

Sveobuhvatno ispitivanje sinkronog generatora s permanentnim magnetima napajanog preko frekvencijskog pretvarača

Zeko, Matea

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:168:585937>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 150

**SVEOBUHVAATNO ISPITIVANJE SINKRONOG GENERATORA
S PERMANENTNIM MAGNETIMA NAPAJANOG PREKO
FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA**

Matea Zeko

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 150

**SVEOBUHVAATNO ISPITIVANJE SINKRONOG GENERATORA
S PERMANENTNIM MAGNETIMA NAPAJANOG PREKO
FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA**

Matea Zeko

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 150

Pristupnica: **Matea Zeko (0036518922)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: prof. dr. sc. Stjepan Stipetić

Zadatak: **Sveobuhvatno ispitivanje sinkronog generatora s permanentnim magnetima napajanog preko frekvencijskog pretvarača**

Opis zadatka:

U tvornici Končar-GIM gradi se treći u seriji sinkroni generator s feritnim permanentnim magnetima. Detaljno opišite građu, namjenu i sve važne karakteristike objekta ispitivanja te ispitnu opremu (mjerni instrumente, frekvencijski pretvarač, filtere, pogonski stroj, spojku itd.). Sačinite plan ispitivanja i opišite relevantne međunarodne i nacionalne norme i standarde koje je potrebno primjenjivati pri ispitivanju. Opišite postupak provođenja svih pokusa, navedite izmjerene rezultate te komentirajte potencijalne razlike u odnosu na prethodna dva izgrađena generatora.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Stjepanu Stipetiću koji je odlučio poduprijeti moju želju za promjenom područja istraživanja i kroz ovaj diplomski rad omogućio napredovanje u području struke kojim se želim baviti.

Hvala cijelom Končar GiM timu koji su mi omogućili suradnju i izradu diplomskog rada unutar okvira tvornice.

Jedno veliko hvala dugujem kolegi i mentoru iz Končar GiM-a, Antoniu Čuljku, na ogromnoj pomoći pri izradi ovog rada i nesebičnom dijeljenju znanja i iskustava. Zahvaljujem se i kolegi Rolandu Gazibari koji je bio tu kroz sva ispitivanja i za sva moja pitanja. Izuzetna čast je raditi s ovakvim ljudima i učiti od njih!

Zahvaljujem se svim prijateljima, kolegama, članovima obitelji na sudjelovanju u ovom periodu mog života.

I na kraju, ništa ovo ne bi bilo moguće bez vas: mama, tata, Toni i Davide, ovo nije moj, ovo je naš uspjeh.

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. PRINCIP RADA SGPM I PRIMJENA U HIDROELEKTRANAMA S NISKIM PADOM	2
2. ISPITIVANI OBJEKT - SGPM ZA MHE OTOČAC	4
2.1. Nazivni podaci ispitivanog stroja.....	4
2.2. Magnetski materijali.....	4
2.3. Permanentni magneti i njihova primjena u električnim strojevima	4
2.3.1. NMF-12-E	5
3. ISPITNA STANICA – PRETVARAČ, POGONSKI STROJ I MJERNA OPREMA..	6
4. ISPITIVANJA U TIJEKU PROIZVODNJE	9
4.1. Magnetiziranje paketa uz kontrolu toplih mjesta termovizijom.....	9
4.2. Magnetiziranje rotora i kontrola polariteta.....	15
4.3. Određivanje momenta tromosti rotora metodom njihanja	20
5. ISPITIVANJA NA GOTOVOM STROJU	24
5.1. Ugrađena pomoćna oprema	24
5.1.1. Pt100 sonde	24
5.1.2. Grijači	25
5.1.3. Magnetski senzori za provjeru ekscentriciteta	26
5.1.4. Resolver i enkoder.....	30
5.1.5. Prsten za zaštitu od ležajnih struja	30
5.2. Mjerenje otpora namota.....	32
5.3. Mjerenje otpora izolacije.....	34
5.4. Prazni hod	36

5.4.1.	Karakteristika praznog hoda u generatorskom režimu.....	38
5.4.2.	Karakteristika praznog hoda u motorskom režimu.....	40
5.5.	Struje izjednačenja u paralelnim granama.....	41
5.6.	Redoslijed faza	42
5.7.	Ispitivanje pobjega.....	43
5.8.	Ispitivanje generatora pod opterećenjem.....	45
5.8.1.	Mjerenje električnih veličina	45
5.8.2.	Mjerenje mehaničkih veličina	48
5.8.3.	Kontrola zagrijavanja stroja	50
5.8.4.	Karakteristika opterećenja	53
5.9.	Korisnost generatora	55
5.10.	Pokus visokog napona i kontrola otpora izolacije namota prije i nakon VN-a	58
6.	USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA S PRETHODNA DVA GENERATORA	59
6.1.	Zagrijavanja generatora s i bez sinusnog filtera	59
6.2.	Usporedba gubitaka i korisnosti sva tri generatora.....	61
	Zaključak	63
	Literatura	64
	Sažetak	68
	Abstract	69

Popis slika

Slika 1.1: a) Magneti na površini rotora b) Magneti u unutrašnjosti rotora [1].....	2
Slika 2.1: BH karakteristika NMF-12-E [9]	5
Slika 3.2: Ispitivanje generatora potopljenog u bačvi [40].....	8
Slika 3.1: Shema opterećenja SGPM	8
Slika 4.1: B-H krivulja lima M230-50A	9
Slika 4.2: Magnetizacija statorskog paketa	10
Slika 4.3: Kontrola zagrijavanja statorskog paketa – hladno stanje.....	13
Slika 4.4: Kontrola zagrijavanja statorskog paketa – toplo stanje.....	14
Slika 4.5: Krivulja specifičnih gubitaka.....	15
Slika 4.6: Slika namota magnetizera	16
Slika 4.7: Položaji zakretanja osovine pri magnetiziranju rotora.....	16
Slika 4.8: Rotor unutar naprave za magnetiziranje.....	17
Slika 4.9: Magnetiziranje rotora	17
Slika 4.10: Panel generatora impulsa.....	18
Slika 5.1: Temperaturna ovisnost optora za različite materijale[41].....	24
Slika 5.2: Pt100 sonda	25
Slika 5.3: Vrste ekscentriciteta: paralelni (gore lijevo), dijametralni (gore desno), aksijalni (dolje lijevo), sedlasti (dolje desno).....	26
Slika 5.4: Mjerni svitak za kontrolu ekscentriciteta	27
Slika 5.5: Prazni hod - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima.....	28
Slika 5.6: Prazni hod - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka	28
Slika 5.7: Teret sa sinusnim filterom - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima	29
Slika 5.8: Teret sa sinusnim filterom - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka	29
Slika 5.9: Teret bez sinusnog filtera - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima	29
Slika 5.10: Teret bez sinusnog filtera - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka	30

Slika 5.11: Instalacija AEGIS prstena[28].....	32
Slika 5.12: FFT analiza napona između gornjeg štita i kućišta.....	32
Slika 5.13: Mjerenje ohmskog otpora namota U-I metodom u spoju zvijezda	33
Slika 5.14: Mjerenje ohmskog otpora namota U-I metodom u spoju trokut	33
Slika 5.15: Komponente struje prilikom testiranja izolacije istosmjernim naponom [20]	35
Slika 5.16: Krivulja praznog hoda sinkronog stroja [14].....	37
Slika 5.17: Ovisnost inducirano napona PH o brzini vrtnje (generatorski režim)	39
Slika 5.18: Ovisnost napona i brzine u PH (motorski režim).....	40
Slika 5.19: Gubici PH u ovisnosti o naponu (motorski režim).....	41
Slika 5.20: Provjera redoslijeda faza	42
Slika 5.21: Vibracije PS ležaja za vrijeme pobjega.....	44
Slika 5.22: FFT analiza vibracija PS ležaja	44
Slika 5.23: Vibracije SS ležaja za vrijeme pobjega.....	44
Slika 5.24: FFT analiza vibracija SS ležaja	44
Slika 5.25: LEM IN 2000-s.....	45
Slika 5.26: Princip mjerenja struje	47
Slika 5.27: Dovod strujnih i naponskih signala na mjerne stanice Sirius	47
Slika 5.28: Ispitivanje pod opterećenjem - simetrija napona i struja	47
Slika 5.29: FFT analiza napona na stezaljkama generatora.....	48
Slika 5.30: Instalirana mjerna osovina.....	49
Slika 5.31: PS ležaj - položaj akcelerometara	50
Slika 5.32: SS ležaj - položaj akcelerometara	50
Slika 5.33: Ovisnost životnog vijeka izolacije o radnim temperaturama[18]	52
Slika 5.34: Zagrijavanje pod opterećenjem - temperature namota	53
Slika 5.35: Zagrijavanje pod opterećenjem - maksimalna temperatura namota, nadtemperatura i temperatura rashladnog medija.....	53
Slika 5.36: Zagrijavanje pod opterećenjem - temperature ležajeva.....	53
Slika 5.37: Karakteristike opterećenja pri različitim brzinama.....	54
Slika 5.38: Korisnost generatora pri različitim brzinama i opterećenjima.....	55
Slika 5.39: Radne karakteristike stroja pri konstantnom strujnom opterećenju	57

Slika 6.1: Usporedba napona na stezaljkama generatora i 1. harmonika napona nakon zagrijavanja pod teretom s i bez sinusnog filtra	59
Slika 6.2: Usporedba faktora snage i $\cos\phi$ nakon zagrijavanja pod teretom s i bez sinusnog filtra	60
Slika 6.3: Prirast temperature pri zagrijavanju s i bez sinusnog filtra.....	60
Slika 6.4: Gubici tijekom zagrijavanja s i bez sinusnog filtra.....	61
Slika 6.5: Korisnosti tri ispitana generatora u ovisnosti o strujnom opterećenju i brzini	62

Popis tablica

Tablica 2.1: Nazivni podaci ispitivanog stroja	4
Tablica 3.1: Mjerna oprema.....	6
Tablica 4.1: B-H karakteristika lima 230-50A – 1.dio.....	9
Tablica 4.2: B-H karakteristika lima 230-50A – 2. dio.....	9
Tablica 4.3: Podaci o paketu	12
Tablica 4.4: Izračunate veličine	13
Tablica 4.5: Rezultati mjerenja gubitaka u statorskom paketu.....	14
Tablica 4.6: Struje magnetiziranja rotora	19
Tablica 4.7: Indukcija i polaritet po polu rotora	20
Tablica 4.8: Mjereni rezultati prilikom metode njihanja	22
Tablica 5.1: Provjera ekscentriciteta.....	28
Tablica 5.2: Otpor izolacije statorskog namota u hladnom stanju.....	36
Tablica 5.3: Prazni hod - hladno i toplo stanje (generatorski režim).....	38
Tablica 5.4: Ovisnost induciranog napona PH o brzini vrtnje (generatorski režim)....	39
Tablica 5.5: Izmjerene vrijednosti u PH (motorski režim)	40
Tablica 5.6: Mjerenje struja izjednačenja	42
Tablica 5.7: Amplituda vibracija za vrijeme ispitivanja pobjega	43
Tablica 5.8: Klase izolacije	51
Tablica 5.9: Otpor izolacije namota prije pokusa visokim naponom	58
Tablica 5.10: Otpor izolacije namota nakon pokusa visokim naponom	58

UVOD

U tvornici Končar – Generatori i motori razvijeni su potopljeni agregati za male hidroelektrane s niskim padom vode. Proizvedena su i ispitana tri generatora s permanentnim magnetima napajana preko frekvencijskog pretvarača kako bi se regulacijom brzine vrtnje mogla pratiti točka maksimalne korisnosti u radu na elektrani, ovisno o trenutnoj količini vode. Potapanje generatora eliminira potrebu za strojarnicom i smanjuje troškove izgradnje elektrane, a korištenjem permanentnih magneta umjesto uzbuđenog namota izbjegnuta su rotorski gubitci u bakru.

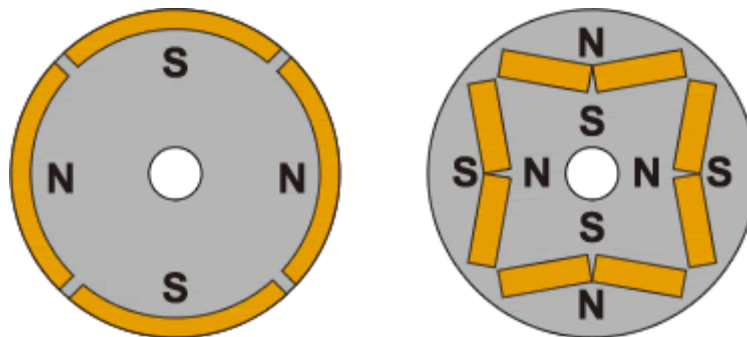
Kroz ovaj diplomski rad dokumentirano je tipsko ispitivanje posljednjeg proizvedenog generatora koje obuhvaća statička ispitivanja poput provjere simetrije namota, kvalitete izolacije i kontrole pomoćne opreme te ispitivanja u vrtnji, odnosno provjere električnih i mehaničkih karakteristika generatora u praznom hodu i pod opterećenjem. Obuhvaćena je i analiza i usporedba rezultata s prethodna dva generatora, a posebna pozornost je posvećena problematici ekscentriciteta rotora, ležajnih struja te utjecaja sinusnog filtra tijekom zagrijavanja. Osim završne električne kontrole provedene na gotovom stroju, rad obuhvaća i pojedine međufazne točke kao što su magnetiziranje permanentnih magneta na rotoru generiranjem jakih impulsnih struja, mjerenje momenta inercije rotora te magnetizacija statorskog paketa s ciljem detekcije potencijalnih toplih mjesta. Sva ispitivanja provedena su u skladu s međunarodnim i nacionalnim normama i standardima.

1. PRINCIP RADA SGPM I PRIMJENA U HIDROELEKTRANAMA S NISKIM PADOM

Sinkroni strojevi predstavljaju izmjenične rotacijske strojeve kod kojih je brzina vrtnje jednaka brzini stroj s kojim je generator mehanički povezan vrti okretnog magnetskog polja (1.1). U generatorskom režimu, pogonski rotor na kojemu je smješten uzbudni namot ili permanentni magneti za stvaranje magnetskog polja. Na armaturnom namotu smještenom na statoru dolazi do induciranja napona. U motorskom režimu napaja se armaturni namot, stvara se okretno magnetsko protjecanje koje u međudjelovanju s protjecanjem uzbuđe dovodi do rotacije rotora.

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

Kod izvedbe s permanentnim magnetima, razlikuju se strojevi s permanentnim magnetima postavljenim na površini i u unutrašnjosti rotora (slika 1.1). Kod izvedbe s magnetima unutar rotora, magneti su bolje zaštićeni zbog čega su takvi strojevi pogodniji za veće brzine vrtnje. Imaju reluktantni moment koji se javlja kao posljedica nejednakosti $L_q > L_d$. U slučaju strojeva s magnetima na površini rotora, magneti su izloženi oštećenjima te imaju kraći životni vijek, no izvedba je jednostavnija. Zbog $L_q = L_d$ nema reluktantnog momenta.



Slika 1.1: a) Magneti na površini rotora b) Magneti u unutrašnjosti rotora [1]

Kod klasične izvedbe hidroelektrana, generatori se vrte konstantnom brzinom reguliranom turbinskim regulatorom te su spojeni direktno na mrežu (nepromjenjiva frekvencija, 50 Hz za Europu). Kod malih hidroelektrana koje obuhvaćaju raspon

instaliranih snaga 0,5 - 10 MW postoji mogućnost za optimalno iskorištenje malog pada i promjenjivog protoka. Mijenjanjem brzine vrtnje ovisno o količini dostupne vode moguće je pratiti točku maksimalne korisnosti. Proporcionalno promjeni brzine vrtnje generatora mijenja se i frekvencija induciranog napona zbog čega su u ovoj izvedbi generatori na mrežu spojeni preko frekvencijskih pretvarača.

2. ISPITIVANI OBJEKT - SGPM ZA MHE OTOČAC

2.1. Nazivni podaci ispitivanog stroja

Osnovni podaci o ispitivanom objektu prikazani su u tablici 2.1 za rad na frekvenciji od 50 Hz. Provedena su ispitivanja na sinkronom generatoru s permanentnim magnetima u pojedinim fazama proizvodnje te na gotovom stroju.

Tablica 2.1: Nazivni podaci ispitivanog stroja

Nazivna prividna snaga	$S = 600 \text{ kVA}$
Nazivni napon	$U = 690 \text{ V}$
Nazivna struja	$I_n = 480 \text{ A}$
Broj polova	$2p = 30$
Nazivna brzina vrtnje	$n = 200 \text{ min}^{-1}$
Vrsta pogona	S1
Faktor snage	$\cos\varphi = 1$
Paralelne grane	$a = 2$
Spoj faza	Y

2.2. Magnetski materijali

Jezgre rotora i statora električnog stroja izrađene su od feromagnetskog materijala koji provodi magnetski tok, a na površini rotora učvršćeni su permanentni magneti koji proizvode magnetski tok.

2.3. Permanentni magneti i njihova primjena u električnim strojevima

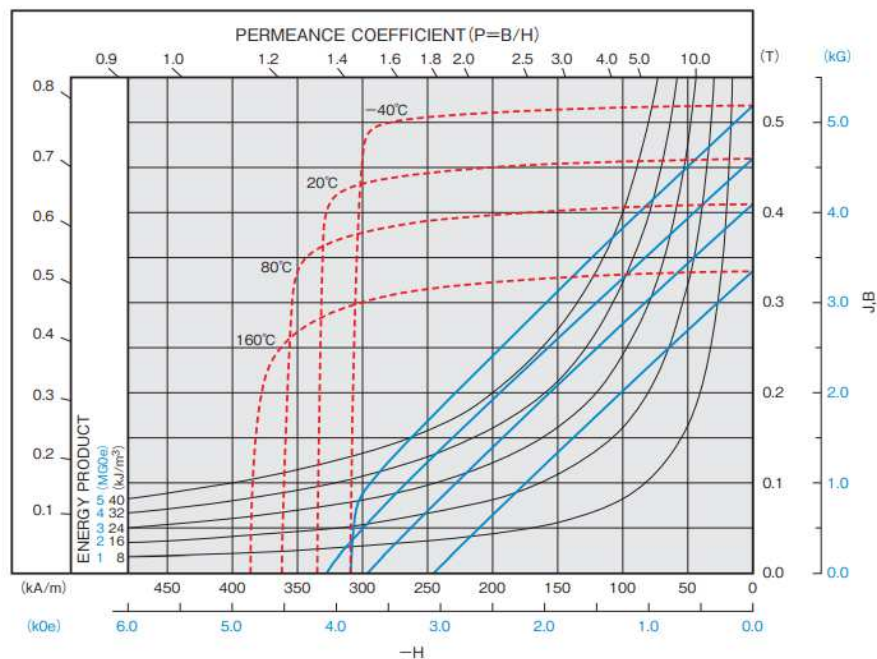
Permanentnim magnetima opisani su materijali u kojima je magnetsko polje stvoreno od same strukture materijala, a njihova magnetna svojstva su gotovo neovisna o vanjskim utjecajima. Moguće ih je razmagnetizirati koercitivnom silom, odnosno djelovanjem jakog magnetskog polja u suprotnom smjeru, izlaganjem temperaturi iznad Currieve ili pak jakim mehaničkim udarcima. U električnim strojevima koriste se kao izvor magnetskog polja, odnosno zamjenjuju uzbudni namot.

Najznačajnije vrste permanentnih magneta:

- AlNiCO magneti
- Feritni magneti
- RECo magneti
- Neodimijski magneti

2.3.1. NMF-12-E

Uz karakteristike permanentnih magneta kao što su koercitivna sila i remanentna indukcija (za korišteni materijal NMF-12-E $B_r \geq 0.46$ T, $H_{cb} = 330$ kA/m), definira se i maksimalni energetska produkt koji predstavlja gustoću energije, a grafički se može prikazati kao površina najvećeg pravokutnika ucrtanog u drugom kvadrantu petlje histerize (za korišteni materijal $BH_{max} = 40$ kJ/m²). Na slici 2.1 je prikazana katalogska karakteristika magneta. Plavom bojom je predstavljena normalna BH karakteristika koja pokazuje magnetsku indukciju u ovisnosti o jakosti magnetskog polja kojem je magnet podvrgnu. Crvenom bojom je označena intrinzična JH krivulja koja prikazuje polarizaciju koju proizvodi dipolni moment u samom materijalu.



Slika 2.1: BH karakteristika NMF-12-E [9]

3. ISPITNA STANICA – PRETVARAČ, POGONSKI STROJ I MJERNA OPREMA

Ispitivanja su provedena u ispitnoj stanici Končar GiM-a. Korišten je frekvencijski pretvarač s dva ispravljačka ulaza i dva izmjenjivačka izlaza koji imaju zajednički istosmjerni međukrug. Za pogonski stroj korišten je asinkroni motor koji ima mogućnost prespajanja paralelnih grana (2/6) kako bi se prilagodila dozvoljena razina statorskih struja pri radu na različitim frekvencijama i opterećenjima. Za potrebe ovog ispitivanja stroj je prespojen za opciju rada na brzinama do 330 min^{-1} i izlaznu snagu do 1 MW.

Temeljna mjerna oprema korištena prilikom ispitivanja prikazana je tablicom 3.1. Za nadzor električnih i mehaničkih veličina pri vrtnji korišten je softver Dewesoft te mjerne stanice DEWE 43A, SIRIUS XHS i SIRIUS UNI. Upotreba navedenih kao i dodatnih instrumenata korištenih u pojedinim ispitivanjima bit će objašnjena uz analizu provedenih mjerenja.

Tablica 3.1: Mjerna oprema

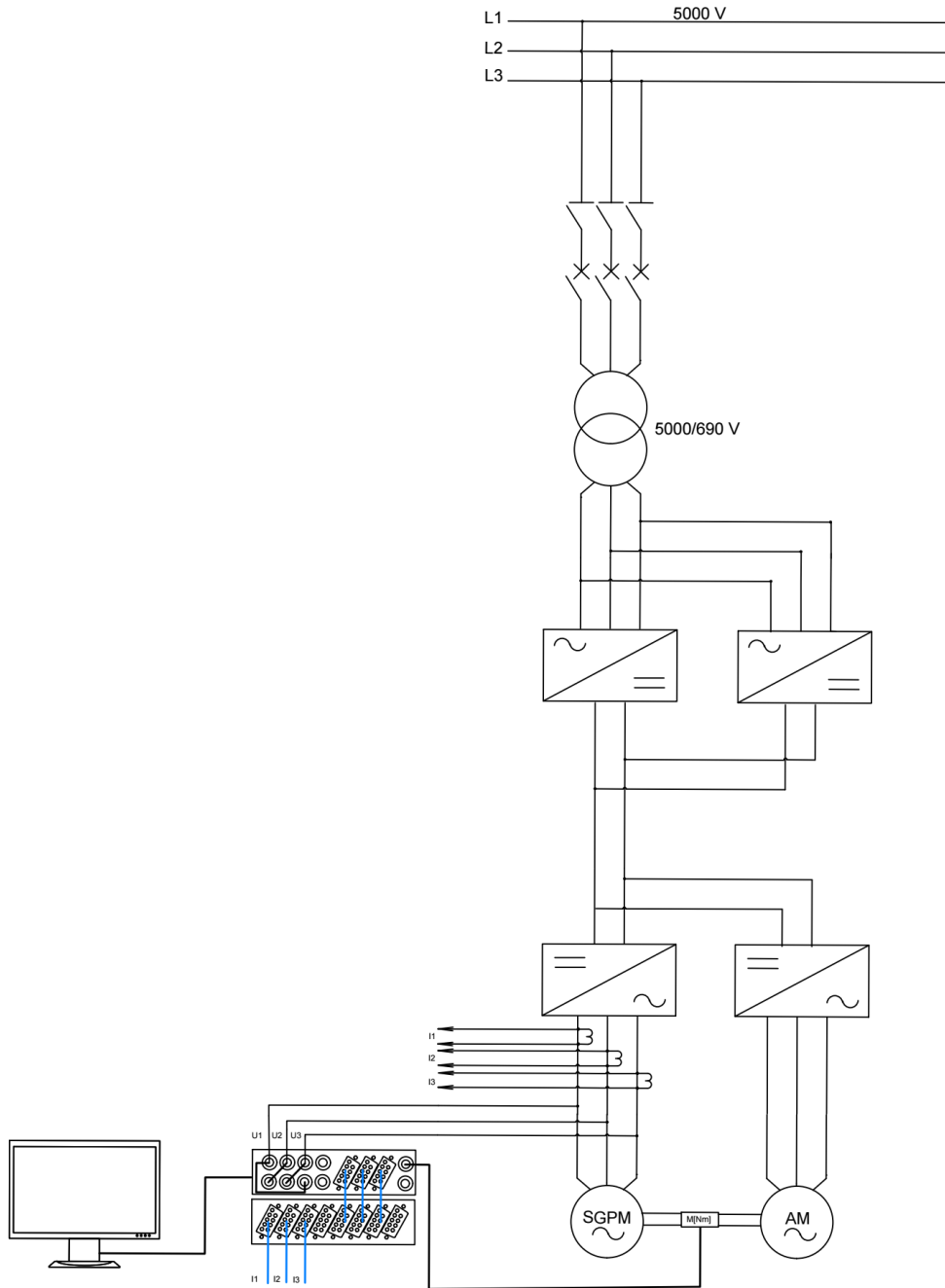
Mjerna oprema	Mjerene veličine	Mjerno područje i pogreška mjerenja
Multimetar Fluke 289	otpor (R) AC napon (U) DC napon (U) AC struja (I) DC struja (I)	0 - 500 M Ω \pm 0.05% 0 - 1000 V \pm 0.4% 0 - 1000 V \pm 0.025% 0 - 10 A \pm 0.6% 0 - 10 A \pm 0.06%
Induktor Fluke 1507	otpor (R)	0.1 M Ω - 10 G Ω (\pm 1.5% do 2000 M Ω , \pm 10% do 10 G Ω)
Induktor Megger MIT1525	otpor (R)	1 M Ω - 35 T Ω \pm 5% (\pm 5% do 3 T Ω \pm 20% do 35 T Ω)
Megger DLRO 200	otpor (R)	0,1 $\mu\Omega$ - 1 Ω (\pm 2% do 300 $\mu\Omega$, \pm 1% do 1 Ω)

senzori LEM IN 2000-S	struja (I)	0 - 2000 A \pm 0.0014%
mjerna osovina T40FM	moment (M)	0 - 30 kNm \pm 0.1%
Pokazivač smjera polja Fluke 9040	napon (U AC)	40 - 700 V

S ciljem utvrđivanja korisnosti ispitivanog stroja pri različitim opterećenjima i različitim brzinama te zagrijavanja stroja pod opterećenjem u svrhu ispitivanja izolacije namota i postizanja stagnacije temperature namota i ležajeva, generator je terećen prethodno spomenutim asinkronim motorom u back-to-back izvedbi. Generator i motor u ulozi pogonskog stroja spojeni su na pretvarač koji je preko transformatora spojen na mrežu. Kako bi se simulirali uvjeti što sličniji onima na elektrani, generator se potapa unutar bačve prilikom zagrijavanja, odnosno vrtnje generatora do stagnacije temperatura namota i ležajeva. Međutim, nema cirkulacije vode unutar bačve zbog čega se voda grije i hlađenje generatora je slabije pri provedenim ispitivanjima nego što će to zapravo biti u pogonu. Također, kreće se od točke temperature unutar ispitne stanice koja je redovno viša od prosječne temperature vode rijeke Like. Pri provedenim ispitivanjima pokazalo se da se namot dobro hladi i ne dostiže velike temperature čak i pri navedenim otežanim okolnostima. Generator potopljen u bačvi prikazan je na slici 3.1. Shema opterećenja je prikazana na slici 3.2.



Slika 3.1: Ispitivanje generatora potopjenog u bačvi [40]



Slika 3.2: Shema opterećenja SGPM

4. ISPITIVANJA U TIJEKU PROIZVODNJE

4.1. Magnetiziranje paketa uz kontrolu toplih mjesta termovizijom

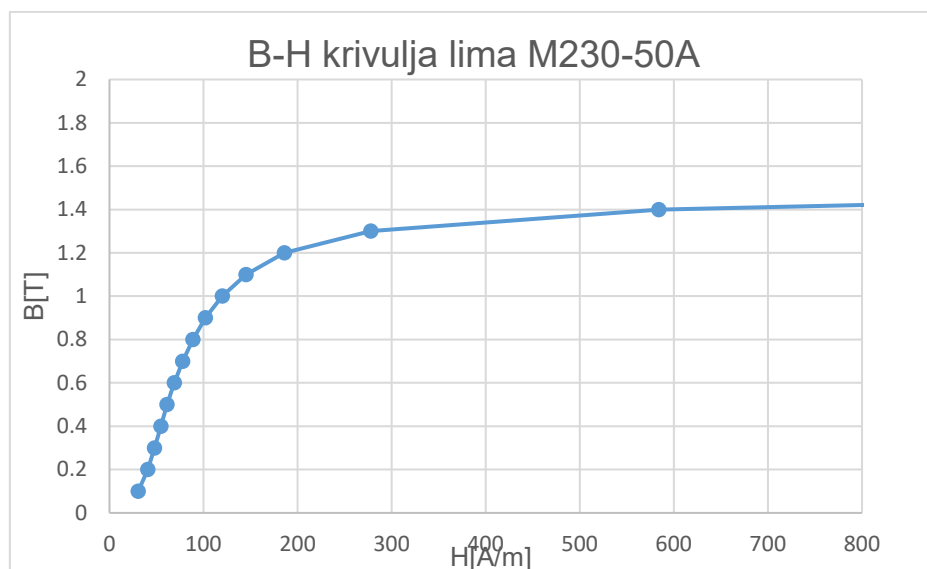
Feromagnetske jezgre statora izrađene su slaganjem i povezivanjem tankih limova koji su međusobno izolirani lakom ili slojem papira kako bi se smanjio utjecaj vrtložnih struja. Za manje strojeve, limovi su jednodijelni, dok se kod strojeva velikih promjera primjenjuje spajanje više segmenata. Tablice 4.1 i 4.2 prikazuju točke B-H krivulje, a slika 4.1 prikazuje B-H krivulju materijala od kojeg je napravljen statorski paket podvrgnut ispitivanju (M230-50A).

Tablica 4.1: B-H karakteristika lima 230-50A – 1.dio

B (T)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
H (A/m)	30,6	40,7	47,9	54,5	61,3	69,0	77,8	88,6	102

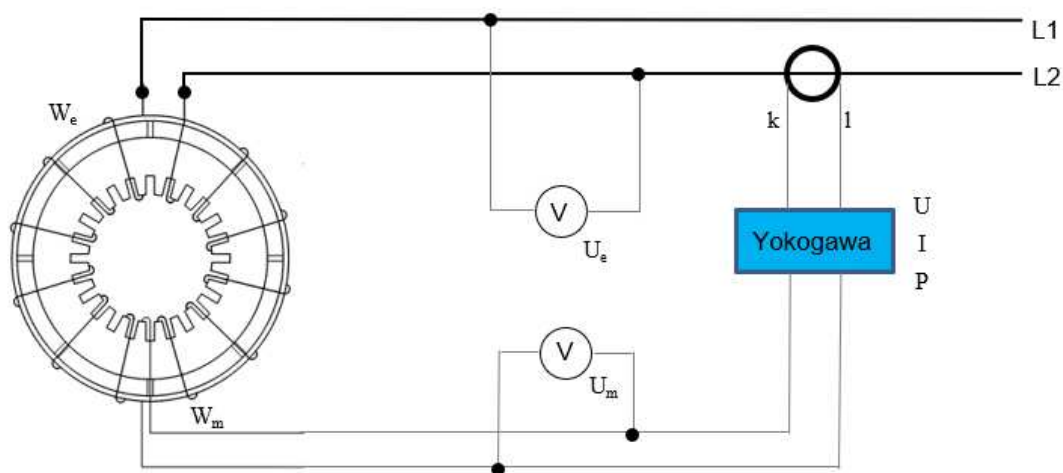
Tablica 4.2: B-H karakteristika lima 230-50A – 2. dio

B(T)	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
H(A/m)	120	145	186	278	584	1600	3680	6890	11600



Slika 4.1: B-H krivulja lima M230-50A

Na statorski paket postavlja se uzбудni namot priključen na izvor izmjeničnog napona (zakretni trofazni transformator) kako bi se simulirala situacija kojoj će stroj biti izložen u normalnom radu, tj. postiže se indukcija za koju je stroj projektiran. Električna shema magnetiziranja i mjerenja prikazana je na slici 4.2.



Slika 4.2: Magnetizacija statorskog paketa

U prvom koraku odabire se proizvoljan broj zavoja namota. Pri tome se uzima u obzir iznos induciranog napona koji se time može dobiti. Iznos napona po zavoju definiran je izrazom (4.1).

$$U_z = 4.44 \cdot l_m \cdot h \cdot B \cdot f \text{ [V]} \quad (4.1)$$

Efektivna duljina paketa dobiva se iz izraza (4.2), a visina paketa iz (4.3).

$$l_m = (l_{uk} - n \cdot d) \cdot f_p \text{ [mm]} \quad (4.2)$$

$$h = \frac{[D_v - (D_u + 2h_z)]}{2} \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

Cilja se na iznose napona koje je lakše dosegnuti i regulirati. Napon koji je potreban za postizanje željene indukcije dobiva se iz (4.4).

$$U = w \cdot U_z \text{ [V]} \quad (4.4)$$

Važno je voditi računa i o iznosu struje te odabiru presjeka kabela. Iz Amperovog zakona slijedi izraz (4.5) gdje je srednji promjer jarma (4.6).

$$I = \frac{H \cdot d_m \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot w} \text{ [A]} \quad (4.5)$$

$$d_m = D_v - h \text{ [mm]} \quad (4.6)$$

Vršna vrijednost za jakost magnetskog polja u točki zadane indukcije očitava se iz krivulje magnetizacije za korišteni materijal (katalog proizvođača). Veličina presjeka kabela odabire se na temelju izračunate vrijednosti struje (4.7).

$$S = \frac{I}{q} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.7)$$

Poželjno je da gustoća struje koja teče kroz kabel ne prelazi 3 A/mm². Veći prosjek smanjuje utjecaj gubitaka u bakru na mjerene podatke. Spomenuti gubici rastu s otporom, a otpor je obrnuto proporcionalan presjeku vodiča (4.8).

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R = \left(\frac{\theta}{w}\right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{w \cdot l_1}{q_1} = \rho \frac{l_1}{S_{Cu}} \cdot \theta^2 \text{ [W]} \quad (4.8)$$

Kod magnetiziranja većih statorskih paketa provodi se korekcija tako što se od ukupno mjerenih gubitaka oduzimaju gubici u bakru. Kod manjih paketa navedeni korak nije potrebno provoditi.

Izračunate vrijednosti napona i struje se uspoređuju s karakteristikama izvora te se rade korekcije u smislu mijenjanja broja zavoja ako je to potrebno. Za izračun specifičnih gubitaka potrebno je poznavati masu stroja. Uz poznatu gustoću materijala (katalog proizvođača lima – 7,6 g/cm²) i volumen statorskog paketa, slijedi izraz za masu (4.9).

$$m = \left(d_m \cdot h - n \cdot \frac{D_k^2}{4}\right) \cdot l_m \cdot \pi \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (4.9)$$

Izračun specifičnih gubitaka predstavlja omjer mjerenih gubitaka i mase (4.10).

$$p = \frac{P}{m} \text{ [W/kg]} \quad (4.10)$$

Kod višedijelnih paketa pri sastavljanju limova nije moguće ostvariti savršen spoj limova što utječe na ukupan broj amperzavoja potrebnih za magnetiziranje (4.11),

$$\theta_{uk} = \theta_{Fe} + \theta_0 \text{ [amperzavoji]} \quad (4.11)$$

gdje su amperzavoji potrebni za magnetiziranje ukupne zračnosti jednaki (4.12).

$$\theta_0 = \frac{B \cdot \delta}{\mu_0} \text{ [amperzavoji]} \quad (4.12)$$

Instrumenti korišteni pri provedbi ispitne metode:

- jednokanalni analizator snage Yokogawa WT310 – za praćenje vrijednosti napona, struje i snage
- strujni transformator 200/5 A – za prilagodbu mjerene struje maksimalnoj vrijednosti koju ulaz korištenog analizatora snage može podnijeti (maksimalna ulazna struja korištene Yokogawe WT310 iznosi 20 A)
- multimeter Fluke 289 – korišten za mjerenje napona na pomoćnom namotu od jednog zavoja te mjerenje napona uzbudnog namota (dodatna kontrola, provjera ispravno unesenih konstanti analizatoru snage)
- termovizijska kamera Fluke Ti32 – korištena za praćenje zagrijavanja statorskog paketa i detekciju mjesta lokalnog zagrijavanja.

Opisanom postupku podvrgnut je statorski paket namijenjen za sinkroni generator s permanentnim magnetima. Vanjski promjer statora je 1,3 metra te je izveden od cjelovitih limova zbog čega nema utjecaja zračnosti među segmentima. U tablicama 4.3 i 4.4 prikazani su podaci o paketu te izračunate veličine potrebne za provedbu ove ispitne metode.

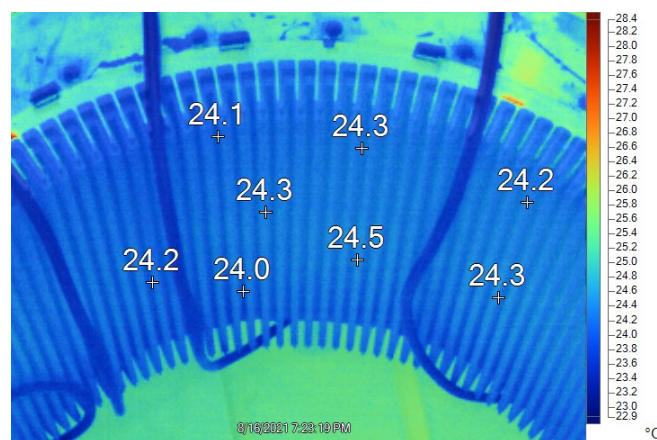
Tablica 4.3: Podaci o paketu

Duljina paketa bez rashladnih kanala	$l_{Fe} = 735 \text{ mm}$
Faktor punjenja	$f_p = 0,95$
Dubina utora s klinom	$h_z = 53 \text{ mm}$
Vanjski promjer paketa	$D_v = 1300 \text{ mm}$
Unutarnji promjer paketa	$D_u = 1100 \text{ mm}$
Aksijalni rashladni kanali	$n = 0$
Indukcija ispitivanja	$B = 1,2 \text{ T}$
Vrsta lima	M230-50A

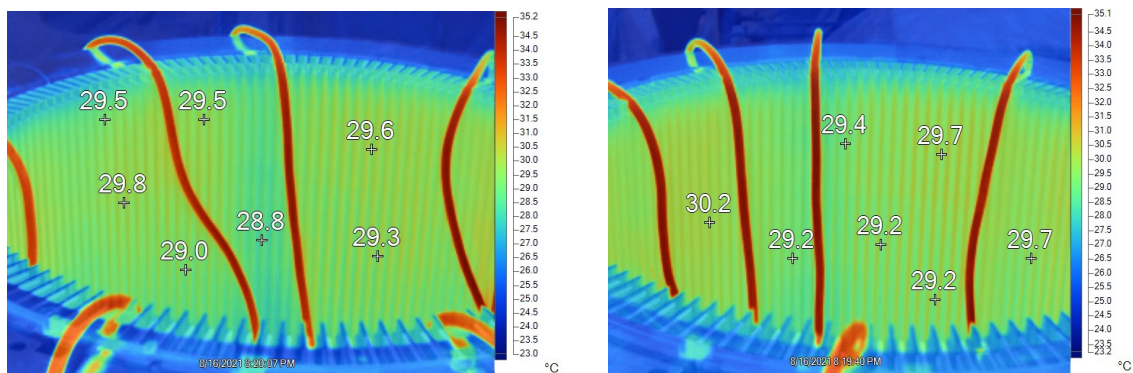
Tablica 4.4: Izračunate veličine

Efektivna duljina paketa	$l_m = 698,3 \text{ mm}$
Visina paketa	$h = 47 \text{ mm}$
Srednji promjer paketa	$d_m = 1253 \text{ mm}$
Masa paketa bez zubi	$m = 981,8 \text{ kg}$
Napon po zavoju	$8,74 \text{ V/zav}$
Odabrani broj uzbudnih zavoja	10
Potreban napon	$87,4 \text{ V}$
Potrebna struja	$51,8 \text{ A}$

Reguliranje napona omogućeno je zakretnim transformatorom. Napon se podiže od nule do izračunate vrijednosti pri kojoj se postiže indukcija 1,2 T. Ispitivanje se provodi 45 minuta kako bi se statorski paket zagrijao i kako bi se mogla uočiti mjesta oštećenja ako ih ima. Temperature se kontroliraju termovizijskom kamerom u hladnom stanju, nakon 25 minuta i nakon 45 minuta. Razlike temperatura između pojedinih mjesta tijekom zagrijavanja za novi paket bez rashladnih kanala ne smiju biti iznad 3 K. Ispitivanjem je utvrđeno da nema kratkospojnih mjesta među limovima kroz koje bi se vrtložne struje mogle zatvarati i prouzročiti štetu na statorskom paketu što je vidljivo iz priloženih slika 4.3 i 4.4.



Slika 4.3: Kontrola zagrijavanja statorskog paketa – hladno stanje

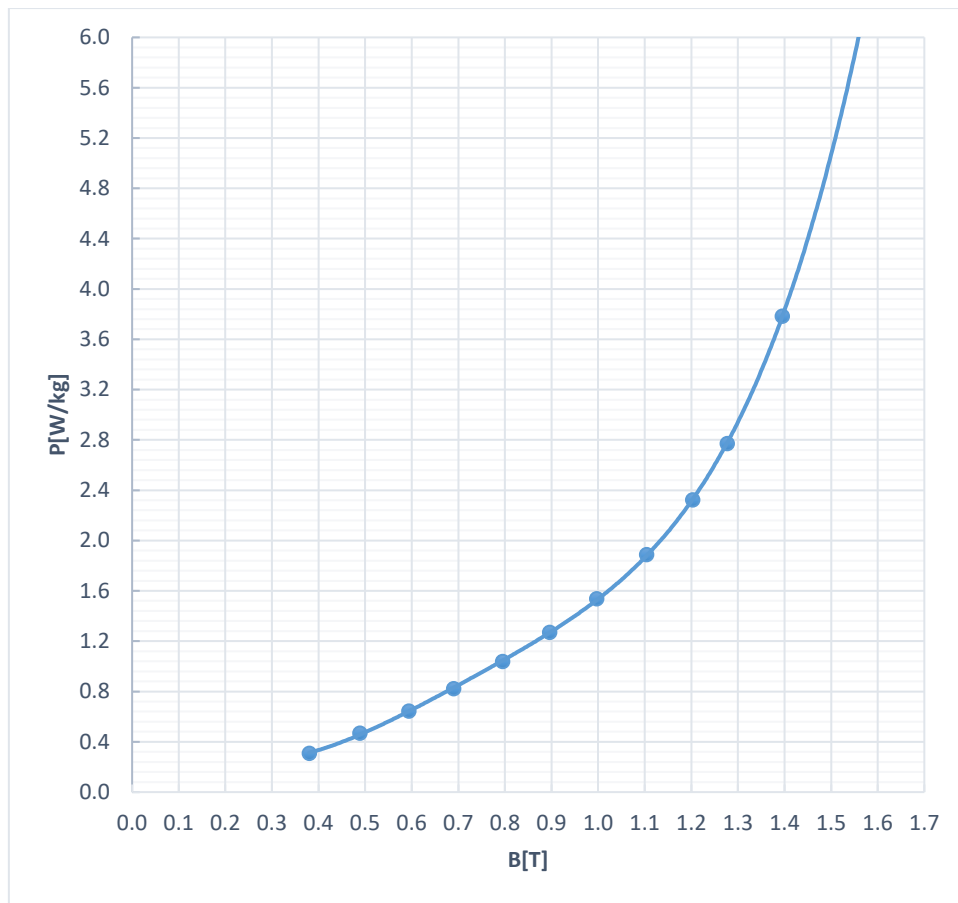


Slika 4.4: Kontrola zagrijavanja statorskog paketa – toplo stanje

Nakon kontrole mjesta zagrijavanja, snima se karakteristika specifičnih gubitaka. Napon se diže iznad izračunate vrijednosti (do 20 %) kako bi se izmjerili gubici na višim vrijednostima indukcije (poželjno do 1,5 T). Zatim se napon postepeno spušta i bilježe se rezultati za 8-10 mjernih točaka. Analizatorom snage mjere se iznosi struje, napona i snage (gubitaka), a iznosi indukcije i specifičnih gubitaka dobiju se računski iz mjerenih podataka. U tablici 4.5 prikazani su rezultati mjerenja. Slika 4.5 prikazuje ovisnost specifičnih gubitaka o magnetskoj indukciji.

Tablica 4.5: Rezultati mjerenja gubitaka u statorskom paketu

Napon U [V]	Struja I [A]	Snaga P [W]	Specifični gubici p [W/kg]	Magnetska indukcija B [T]
101,6	200,7	3714	3,783	1,395
93,0	145,2	2721	2,771	1,277
87,6	117,5	2280	2,322	1,203
80,5	89,9	1853	1,887	1,104
72,6	69,1	1508	1,536	0,997
65,3	55,0	1246	1,269	0,896
58,0	44,4	1019	1,038	0,795
50,3	35,8	807	0,822	0,690
43,3	29,6	632	0,644	0,594
35,6	23,9	460	0,469	0,489
27,66	18,83	302	0,308	0,380

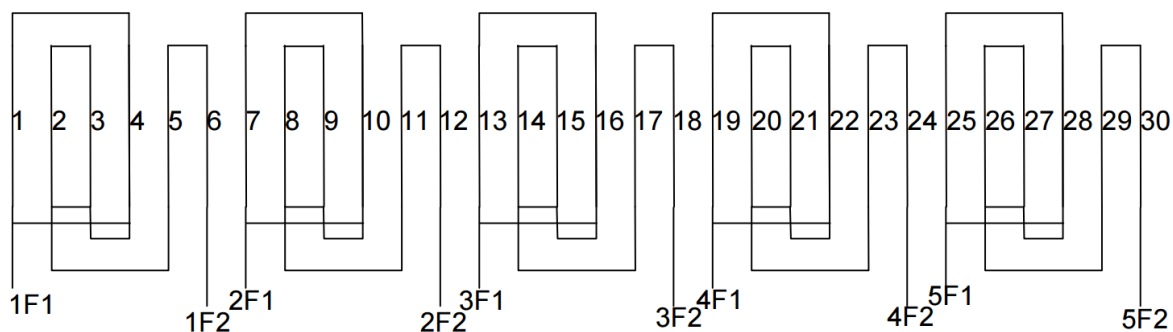


Slika 4.5: Krivulja specifičnih gubitaka

4.2. Magnetiziranje rotora i kontrola polariteta

Naprava za magnetiziranje energizira se kroz 5 zavojnica povezanih na izvor impulsnog napona (generator impulsa) kako bi se ostvarilo jako magnetsko polje potrebno za trajnu magnetizaciju permanentnog materijala. Svaka zavojnica napaja tri povezana koncentrična svitka. Shema namota naprave za magnetiziranje prikazana je slikom 4.6. Dio namota napajanog jednom zavojnicom obuhvaća prostorno 6 polova rotora koji je objekt magnetiziranja, a raspoređen je u 6 utora. Svaki treći zub izrađen je od nemagnetskog i nevodljivog materijala koji ograničava magnetski tok i sprječava grananje magnetskog toka prema susjednim magnetima i polovima. Jednoslojni koncentrični namot je sastavljen od kombinacije 10 svitaka po 10 zavoja te 5 svitaka po 15 zavoja [29]. Svitci koji imaju manje zavoja načinjeni su od deblje žice tako da su

zapravo svi svitci jednakog otpora. Svitci s manje zavoja namotani su oko zuba s nemagnetskim materijalom, dok su svitci s više zavoja postavljeni koncentrično oko svitaka s manje zavoja (svitci koji zauzimaju kombinacije utora 1-4, 7-10, 13-16, 19-22, 25-28).

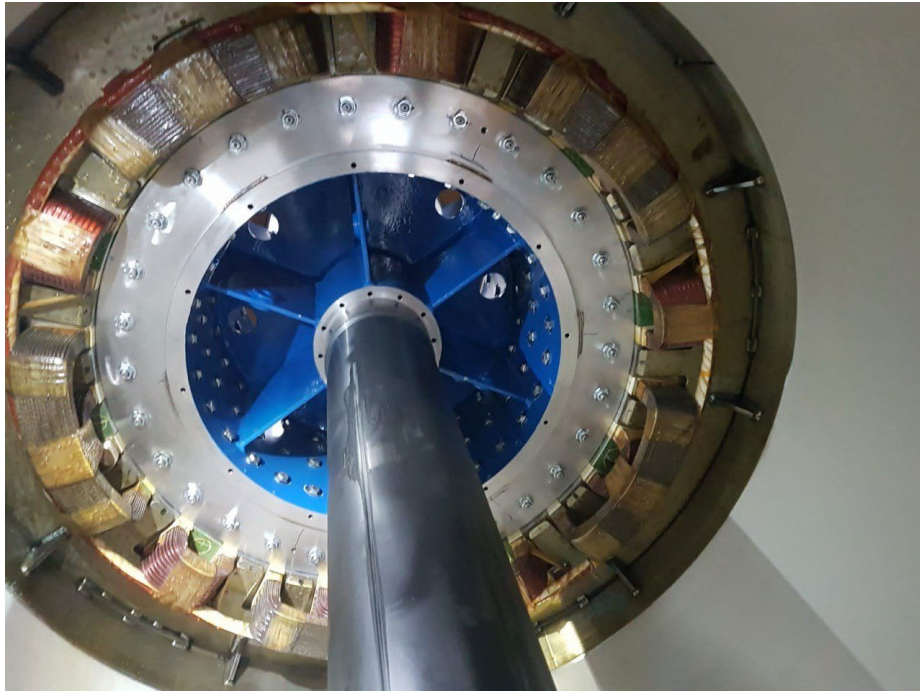


Slika 4.6: Slika namota magnetizera

Prilikom magnetiziranja, pri jednom impulsu struje kroz zavojnice, magnetizira se 10 polova te se zatim rotor pomiče - rotira za 24° , odnosno 2 pola. Cijeli rotor se magnetizira kroz tri položaja. Na slici 4.7 su prikazani položaji posmicanja pomoćne osovine korištene pri magnetiziranju. Slike 4.8 i 4.9 prikazuju rotor umetnut u magnetizer i zavojnice spojene na generator impulsa.



Slika 4.7: Položaji zakretanja osovine pri magnetiziranju rotora



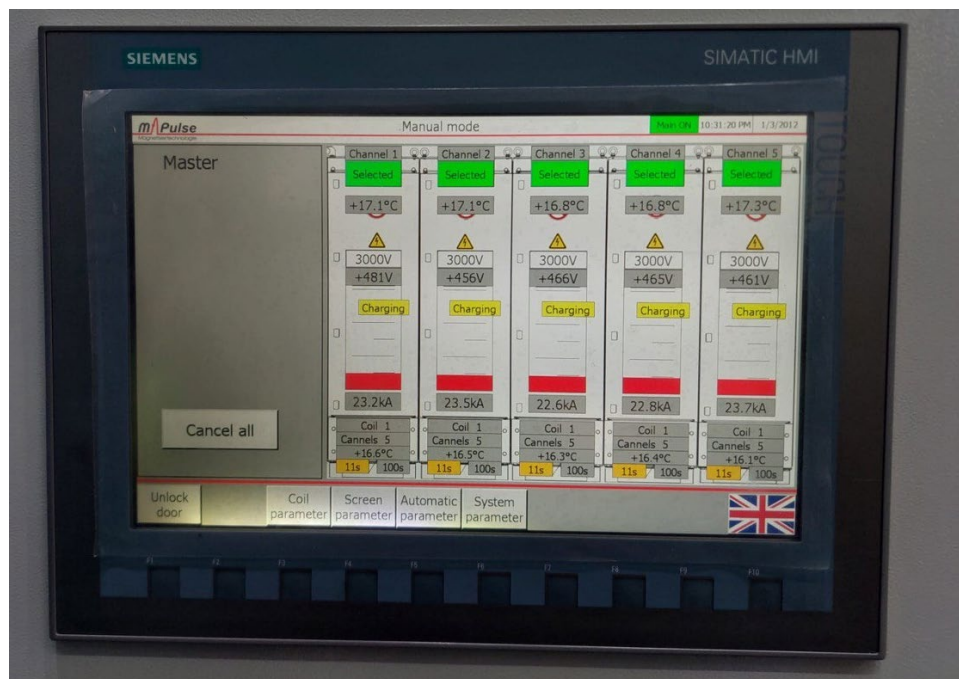
Slika 4.8: Rotor unutar naprave za magnetiziranje



Slika 4.9: Magnetiziranje rotora

Generator impulsa generira velike struje (do 35 kA) punjenjem kondenzatora prema odabranoj naponskoj razini (maksimalno 3000 V). Mjerenje napona kondenzatora vrši se u dvije točke te je omogućeno sigurnosno pražnjenje kapaciteta u slučaju značajnije

razlike između navedena dva mjerenja ili pak u slučaju mjerenja napona iznad maksimalne definirane granice. Brzina pražnjenja kondenzatora pri sigurnosnom pražnjenju ili impulsu magnetiziranja je unutar 1,5 sekundi. Postavljanje naponskih razina i praćenje iznosa struja omogućeno je na panelu prikazanom slikom 4.10.



Slika 4.10: Panel generatora impulsa

Magnetizacija rotora vršena je postepenim izlaganjem magneta sve jačem magnetskom polju. Naponske razine punjenja kapaciteta, struje kroz zavojnice te mjerenja u sva tri položaja prikazana su tablicom 4.6.

Tablica 4.6: Struje magnetiziranja rotora

Napon (V)	1000	2000	2500	2800	2900	3000
Položaj rotora	Struja, kA					
1. položaj (0°)	5,7	15,1	19,7	22,3	23,2	24,0
	5,7	15,4	20,0	22,7	23,5	24,4
	5,5	14,8	19,2	21,7	22,6	23,5
	5,5	15,0	19,0	22,0	22,8	23,8
	4,9	15,6	20,2	22,9	23,7	24,6
2. položaj (24°)	5,9	15,1	19,6	22,3	23,1	24,0
	5,9	15,4	19,9	22,6	23,4	24,3
	5,5	14,8	19,2	21,7	22,5	23,4
	5,7	14,9	19,3	22,0	22,8	23,8
	6,0	15,6	20,2	22,9	23,8	24,6
3. položaj (48°)	5,9	15,1	19,6	22,2	23,1	24,0
	5,9	15,3	19,9	22,6	23,5	24,4
	5,5	14,8	19,2	21,7	22,6	23,4
	5,8	14,9	19,4	22,0	22,8	23,7
	6,1	15,6	20,3	22,9	23,8	24,6

Nakon procesa magnetizacije rotora, izmjerena je indukcija po polu gausmetrom te odrađena kontrola polariteta polova na osnovu Lenzovog pravila praćenjem smjera kazaljke na milivoltmetru na kojem je spojena pomoćna zavojnica. Pomicanjem zavojnice u magnetskom polju, odnosno prema određenom polu, inducira se elektromotorna sila. Dva susjedna pola moraju imati suprotne polaritete (sjeverni i južni pol). Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4.7.

Tablica 4.7: Indukcija i polaritet po polu rotora

Broj pola	B (mT)	Polaritet	Broj pola	B (mT)	Polaritet
1	104	+	16	100	-
2	102	-	17	107	+
3	104	+	18	101	-
4	101	-	19	102	+
5	109	+	20	106	-
6	103	-	21	104	+
7	103	+	22	103	-
8	104	-	23	106	+
9	106	+	24	100	-
10	99	-	25	104	+
11	107	+	26	105	-
12	101	-	27	105	+
13	105	+	28	100	-
14	104	-	29	107	+
15	106	+	30	100	-

4.3. Određivanje momenta tromosti rotora metodom njihanja

Moment inercije rotacijskih strojeva, odnosno rotora, pokazuje koliko otpora taj stroj pruža rotacijskom gibanju. Što je veći moment inercije stroja, stroj je teže pokrenuti, ali i zaustaviti. [24][25][26] Ova veličina je od posebne važnosti kod sinkronih generatora koji priključeni na mrežu sudjeluju u inercijskom odzivu prilikom nastanka poremećaja koji dovode do neravnoteže proizvodnje i potrošnje električne energije te porasta ili pada frekvencije. Definira se konstanta tromosti koja pokazuje koliko dugo generator može davati nazivnu kinetičku energiju na osnovu pohranjene energije u svojim masama (4.13). Obično se izračunava nadomjesna konstanta tromosti za određeno područje, a što je taj iznos veći, smanjuje se brzina pada frekvencije prilikom poremećaja, iznos maksimalnog odstupanja te pomiče vrijeme istog. Posljedično, što

je konstanta tromosti veća, znači da su strojevi masivniji, teže ih je smiriti te je sporiji oporavak frekvencije nakon poremećaja.

$$H = \frac{E_k}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{sm})^2}{S_b} \text{ [s]} \quad (4.13)$$

Priključenje generatora na mrežu preko frekvencijskih pretvarača ima negativnu posljedicu za inercijski odziv sustava budući da generator upravljani pretvaračem ne osjeti promjene frekvencije u sustavu. No generatori manjih snaga, a posljedično i manjih dimenzija i mase, značajnije ne pomažu ili ne odmažu u inercijskom odzivu svojim (ne)sudjelovanjem, kao što je slučaj s ispitivanim generatorima.

Ako se tijelo definira kao suma određenog broja manjih elemenata, njegov moment tromosti definiran je izrazom (4.14) odnosno (4.15).

$$I = \sum_{i=1}^n r_i^2 \cdot \Delta m_i \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (4.14)$$

$$I = \int r^2 dm \quad (4.15)$$

Zakretni moment određen je momentom tromosti i kutnim ubrzanjem (4.16).

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.16)$$

Eksperimentalno utvrđivanje momenta inercije rotora ispitivanog stroja provedeno je metodom njihanja. Na rotor se postavlja uteg unaprijed poznate mase i momenta inercije, bilježi se referentni početni položaj te se uteg pomiče iz ravnotežnog položaja za do 15°. Na taj način ostvaren je titrajni sustav pri čemu uteg djeluje na rotor momentom prema (4.17).

$$M = -g \cdot m \cdot r \cdot \sin(\alpha) \quad (4.17)$$

Budući da je riječ o malim kutevima, uzima se aproksimacija $\sin(\alpha) \approx \alpha$.

Povezivanjem prethodna dva izraza i derivacijom po vremenu dolazi se do diferencijalne jednadžbe (4.18) čije je rješenje definirano izrazom (4.19) uz inicijalne uvjete $\alpha = \alpha_m$, $t = 0$ i $\omega = 0$.

$$-g \cdot m \cdot r \cdot \omega = I \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad (4.18)$$

$$\sin \sqrt{\frac{g \cdot m \cdot r}{I}} \cdot t = \omega \cdot \frac{I}{K \cdot \alpha_m} \quad (4.19)$$

Navedenim izračunom dobiven je izraz za trajanje jednog njihaja (4.20) koje se dobiva direktno mjerenjem za vrijeme provođenja ispitivanja, a dobiveni podaci i izvedeni izraz koriste se za računanje momenta tromosti pri čemu je važno iznos umanjiti za moment tromosti utega [12].

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I}{g \cdot m \cdot r}} \quad (4.20)$$

Kako bi se dobilo vrijeme jednog njihaja (jedan njihaj podrazumijeva prolazak utega dva puta kroz ravnotežno stanje) mjeri se vrijeme potrebno za nekoliko njihaja te se navedeno mjerenje ponavlja minimalno 3 puta. Za konačni rezultat uzima se srednja vrijednost koja se potom dijeli s brojem njihaja. Izraz za eksperimentalno određivanje momenta tromosti definiran je izrazom (4.21).

$$I = \frac{m_0 \cdot g \cdot r \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2} - I_0 \quad (4.21)$$

Za mjerenje momenta inercije korišten je uteg od 112,5 kg postavljen na radijus od 0,943 m ($I_0=100,04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$). Mjereno je vrijeme potrebno za 5 titraja, a mjerenja su ponovljena četiri puta. Rezultati su prikazani u tablici 4.8.

Tablica 4.8: Mjereni rezultati prilikom metode njihanja

Broj njihaja	5
1. mjerenje	23,18 s
2. mjerenje	23,43 s
3. mjerenje	23,44 s
4. mjerenje	23,47 s

Iz srednje vrijednosti vremena njihaja $T_{sr}=23,38$, dobiva se vrijeme jednog njihaja $T=4,676$ na osnovu kojeg je moguće prema izrazu izračunati moment inercije rotora $I=476,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Norma IEC 60034-1 definira dozvoljeno odstupanje $\pm 10 \%$ od projektirane vrijednosti što je u ovom slučaju usporedbom s projektnim podacima zadovoljeno.

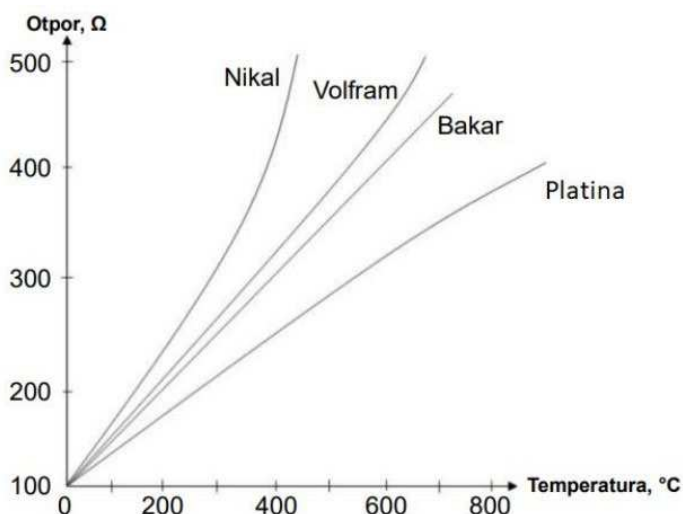
5. ISPITIVANJA NA GOTOVOM STROJU

5.1. Ugrađena pomoćna oprema

Prije ispitivanja u vrtnji potrebno je provjeriti ugrađenu pomoćnu opremu – elemente poput termometara, grijača, dodatnih senzora za monitoring, koji su instalirani unutar stroja te čiji su izvodi dostupni u priključnoj kutiji. Provjera obično podrazumijeva kontrolu ohmskog otpora i otpora izolacije, kao i vizualnu te funkcionalnu kontrolu.

5.1.1. Pt100 sonde

Princip rada Pt100 sonde bazira se na linearnom porastu otpora s povećanjem temperature. Za izradu se koriste materijali koji imaju dobru toplinsku postojanost te velik temperaturni koeficijent (najčešće platina i nikal). Ovisnost otpora o temperaturi za materijale koji se najčešće koriste za izradu otporničkih termometara prikazana je na slici 5.1.

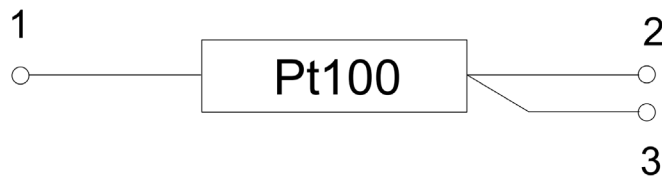


Slika 5.1: Temperaturna ovisnost optora za različite materijale[41]

Ovisno o udaljenosti mjesta gdje je senzor postavljen te mjesta nadzora mjerenja, potrebno je u obzir uzeti utjecaj otpora dovodnih vodova. Prema kriterijima za točnost mjerenja, koriste se dvožilne, trožilne i četverožilne Pt100 sonde. Kod dvožilnog spajanja nije moguće izmjeriti čisti otpor termometra, odnosno rezultati mjerenja su narušeni uključenim otporom žica. Kompenzacija trećom žicom omogućuje korekciju mjerenog otpora za otpor žica uz pretpostavku da su sve tri žice jednake duljine i istog

materijala, tj. imaju isti otpor. Najpreciznije mjerenje daje četverožilno spajanje gdje se otpor žica s obje strane zasebno mjeri i oduzima, odnosno zahtjevi za istom duljinom i otporom vodiča ne moraju biti zadovoljeni. Npr. za dužinu kabela od 10 m i presjeka 0,22 mm², pri temperaturi od 150 °C, pri dvožilnom mjerenju zabilježena je greška od 5,25 °C, a pri četverožilnom 0,45 °C.

Na slici 5.2 ugrađene su trožilne Pt100 sonde u statorskom namotu: po dvije za svaku fazu, jedna sonda za kontrolu temperature kućišta te sonde u gornjem i donjem ležaju. Definirane su temperature pri kojima je potreban pojačan nadzor (kućište – 20 °C, namot statora – 155°C, ležajevi 80°C) te temperature pri kojima je nužno isključenje (kućište – 30 °C, namot statora – 180°C, ležajevi 90 °C).



Slika 5.2: Pt100 sonda

Kontrolne mjere izvršene na ugrađenim termosondama podrazumijevaju mjerenje ohmskog otpora, provjeru kratkog spoja (između stezaljki 2 i 3) te mjerenje izolacije pri naponu induktora od 250 V. Na osnovu izmjerenog ohmskog otpora, za provjeru ispravnog rada termometara, izračunava se temperatura ((5.1) i (5.2)) i uspoređuje s trenutnom mjerenom temperaturom okoline (primjer na rezultatu mjerenja otpora jedne sonde uz $T_{okolina}=20,5$ °C).

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (5.1)$$

$$T = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha} + T_0 = \frac{108.1 - 100}{100 \cdot 0.00385} + 0 = 21.04 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.2)$$

5.1.2. Grijači

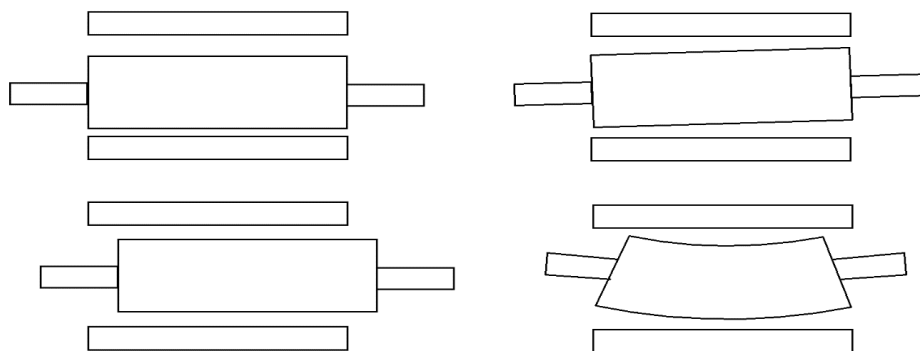
Električni izolacijski materijali skloni su higroskopsnosti, odnosno upijanju vode iz okoline zbog čega slabi njihova dielektrična čvrstoća te se smanjuje vijek trajanja. Kako bi se smanjio utjecaj vlage na izolaciju, u električne strojeve se ugrađuju grijači. U

ispitivani objekt ugrađuju se 4 grijača snage 300 W za napon od 230 V. Ispituje se otpor izolacije ispitnim naponom od 500 V te ohmski otpor (npr. izmjereni otpor jednog od grijača $R_h=172,25 \Omega$) čija se vrijednost provjera usporedbom s računski dobivenim podatkom za toplo stanje (5.3).

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{300} = 176,33[\Omega] \quad (5.3)$$

5.1.3. Magnetski senzori za provjeru ekscentriciteta

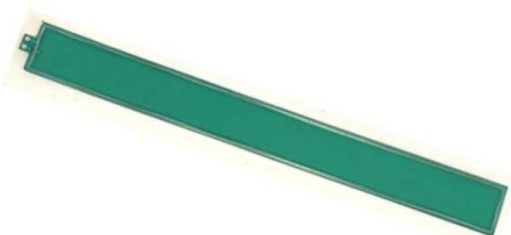
Ekscentricitet rotora predstavlja pojavu nejednolikosti zračnog raspora, odnosno nepodudaranja centra rotora s centrom statora. Razlikuje se statički ekscentricitet uzrokovan nepreciznim centriranjem ili ovalnošću statora kod kojeg točka najmanjeg razmaka miruje pri rotaciji te dinamički ekscentricitet pri kojemu promatrana točka rotira skupa s rotorom, a uzroci mogu biti mehaničke rezonancije na kritičnim brzinama, savijena osovina ili istrošenost ležajeva. Ovisno o položaju rotora u odnosu na stator, može se detektirati radijalni (paralelni ili dijametralni), aksijalni ili sedlasti ekscentricitet što je prikazano slikom 5.3. Opisani kvar uzrokuje neravnomjernu raspodjelu magnetskog toka u zračnom rasporu što dovodi do pojave nebalansirane magnetske sile (*unbalanced magnetic pull – UMP*) koja nastoji primaknuti rotor statoru [19].



Slika 5.3: Vrste ekscentriciteta: paralelni (gore lijevo), dijametralni (gore desno), aksijalni (dolje lijevo), sedlasti (dolje desno)

Za detekciju statičkog ekscentriciteta, na zube statora postavljeni su magnetski senzori, odnosno mjerni svitci prikazanih slikom 5.4 u kojima se prema Faradayevom zakonu inducira napon proporcionalan brzini promjene magnetskog toka. Pri odabiru pozicija mjernih svitaka, važno je odabrati mjesta gdje će ulančeni magnetski tok biti jednak.

Zbog toga razmak između svitaka mora biti minimalno jednak polnom koraku ili višekratniku polnog koraka. Potrebno je obratiti i pozornost na polaritet napona koji će se inducirati: u svitcima udaljenim za neparne višekratnike polnog koraka induciraju se naponi suprotnog predznaka, dok je za parne višekratnike polaritet isti. Svitke je moguće spojiti u seriju te direktno mjeriti razliku napona ili pak vršiti mjerenja za svaki svitak odvojeno te analizirati izmjerene rezultate. Oba pristupa su realizirana te su rezultati prikazani tablicom 5.1 i slikama 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 te 5.10.



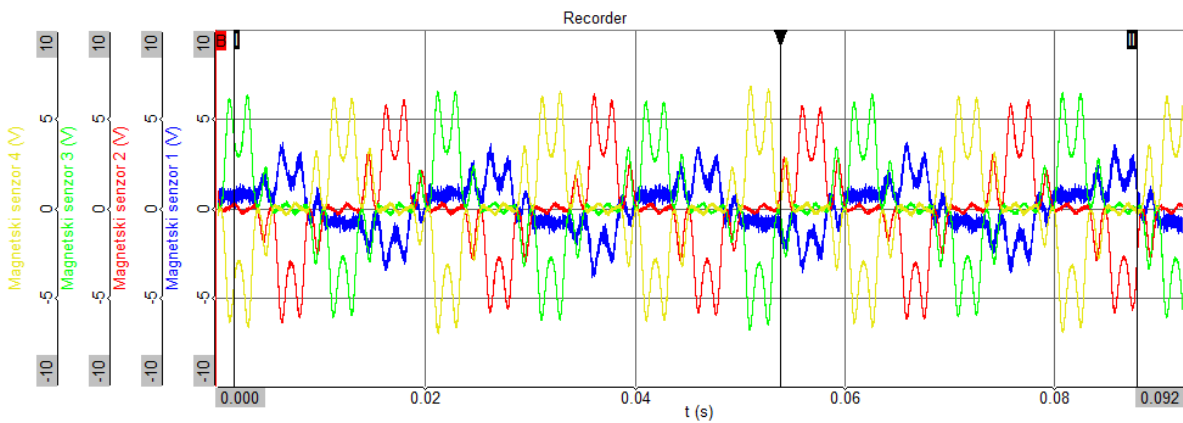
Slika 5.4: Mjerni svitak za kontrolu enscentriciteta

Signali su dovedeni na analogne ulaze, uz uzorkovanje napona od 10 kHz. Dozvoljena naponska razina za mjerne svitke je ± 10 . Signali su dovedeni na mjernu stanicu DEWE 43a, a mjerenja obrađena u Dewesoftu. Naponi u svim mjernim svitcima trebaju biti jednaki po iznosu u slučaju ispravnog stanja. Ako dođe do ekscentriciteta, najveći napon se javlja kod svitka kojem je rotor najbliži. Kako bi se mogao detektirati smjer pomaka rotora, potrebno je postaviti minimalno 4 magnetska svitka. Npr. ako su senzori postavljeni podudarno s x i y osi, a rotor se pomakne u smjeru x osi, u svitcima na y osi doći će do promjene napona po iznosu, ali ti naponi će idalje biti jednaki, odnosno nema detekcije razlike napona.

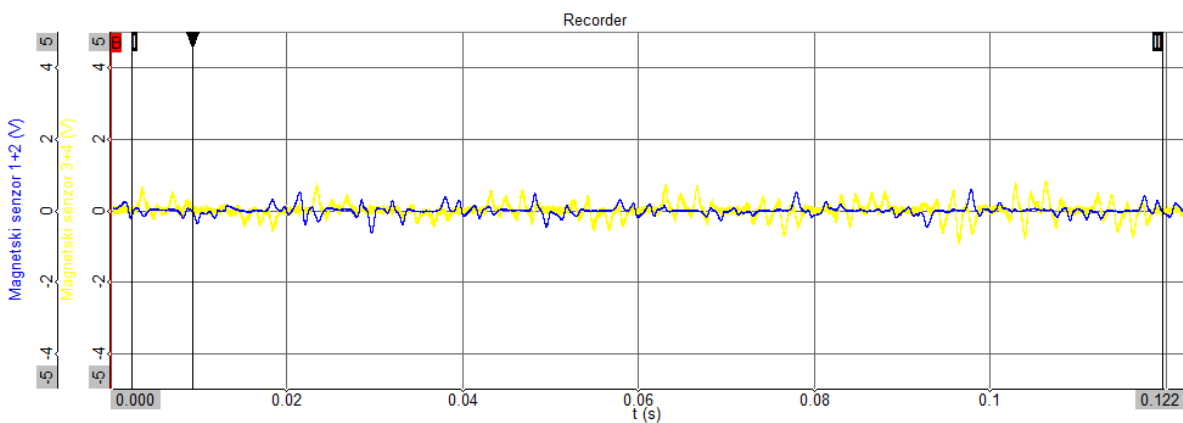
Prije snimanja rezultata, izvršena je provjera svakog od senzora mjerenjem otpora namota i otpora izolacije ispitnim naponom od 250 V. Prikazani su rezultati zabilježeni tijekom praznog hoda, terećenja s i bez sinusnog filtra. Serijski se spajaju svitci 1-2 te 3-4 (razmaknuti za neparni višekratnik polnog koraka, naponi različitih polariteta, očekuje se mjerenje razlike napona jednako nuli). Prema istraživanjima, prihvatljiv je statički ekscentricitet do ± 10 % vrijednosti zračnog raspora.

Tablica 5.1: Provjera ekscentriciteta

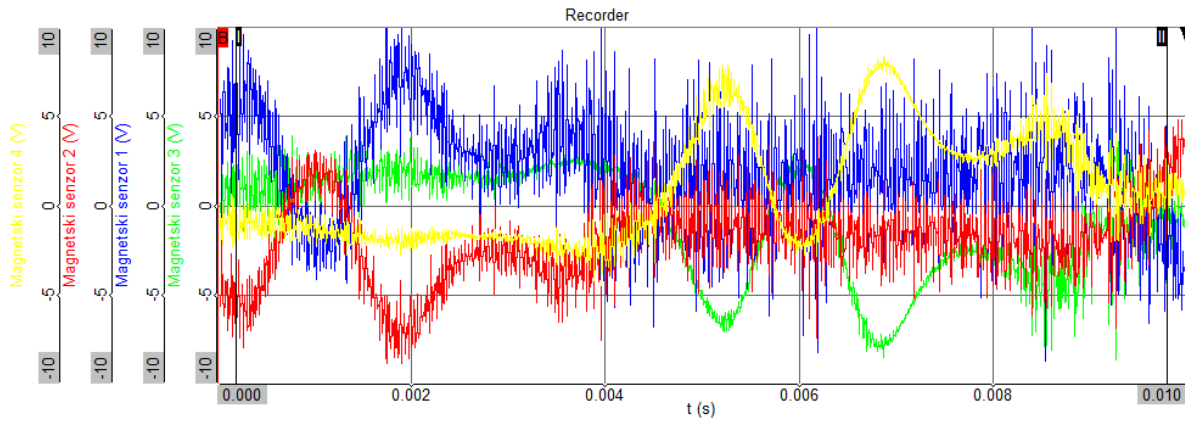
	Prazni hod	Teret sa sinusnim filterom	Teret bez sinusnog filtera
Mjerni svitak 1	1,39 V	3,86 V	3,97 V
Mjerni svitak 2	2,46 V	3,14 V	3,29 V
Mjerni svitak 3	2,56 V	3,20 V	3,41 V
Mjerni svitak 4	2,65 V	3,18 V	3,52 V
Serijski spoj 1-2	0,13 V	1,20 V	1,44 V
Serijski spoj 3-4	0,19 V	0,98 V	1,24 V



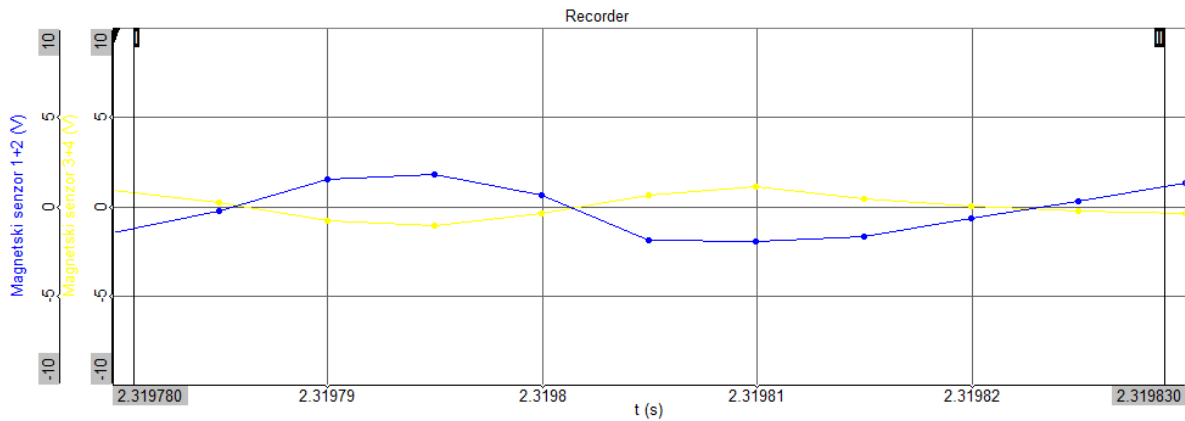
Slika 5.5: Prazni hod - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima



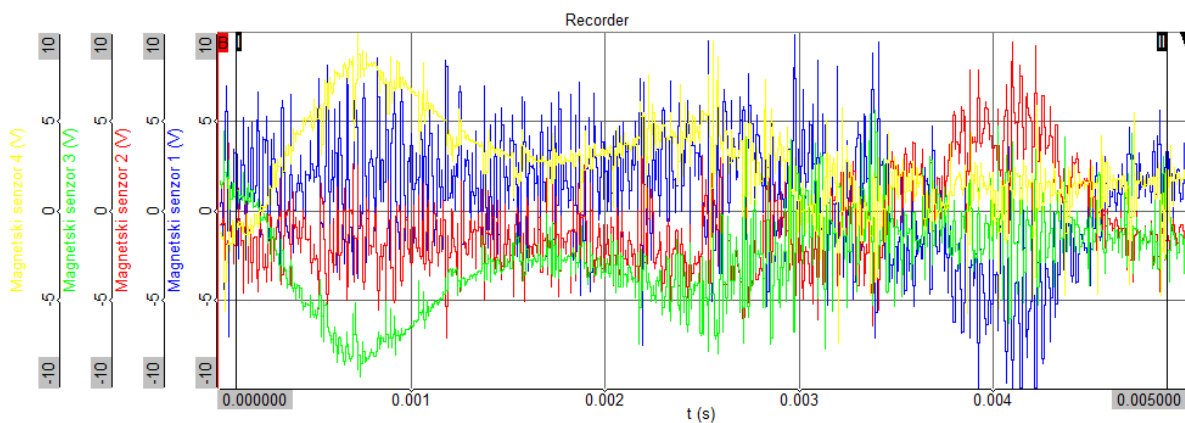
Slika 5.6: Prazni hod - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka



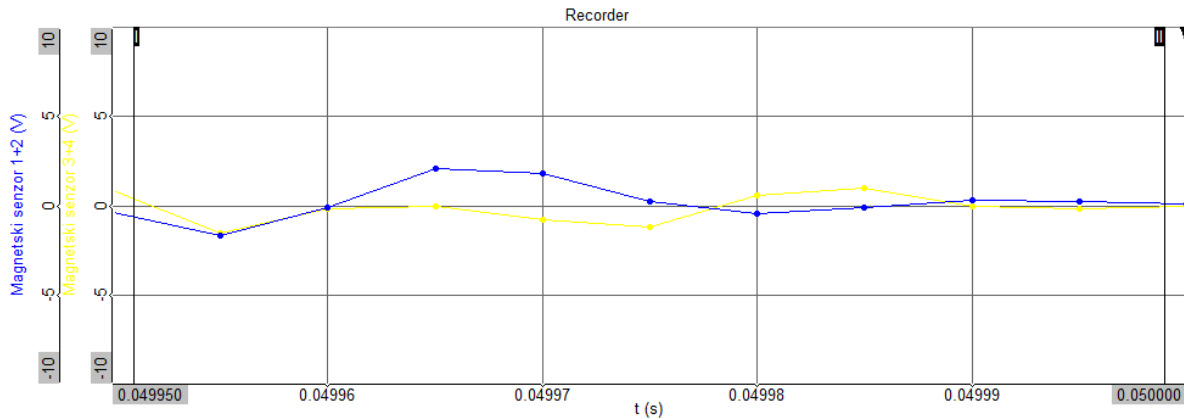
Slika 5.7: Teret sa sinusnim filterom - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima



Slika 5.8: Teret sa sinusnim filterom - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka



Slika 5.9: Teret bez sinusnog filtera - inducirani naponi u pojedinačnim mjernim svitcima



Slika 5.10: Teret bez sinusnog filtera - razlika napona mjerena u parovima serijski spojenih mjernih svitaka

5.1.4. Resolver i enkoder

Zbog mogućnosti pretvarača ispitne stanice, ispitivanja su provedena korištenjem enkodera za informaciju o brzini i smjeru vrtnje, dok će na elektrani biti instaliran resolver.

5.1.5. Prsten za zaštitu od ležajnih struja

Nesavršenosti poput nejednolikosti zračnog rasporeda te rasporeda između limova prilikom pakiranja statorskog paketa vode do nastanka nesimetričnog magnetskog toka pri rotaciji. Navedene nesimetrije dovode do zatvaranja magnetskog kruga preko kućišta, pogonskog ležaja, osovine i stražnjeg ležaja te posljedično induciranja napona na osovini. Taj napon može uzrokovati protok ležajnih struja, ako se premosti izolacija ležajeva. Europske (IEC 60034-17) i američke norme (NEMA) dozvoljavaju osovinski napon do 500 mV, odnosno 1 V za niskonaponske strojeve spojene na mrežu. Apsolutni iznos ležajnih struja koji bi se smatrao štetnim ovisi o vrsti ležajeva, a spomenute struje su veće što je stroj veći (veći je parazitski magnetski krug). Kako bi se spriječilo oštećenje ležajeva, obično se stražnji ležaj izolira kako bi se prekinuo strujni krug.

Problem ležajnih struja posebno se javlja kod strojeva napajanih preko frekvencijskog pretvarača. Pri nižim sklopnim frekvencijama javljaju se dodatni gubici, buka te

mrežkanje momenta. Više sklopne frekvencije rješavaju navedene probleme, ali visokofrekventne komponente napona u interakciji s kapacitetima stroja uzrokuju različite tipove ležajnih struja koje se mogu smanjiti instalacijom filtera na izlazu iz pretvarača.

Razlikuju se četiri tipa ležajnih struja koje se javljaju kao posljedica napajanja preko pretvarača. [23]. Kapacitivne ležajne struje (5.4) su reda veličine amplitude do 200 mA, a u praksi se pokazalo da je ova komponenta ležajnih struja redovno mala i ne predstavlja opasnost za ležajeve. Nesimetričnost napona zvjezdišta uzrokuje pad napona na ležaju između unutarnjeg i vanjskog prostora, a budući da ležaj posjeduje ohmski otpor, dolazi do protoka ove komponente struje (stroj ima svoje kapacitete kao što su kapacitet ležaja i kapacitet između statorskog namota i kućišta – kapacitivno djelilo napona).

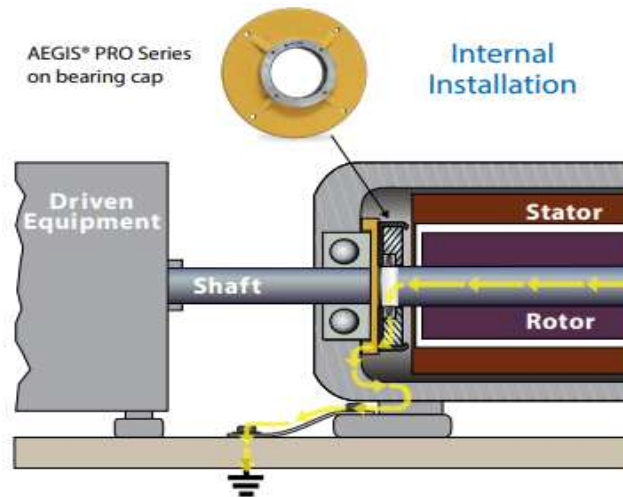
$$i_b = C_b \cdot \frac{dv_b}{dt} \quad (5.4)$$

Struje elektrostatskog pražnjenja nastaju kada se u električki nabijenom sredstvu za podmazivanje ležaja prijeđe naponska granica koja obično iznosi 5 - 30 V na temperaturi od 20 °C, a ta granica se smanjuje s porastom temperature. Ova komponenta ležajnih struja javlja se u vidu strujnih impulsa amplitude do 5 A te uzrokuje ozbiljna oštećenja, posebno na manjim strojevima.

Cirkulirajuće ležajne struje javljaju se zbog dodatne struje uzemljenja kao posljedice kapaciteta između statorskog namota i kućišta. Navedena struja uzrokuje magnetski tok oko osovine te se inducira osovinski napon koji, ako je dovoljno velik, premosti izolaciju ležaja. Ova komponenta ležajnih struja doseže amplitude i do 20 A.

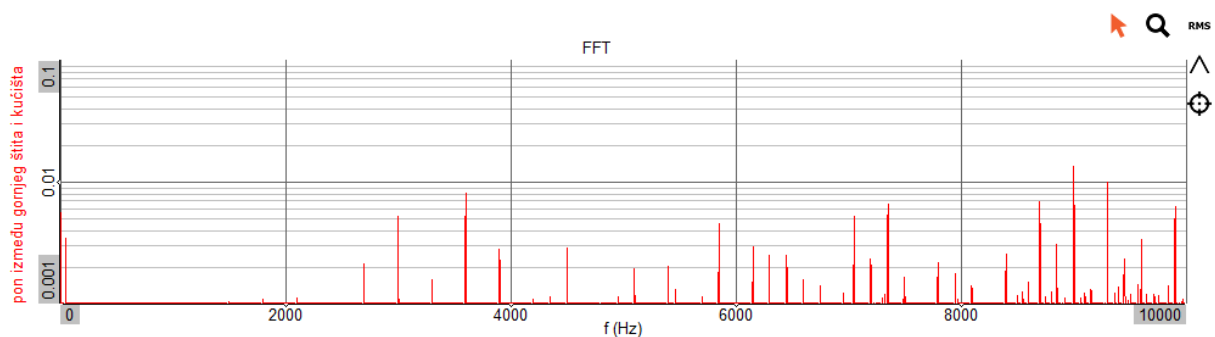
Posljednja komponenta ležajnih struja odnosi se na slučaj uzemljenja rotora stroja preko tereta s kojim je skuplan.

Kako bi se spriječio utjecaj ležajnih struja, izoliran je štit na stražnjoj strani te instaliran AEGIS prsten na pogonskoj strani za uzemljenje osovine, prikazano slikom 5.11.



Slika 5.11: Instalacija AEGIS prstena[28]

Prilikom ispitivanja izvršeno je mjerenje napona između gornjeg štita prema kućištu. Izmjeren je napon u iznosu od 300 mV, a FFT analiza je prikazana slikom 5.12.

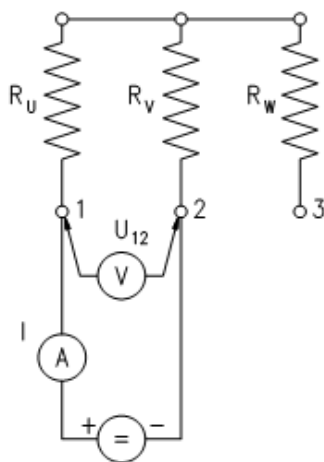


Slika 5.12: FFT analiza napona između gornjeg štita i kućišta

5.2. Mjerenje otpora namota

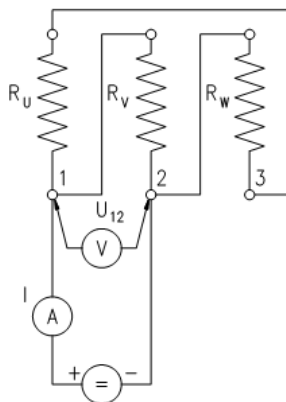
Otpori namota mjere se radi provjere simetrije faznih otpora namota te usporedbe mjerenih vrijednosti s projektnim podacima. Norma IEC 60034-4 preporučuje mjerenje U-I metodom korištenjem stabilnog istosmjernog izvora. Potrebno je mjeriti otpor svake faze zasebno, a preporuča se ponavljanje mjerenja 3-5 puta. Prilikom mjerenja potrebno je obratiti pozornost na odsustvo prijelaznih pojava, odnosno pričekati da očitavanja na korištenim instrumentima postanu stabilna. Prirast temperature prilikom mjerenja ne smije biti veći od 1 K – gustoća struje kroz namot mora biti manja od 1,826 A/mm² tijekom max. 1 minute.

Koristi se istosmjerni izvor napona te analogni voltmetar i ampermetar. Prilikom mjerenja važno je obratiti pozornost na podešavanje mjernog opsega instrumenata, odnosno na zadovoljen zahtjev za otklonom kazaljke minimalno za 2/3. Ako je namot moguće raspojiti, mjerenje se provodi spajanjem na krajeve određene faze namota. Ako je prisutna situacija nedostupnog zvjezdišta ili spoj trokut, prikazano slikama 5.13 i 5.14, moguće je mjeriti otpor između svake kombinacije dviju faza pa računskim putem dobiti pojedine otpore faza ((5.5), (5.6)).



Slika 5.13: Mjerenje ohmskog otpora namota U-I metodom u spoju zvijezda

$$R_{U,Y} = \frac{R_{12} + R_{31} + R_{23}}{2} \quad (5.5)$$



Slika 5.14: Mjerenje ohmskog otpora namota U-I metodom u spoju trokut

$$R_{U,\Delta} = \frac{2 \cdot R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \quad (5.6)$$

Kod spojenog zvjezdišta jedna od opcija je i mjerenje struje između dvije napajane faze i napona između napajane i nenapajane faze (direktno mjerenje otpora faze).

Mjerenje je moguće izvršiti i s ohmmetrom niskog otpora (DLRO). Za potrebe ovog ispitivanja korišten je Megger DLRO600 koji može generirati istosmjernu struju u rasponu od 10 do 600 A, a namijenjen je za mjerenje otpora od 0,1 $\mu\Omega$ do 1 Ω . Koristi se 4-žilna metoda mjerenja kako bi se poništio utjecaj otpora mjernih kabela.

Provedenim mjerenjima zadovoljeni su kriteriji prihvatljivosti – dozvoljeno odstupanje ohmskog otpora svake faze je $\pm 5\%$ od projektirane vrijednosti, a razlika između faza ne smije prelaziti 1,5 %.

5.3. Mjerenje otpora izolacije

Mjerenje otpora izolacije namota se provodi induktorom. Kod strojeva kojima je namot spojen u zvjezdište, ako je zvjezdište dostupno, poželjno ga je raspojiti i mjeriti izolaciju svake faze. Izolacija se mjeri tako da se jedna stezaljka priključi na fazu, a druga se spaja na kućište. Prilikom mjerenja izolacije jedne faze, potrebno je i ostale faze uzemljiti. Ako je namot spojen u trokut ili zvjezdište nije dostupno, mjeri se otpor izolacije cijelog namota.

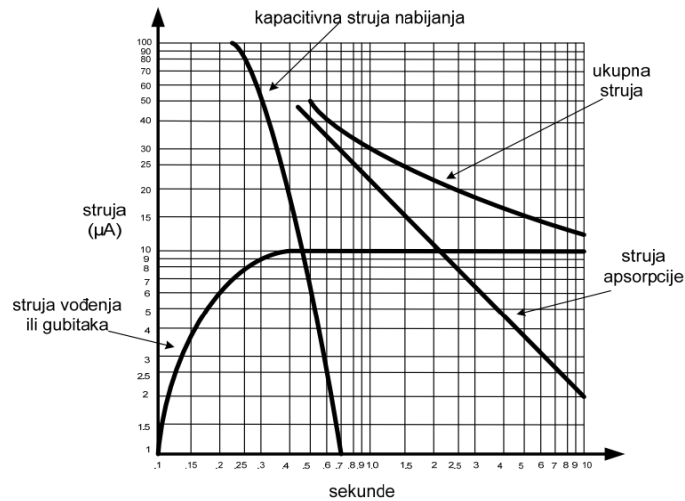
Testiranje se provodi istosmjernim naponom, a dielektrik je prilikom trajanja testa izložen struji koja se sastoji od sljedećih komponenata na slici 5.15:

- kapacitivna struja I_C – nabijanje izolacije, funkcija vremena, najeća u trenutku kada se narine DC napon, zatim eksponencijalno pada do nule, iščezava nakon 10ak sekundi (5.7)

$$i_C = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5.7)$$

- struja apsorpcije I_A – najeća u trenutku kada se narine DC napon, iščezava sporije u odnosu na kapacitivnu komponentu

- rasipna struja I_L – gubici na površini dielektrika
- struja vođenja I_R – i izolacijski materijal je donekle vodljiv, a veličina ove komponente struje ovisi o vrsti materijala, stupnju onečišćenja i vlage u izolaciji te trenutnoj temperaturi



Slika 5.15: Komponente struje prilikom testiranja izolacije istosmjernim naponom [20]

Ovisno o zahtjevima, mjeri se indeks apsorpcije (DAR) ili indeks polarizacije (IP). Indeks apsorpcije predstavlja omjer otpora izolacije za vrijeme trajanja testa od 60 i 15 sekundi (5.8). Vrijednost otpora nakon 1 minute je vrijednost bez utjecaja kapacitivne struje. Ako je $DAR < 2$, komponenta struje gubitaka je velika, odnosno izolacija je narušena nečistoćama i vlagom.

$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{\frac{V}{I_A + I_L + I_R}}{\frac{V}{I_C + I_A + I_L + I_R}} = 1 + \frac{I_C}{I_A + I_L + I_R} \quad (5.8)$$

Indeks polarizacije predstavlja omjer otpora izolacije za vrijeme trajanja testa od 10 i 1 minute, a mjereni rezultati nakon 10 minuta su bez utjecaja kapacitivne struje i struje apsorpcije (5.9). Indikator za narušeno zdravlje izolacije je $PI < 1,5$.

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} = \frac{\frac{V}{I_L + I_R}}{\frac{V}{I_A + I_L + I_R}} = 1 + \frac{I_A}{I_L + I_R} \quad (5.9)$$

Norma IEC 60034-27-4 definira provođenje mjerenja, naponske razine i kriterije prihvatljivosti pri mjerenju otpora izolacije i indeksa polarizacije na izolaciji namota rotacijskih električnih strojeva. Za ispitivanje kvalitete izolacije na ispitivanom objektu korišten je induktor Megger MIT1512, a ispitivanje je provedeno na naponskoj razini od 1000 V pri 24 °C. Izmjeren je otpor izolacije svake faze namota, a rezultati mjerenja su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2: Otpor izolacije statorskog namota u hladnom stanju

faza namota	R _{15s} (MΩ)	R _{60s} (MΩ)	DAR
U:VWN	863	2910	3,372
V:UWN	900	3020	3,356
W:UVN	876	2960	3,379

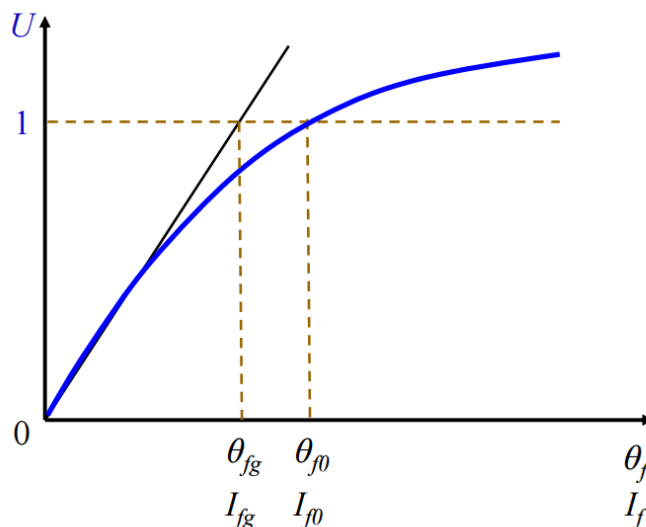
5.4. Prazni hod

Norma IEEE Std 1812 definira ispitne metode za utvrđivanje i provjeru električnih, mehaničkih i termičkih svojstava stroja u stacionarnom stanju. Ispitivanja obuhvaćaju i vrtnju u praznom hodu, što je kod strojeva s permanentnim magnetima izuzetno važno kako bi se još jednom potvrdilo ispravno magnetiziranje rotora, odnosno magneta.

Generalno, pri ispitivanju sinkronih strojeva s uzbudnim namotom, snima se karakteristika praznog hoda, odnosno ovisnost induciranog napona o struji uzbude. Uzbudni namot odgovoran je za stvaranje magnetskog toka koji se zatvara putem jedan pol - zračni raspor - zubi statora - jaram statora - zubi statora - drugi pol - jaram rotora (glavni magnetski tok). Prilikom vrtnje rotora inducira se napon koji ovisi o izvedbi statorskog namota, frekvenciji te magnetskom toku, odnosno uzbudi (5.10).

$$E = 4.44 \cdot f \cdot w_a \cdot f_n \cdot \Phi_{gl} \quad (5.10)$$

Pri niskim razinama uzbudne struje zanemaruje se pad magnetskog napona u željezu te je karakteristika predstavljena pravcem. Pri većoj uzbuđi i većim indukcijama, dolazi do zasićenja u željezu i gubi se linearni oblik krivulje praznog hoda, prikazano slikom 5.16. Nagib krivulja određen je zračnim raspорom – veći raspор znači i veći magnetski otpor, odnosno blaži nagib. [14], [16], [30].



Slika 5.16: Krivulja praznog hoda sinkronog stroja [14]

Na osnovu opisanih karakteristika određuje se nezasićena uzbudna struja praznog hoda i uzbudna struja pri kojoj se inducira nazivni napon. Ti podaci, uz podatak o uzbuđnoj struji kratkog spoja, omogućuju izračun nezasićene i zasićene sinkrone reaktancije (5.11).

$$x_d = \frac{I_{fk}}{I_{fg}} \cdot 100\%, \quad x_d = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \cdot 100\% \quad (5.11)$$

Snimanje karakteristike praznog hoda, odnosno dostupnost regulacije uzbuđe omogućuje razdvajanje gubitaka praznog hoda koji se sastoje od gubitaka trenja i ventilacije (trenje u ležajevima, trenje zraka zbog rotacije i sl.), gubitaka u željezu statora (gubici histereze i vrtložnih struja) te gubitaka u uzbuđnom namotu (gubici u bakru). Gubici trenja i ventilacije ovisni su o brzini, a budući da se karakteristika praznog hoda snima uz konstantan iznos brzine, konstantan je i udio navedenih gubitaka koji se

može očitati iz karakteristike u početnoj točki ($I_r=0$). Gubici u željezu statora ovise o frekvenciji i indukciji kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima.

Kod strojeva s permanentnim magnetima prisutna je trajna uzbuda koju je nemoguće regulirati. Stoga ne postoji mogućnost snimanja krivulje praznog hoda i mjerenje odvojenih gubitaka praznog hoda uz magnetizirani rotor. Alternativno, moguće je izmjeriti gubitke trenja i ventilacije vrtnjom stroja prije magnetizacije samog rotora direktnim (mjerenje momenta preko mjerne osovine) ili indirektnim mjerenjem (računski iz izmjerene ulazne snage pogonskog stroja i njegovih poznatih gubitaka ili postupkom zaustavljanja). Izvedbom uzbude permanentnim magnetima ukinuti su gubici u uzbudnom namotu. Također, gubici praznog hoda variraju ovisno o stanju magneta jer je njihovo djelovanje usko povezano s njihovom radnom temperaturom koju je gotovo nemoguće mjeriti i kontrolirati. Međutim, u praznom hodu se rotor pretjerano ne zagrijava, izuzev od topline koja nastaje zbog gubitaka u statoru i prenosi se na magnete kroz zračni raspod. Temperatura utječe i na viskoznost sredstva kojim je ležaj podmazan, odnosno zagrijavanjem se smanjuje unutarnje trenje, a samim time i gubici.

5.4.1. Karakteristika praznog hoda u generatorskom režimu

Prema navedenoj normi, nužno je mjerenje jednog linijskog napona, a preporuča se mjerenje sva tri, kako bi se dodatno provjerila simetrija napona (po faznom pomaku i amplitudi) i pravovremeno detektirali potencijalni nedostaci statorskog namota.

Stezaljke ispitivanog stroja ostaju otvorene, a stroj je pogonjen asinkronim motorom čijom brzinom se upravlja preko pretvarača. Varijacije induciranih napona praznog hoda generatora posljedica su utjecaja temperature magneta na njihove karakteristike – u slučaju feritnih magneta porast temperature dovodi do smanjenja remanencije te povećanja koercitivne sile. O navedenom svjedoče i izmjereni rezultati u praznom hodu u hladnom i toplom stanju stroja prikazani tablicom 5.3.

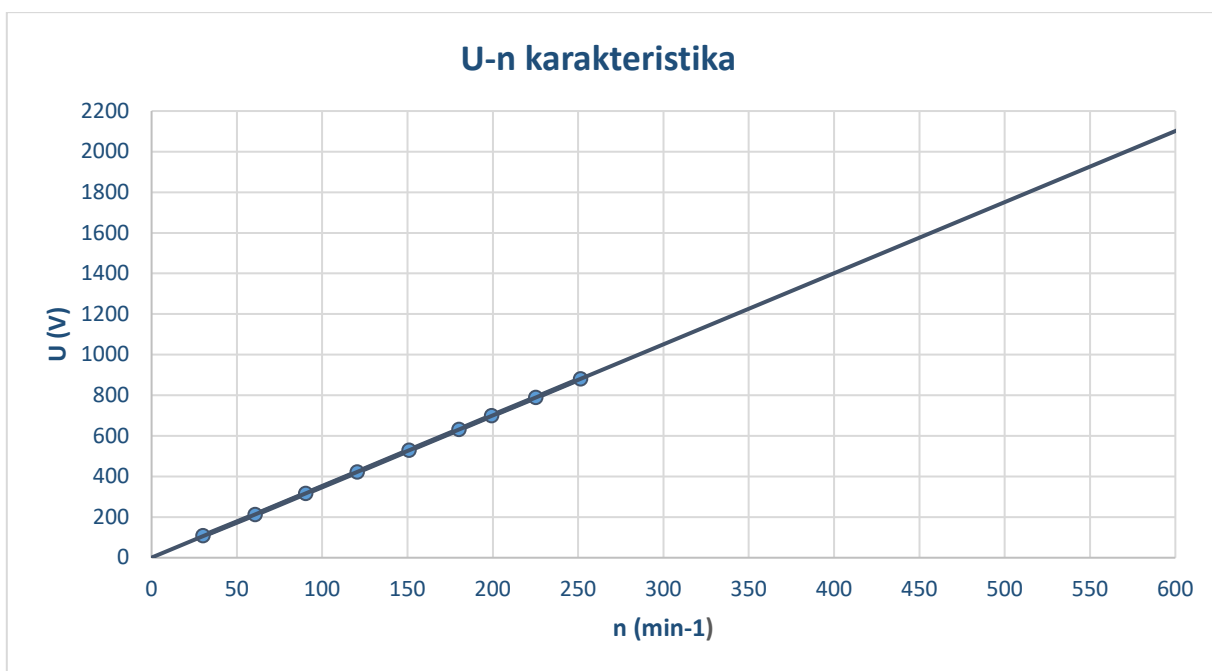
Tablica 5.3: Prazni hod - hladno i toplo stanje (generatorski režim)

	n (min^{-1})	f (Hz)	U (V)	P_{loss} (kW)	ϑ_{nam} ($^{\circ}\text{C}$)
Hladno stanje	199,35	49,83	698,7	5,91	18,3
Toplo stanje	200,29	50,07	650,1	3,82	61,2

Potrebno je izmjeriti inducirani napon praznog hoda nakon što stroj dođe u stanje toplinske stagnacije – generator se vrti pod opterećenjem konstantnom brzinom uz kontrolu temperatura namota i ležajeva. Kada je prirast temperature unutar sat vremena manji od 1 °C, postignuto je stacionarno, „toplo“ stanje stroja. Stroj se zatim rastereti i snimaju se vrijednosti inducirano napona, brzine i odgovarajućih temperatura. Pretvarač održava brzinu vrtnje na temelju zadane reference te nema odstupanja od nazivne vrijednosti. Kada to ne bi bio slučaj, izmjereni inducirani napon se jednostavno preračunava korekcijom za faktor koji predstavlja omjer nazivne brzine i brzine pri kojoj je mjerenje izvršeno. Zabilježen je inducirani napon praznog hoda generatora pri različitim brzinama te su dobiveni očekivani rezultati - inducirani napon proporcionalno raste s brzinom, prikazano tablicom 5.4 te slikom 5.17.

Tablica 5.4: Ovisnost inducirano napona PH o brzini vrtnje (generatorski režim)

n(min ⁻¹)	30,24	60,71	90,38	120,62	150,88	180,18	199,32	225,23	251,39
U(V)	107,93	212,64	316,52	422,57	528,57	631,3	698,69	789,36	881,41



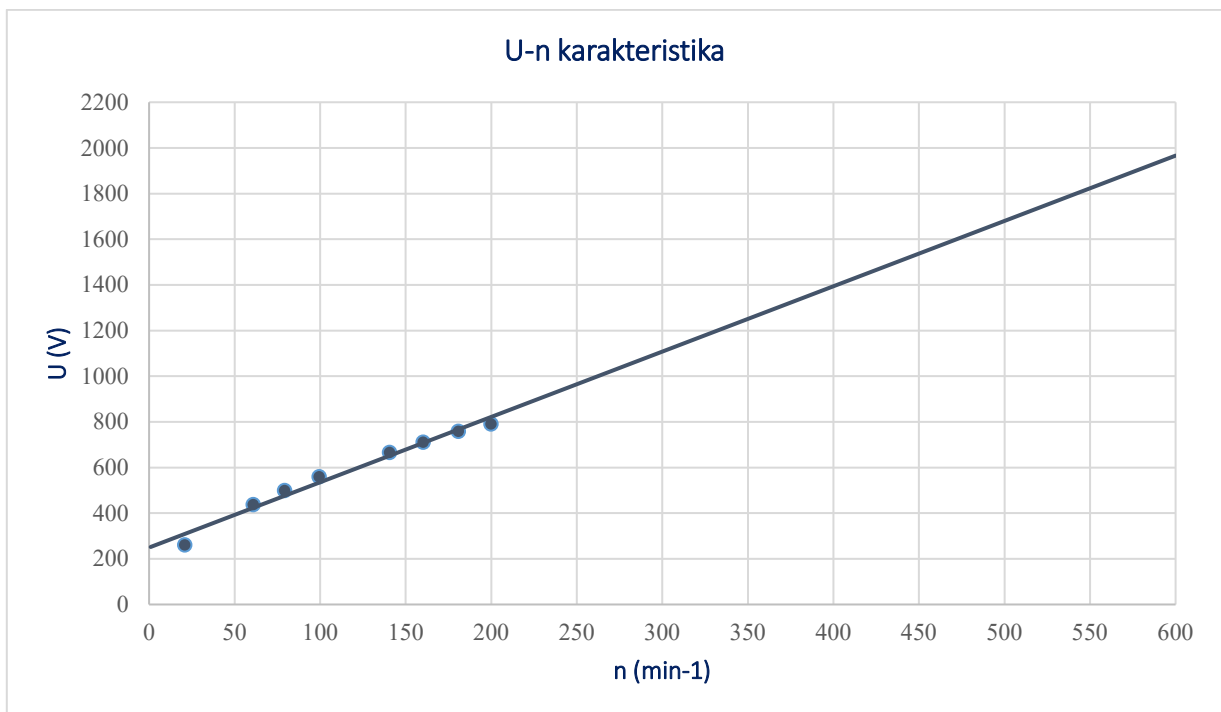
Slika 5.17: Ovisnost inducirano napona PH o brzini vrtnje (generatorski režim)

5.4.2. Karakteristika praznog hoda u motorskom režimu

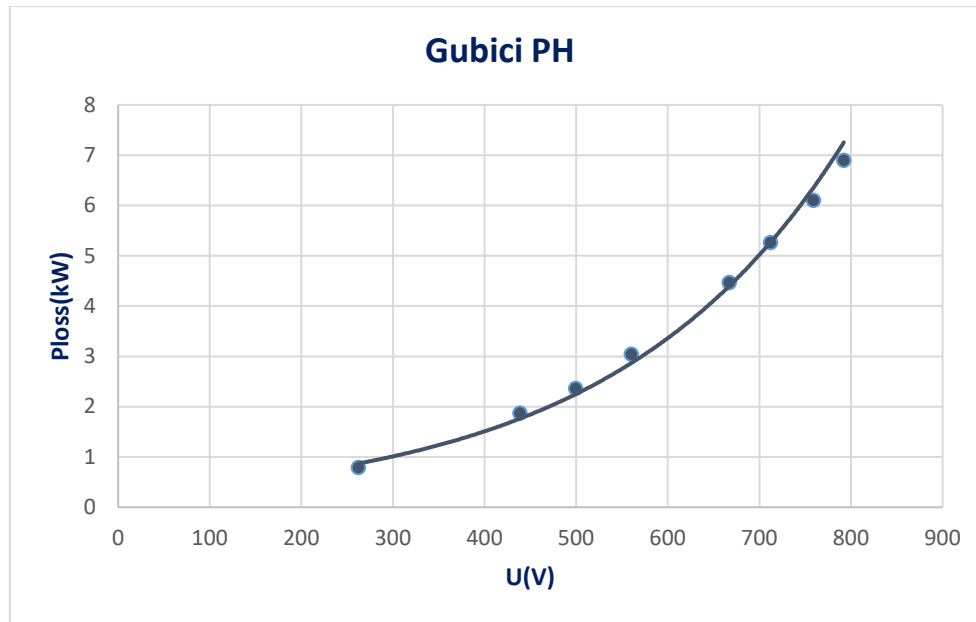
Pokus praznog hoda stroja s permanentnim magnetima u motorskom režimu može se izvesti na dva načina. Jedan od njih podrazumijeva vrtnju u motorskom režimu pri konstantnom teretu i brzini do stagnacije temperatura te snimanje brzine i napona u vremenu od trenutka rasterećenja stroja. Druga metoda, provedena na ispitivanom objektu u hladnom stanju, slobodne osovine, zahtijeva opciju regulacije napona koji se dovodi na stezaljke armaturnog namota, što je izvedeno spajanjem stroja na pretvarač te zadavanjem reference brzine. Rezultati su prikazani tablicom 5.5 te slikama 5.18 i 5.19.

Tablica 5.5: Izmjerene vrijednosti u PH (motorski režim)

U(V)	792,12	758,72	712,12	667,11	559,87	499,25	438,50	261,87
n(min ⁻¹)	199,96	180,72	160,16	140,52	99,40	79,19	60,91	20,92
I(A)	25,76	10,97	10,31	9,97	99,08	8,48	7,95	7,02
P _{loss} (kW)	6,90	6,10	5,26	4,47	3,04	2,36	1,87	0,79



Slika 5.18: Ovisnost napona i brzine u PH (motorski režim)



Slika 5.19: Gubici PH u ovisnosti o naponu (motorski režim)

5.5. Struje izjednačenja u paralelnim granama

Uvođenjem paralelnih grana stroj se prilagođava izvoru napajanja (napon i struja na stezaljkama) pri čemu se ne mijenja gustoća struje po vodiču niti napon po zavoju. Ispitivani stroj ima dvije paralelne grane po fazi. Otpor paralelnih grana u idealnom slučaju je jednak, no uvijek postoji određeno odstupanje. Javlja se razlika u induciranom naponu svake grane zbog čega se prilikom spajanja paralelnih grana zbog razlike potencijala javljaju struje izjednačenja koje predstavljaju čiste gubitke i dodatno zagrijavaju namot. Mjerenja struja izjednačenja izvršena su na način da je mjerena ulazna struja jedne faze te struja obje grane pod strujnim opterećenjem od 290 A. Oduzimanjem izmjerenih vrijednosti dobiveni su iznosi struja izjednačenja. Postupak je ponovljen za svaku fazu, a rezultati su prikazani tablicom. Namot je za potrebe ovih ispitivanja spojen na način da su paralelne grane spojene u dva zvjezdišta te su zatim izvršena mjerenja s povezanim i odvojenim zvjezdištima. Mjerena je razlika potencijala između zvjezdišta, kao i struja u slučaju povezanih zvjezdišta. Rezultati mjerenja prikazani su tablicom 5.6.

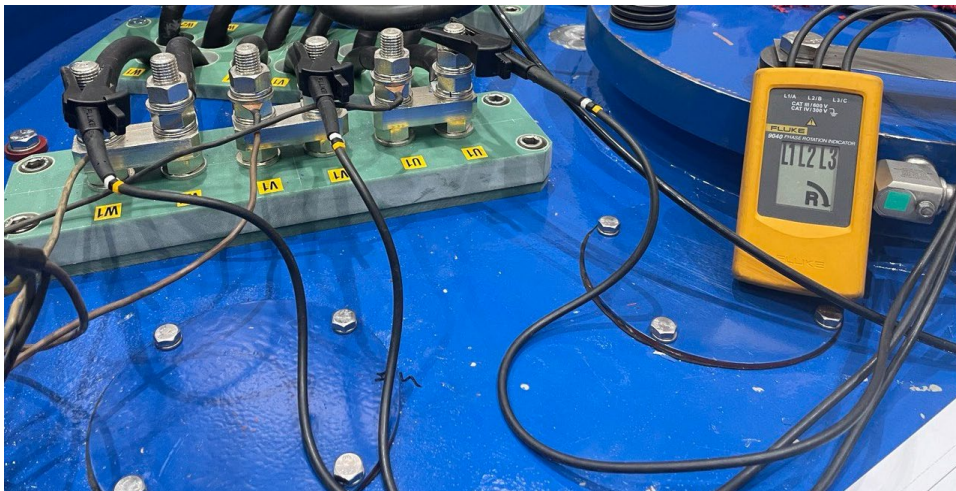
Tablica 5.6: Mjerenje struja izjednačenja

	Mjerenja	Faza U	Faza V	Faza W
Zvezdišta odvojena	Struja izjednačenja (A)	2,265	2,756	1,842
	Razlika zvezdišta (V)	8,037		
Zvezdišta povezana	Struja izjednačenja (A)	2,226		
	Razlika zvezdišta (V)	1,0677	1,944	2,325
	Struja između zvezdišta(A)	1,221		

5.6. Redoslijed faza

Kontrolom redoslijeda faza utvrđuje se ispravno označavanje izvoda statorskog namota. Važan je podatak kod strojeva dizajniranih za određeni smjer vrtnje zbog izvedbe hlađenja, odnosno pozicije lopatica ventilatora te prilikom sinkronizacije generatora na mrežu. Na redoslijed faza se može jednostavno utjecati zamjenom bilo kojih dviju faza.

Provjera je izvršena u skladu s normama IEEE 1812 i IEEE 115 pri čemu je korišten indikator redoslijeda faza Fluke 9040 na slici 5.20. Instrument je ograničen naponskom razinom te je mjerenje provedeno u praznom hodu pri iznosu napona nižem od nazivnog. Utvrđen je desni redoslijed za desni smjer vrtnje generatora (smjer vrtnje se određuje s pogonske strane).



Slika 5.20: Provjera redoslijeda faza

5.7. Ispitivanje pobjega

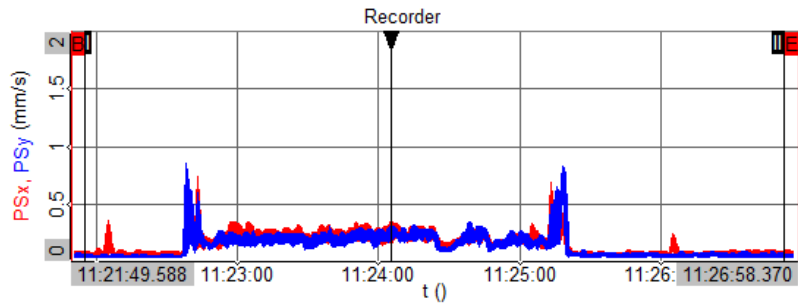
Zbog potencijalne opasnosti od ispada pretvarača s mreže, potrebno je ispitati generator na brzini pobjega kako bi se utvrdila njegova mehanička čvrstoća. Brzina pobjega označava brzinu do koje bi stroj nekontrolirano ubrzavao pri naglom rasterećenju bez djelovanja turbinskog regulatora. Ispitivanje je poželjno provesti bez uzbuđivanja, ili ako to slučaj ne dozvoljava, uz regulirajuću uzбудu preporuča se ići maksimalno do 105% nazivnog napona. Norma IEEE 1812 upozorava na činjenicu da kod strojeva s permanentnim magnetima uzbudu nije moguće regulirati te je potrebno posebnu pozornost obratiti na napon koji će se inducirati pri vitlanju zbog opasnosti za izolaciju. Dodatno, postoji opasnost da će se permanentni magneti učvršćeni na rotoru razletjeti.

Norma IEEE Std 115 definira provedbu samog ispitivanja. Stroj je prvo potrebno zavrtjeti do nazivne brzine vrtnje i pričekati do stabilizacije mjerenja vibracija. Zatim se stroj ubrzava do proračunate brzine pobjega koja je određena turbinom, a okvirno za generatore pogonjene vodnom turbinom iznosi oko 180 % nazivne brzine. Za ubrzavanje stroja iznad 115 % nazivnog iznosa, preporuča se napraviti dodatne provjere vibracija i pomaka osovina na različitim točkama ubrzavanja. Test se smatra uspješnim ako nakon vitljanja nisu pronađena nikakva oštećenja ili deformacije i ako stroj izdrži pokus visokim naponom.

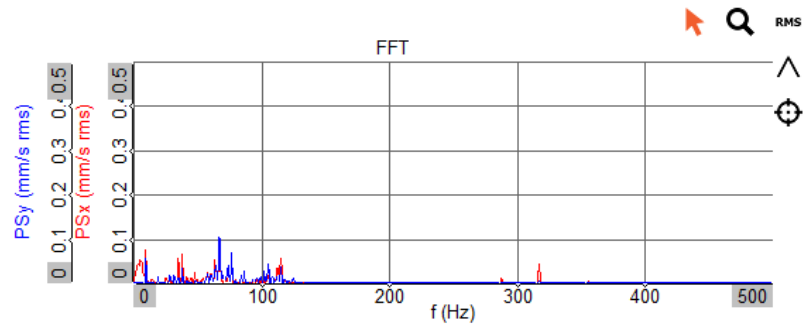
Ispitivanje je provedeno na projektom određenoj brzini od 576 min^{-1} , u trajanju od 2 minute uz kontrolu vibracija koje su bile unutar granica prihvatljivosti. Rezultati su prikazani tablicom 5.7 i slikama 5.21, 5.22, 5.23 i 5.24.

Tablica 5.7: Amplituda vibracija za vrijeme ispitivanja pobjega

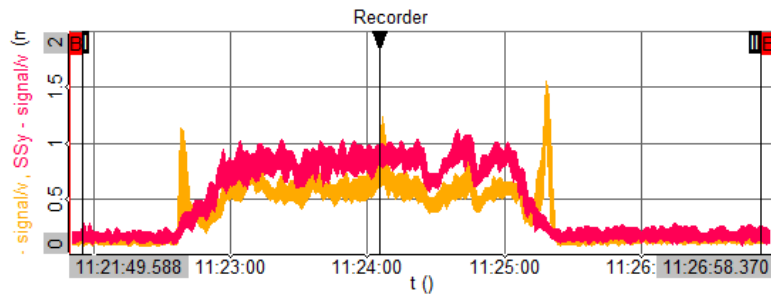
PSx	0,25
Psy	0,23
SSx	0,81
Ssy	0,90



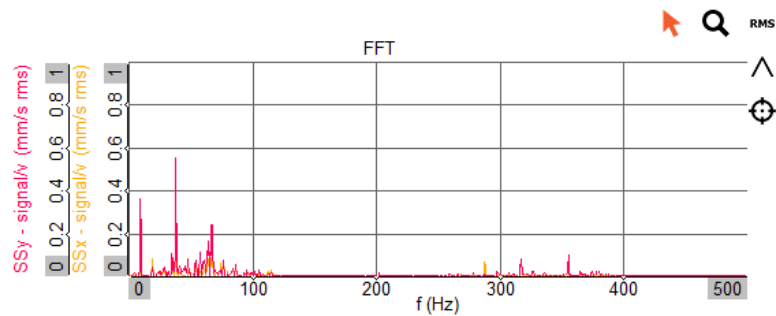
Slika 5.21: Vibracije PS ležaja za vrijeme pobjega



Slika 5.22: FFT analiza vibracija PS ležaja



Slika 5.23: Vibracije SS ležaja za vrijeme pobjega



Slika 5.24: FFT analiza vibracija SS ležaja

5.8. Ispitivanje generatora pod opterećenjem

Terećenje generatora vrši se na nazivnoj brzini okretaja (200 min^{-2}) i pri nazivnoj snazi (500 kVA). Ispitivanje je provedeno *back-to-back* metodom definiranom normom IEEE 1812. I generator kao ispitivani stroj i asinkroni motor kao pogonski stroj, spojeni su na pretvarač preko kojeg se pogonskom motoru zadaje referenca brzine, a ispitnom referenca momenta. Pretvarač je preko transformatora spojen na mrežu iz koje se nadoknađuju gubici oba stroja. Provedba ovog testa nužna je za utvrđivanje simetrije napona i struja, udjela viših harmonika, provjeru faktora snage, zagrijavanja stroja, izračun korisnosti te kontrolu vibracija i buke.

5.8.1. Mjerenje električnih veličina

Za mjerenje struje i napona korišten je akvizicijski sustav Dewesoft Sirius. Nazivni napon stroja ne prelazi granicu naponskih ulaza mjernog uređaja te su mjerenja linijskih napona dovedena direktno na Sirius XHS. Za mjerenje struje korišteni su strujni pretvarači signala prikazani slikom 5.25 koji mogu mjeriti do 2000 A, a rade na principu detekcije preostalog magnetskog toka prikazanog slikom 5.26 - *zero-flux* metoda.



Slika 5.25: LEM IN 2000-s

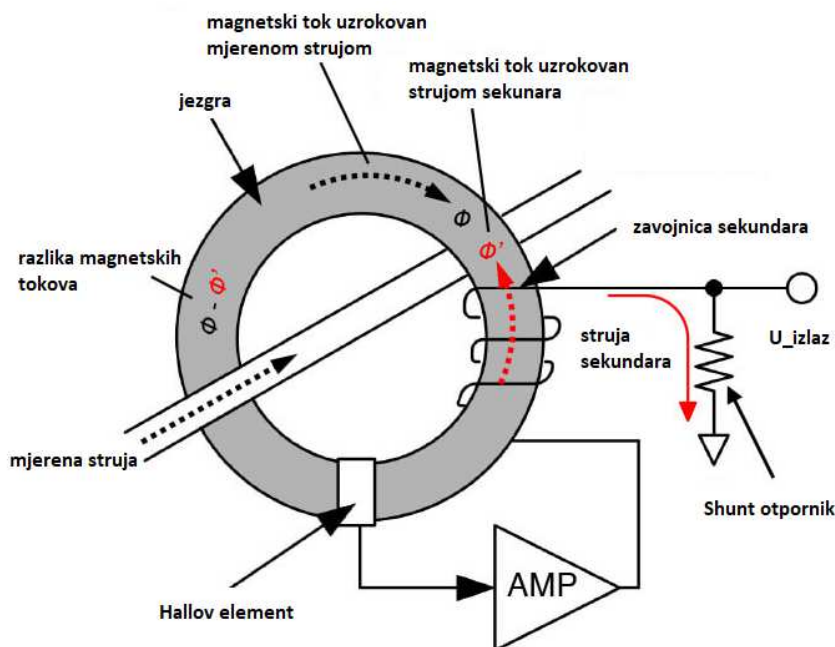
Vodič se postavlja kroz senzor načinjen od magnetske jezgre te mjerena struja uzrokuje magnetski tok u jezgri. Oko jezgre je namotana pomoćna zavojnica čija struja uzrokuje magnetski tok u suprotnom smjeru koji bi trebao poništiti primarni tok. Međutim, uvijek postoji određeni rezidualni tok koji se detektira Hallovim elementom i poništava generiranjem struje u krugu pojačala. Hallov element mjeri jakost magnetskog polja na principu Hallovog učinka posebno izraženog u poluvodičim materijalima koje odlikuje niska koncentracija nosioca naboja te velika pokretljivost. Kada se poluvodič izloži vanjskom električnom polju (referentno smjer osi x), dolazi do gibanja elektrona i šupljina u suprotnim smjerovima. Na nosioce naboja djeluje i

magnetsko polje smjera okomitog na električno (smjer osi z). Zbog navedenog dolazi do nagomilavanja obje vrste naboja na površini poluvodičkog materijala te posljedično do nastanka dva električna polja (smjer osi y) koja se zbog nejednakog broja elektrona i šupljina ne poništavaju. Mjeri se Hallov napon (5.12) proporcionalan jakosti magnetskog polja. Hallova konstanta ovisi o korištenom materijalu, a za poluvodiče definirana je izrazom (5.13) uz pretpostavku iste brzine za sve nosioce.

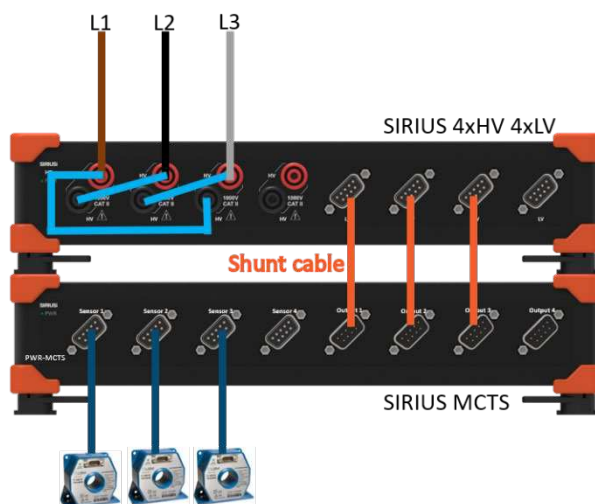
$$U_H = R_H \cdot I \cdot \frac{B}{d} \quad (5.12)$$

$$R_H = -\frac{1}{e} \cdot \frac{n \cdot \mu_n^2 - p \cdot \mu_p^2}{(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)^2} \quad (5.13)$$

Suma struje u pomoćnoj zavojnici i struje za poništenje rezidualnog toka predstavlja struju sekundara (manja od struje primara N puta). Struja sekundara prolazi kroz shunt otpornik na kojemu se mjeri pad napona proporcionalan mjerenoj struji i dovodi na ulaz u SIRIUSi-PWR-MCTS2 koji predstavlja izvor napajanja senzora čiji su izlazi povezani na niskonaponske ulaze mjerne stanice SIRIUSi-XHS kao što je prikazano na slici 5.27.

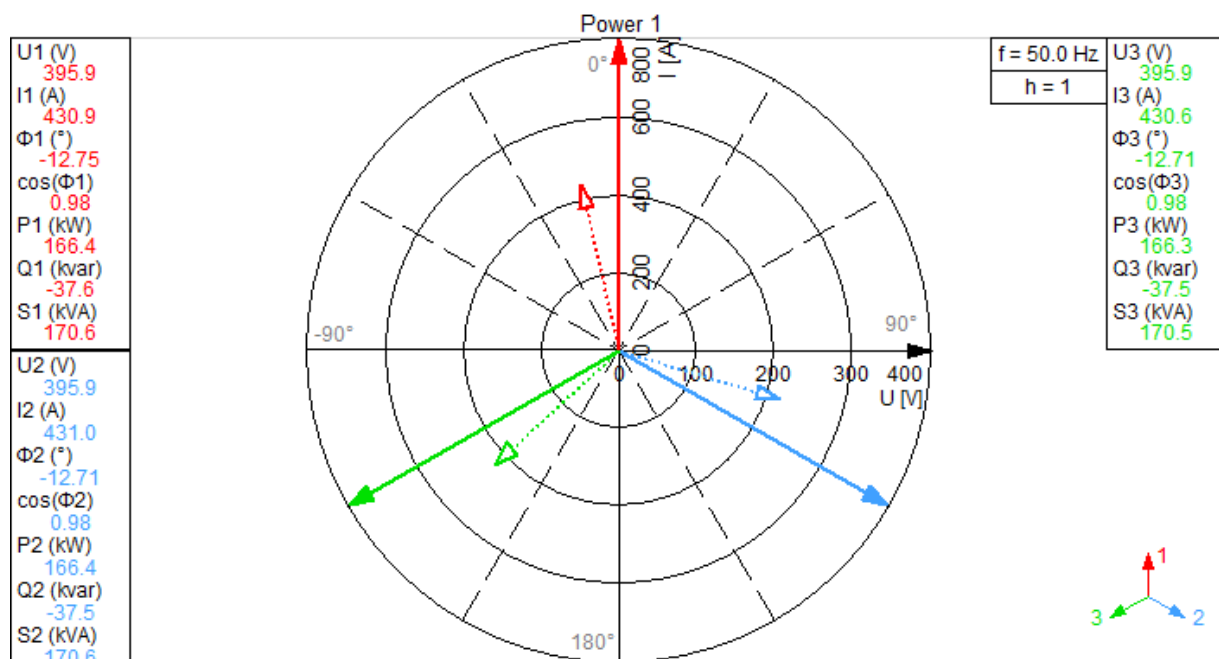


Slika 5.26: Princip mjerenja struje

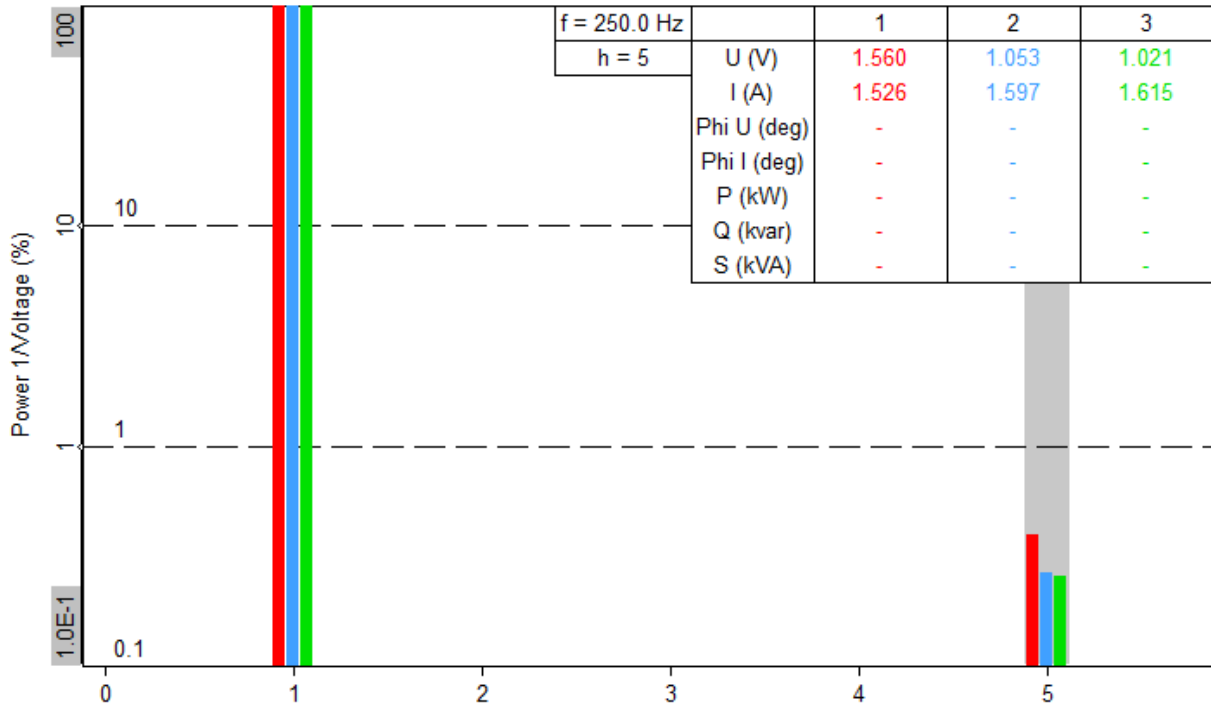


Slika 5.27: Dovod strujnih i naponskih signala na mjerne stanice Sirius

Iz mjerenja napona i struja sustavom Dewesoft dobiveni su podaci o faktoru snage, radnoj, jalovoj te prividnoj snazi, frekvenciji iz koje se izračunava i brzina vrtnje, FFT analiza napona mjenenog na stezaljkama generatora prikazane slikom 5.29 te simetrija mjerenih veličina na slici 5.28.



Slika 5.28: Ispitivanje pod opterećenjem - simetrija napona i struja



Slika 5.29: FFT analiza napona na stezaljkama generatora

5.8.2. Mjerenje mehaničkih veličina

Za određivanje ulazne mehaničke snage, odnosno gubitaka i korisnosti generatora, na osovinu se montira mjerna osovina T40FM koja može mjeriti do 30 kNm, prikazano slikom 5.30. Za izračun momenta definirana je ovisnost izlaznog signala osovine i mjenog momenta (90 kHz za 30 kNm i 30 kHz za -30 kNm).

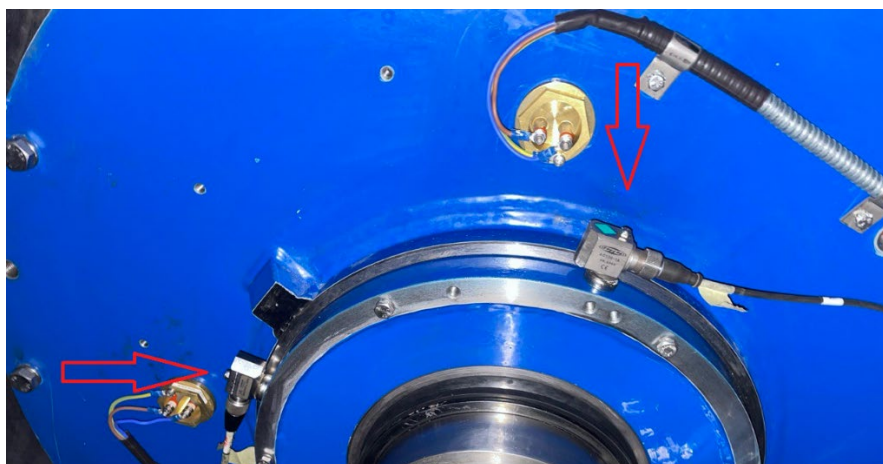


Slika 5.30: Instalirana mjerna osovina

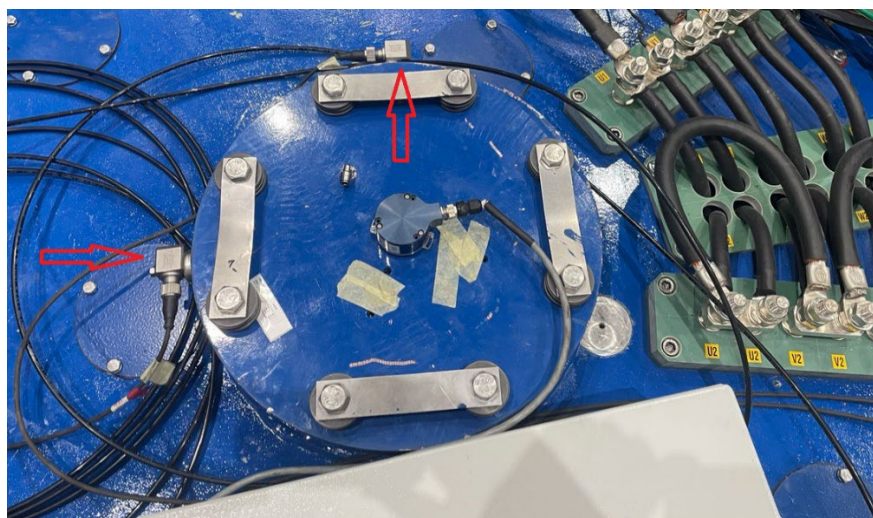
Zbog relativno niske brzine vrtnje ($n=200 \text{ min}^{-1}$) preciznije očitavanje brzine slijedi računski iz mjerene frekvencije napona nego direktnog mjerenja senzorom.

Na dodirnim mjestima rotirajućih i mirujućih dijelova električnih strojeva uobičajeno je mjerenje mehaničkih vibracija kako bi se utvrdilo je li ispitivani stroj balansiran, odnosno je li raspored rotirajućih masa jednakolik. Prilikom ispitivanja, vibracije su promatrane kao periodičke vremenske funkcije te se izražavaju u brzini titranja (mm/s). Analizom rezultata mjerenih vibracija moguće je detektirati problem poput oštećenja ležajeva, nesimetrije, nebalansiran rotor i sl. Mjerenja se provode akcelerometrima, mjernim instrumentima koji generiraju naponski signal proporcionalan količini u učestalosti vibracija u vremenu. Princip rada počiva na piezoelektričnom efektu koji opisuje stvaranje električnog naboja na površini kristala kada na njegovu površinu djeluje vanjska sila. Akcelerometri se postavljaju na kućište stroja u području gornjeg i donjeg ležaja. Mjerenja su postavljena u smjeru x i y osi kao što je prikazano slikama 5.31 i 5.32. Položaj senzora te granice prihvatljivih amplitudnih iznosa vibracija određene su

normom ISO 10816-5. Za vertikalne generatore brzina $60-1800 \text{ min}^{-1}$ dozvoljene su vibracije do $1,6 \text{ mm/s}$ za stražnji ležaj (NDE) te $4,0 \text{ mm/s}$ za pogonski ležaj (DE).



Slika 5.31: PS ležaj - položaj akcelerometara



Slika 5.32: SS ležaj - položaj akcelerometara

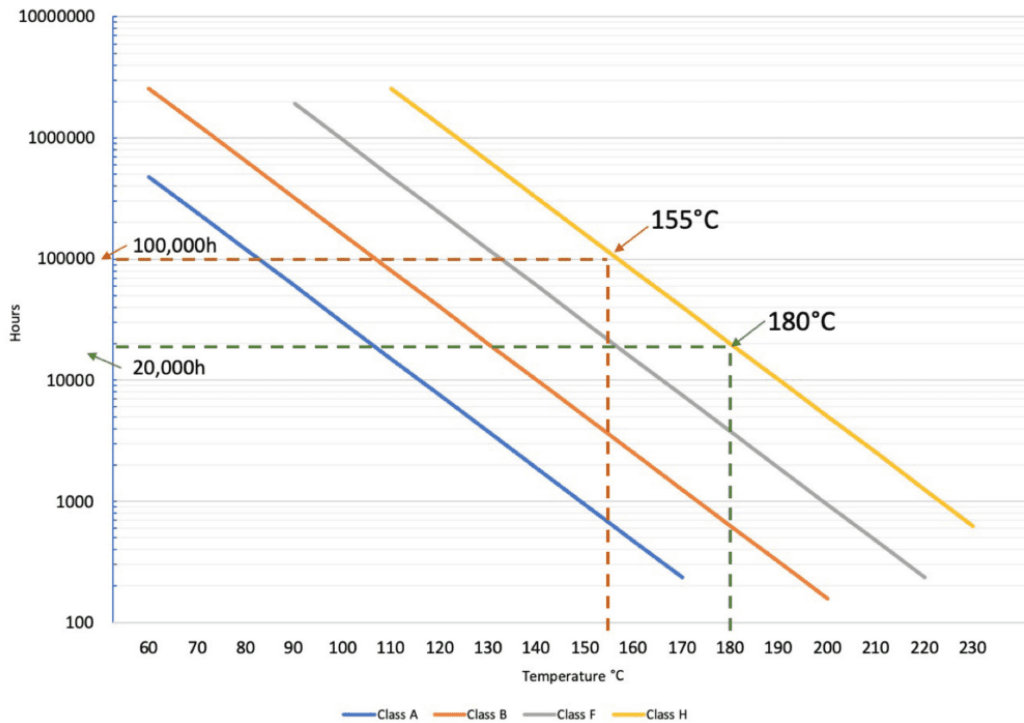
5.8.3. Kontrola zagrijavanja stroja

Prilikom ispitivanja generatora pod nazivnim opterećenjem prate se temperature namota, pogonskog i stražnjeg ležaja te temperatura kućišta preko ugrađenih Pt100 sondi. Mjerenja su dovedena na digitalni multimetar Fluke 2638A Hydra. Zagrijavanje je vršeno do stagnacije temperatura, odnosno dok prirast svih mjerenih temperatura unutar 30 min nije pao ispod $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Izolacija namota osjetljiva je na visoke temperature te se njena svojstva narušavaju ovisno o izloženosti istima. Klasa izolacije predstavlja podatak o dopuštenom porastu temperature u odnosu na temperaturu okoline. Maksimalna temperatura namota definirana je za temperaturu okoline od 40 °C, a uključuje i rezervu obično u iznosu 5-15 °C za topla mjesta namota. Tablicom 5.8 su prikazane klase izolacije definirane normom IEC 60034-1. Ako stroj radi u uvjetima koji ne prelaze maksimalnu dozvoljenu temperaturu, procijenjeni životni vijek izolacije iznosi 20 000 sati rada pri nazivnom opterećenju, a prekoračenje temperaturne granice narušava trajnost izolacije u skladu s trendom prikazanim na slici 5.33. U praksi proizvođači znaju ugrađivati izolaciju namota s toplinskom rezervom, odnosno ugrađuje se izolacija više klase, a dopušteno zagrijavanje je određeno nižom klasom (npr. u slučaju F/B maksimalna temperatura namota iznosi 155 °C, a dozvoljena nadtemperatura je 80 °C).

Tablica 5.8: Klase izolacije

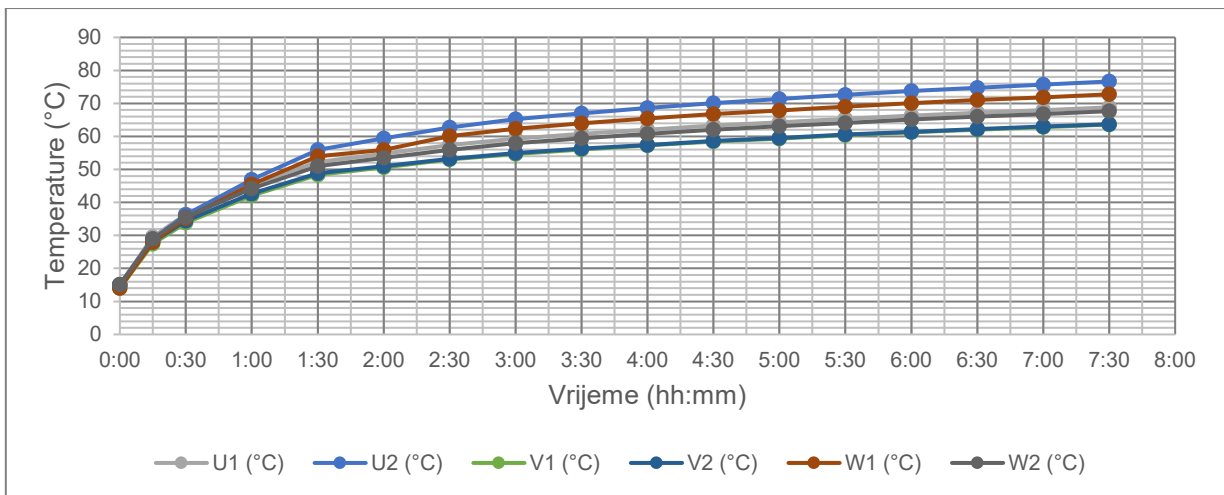
Klasa izolacije	Najveća dozvoljena temperatura (°C)	Maksimalna temperatura okoline (°C)	Dozvoljena nadtemperatura (°C)	Granica temperature toplih mjesta (°C)
A	105	40	60	5
E	120	40	75	5
B	130	40	80	10
F	155	40	105	10
H	180	40	125	15



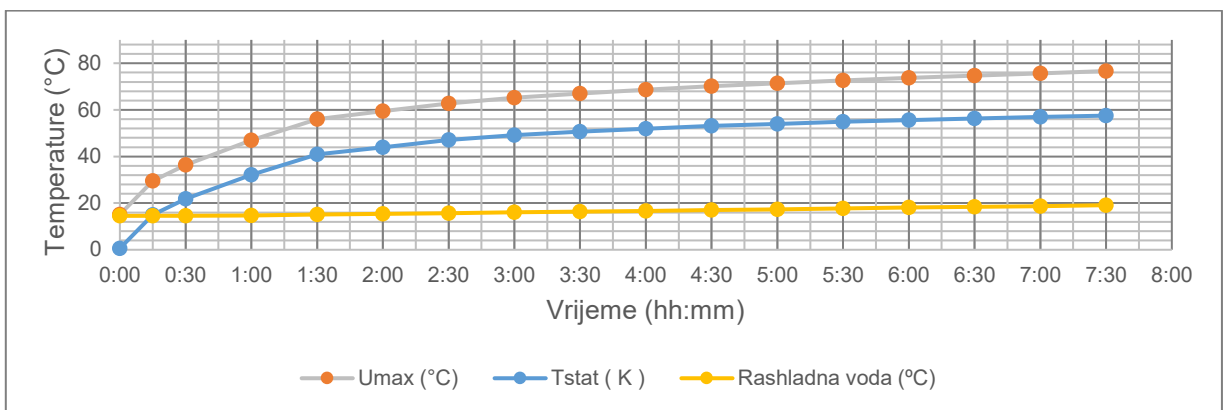
Slika 5.33: Ovisnost životnog vijeka izolacije o radnim temperaturama[18]

Zagrijavanje stroja do stagnacije temperatura provodi se radi potvrde rada stroja unutar dozvoljenih granica određenih klasom izolacije za koju je projektiran. Kontrola spomenutih temperatura nastavlja se i tijekom rada generatora kako bi se osigurala sigurnost pogona te pravovremeno detektirala potencijalna oštećenja namota i/ili izolacije.

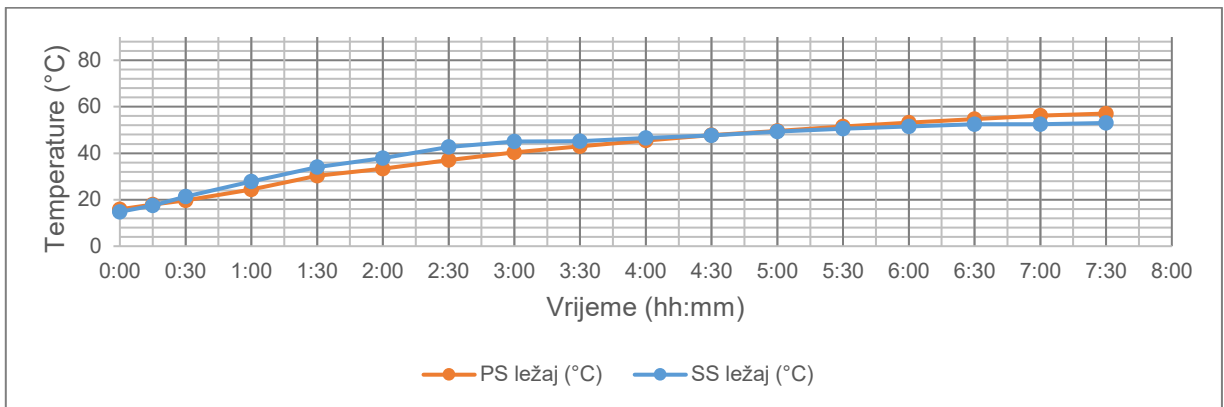
Na grafovima 5.34, 5.35 i 5.36 je prikazan trend zagrijavanja namota, kućišta, ležajeva i rashladne vode za vrijeme vrtnje pod nazivnim opterećenjem u trajanju od 7 sati i 30 minuta. Sve tri faze namota se zagrijavaju ravnomjerno te stagniraju u isto vrijeme. Primjetne su niže temperature kod pogonskog ležaja u odnosu na stražnji zbog veće otvorenosti i pristupa zraka, odnosno boljeg odvođenja topline. Temperatura rashladne vode raste budući da u bačvi nije omogućena cirkulacija. Maksimalna temperatura koju doseže namot iznosi 76,6 °C, uz nadtemperaturu 57,5, a stroj je projektiran za klasu izolacije H koja propisuje maksimalnu temperaturu od 180 i nadtemperaturu 125. Zagrijavanje stroja je unutar dozvoljenih granica uz dosta veliku temperaturnu rezervu.



Slika 5.34: Zagrijavanje pod opterećenjem - temperature namota



Slika 5.35: Zagrijavanje pod opterećenjem - maksimalna temperatura namota, nadtemperatura i temperatura rashladnog medija

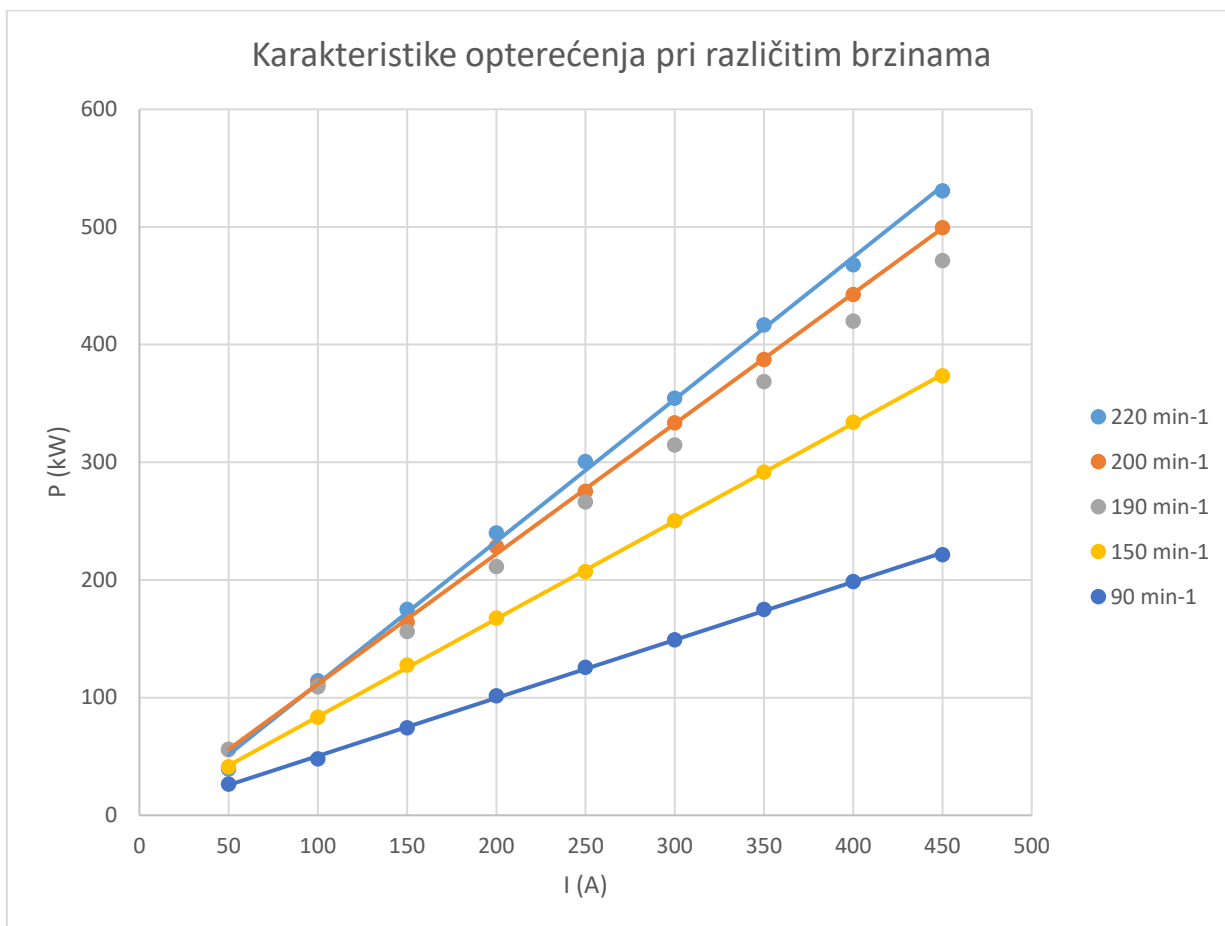


Slika 5.36: Zagrijavanje pod opterećenjem - temperature ležajeva

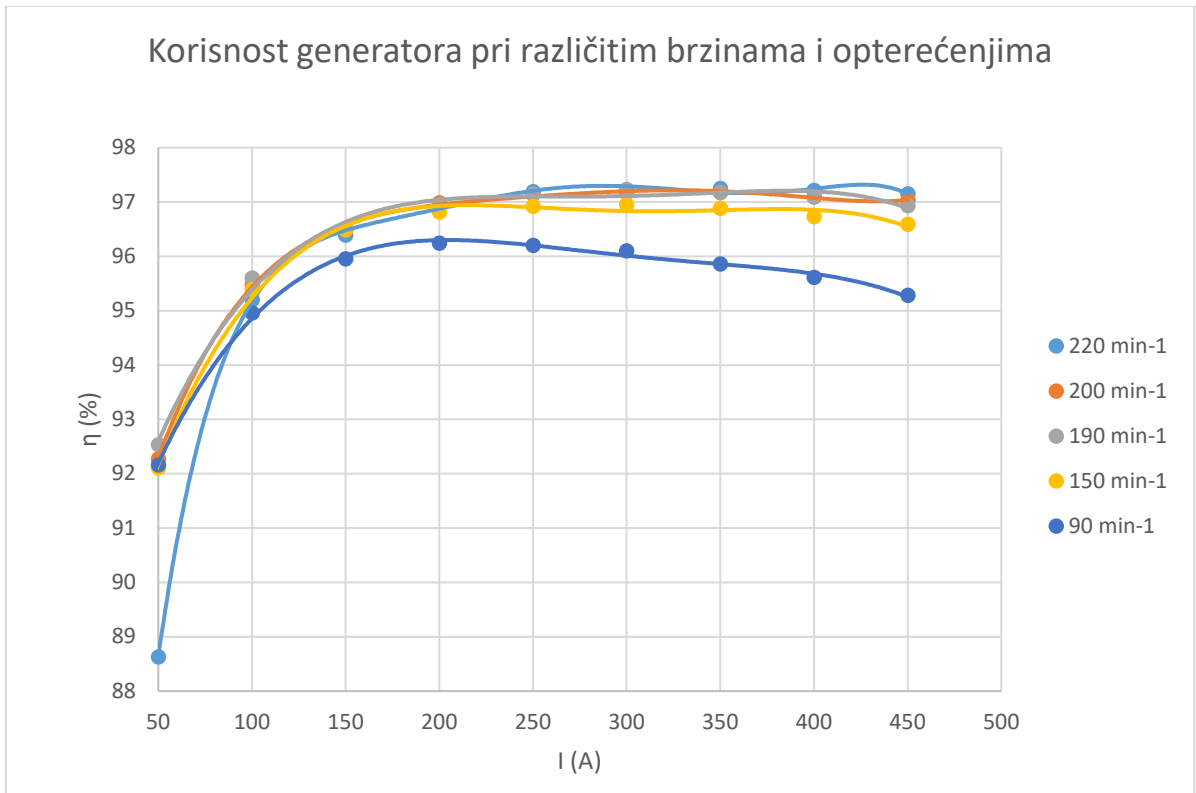
5.8.4. Karakteristika opterećenja

Nakon zagrijavanja i postizanja stagnacije temperatura namota i ležajeva snimljene su karakteristike opterećenja pri različitim brzinama vrtnje. Praćeno je i postepeno

smanjivano strujno opterećenje u koracima od 50 A (početna točka određena je strujnim opterećenjem u nazivnoj točki u iznosu od 450 A, a za posljednju snimljenu točku karakteristike uzet je iznos od 50 A). Rezultati su prikazani grafički na slici 5.37. Prikazana je i ovisnost korisnosti o opterećenju slikom 5.38 kako bi se pokazala ideja praćenja točke maksimalne korisnosti podešavanjem brzine vrtnje.



Slika 5.37: Karakteristike opterećenja pri različitim brzinama



Slika 5.38: Korisnost geenratora pri rzličitim brzinama i opterećenjima

5.9. Korisnost generatora

Unutar svakog električnog stroja prilikom pretvorbe energije iz električne u mehaničku, ili obrnuto, nastaju određeni gubici. Udio tih gubitaka u odnosu na dobivenu korisnu energiju predstavlja mjeru za korisnost stroja. Bez obzira radi li se o motoru ili generatoru, korisnost se definira kao omjer izlazne snage (snage koju stroj predaje) i ulazne snage (snage koju stroj prima). Razlikuju se dva pristupa određivanja korisnosti: direktna metoda se primjenjuje ako je moguće mjeriti i električnu i mehaničku snagu na osovini, te indirektna metoda kod koje se mjeri ulazna ili izlazna snaga (obično električna), a zatim se određuju gubici. Kod generatora s uzбудnim namotom moguće je odrediti ukupne gubitke na više načina: metodom povratnog rada pri čemu se generator tereti istosmjernim strojem, metodom naduzbude ili poduzbude ako je moguće generator teretiti strojem sličnih veličina te kalorimetrijskom metodom gdje se gubici određuju na osnovu mjerenja zagrijavanja rashladnog sredstva.

U praksi se kod većih strojeva i većih korisnosti prednost daje indirektnoj metodi. Ako se usporede relativne pogreške mjerenja (5.14) i (5.15) dolazi se do granice (5.16) pri kojoj indirektna metoda daje točnije rezultate. [12]

$$r_{\text{direktno}}(\%) = \pm r_1 \pm r_2 = \frac{\eta_{mj} - \eta}{\eta} \quad (5.14)$$

$$r_{\text{indirektno}} \cdot \left(\frac{1 - \eta}{\eta}\right) (\%) = \left(\frac{1 - \eta}{\eta}\right) \cdot (\pm r_1 \pm r_{gub}) \quad (5.15)$$

$$\eta > \frac{r_{\text{indirektno}}}{r_{\text{direktno}} + r_{\text{indirektno}}} \quad (5.16)$$

Gubici u sinkronim generatorima s uzбудnim namotom sastoje se od sljedećih komponenti:

- uži gubitci praznog hoda – gubitci u željezu i gubitci trenja i ventilacije
- uzbudni gubitci – gubitci u bakru uzbudnog namota te gubitci uzбудnika
- teretni gubitci – gubitci u bakru armaturnog namota te dodatni gubitci u željezu i vodičima.

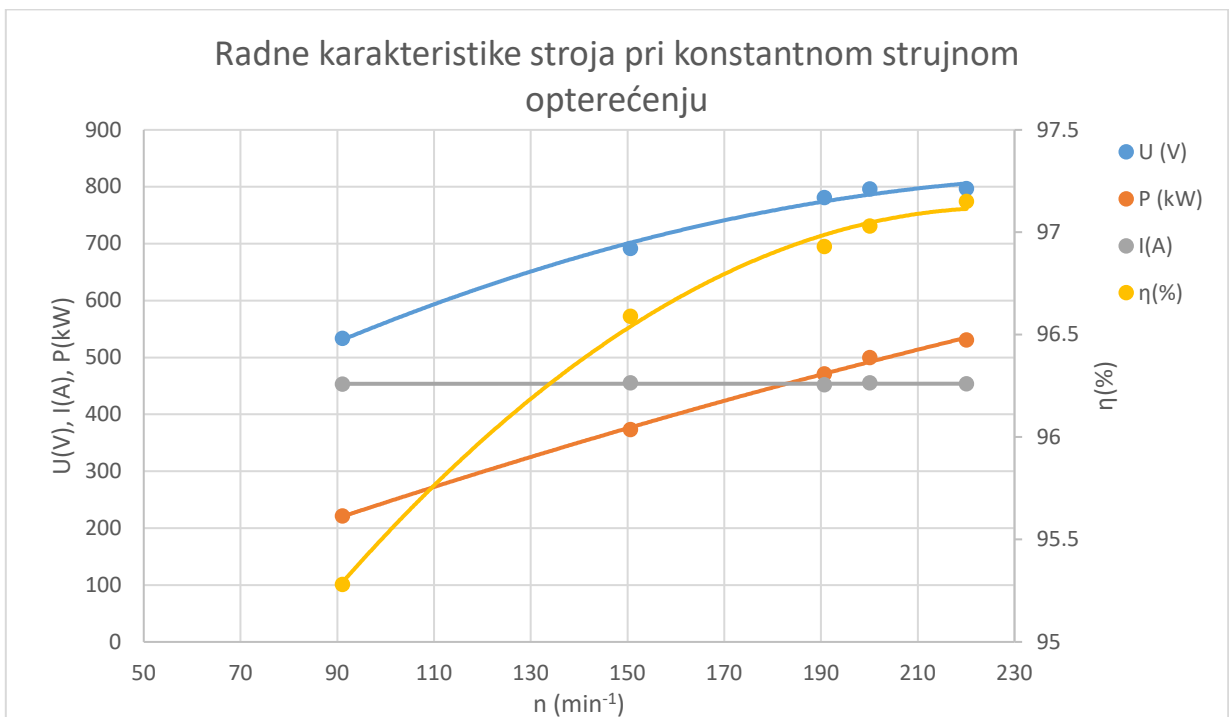
Kod generatora s permanentnim magnetima odsustvo uzbudnog namota otklanja gubitke bakra u rotoru. Međutim, iako je električka vodljivost magneta dosta manja od bakra, vrtložne struje koje se javljaju u magnetima nisu zanemarive, posebno kod izvedbe stroja s permanentnim magnetima postavljenim na površini rotora te otvorenim statorskim utorima.

Norma IEEE Std 1812 definira određivanje korisnosti direktnom metodom za strojeve manjih snaga kod kojih je moguće preciznije mjeriti mehaničku snagu. Kod većih strojeva preporuča se određivanje pojedinačnih gubitaka. Budući da je mjerenje električne snage redovno točnije i izvedivo, definiran je izraz za korisnost generatora (5.17) i korisnost motora (5.18).

$$\eta(\%) = 100 - \frac{P_{gubitci} \cdot 100}{P_{izlaz} + P_{gubitci}} \quad (5.17)$$

$$\eta(\%) = 100 - \frac{P_{gubitci} \cdot 100}{P_{ulaz}} \quad (5.18)$$

Korisnost ispitivanog stroja utvrđena je direktnim mjerenjem električne i mehaničke snage nakon 8,5-satnog zagrijavanja na nazivnoj brzini i pri nazivnom opterećenju prema izrazu (5.18) i iznosi $\eta=97,04\%$. Slika 5.39 prikazuje radne karakteristike stroja pri različitim brzinama vrtnje i konstantnom strujnom opterećenju koje se postiže u nazivnoj radnoj točki. Mijenjajući brzinu u rasponima očekivanih radnih brzina te održavajući istu struju na namotu statora, zabilježen je trend porasta napona, izlazne snage te korisnosti stroja. Porast korisnosti s promjenom brzine izraženiji je pri nižim brzinama, nakon čega usporava zbog jačanja udjela gubitaka ovisnih o frekvenciji (gubici u bakru za zabilježene mjerne točke su približno konstantni budući da se održava konstantan iznos struje).



Slika 5.39: Radne karakteristike stroja pri konstantnom strujnom opterećenju

5.10. Pokus visokog napona i kontrola otpora izolacije namota prije i nakon VN-a

Pokus visokim naponom provodi se na gotovom stroju nakon što su prethodno izvršena sva predviđena ispitivanja. Cilj ove ispitne metode je provjera ispravnosti izolacije namota, a test se smatra uspješnim ako ne dođe do proboja. Ako je namot spojen u neraspajivo zvjezdište, visoki napon se spaja na namot i kućište stroja koje obvezno mora biti uzemljeno. Ako je moguće raspajati namot, testira se svaka faza namota zasebno, pri čemu je faze namota koje se ne testiraju i kućište potrebno uzemljiti. Ispitni napon treba imati mrežnu frekvenciju i sinusni oblik, a razina ispinog napona određena je nazivnim podacima stroja. Provođenje ispitivanja definirano je normom IEC 60034-1 koja za nove strojeve snage manje od 10 MVA i nazivnog napona manjeg od 1000 V propisuje ispitni napon $U_{isp}=2 \cdot U_n+1000$ V te trajanje ispitivanja 60 sekundi ($U_{isp}=2380$ V). Napon je potrebno postepeno podizati do punog iznosa, a početna točka ne smije biti veća od polovice pune vrijednosti. Vremenski period postizanja ispitnog napona ne smije biti manje od 10 sekundi. Ova ispitna metoda se smatra destruktivnom te u slučaju potrebe ponavljanja ispitivanja, provodi se s 80 % vrijednosti ispitnog napona prvog testiranja. Izolacija namota mjeri se prije i nakon pokusa, a rezultati mjerenja prikazani su tablicom 5.9 i 5.10. Mjerenje se provodi induktorom, a zbog utjecaja pojave elektroosmotskog protoka u slučaju prisustva vlage, preporuča se priključak pozitivnog terminala na kućište, a negativnog na namot.

Tablica 5.9: Otpor izolacije namota prije pokusa visokim naponom

faza namota	$R_{15s}(M\Omega)$	$R_{15s}(M\Omega)$	DAR
U:VWN	123	345	2,805
V:UWN	118	330	2,797
W:UVN	122	344	2,820

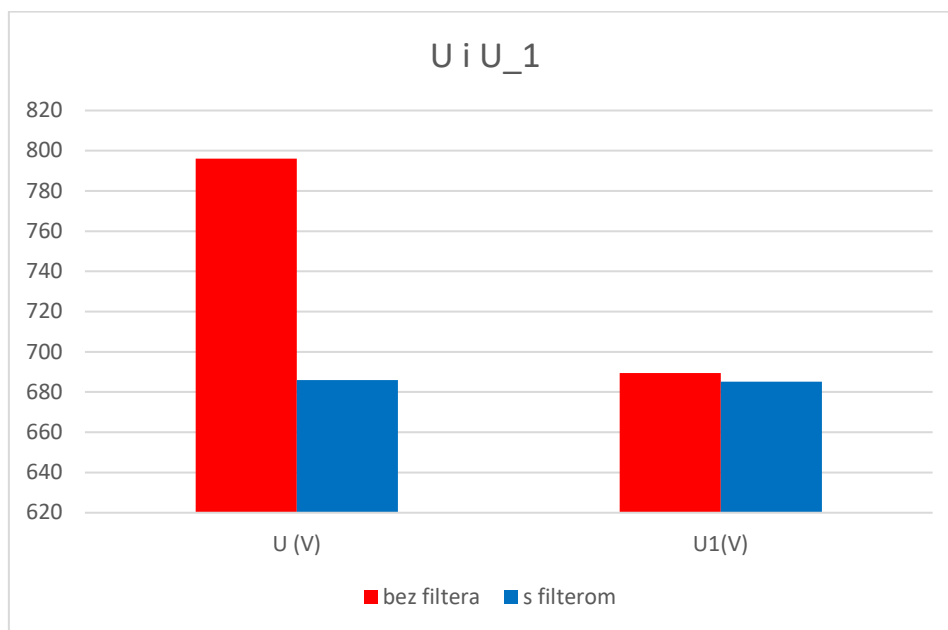
Tablica 5.10: Otpor izolacije namota nakon pokusa visokim naponom

faza namota	$R_{15s}(M\Omega)$	$R_{15s}(M\Omega)$	DAR
U:VWN	124	349	2,815
V:UWN	121	334	2,694
W:UVN	124	349	2,815

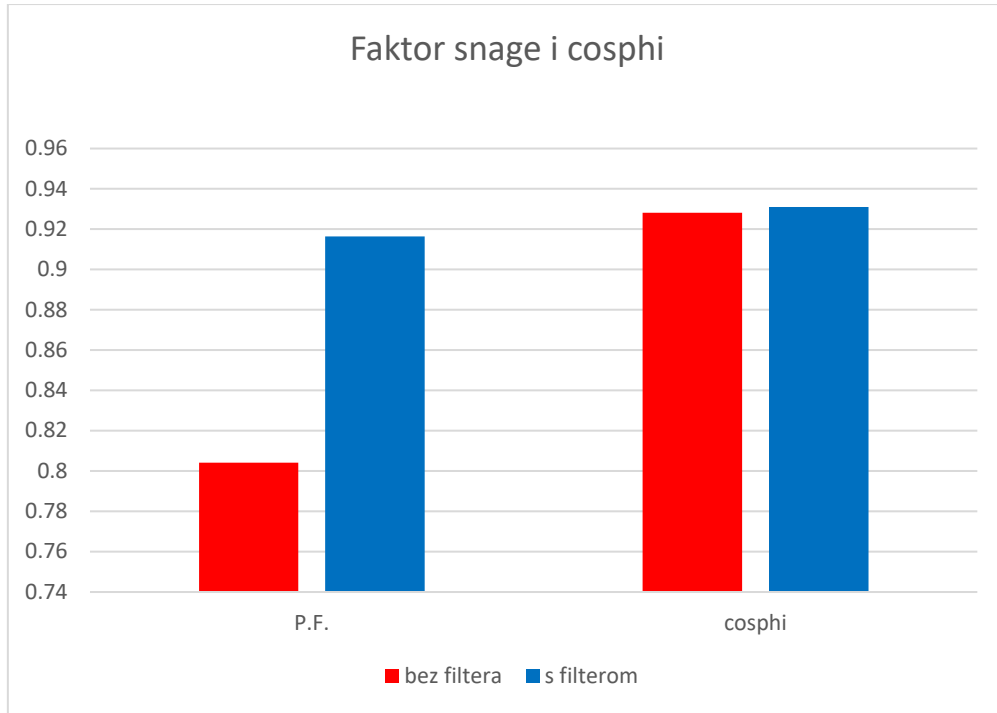
6. USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA S PRETHODNA DVA GENERATORA

6.1. Zagrijavanja generatora s i bez sinusnog filtera

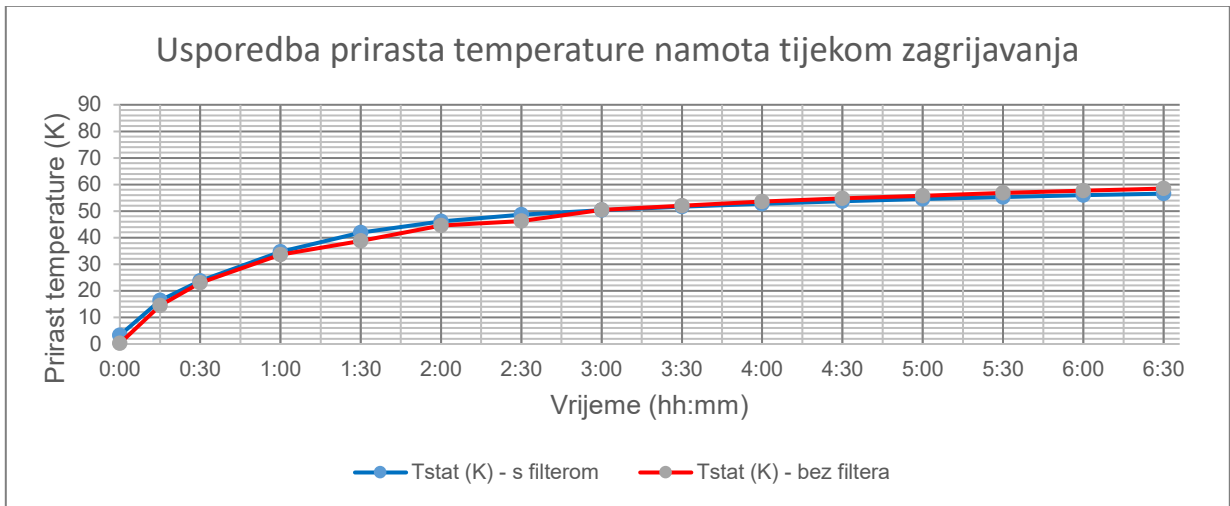
Ispitivani generatori napajani su preko frekvencijskog pretvarača koji dovodi do pojave viših harmonika te posljedično dodatnih gubitaka. Kako bi se proučio utjecaj viših harmonika, na dva prethodno ispitana generatora napravljeno je ispitivanje sa sinusnim filtrom i bez njega. Prikazani su i analizirani podaci mjerenja na prvom generatoru. Sinusni filter uklanja više harmonike, a njegov utjecaj se može vidjeti u usporedbi i napona mjenog na stezaljkama generatora i i prvog harmonika napona te faktora snage i $\cos\varphi$ nakon postizanja stagnacije temperatura namota i ležajeva pri zagrijavanju na nazivnom teretu s i bez filtra, prikazano slikama 6.1 i 6.2. Prilikom zagrijavanja bez filtra zbog nešto većih gubitaka uočen je veći prirast temperature namota, prikazano slikama 6.3 i 6.4



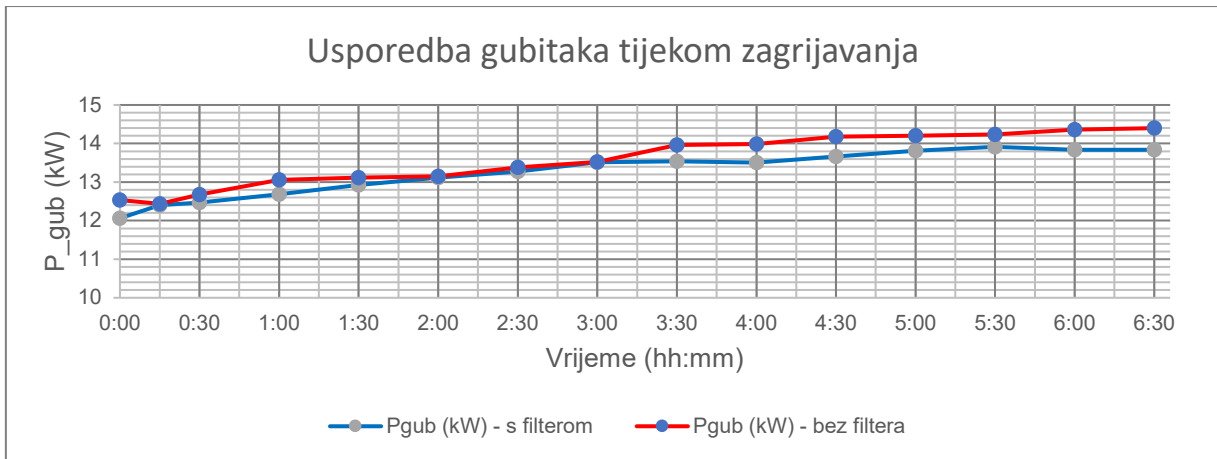
Slika 6.1: Usporedba napona na stezaljkama generatora i 1. harmonika napona nakon zagrijavanja pod teretom s i bez sinusnog filtra



Slika 6.2: Usporedba faktora snage i cosphi nakon zagrijavanja pod teretom s i bez sinusnog filtra



Slika 6.3: Prirast temperature pri zagrijavanju s i bez sinusnog filtra

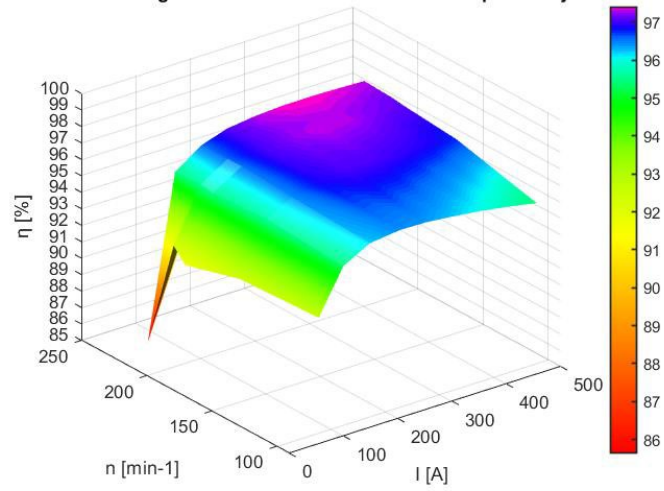


Slika 6.4: Gubici tijekom zagrijavanja s i bez sinusnog filtra

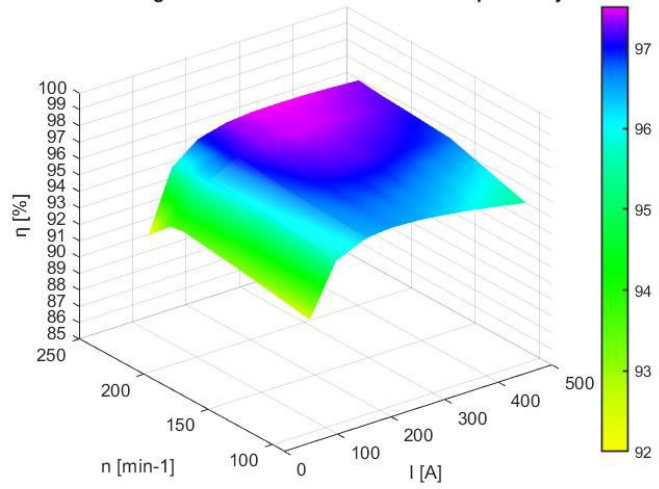
6.2. Usporedba gubitaka i korisnosti sva tri generatora

Opisana mjerenja provedena su na sva tri stroja te je analizom i usporedbom rezultata ispitivanja potvrđena sljedivost u serijskoj proizvodnji generatora s permanentnim magnetima. Potvrđene su projektom određene karakteristike statorskog namota, izolacije, električne i mehaničke veličine u različitim režimima rada te garantirana korisnost. Usporedba korisnosti svakog generatora u ovisnosti o brzini i strujnom opterećenju predstavljena je slikom 6.5.

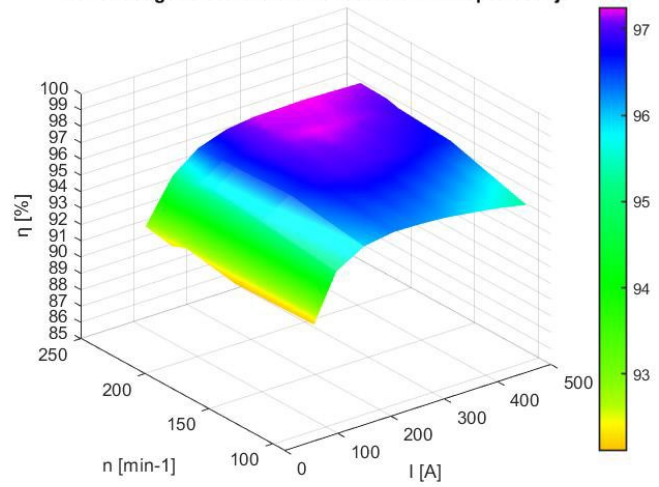
Korisnost generatora A u ovisnosti o brzini i opterećenju



Korisnost generatora B u ovisnosti o brzini i opterećenju



Korisnost generatora C u ovisnosti o brzini i opterećenju



Slika 6.5: Korisnosti tri ispitana generatora u ovisnosti o strujnom opterećenju i brzini

Zaključak

Primjenom permanentnih magneta u sinkronim generatorima uklonjena je komponenta gubitaka u bakru rotora, a spajanje na mrežu preko frekvencijskog pretvarača omogućuje rad na različitim brzinama vrtnje te praćenje točke maksimalne korisnosti. Primjer takvog stroja koji će biti instaliran na maloj hidroelektrani detaljno je ispitan unutar tvornice Končar – Generatori i motori pod simuliranim uvjetima koji se očekuju u trajnom radu. Statičkim ispitivanjima utvrđena je ispravnost i funkcionalnost pomoćne opreme, kao i simetrija namota te zadovoljavajuća izolacija. Ispitivanjima u vrtnji stroja (prazni hod u motorskom i generatorskom režimu, zagrijavanje pod opterećenjem, vitlanje) potvrđena su projektom definirana električna i mehanička svojstva ispitivanog objekta.

Literatura

- [1] *Tehnička enciklopedija Jugoslavenskog leksikografskog zavoda*, Zagreb, JLZ, 1963- 1997., Sv. 5. 1976.
- [2] Miloloža H., *Magnetska svojstva amorfnih feromagneta*, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, 2016.
- [3] Jozić M., *Suvremeni magnetski materijali*, Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.
- [4] Kang D. H., Curiać P., Jeong Y. H., Jung S. J., *Field pulse magnetization of power PMSM rotors*, *Electrical Engineering* (2005) 87: 295-304
- [5] Bavendiek G., Hameyer K., Filippini M., Alotto P., *Analysis of impulse-magnetization in rare-earth permanent magnets*, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* (2018) 57: 23-31
- [6] Žarko D., Stipetić S., Nađ S., Klanac M., *Generator s permanentnim magnetima za male hidroelektrane*, 14. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 10.-13. studenoga 2019.
- [7] Čorluka V., *Modeliranje sinkronog motora s unutarnjim permanentnim magnetima i koncentriranim namotom*, Disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [8] Melideo L., *Magnetization process for PM rotors*, <https://www.electricmotorengineering.com/magnetization-process-for-pm-rotors/>, 17.4.2024.
- [9] *High-Performance Ferrite Magnet, NMF Series, Demagnetization curve*, Materials Magic, <https://hitachi.co.in/pdf/resources/high-function-materials-and-components/advanced-materials-and-components/nmf-a.pdf>, 17.04. 2024.
- [10] Hang H., *Research on Degaussing Method of Ferromagnetic Materials Based on Magnetic Domain Control*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 310, 2019.
- [11] *Eddy current*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current, 12.11.2023.
- [12] Wolf R., *Ispitivanje električnih strojeva*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1964.

- [13] Wolf R., *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- [14] Hanić Z., *Generatori i transformatori*, prezentacije s predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2023.
- [15] Hendershot J.R.Jr., Miller T.J.E., *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, Motor Design Books LLC, Florida, SAD, 2010.
- [16] Sirotić Z., Maljković Z., *Sinkroni strojevi*, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 1996.
- [17] Žarko D., *Design of Synchronous Permanent Magnet Motors*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2019.
- [18] *What does motor insulation class specify and why is it important?*, Motion Control Tips, <https://www.motioncontroltips.com>, 6. 6. 2024.
- [19] Tvorčić S., *Otkrivanje kvarova rotora kaveznoga asinkronoga motora analizom magnetskog polja u zračnom rasporu*, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2019.
- [20] Kuzle I, Pandžić H., *Održavanje elektroenergetskog sustava*, Sveučilište u Zagrebu, Zavod za visoki napon i energetiku, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2012.
- [21] Stipetić S., *Sinkroni i asinkroni strojevi*, prezentacije s predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2023.
- [22] Stipetić S., Žarko D., *Elektromehaničke pretvorbe energije*, prezentacije s predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2023.
- [23] Muetze A., *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*, disertacija, Tehničko sveučilište Darmstadt, 2004.
- [24] Hubak A., *Uređaj za eksperimentalno određivanje momenata tromosti trkaćeg automobila Formula student*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [25] Križanić S., *Estimacija momenta inercije laboratorijskog sustava asinkroni motor – istosmjerni generator*, diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2019.

- [26] Matak L., *Eksperimentalno određivanje momenta tromosti višerotorske bespilotne letjelice*, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2018.
- [27] Novak A., *Uzroci osovinskih napona i sprečavanje ležajnih struja kaveznih asinkronih strojeva*, završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2017.
- [28] *Best Practices for Bearing Protection in New and Repaired Motors, Testing In-Service Motors, and Inspecting Damaged Motor Bearings*, Bearing Protection Handbook, AEGIS, Edition 3
- [29] Tomičić B., *Uređaj za magnetiziranje rotora strojeva s tangencijalno postavljenim permanentnim magnetima*, Državni zavod za intelektualno vlasništvo, Zagreb, 2023.
- [30] Sirotić Z., Krajzl V., *Upute za proračun sinkronih strojeva*, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, 1991.
- [31] Huzlik R., Ondrusek C., Palsovcis N., *Design of Permanent Magnet Generators for Small Hydro Power Plant*, Department of Power Electrical and Electronic Engineering, Brno University of Technology, 2016.
- [32] Borkowski D., Wegiel T., Kisielewski P., Liszka D., *Universal Modular Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Low-Head Hydropower Plants*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 38, No. 4, December 2023.
- [33] Hečimović I., *Parametarska simulacija elektromagnetskog polja generatora s permanentnim magnetima u FEM simulacijskom alatu*, diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2022.
- [34] *Tehnički priručnik Končar*, Končar Elektroindustrija, peto izdanje, Zagreb, 1991.
- [35] Kubatka K., *Model sinkronog motora s permanentnim magnetima s uključenim gubicima*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Završni rad, 2021.
- [36] *Motor Tehnology*, HAMACO Industries Corporation, <http://www.hamaco-ind.com>, 18. lipnja 2024.
- [37] Mandić I., Tomljenović V., Pužar M., *Sinkroni i asinkroni električni strojevi*, Priručnici tehničkog veleučilišta u Zagrebu, 2012.

- [38] *What is a Resolver?*, Advanced Micro Controls INC., <https://www.amci.com>, studeni 2023.
- [39] Stracenski M., Mjerenje položaja i brzine rotora – rezolveri i enkonderi, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Završni rad, 2019.
- [40] Car S., *Potopljeni agregati za niske padove voda*, Končarevac, srpanj-kolovoz 2023.
- [41] D. Dujmović, *Umjeravanje etalonskih mjerila temperature s platinskim otporničkim osjetnicima*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Završni rad, 2023.

Sažetak

Naslov: Sveobuhvatno ispitivanje sinkronog generatora s permanentnim magnetima napajanog preko frekvencijskog pretvarača

Sažetak:

S ciljem što boljeg iskorištenja hidropotencijala u slučajevima manjeg pada i varijabilnog protoka, Končar – Generatori i motori razvija sinkrone generatore s permanentnim magnetima koji će na mrežu biti spojeni preko frekvencijskog pretvarača i na taj način omogućiti rad na različitim brzinama vrtnje i praćenje točke maksimalne korisnosti. Izvedbom potopljenih agregata ukinuta je strojarnica, a zamjenom uzbudnog namota permanentnim magnetima smanjeni rotorski gubici. U ovom radu opisan je osnovni princip rada i primjena strojeva s permanentnim magnetima te predstavljen spomenuti proizvedeni generator kao objekt ispitivanja. Predstavljena je ispitna stanica te osnovni principi rada korištene mjerne opreme. Dokumentirani su postupci i rezultati ispitivanja u tijeku proizvodnje te na gotovom objektu izvršeni u skladu s nacionalnim i međunarodnim normama i standardima.

Ključne riječi: sinkroni generator, permanentni magneti, frekvencijski pretvarač, potopljeni agregat, završna električna ispitivanja

Abstract

Title: Testing of a synchronous generator with permanent magnets powered by a frequency converter

Summary: To accomplish better utilization of hydro potential in cases of low head and variable flow, Končar – Generators and Motors developed synchronous generators with permanent magnets which will be connected to the grid by frequency converters to enable running at different rotation speeds and following the maximal efficiency point. With the form of submersible aggregates, there is no need for machine room and usage of permanent magnets instead of excitation winding reduces rotor losses. This study presents the main principle of work and application of machines with permanent magnets. Produced generator mentioned above is presented as testing object. Test station and the main principles of work of used measuring equipment are described. Procedures and results of tests during the production and on the final object are documented. All tests are done according to relevant international and national norms and standards.

Keywords: synchronous generator, permanent magnets, frequency converter, submersible aggregates, final electrical testing