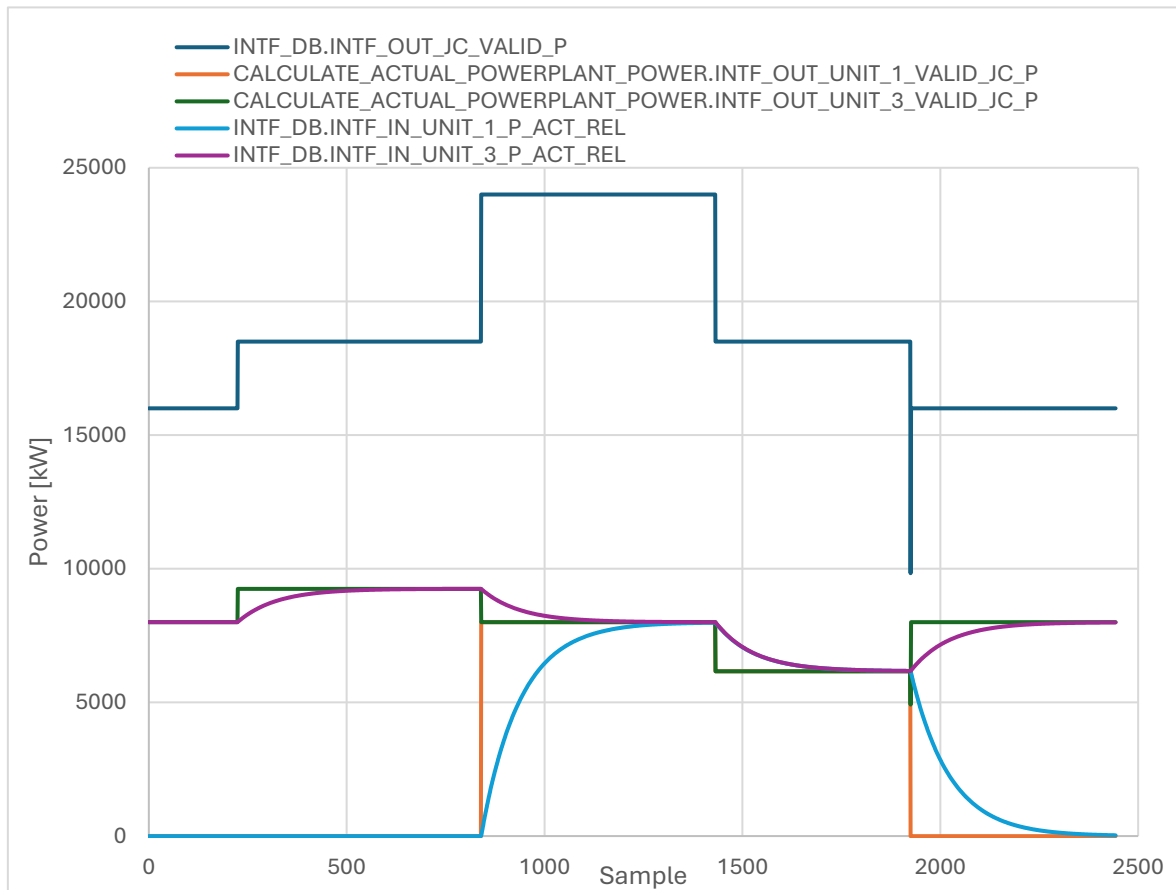
Slika 6.3. Odziv prve simulacije

Kao što je vidljivo iz slike 5.3. oko 700. uzorka uključuje se 4. agregat u samostalnom režimu sa snagom od 6 MW gdje rasterećuje prva 3 agregata, svakog za 2 MW. Agregati u JC-u ne prelaze granice isključenja. U sljedećem koraku frekvencija raste na 50.2 Hz što utječe opet na prva 3 agregata tako da ih podjednako rasterećuje, dok četvrti agregat ostaje neizmijenjen. U posljednjem koraku frekvencija se vraća na zadanu vrijednost kao i referentna snaga HE, ali ne i ukupna JC snaga.

6.2. Simulacija promjene broja agregata zbog promjene ukupne referentne snage

U prijašnjoj simulaciji referentna snaga nije prelazila granicu pokretanja ni zaustavljanja agregata s najvišim prioritetom. U ovom slučaju limit za pokretanje trećeg agregata postavljen je na 19 MW, a za zaustavljanje trećeg agregata na 18 MW. Glavna referentna snaga kretat će se u koracima na sljedeći način: 16000 kW – 18500 kW – 24000 kW – 18500 kW – 16000 kW.

Odziv druge simulacije prikazan je slikom 6.4. U početku rade agregati 2 i 3, reference i vrijednosti snage im se preklapaju jer su identični. Vrijednost referentne snage u području histereze (od 18000 kW do 19000 kW) ne pokreće dodatni agregat što je traženo ponašanje. S dodatnim skokom na 24000 kW itekako je potrebno pokrenut dodatni treći agregat. Prioritet po ukupnom broju radnih sati određuje agregat broj 1 kao sljedećeg za pokretanje te se istog trenu pojavljuje razvijena snaga.



Slika 6.4. Odziv druge simulacije

U realnom slučaju postoji duže kašnjenje od trenutka naloga za pokretanje do pojave njegove razvijene snage. Tu najviše pridonosi činjenica da se pokrenuti agregat treba sinkronizirati na mrežu, što traje, te kada počne dostizati vlastitu referentnu snagu, to radi sporo zbog slabog proporcionalnog pojačanja regulatora i jakog integralnog člana.

Sada sva tri agregata razvijaju jednaku snagu. Postavljanjem glavne referentne snage cijele HE ponovno u područje histereze, neće se ponoviti stanje s početka simulacije kada rade samo dva agregata, već će ista referentna vrijednost biti podijeljena između tri agregata. Tek u idućem koraku, vraćanjem referentne snage HE na početnu vrijednost, isti pokrenuti agregat će se zaustavit jer se relativni odnos radnih sati nije promijenio.

Propad ukupne referentne JC snage oko 1900. uzorka na samo jedan ciklus može se objasniti činjenicom da blokovi nisu najbolje poredani i zbog toga što je simulacija agregata unutar istog ciklusa izvođenja kao i sam kod. To rezultira pogrešnom slikom ulaza s kojom simulacija PLC-a krivo računa vrijednosti na samo jedan ciklus dok se ne uračunaju novi signali stanja i pripadajuće vrijednosti parametara.

7. ZAKLJUČAK

Tema diplomskog rada bila je razvoj metode optimalne raspodjele radne i jalove snage na agregate u hidroelektrani. Iako je u naslovu spomenuta raspodjela jalove snage, ona će biti tema budućeg rada. Predmet ovog rada bila je usporedna analiza dva najčešća tipa upravljanja hidroelektranom, a to su „podjednako raspodijeljena referentna snaga“ te „praćenje referentne vrijednosti snage jednim agregatom“ dok je drugome zadana referentna snaga maksimalna. Zatim selekcija jednog od njih te njegova implementacija u razvojnom okruženju TIA portala i na kraju testiranja koda putem simulacije.

Za početak provedena je analiza na tri postojeća objekta svaki sastavljen od po dva ista agregata. Jedina razlika u objektima su korišteni tipovi turbina (Kaplan, Francis i Pelton) zbog razlika u protocima i neto visinama pada. Rezultati analize su pokazali da pri manjim razvijenim snagama, podjednaka raspodjela referentne snage ima malo veću korisnost, dok se pri većim snagama korisnosti izjednačavaju. Razlike u korisnosti ovakvih razmjera su od puno manjeg značaja za male hidroelektrane, nego kod većih hidroelektrana.

Za realizaciju koda prvi korak je bio dobro odrediti ulazne i izlazne parametre svakog funkcijskog bloka te osnovnu logiku koja će upravljati brojem agregata potrebnih za optimalan rad. Prodiskutirana su neka rješenja izvan početne analize koja ipak zbog nedostatka potrebnih informacija, vremena i odlučnosti nisu stigla zaživjeti do točke simuliranja. Postoji razlika algoritma pristupa upravljanju agregatima kada su svi isti i kada su različiti, neovisno o tipu upravljanja. Jedna od razlika su prioriteta koji, osim ručnog unosa, mogu biti izračunati na temelju radnih sati ili maksimalnoj snazi agregata. Izlazni parametri svakog funkcijskog bloka nisu nužno upotrebljeni u idućim blokovima zajedničkog upravljanja, neki mogu biti samo signali za prikaz stanja operaterima.

Iako je sama simulacija pojednostavljena, ipak dobiveni rezultati pokazuje da dio koda odgovoran za pokretanje i zaustavljanje agregata radi. Sljedeći korak bio bi izraditi do kraja blokove navedene na kraju 4. poglavlja te modelirati realnije odzive agregata.

Ograničenje ovog istraživanja je prevelika složenost pravog procesa zajedničkog upravljanja agregata i nedostatak potrebnih informacija s terena dobivenih iskustvom. Jedan od načina optimalne raspodjele spomenut u literaturi [1] bio bi iterativni postupak traženja optimalnih točaka referentnih vrijednosti snage gdje se u postupnim malim koracima odstupa od zadanih referentnih vrijednosti i traži pozitivna promjena korisnosti sve dok se ne nađe najveća.

Preporuke za daljnja istraživanja bile bi koristiti naprednije simulacije opisane u diplomskom radu s FER-a [5] koji se bavio sličnom problematikom te ima razvijen model zajedničkog upravljanja, veći broj agregata, te više analiziranih slučajeva u kojima se agregati mogu zadesiti prilikom rada.

Samo okruženje ulaznim i izlaznim parametrima funkcijskih blokova, proučavanje kako se odnose, ponašaju i zašto, pomoći će pri sljedećem ozbiljnijem projektiranju optimalne raspodjele snage u zajedničkom upravljanju nad pravim objektima. Zasad opisana 3 objekta iz 2. poglavlja nisu još spremni za puštanje u pogon.

LITERATURA

- [1] Bortoni, E. C., Bastos G. S., Souza L. E. (2007). Optimal load distribution between units in a power plant. ScienceDirect ISA Transactions 46(2007), 533-539.
- [2] Interni materijal poduzeća Brodotehna d.o.o., Zadar
- [3] Kuzle, I., Regulacija frekvencije i djelatne snage i podfrekvencijsko rasterećenje elektroenergetskog sustava: Dinamika i regulacija elektroenergetskog sustava. FER, Zagreb, 2013.
- [4] Mikuličić, V., Grgić, D., Šimić, Z., Šadek, S, Delimar, M. (2023) *Elektroenergetika: Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama* (PowerPoint prezentacija). FER, Zagreb.
- [5] Gršković, M. Modularna struktura grupnog upravljanja hidroelektranom. Diplomski rad. FER, 2016.

SAŽETAK

Razvoj metode za optimalnu raspodjelu radne i jalove snage na agregate u hidroelektrani

Tema diplomskog rada bila je razvoj metode optimalne raspodjele radne snage na agregate u hidroelektrani. Predmet istraživanja bila je usporedna analiza dva najčešća tipa upravljanja hidroelektranom, selekcija jednog od njih te njegova implementacija u razvojnom okruženju TIA portala i na kraju testiranje koda putem simulacije. Analiza je provedena na tri postojeća objekta od po dva ista agregata od kojih je svaki imao različite tipove turbina (Kaplan, Francis i Pelton). Rezultati su pokazali da pri manjim razvijenim snagama, podjednaka raspodjela referentne snage ima malo veću korisnost, dok se pri većim snagama korisnosti izjednačavaju. Simulacija je pokazala da kod odgovoran za upravljanje brojem agregata funkcionira. Ograničenje istraživanje bio je nedostatak potrebnih informacija s terena. Preporuke za daljnja istraživanja su dograditi postojeće kodove i simulacije za radnu snagu te razviti metodu za jalovu snagu.

Ključne riječi: hidroelektrane, zajedničko upravljanje agregatima, optimalna raspodjela radne snage.

ABSTRACT

Development of a method for the optimal distribution of active and reactive power to aggregates in a hydroelectric power plant

The topic of the diploma thesis was the development of a method of optimal distribution of active and reactive power to aggregates in a hydroelectric power plant. The subject of the research was a comparative analysis of the two most common types of hydropower management, the selection of one of them and its implementation in the development environment of the TIA portal, and finally the testing of the code through simulation. The analysis was carried out on three existing facilities of two identical units, each of which had different types of turbines (Kaplan, Francis and Pelton). The results showed that at lower developed powers, the equal distribution of the reference power has a slightly higher efficiency, while at higher powers the efficiency becomes equal. The simulation showed that the code responsible for managing the number of aggregates works. A limitation of the research was the lack of necessary information from the field experience. Recommendations for further research are to upgrade the existing codes and simulations for active power and to develop a method for reactive power.

Keywords: hydropower plants, joint management of aggregates, optimal distribution of active power.