

# Določanje izgub 6-faznega sinhronskega stroja z metodo sintetične obremenitve

Klemen Drobnič, Anton Darovic, Andraž Rihar, Mitja Nemeč in Vanja Ambrožič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: klemen.drobnic@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V prispevku predstavljamo metodo sintetične obremenitve (MSO), ki omogoča določitev izgub večfaznega sinhronskega stroja v širokem obratovalnem področju. Običajni način meritev izgubne moči namreč zahteva mehansko sklopitev merjenca z dovolj veliko aktivno zavoro, kar merilni proces zaplete in podraži. Aplikacija MSO je primerna predvsem v tistih večfaznih strojih, ki imajo sodo število 3-faznih skupin navitij. MSO smo zato aplicirali na 6-fazni sinhronski stroj z notranje nameščenimi trajnimi magneti in dvema 3-faznima skupinama navitij, ki ju napajamo z dvema 3-faznima pretvornikoma s skupnim enosmernim tokokrogom. Prva skupina v motorskem režimu generira navor, ki je po smeri enak vrtilni hitrosti, medtem ko ji druga skupina v generatorskem režimu nasprotuje. Motorska in generatorska skupina navitij si v zračni reži izmenjata mehansko moč, ki zaradi skupnega enosmernega tokokroga v pretvornikih recirkulira v motorsko skupino. Medtem iz enosmernega tokokroga doteka zgolj moč, ki je potrebna za pokrivanje izgub celotnega pogona. Iz meritve vhodnih moči obeh skupin navitij je tako mogoče določiti izgube stroja brez mehanskega obremenjevanja gredi z dodatnim strojem.

**Ključne besede:** izkoristek, izgube, merilni sistem, električni pogon, večfazni stroj, sinhronski stroj s trajnimi magneti

## Power loss determination in the six-phase synchronous machine using a synthetic loading method

The paper presents a synthetic loading method (SLM) for the power loss determination in the multiphase electrical machine over a wide operating range. The conventional power loss determination requires a mechanical coupling of the machine under test with a sufficiently large active brake which complicates the measurement process and makes it more expensive. MSO is particularly suitable in the multiphase machines with an even number of three-phase winding sets. SLM is applied on a six-phase synchronous machine with interior permanent magnets and two three-phase winding sets fed by two three-phase inverters with a common DC link. The motoring set generates a positive and the generator set a negative torque. The motor and generator winding sets exchange the mechanical power in the air gap. The power is then recirculated back to the motoring set via a common DC link. Only the power needed to cover the losses of the drive flows from the DC circuit. The machine power losses are determined from the measurement of the input power of the two winding sets thus avoiding a mechanical loading of the shaft with additional machinery.

**Keywords:** efficiency, losses, measurement test bed, electric drive, multiphase machine, permanent magnet synchronous machine

## 1 UVOD

Klasični način za določevanje izgub, izkoristka in končne nadtemperature rotacijskih električnih strojev je metoda naravne obremenitve (MNO) [1], [2]. Preizkušanelec je prek mehanske gredi togo sklopljen z zavoro, ki je po navadi električni stroj podobne moči, medtem ko sta stroja napajana z dvema ločenima močnostnima pretvornikoma. Želena delovno točko dosežemo z nastavitvijo vrtilne hitrosti preizkušanca prek regulacijske zanke za vrtilno hitrost in z uporabo regulacijske zanke navora za nastavitev obremenitve zavore. Na ta način izmerimo lastnosti stroja v celotnem obratovalnem področju vse do nazivne moči. Če si močnostna pretvornika delita enosmerni tokokrog, je omogočena rekuperacija mehanske moči, kar zagotavlja, da se med meritvijo trošijo zgolj izgubne moči posameznih komponent pogonskega sistema.

Glavna pomanjkljivost MNO je zahteva po dodatnem stroju, zaradi česar je merilni sistem dražji in kompleksnejši. Potrebni so mehanska sklopitev strojev na gredi, vgradnja senzorja navora ter v primeru ločenih enosmernih tokokrogov tudi močnostni pretvornik z dvosmernim pretokom moči ali zadosten zavorni upor. Naštetim komponentam se je mogoče izogniti z metodo dinamične obremenitve (MDO) [3], [4]. V tem primeru za merjenje učinkovitosti in temperaturnega porasta

konstantna mehanska obremenitev ni potrebna, saj lahko (skoraj) enakovredno obratovalno stanje dosežemo s pomočjo pulzirajočega navora preizkuševanca samega. MDO posnema mehansko breme tako, da izkoristi vztrajnostni moment stroja, ki ob spreminjanju vrtilne hitrosti ustvarja dinamični navor na gredi. Zaradi tega stroj pospešuje (motorski režim) in upočasnjuje (generatorski način) okoli izbrane povprečne vrtilne hitrosti. Frekvenca navora mora biti dovolj velika, da sicer neizbežna oscilacija vrtilne hitrosti ostane razmeroma majhna. Povprečna moč napajalnika, ki mora omogočati dvosmerno delovanje, je tudi tu enaka skupnim izgubam motorja in pretvornika. Zato MDO omogoča znatno poenostavitev in pocenitev merilnega sistema, saj ga sestavljajo le preizkušane z enim močnostnim pretvornikom, napajalnikom in analizatorjem moči, brez mehanske sklopitve. Pomanjkljivosti MDO izhajajo neposredno iz kvazistacionarnega stanja: čas zajema posamezne merilne točke je dolg, saj je odvisen od frekvence oscilacije navora in časovno spremenljive magnetne razmere povzročajo dodatne izgube.

Medtem ko 3-fazni stroji omogočajo zgolj izbiro med MNO in MDO, se v kontekstu nekaterih večfaznih strojev ponuja nova možnost. Če ima večfazni stroj sodo število faznih navitij, lahko skupina navitij obratuje v poljubnem režimu moči, kar omogoča, da istočasno polovica navitij deluje v motorskem, druga polovica pa v generatorskem načinu [5]. Glavnina moči teče iz motorske v generatorsko skupino, medtem ko iz enosmernega tokokroga doteka zgolj moč, ki je potrebna za pokrivanje izgub pogona. Opisani merilni postopek imenujemo metoda sintetične obremenitve (MSO) [6]. MSO ohranja dobre lastnosti obeh prej navedenih metod, saj za dosego želenega obratovalnega stanja nista potrebna ne mehanska gred z dodatnim strojem in močnostnim pretvornikom kot tudi ne pulzirajoč navor na gredi. Med MSO je stroj v stacionarnem elektromagnetnem stanju.

MSO je omejena na večfazne stroje in je zmožna oceniti izgubno moč sinhronskega stroja s trajnimi magneti (SSTM) v širokem obratovalnem območju. Posebej primerna je aplikacija MSO v večfaznih strojih s statorskim navitjem, ki ga sestavlja sodo število 3-faznih skupin navitij. Na ta način polovica 3-faznih skupin deluje v motorskem režimu, medtem ko druga polovica v generatorskem režimu.

## 2 6-FAZNI SINHRONSKI STROJ

MSO smo aplicirali na 6-fazni SSTM z notranje nameščenimi trajnimi magneti in dvema 3-faznima skupinama navitij.

### 2.1 Matematični model za stacionarno stanje

6-fazni SSTM matematično predstavimo s sistemom napetostnih enačb v dvoosnem rotorskem koordinatnem sistemu, ki omogoča analizo delovanja na podlagi razmer v magnetilni (d) in navorotvorni (q) osi. Poglavitne lastnosti MSO lahko pozneje pojasnimo tako, da se

omejimo na razmere v stacionarnem stanju. Električne razmere v stroju opišemo s po 4 napetostnimi enačbami za vsako 3-fazno skupino, s čimer zajamemo tudi izgube v železu, ki jih povzema nadomestna upornost  $R_{Fe}$  in je enaka za obe osi [7]

$$\begin{aligned} U_{d1} &= R_s I_{d1} - \omega_r L_q I_{q1,a} - \omega_r M_q I_{q2,a} \\ U_{d1} &= R_s I_{d1} + I_{d1,Fe} R_{Fe} \end{aligned} \quad (1)$$

$$U_{q1} = R_s I_{q1} + \omega_r L_d I_{d1,a} + \omega_r M_d I_{d2,a} + \omega_r \Psi_{TM}$$

$$U_{q1} = R_s I_{q1} + I_{q1,Fe} R_{Fe}$$

$$U_{d2} = R_s I_{d2} - \omega_r L_q I_{q2,a} - \omega_r M_q I_{q1,a}$$

$$U_{d2} = R_s I_{d2} + I_{d2,Fe} R_{Fe}$$

$$U_{q2} = R_s I_{q2} + \omega_r L_d I_{d2,a} + \omega_r M_d I_{d1,a} + \omega_r \Psi_{TM}$$

$$U_{q2} = R_s I_{q2} + I_{q2,Fe} R_{Fe}$$

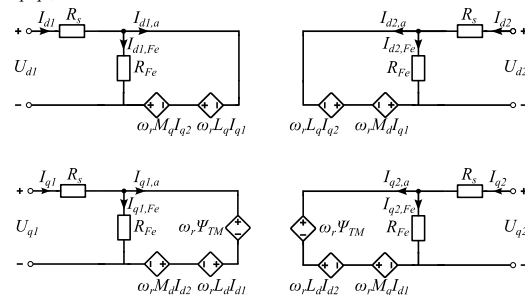
$R_s$  je statorska upornost,  $L_d$  in  $L_q$  statorski induktivnosti v d- in q-osi,  $\Psi_{TM}$  rotorski magnetni sklep ter  $\omega_r$  električna vrtilna hitrost. Magnetno sklopitev med skupinama navitij opišemo z medsebojnima induktivnostma  $M_d$  in  $M_q$ , ki prek množenja s tokom in vrtilno hitrostjo vplivata na napetostne razmere v drugi skupini navitij. Z indeksom 1 oz. 2 označujemo posamezno 3-fazno skupino navitij. Matematični opis dopolnimo še s štirimi vozliščnimi enačbami za tok,

$$\begin{aligned} I_{d1} &= I_{d1,Fe} + I_{d1,a}, & I_{d2} &= I_{d2,Fe} + I_{d2,a} \\ I_{q1} &= I_{q1,Fe} + I_{q1,a}, & I_{q2} &= I_{q2,Fe} + I_{q2,a} \end{aligned} \quad (3)$$

ki povzemajo deljenje statorske (vsiljene) komponente toka med prečno in rotorsko vejo.

### 2.2 Nadomestno vezje

Sistem enačb (1)–(2) lahko osvetlimo z ekvivalentnim nadomestnim vezjem na sliki 1, ki je sestavljen iz 4 podsistemov. Vidimo, da se statorske komponente toka ( $I_{d1}$ ,  $I_{q1}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_{q2}$ ) v vezju razdelijo v dva dela, in sicer v tok prečne veje, ki ponazarja izgube v železu (indeks Fe), ter tok rotorske veje (indeks a), ki ustvarja magnetenje (v d-osi) ali navor (v q-osi). S konstantno upornostjo  $R_{Fe}$  sicer implicitno definiramo kvadratično odvisnost izgub v železu od inducirane napetosti, kar je za potrebe analize dovolj dober približek. Medsebojni vpliv 3-faznih skupin je po naravi enak dobro znanemu križnemu vplivu med osema znotraj posamezne skupine. V obeh primerih se kaže v obliki odvisnih virov napetosti (npr. v magnetilni osi prve skupine navitij tako najdemo člena  $\omega_r L_q I_{q1,a}$  in  $\omega_r M_q I_{q2,a}$ ).



Slika 1: Nadomestno vezje 6-faznega SSTM.

Navorna enačba 6-faznega SSTM

$$M_{em} = 3P_p \begin{pmatrix} \Psi_{TM}(I_{q1,a} + I_{q2,a}) \\ + (L_d - L_q)(I_{d1,a}I_{q1,a} + I_{d2,a}I_{q2,a}) \\ + (M_d - M_q)(I_{d1,a}I_{q2,a} + I_{d2,a}I_{q1,a}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

poleg izravnalnega navora trajnih magnetov, ki teži k poravnanju rotorske magnetne osi z vektorjem toka, vsebuje tudi dva prispevka zaradi magnetne izraženosti. Prvi prispevek se nanaša na razliko v lastnih induktivnostih znotraj posamezne skupine navitij ( $L_d - L_q$ ), medtem ko je drugi odvisen od razlike medsebojnih induktivnosti med skupinama navitij ( $M_d - M_q$ ). Na podlagi uveljavljene terminologije je prispevka smiselno imenovati lastni in medsebojni reluktančni navor.

### 3 METODA SINTETIČNE OBREMITITVE

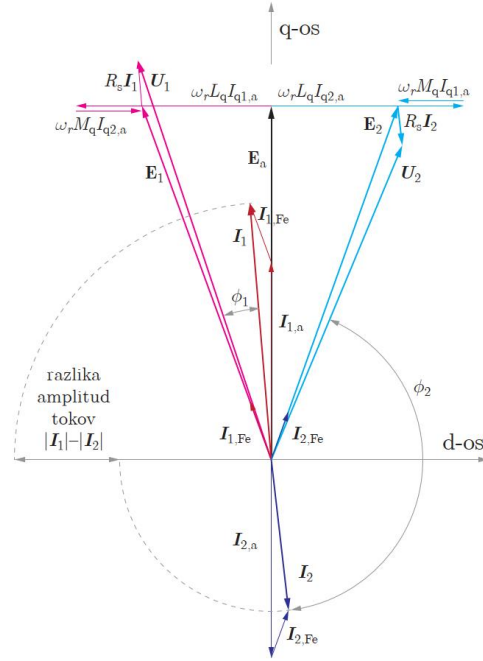
Pri sintetični obremenitvi 6-faznega stroja 3-fazni skupini navitij napajamo z dvema 3-faznima pretvornikoma. Skupina v motorskem režimu ustvarja navor, ki je po smeri enak vrtilni hitrosti, medtem ko ji skupina v generatorskem režimu nasprotuje, in torej deluje kot zavora. Tovrsten način obratovanja dosežemo tako, da v prvo skupino navitij vsiljujemo pozitivno q-komponento toka, medtem ko v drugo skupino negativno q-komponento toka. Pogon doseže stacionarno stanje, ko se vrtilna hitrost na gredi ustali, kar z drugo besedo pomeni, da je vsota navorov takrat nič. Navora skupin si medsebojno nasprotujeta ter si hkrati izmenjujeta elektromagnetno moč. Iz enosmernega tokokroga prek pretvornika doteka zgolj moč, ki je potrebna za pokrivanje izgub električnega stroja ter močnostnega pretvornika.

Če mehansko trenje zanemarimo in privzamemo enak magnetilni tok v obeh skupinah navitij ( $I_{d2,a} = I_{d1,a}$ ), iz enačbe (4) ugotovimo, da morata za ničelni navor na gredi navorotvorni komponenti toka v rotorski veji biti po amplitudi enaki, a v protifazi  $I_{q1,a} = -I_{q2,a}$ . V praksi je zaradi premagovanja mehanskega trenja na gredi stroja navorna komponenta v prvi (motorski) skupini navitij  $I_{q1,a}$  vedno nekoliko večja.

Prečna veja v nadomestnem vezju povzroči, da del statorskega toka rotorske veje ne doseže in tako ne sodeluje pri elektromagnetni pretvorbi moči, temveč pokriva izgube v železu. Ker skupini navitij delujeta v različnih obratovnih režimih, ima ta pojav različne posledice za statorski tok v motorski in generatorski skupini.

#### 3.1 Kazalčni diagram

Vpliv izgub v železu na amplitudo statorskega toka lahko razložimo s kazalčnim diagramom na sliki 2, ki izhaja iz nadomestnega vezja na sliki 1. Komponenti posamezne električne veličine združimo v kazalec, npr.  $I_1 = I_{d1} + jI_{q1}$ , ter enačbe grafično predstavimo. Z rdečo so predstavljene razmere v motorski skupini (indeks 1), z



Slika 2: Kazalčni diagram pri MSO in toku  $I_{1,a} = jI_{q1,a}$ .

modro razmere v generatorski skupini (indeks 2). Zaradi enostavnosti se omejimo na situacijo, kjer magnetilne komponente toka v rotorski veji ni. Zato velja  $I_{1,a} = jI_{q1,a}$  in  $I_{2,a} = -jI_{q2,a}$ , ki sta medsebojno v protifazi, a po amplitudi enaka. V motorski skupini vektorska vsota rotorske inducirane napetosti  $E_a$  in obeh induktivnih padcev napetosti  $\omega_r L_q I_{q1,a}$  in  $\omega_r M_q I_{q2,a}$  definira statorsko inducirano napetost  $E_1$ , ki požene  $I_{1,Fe}$  v prečni veji. Z vektorsko vsoto toka v rotorski in prečni veji nato določimo statorski tok  $I_1$ , ki je po amplitudi večji od  $I_{1,a}$ . Podoben razmislek opravimo tudi za generatorsko skupino, kjer ugotovimo, da je statorski tok  $I_2$  manjši od  $I_{2,a}$ . Izgube v železu torej povzročijo, da je statorski tok v motorski skupini  $I_1$  večji od toka  $I_2$  v generatorski skupini, pri čemer medsebojni kot ostaja tako rekoč  $180^\circ$ .

#### 3.2 Bilanca moči

S kazalcema statorske napetosti in toka izračunamo vhodno električno moč v posamezni skupini navitij. Celotna moč, ki med MSO vstopa v 6-fazni SSTM, je

$$P_{12} = P_1 + P_2 = 3U_1 I_1 \cos \phi_1 + 3U_2 I_2 \cos \phi_2, \quad (5)$$

kjer je  $P_2 < 0$ .

Kazalčni diagram razkrije, da tako izgube v železu kot bakru vplivajo tudi na velikost faznega kota med kazalcema statorske napetosti in toka. V generatorski skupini se fazni kot  $\phi_2$  tako zmanjša, medtem ko se v motorski skupini poveča. Ne glede na obremenitev zato velja, da v motorsko skupino vedno pritekata večja delovna moč in tok z večjim faktorjem delavnosti.

Ker 6-fazni SSTM napajamo z močnostnim pretvornikom s skupnim enosmernim tokokrogom, moč generatorske skupine  $P_2$  recirkulira v motorsko skupino (slika 3). V stroj prek pretvornika tako doteka zgolj moč,

ki je potrebna za pokrivanje izgub v bakru in železu ter izgub zaradi trenja in ventilacije, in je enaka

$$P_{i,\text{stroj}} = P_1 + P_2. \quad (6)$$

Moč  $P_{dc}$ , ki priteka iz napajalnega vira, pokriva tako izgube pretvornika kot že prej omenjene izgube stroja

$$P_{dc} = P_{i,\text{pretv}} + P_{i,\text{stroj}}. \quad (7)$$

Poglavitni prednosti MSO pred MDO in MNO sta, da preizkus nazivne obremenitve električnega stroja poteka v stacionarnem stanju in zanj ne potrebujemo mehanske sklopitve z dodatnim strojem. Med MSO lahko obe 3-fazni skupini delujeta blizu svoje nazivne napetosti, toka ter faktorja moči.

## 4 IMPLEMENTACIJA MSO

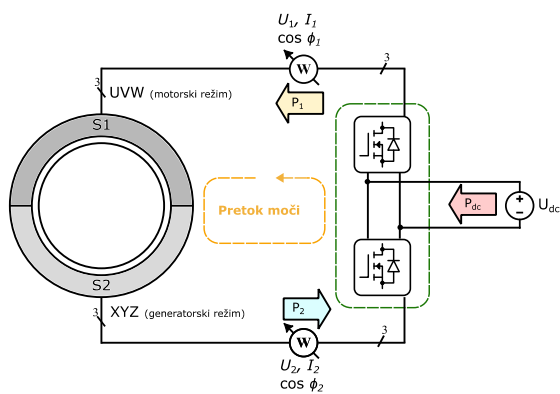
### 4.1 Laboratorijski model pogona

Meritve so bile izvedene na laboratorijskem modelu 6-faznega pogona (slika 4). Sestavljajo ga 6-fazni močnostni pretvornik z mikrokrmilniškim vezjem, 6-fazni SSTM (tabela 1) ter pripadajoča programska oprema za zaprtozračno vodenje.

6-fazni SSTM je namenjen za transportno pogonsko aplikacijo, kjer je na voljo 48 V baterijska enosmerna napetost. Večfazna zasnova omogoča, da se pri enaki napajalni napetosti moč porazdeli na več faznih navitij, zaradi česar so fazni tokovi manjši in posledično vgradnja polprevodniških stikal cenovno dostopnejša.

### 4.2 Prilagoditev regulacijske zanke

Za običajni režim obratovanja 6-faznega SSTM zasnova regulacijske zanke temelji na razširitvi dobro znane 3-fazne tehnologije vodenja. Skupini navitij imata skupno regulacijsko zanko vrtilne hitrosti. Izhod regulatorja hitrosti je želeni navor, ki se enakomerno razdeli med obe 3-fazni skupini. Ker strategija MTPA (angl. Maximum Torque Per Ampere) ni implementirana, je želeni navor premo sorazmeren zelenemu toku  $i_q$  in vstopa kot prilagojena zelena vrednost toka v regulatorja q-komponente obeh 3-faznih skupin. Prav tako je 3-faznima skupinama navitij skupen regulator slabljenja polja. V 3-faznih strojih je vhod v regulator slabljenja polja nenasičena vrednost zelenega napetostnega



Slika 3: Bilanca moči pri MSO.

vektorja. V primeru 6-faznega stroja sta takšna vektorja dva, po eden za vsako skupino navitij. Izkaže se, da je namesto njune povprečne vrednosti treba izbrati zgolj tisti napetostni vektor ( $U_1, U_2$ ), ki je po iznosu večji. Zahtevani pogoj za vstop v področje slabljenja polja bo vedno prva izpolnila skupina navitij, ki deluje v motorskem režimu.

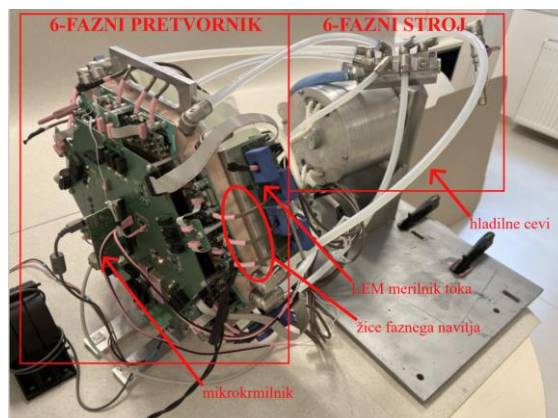
Sintetično obremenitev realiziramo s prilagoditvijo regulacijskega sistema tako, da prva 3-fazna skupina (skupina UVW) deluje v motorskem režimu, medtem ko druga 3-fazna skupina deluje v generatorskem režimu (skupina XYZ).

Slika 5 prikazuje prilagoditev regulacijskega sistema za izvedbo MSO. Vhodne zelene vrednosti so vrtilna hitrost  $\omega^{\text{nast}}$  ter tokova  $i_q^{\text{nast}}$  in  $i_d^{\text{nast}}$ . Izhod regulatorja vrtilne hitrosti je potrebna komponenta toka  $i_q^*$ , ki zagotavlja elektromagnetni navor, potreben za premagovanje navora trenja in ventilacije.

Zaradi dveh 3-faznih skupin navitij je regulacija toka izvedena z enim skupnim regulatorjem povprečja ter dvema regulatorjema razlike (za vsako skupino po eden). Regulator povprečja skrbi za vzdrževanje zelene vrtilne hitrosti in pokrivanje izgub zaradi trenja in ventilacije. Njegovo zeleno vrednost določata izhod regulatorja vrtilne hitrosti ( $i_q^*$ ) ter izhod regulatorja slabljenja polja ( $i_d^*$ ). Motorsko oz. generatorsko obratovanje posamezne skupine navitij dosežemo tako, da regulatorjema razlike nastavimo zeleno vrednost q-komponente toka: a) v skupini UVW, ki naj deluje v motorskem režimu, je zelena vrednost  $+i_q^{\text{nast}}$  in b) v skupini XYZ, ki deluje v generatorskem režimu, je zelena vrednost  $-i_q^{\text{nast}}$ .

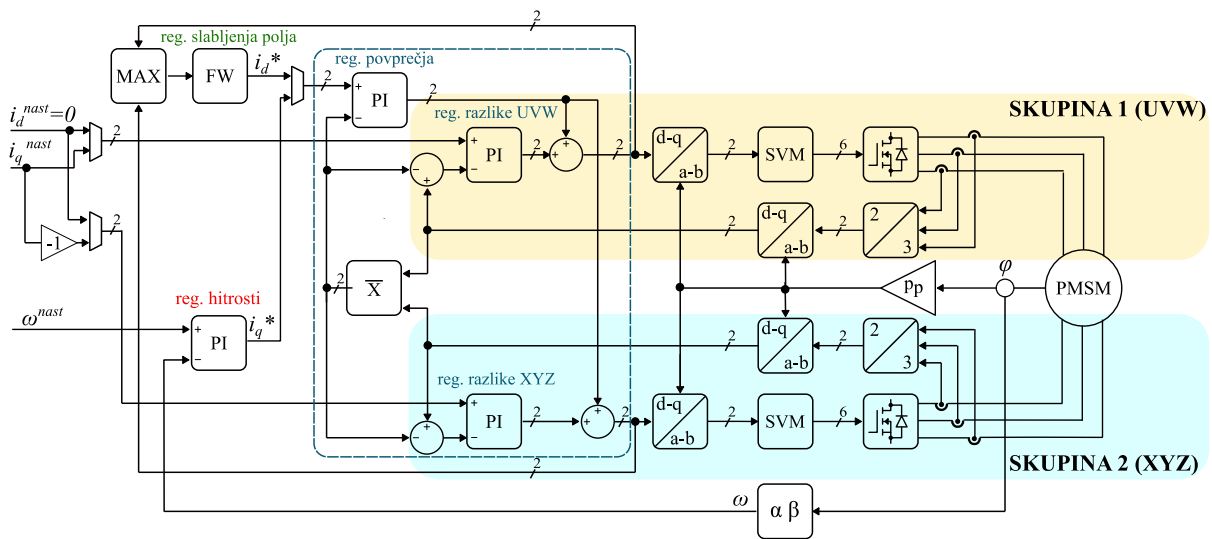
Tabela 1: Podatki 6-faznega SSTM

Podatek	Vrednost
<i>Nazivni podatki</i>	
Maksimalni tok $I_{\text{max}}$	200 A
Napetost en. tokokroga $U_{dc}$	48 V
<i>Parametri</i>	
Statorska upornost $R_s$	7,4 mΩ
Induktivnost v d-osi $L_d$	39,5 μH
Induktivnost v q-osi $L_q$	59,8 μH
Medsebojna induktivnost v d-osi $M_d$	11,8 μH
Medsebojna induktivnost v q-osi $M_q$	17,9 μH
Magnetni sklep trajnih magnetov $\Psi_{TM}$	29,8 mVs



Slika 4: Laboratorijski model 6-faznega pogona.





Slika 5: Prilagojeni regulacijski sistem 6-faznega stroja za izvedbo MSO.

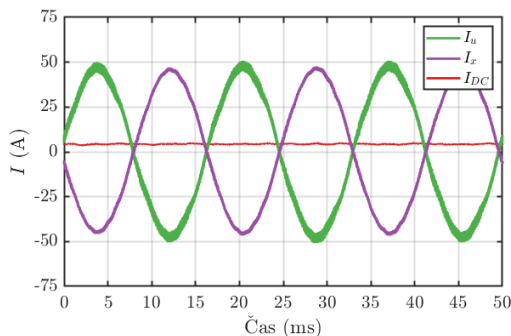
Ne glede na režim (motorsko/generatorsko) in področje delovanja (konstanten navor/slabiljenje polja) je zelena vrednost d-komponente v regulatorjih razlike 0 A. Izhodu regulatorja povprečja prištejemo izhod pripadajočega regulatorja razlike (za UVW ali XYZ skupino), s čimer dobimo želeni vektor napetosti za posamezno 3-fazno skupino. Ta nato vstopa v blok SVM, ki določi krmilne signale za močnostna stikala.

## 5 REZULTATI

Vrtilno hitrost  $\omega$  smo nastavljali v razponu od  $0 \text{ min}^{-1}$  do  $1800 \text{ min}^{-1}$  s korakom  $300 \text{ min}^{-1}$  in amplitudo toka  $I_q^{\text{nast}}$  od 0 A do 76,5 A s korakom 4,5 A. Čas med odčitkom veličin med dvema zaporednima obratovalnima točkama je znašal 13 sekund – to je bil čas, da se obremenitev spremeni, obratovanje pogona ustali, merilni rezultat na inštrumentu pa ustali in zajame.

### 5.1 Časovni potek tokov ob sintetični obremenitvi

Časovni poteki faznih tokov iz obeh skupin navitij ter tok enosmernega vmesnega tokokroga so prikazani na sliki 6. Nastavljena obratovalna točka ( $\omega^{\text{nast}}, i_q^{\text{nast}}$ ) = ( $900 \text{ min}^{-1}$ , 45 A) je v področju konstantnega navora,

Slika 6: Fazna tokova skupin navitij UVW (zelena) in XYZ (vijolična) ter tok enosmernega tokokroga (rdeča) pri  $\omega^{\text{nast}} = 900 \text{ min}^{-1}$  in  $i_q^{\text{nast}} = 45 \text{ A}$ .

uporabljena je bila strategija  $I_d^{\text{nast}} = 0 \text{ A}$ . Pričakovano sta tokova motorske skupine UVW in generatorske skupine XYZ v protifazi, pri čemer je fazni tok v skupini navitij UVW po iznosu nekoliko višji. Odstopanje je, kot že omenjeno, mogoče pojasniti z nadomestnim vezjem, kjer mora del vhodne moči motorskega navitja pokriti skupne izgube v železu in izgube trenja. Tok enosmernega tokokroga je pozitiven, kar pomeni, da je takšna tudi moč enosmernega tokokroga, s čimer se pokriva tako izgube stroja kot pretvornika.

### 5.2 Vhodna moč v motorsko in generatorsko skupino navitij

Rezultati meritve vhodne moči za obe 3-fazni skupini navitij so prikazani na sliki 7, pri čemer so na zgornji polovici podane moči skupine UVW, delujoče v motorskem režimu, in na spodnji polovici moči skupine XYZ, delujoče v generatorskem režimu. S krogi so označene obratovalne točke, v katerih so bile opravljene meritve. Vrednosti moči skupine UVW so višje od absolutnih vrednosti moči v skupini XYZ. Pri nizki vrtilni hitrosti lahko pri močeh skupine XYZ (spodnja polovica grafa) opazimo celo pozitivno moč. V tistih obratovalnih točkah namreč zaradi nizke vrtilne hitrosti generatorska skupina proizvede premalo moči, da bi pokrivala lastne izgube, primanjkljaj moči mora zato zagotoviti enosmerni tokokrog. V tem primeru krožnega pretoka moči ni več, temveč enosmerni tokokrog vzporedno dovaja moč obema skupinama navitij.

Za lažjo interpretacijo rezultatov si meritve vhodne moči skupin UVW in XYZ oglejmo na sliki 8, pri čemer so izrisane vrednosti zgolj za štiri različne vrednosti  $I_q^{\text{nast}}$ . Za lažjo primerjavo je moč v generatorski skupini XYZ podana kot nasprotna vrednost ( $-P_{\text{XYZ}}$ ). Ugotovimo, da je vhodna moč motorske skupine vedno višja od moči, ki jo izmerimo v generatorski skupini. Razlika med krivuljama pri določeni obremenitvi predstavlja izgubno moč, to je moč, ki je vedno pozitivna in v 6-fazni stroj priteče iz enosmernega tokokroga. S povečevanjem

vrtilne hitrosti in obremenitve izgubne moči pričakovano naraščajo, pri čemer do področja slabljenja polja (ta se začne v intervalu od  $1500 \text{ min}^{-1}$  do  $1800 \text{ min}^{-1}$ , odvisno od obremenitve) naraščajo približno linearno odvisno od vrtilne hitrosti.

Slika 9 prikazuje izmerjene amplitude statorskih tokov obeh skupin za enake obremenitve, kot so podane na sliki 8. Razlika v amplitudah kljub povečevanju obremenitve ostaja tako rekoč enaka (razen v primeru prostega teka). S povečevanjem vrtilne hitrosti je sicer zaznati rahel trend v povečevanju razlike med amplitudama tokov, a lahko trdimo, da se povečevanje izgubne moči zaradi izgub v železu in izgub v trenju primarno kaže v različnih amplitudah napetostnih vektorjev in faznem kotu.

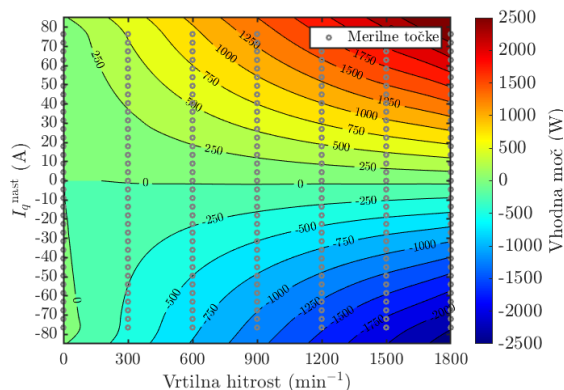
### 5.3 Izgubna moč 6-faznega stroja

Na osnovi meritev vhodnih moči obeh skupin 3-faznih navitij lahko določimo izgubne moči 6-faznega SSTM v širokem obratovalnem področju. Izgubne moči izračunamo tako, da moči obeh skupin seštejemo (enačba (6)).

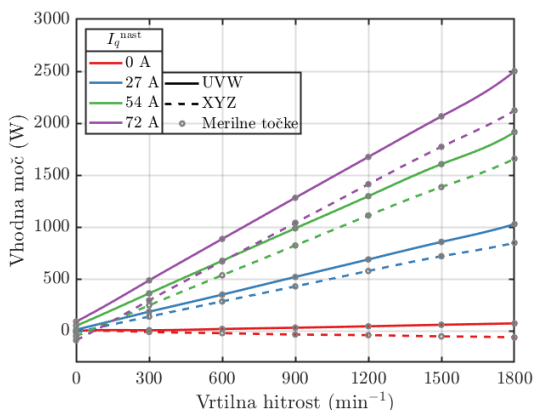
Izgubne moči stroja prikazujeta sliki 10 in 11, pri čemer so na slikah s krogci označene merilne točke. Iz parametričnega grafa (slika 11) je razvidno, da izgube v

področju konstantnega navora naraščajo praktično linearno z vrtilno hitrostjo in določenim začetnim odklikom, ki pri višanju obremenitve narašča. Ko vrtilna hitrost pogona preseže  $1500 \text{ min}^{-1}$ , začne pogon pri višjih obremenitvah že prehajati v področje slabljenja polja. Takrat se zaradi dodatnega toka v d-komponenti povečajo izgube v navitju. Tako lahko na sliki 11 opazimo, da se pri obremenitvi  $I_q^{\text{nast}} = 72 \text{ A}$  krivulja izgub usloči navzgor.

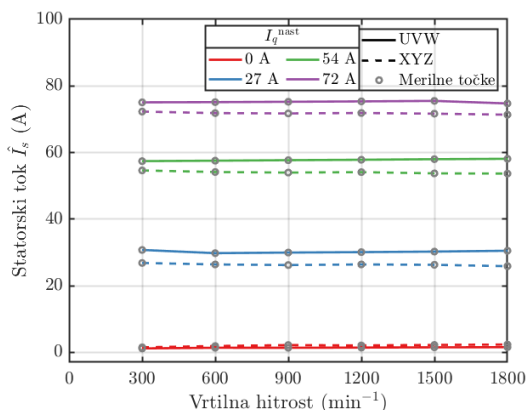
Spodnja (rdeča) krivulja na sliki 11 označuje potek izgub v prostem teku ( $I_q^{\text{nast}} = 0 \text{ A}$ ), kar pomeni, da te vsebujejo zgolj izgube v železu in izgube trenja. Če torej vsem preostalim krivuljam odštejemo rdečo krivuljo ( $I_q^{\text{nast}} = 0 \text{ A}$ ), dobimo izgube v statorskem navitju. Slika 12 prikazuje poteke moči v statorskem navitju do  $1500 \text{ min}^{-1}$ , saj pri višjih vrtilnih hitrostih tovrsten način določevanja statorskih izgub ni smiseln. Pogon namreč takrat vstopa v področje slabljenja polja, kar pa se zgodi pri različnih vrtilnih hitrostih, odvisno od obremenitve. S slike je razvidno, da so izgube statorskega navitja v področju konstantnega navora neodvisne od vrtilne hitrosti. Izgube so v kvadratičnem razmerju do statorskega toka: pri 2-krat večji obremenitvi ( $54 \text{ A}/27 \text{ A}$ ) so izgube 4-krat večje ( $100 \text{ W}/25 \text{ W}$ ).



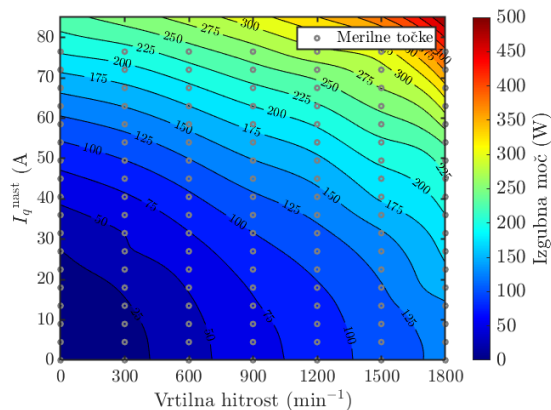
Slika 7: Vhodna moč skupine UVW (zgornja polovica) in skupine XYZ (spodnja polovica).



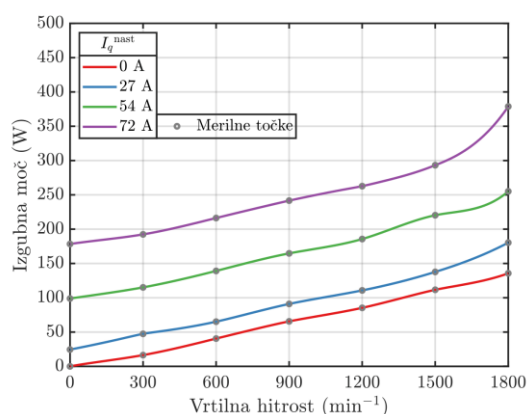
Slika 8: Parametrični graf vhodne moči skupin UVW in XYZ za štiri različne obremenitve; moč generatorske skupine XYZ je podana kot nasprotna vrednost ( $-P_{XYZ}$ ).



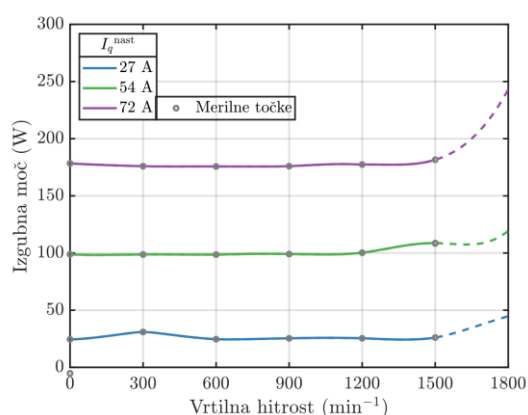
Slika 9: Parametrični graf amplitude faznega toka skupin UVW in XYZ za štiri različne  $I_q^{\text{nast}}$ .



Slika 10: Izgubne moči 6-faznega stroja z uporabo MSO.



Slika 11: Parametrični graf izgubnih moči 6-faznega stroja z uporabo MSO.



Slika 12: Parametrični graf izgub v navitju 6-faznega stroja z uporabo MSO.

V MSO deluje polovica 3-faznih skupin v motorskem režimu, medtem ko druga polovica deluje v generatorskem režimu. Zaradi takšnega načina napajanja si magnetni polji nasprotujeta, zato sklepamo, da je rezultirajoče magnetno polje v stroju manjše kot v MNO. Manjša gostota magnetnega polja seveda vpliva na zmanjšanje izgub v železu, zato MSO verjetno rahlo podceni izgube v železu. Po drugi strani pa MSO dobro poustvari izgube v bakru, saj so te prvenstveno odvisne od statorskega toka, ki je med MSO podoben tistemu MNO. MSO je torej zanesljivejša v tistih obratovalnih točkah, kjer prevladujejo izgube v bakru, kar pomeni nižje vrtilne hitrosti in večje obremenitve. Za dokončno potrditev primernosti MSO kot alternativne metode za določanje izgubne moči bi bilo treba rezultate primerjati z meritvami s klasično MNO.

V običajnem obratovanju 6-fazni SSTM kompenzira normalno komponento magnetne sile. Normalna komponenta magnetne sile, ki jo ustvarja prva skupina 3-faznega navitja, je namreč kompenzirana s silo druge 3-fazne skupine. Če skupini nista napajani popolnoma enako, se radialni komponenti magnetne sile ne kompenzirata, kar se zgodi v primeru MSO. Zato je med MSO pogon obratoval z bistveno višjim hrupom kot pri

normalnem obratovanju, saj je bil radialni pritisk na ležaje razmeroma velik. Sklepamo lahko, da so izgube zaradi trenja v ležajih nekoliko višje, kot bi bile v normalnem obratovanju.

## 6 ZAKLJUČEK

V prispevku smo se osredotočili na implementacijo MSO v 6-faznem SSTM z dvema skupinama 3-faznih navitij, kar je alternativni pristop za določitev izgubne moči stroja. Glavni prednosti MSO sta, da za preizkus obremenitve električnega stroja ne potrebujemo več mehanske sklopitve z dodatnim strojem podobne moči ter da merilni proces poteka v stacionarnem stanju.

Na podlagi fizikalne slike sklepamo, da je zaradi nasprotujočega si magnetnega polja motrske in generatorske skupine magnetna gostota v jedru nekoliko manjša, kar najbrž rahlo podceni izmerjene izgube v železu. Pojav nekompenzirane radialne magnetne sile pa, nasprotno, povzroči dodatne izgube zaradi trenja v ležajih. V obratovalnih točkah, kjer prevladujejo izgube v bakru, se izkaže, da MSO razmeroma zanesljivo določi izgubno moč. To velja predvsem za nižje vrtilne hitrosti in večje obremenitve.

Poseben izziv je uporaba MSO za določanje izkoristka stroja v širokem področju obratovanja. V tem primeru je treba najti smiselno zvezo med obremenitvijo  $I_q^{\text{nast}}$  v MSO, ki na gredi navora ne ustvarja, in obremenitvijo v MNO, ki na gredi navora povzroča in ga tudi izmerimo. Vprašanje, katera obratovalna točka v MSO ustreza obratovalni točki v MNO, je razmeroma kompleksno in zahteva dodatno teoretično analizo.

## LITERATURA

- [1] H. Lavrič, K. Drobnič in R. Fišer, "Efficient testing of electric drive components on a test bed with energy recuperation," v *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, jun. 2015, str. 258–264. doi: 10.1109/CPE.2015.7231083.
- [2] E. Armando, F. Villata in P. Guglielmi, "Electric Loss Measurement Technique for Synchronous PM Brushless Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, let. 61, št. 8, str. 4421–4431, avg. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2289854.
- [3] J. Herman, J. Bojkovski, R. Fišer in K. Drobnič, "An Improved Design of Synthetic Loading Method for a Rapid In-Wheel Motor Characterization in Different Operating Points," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, let. 7, št. 4, str. 2562–2575, dec. 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3089482.
- [4] A. Varatharajan, G. Pellegrino in E. Armando, "Kinetic-Rotor Self-Commissioning of Synchronous Machines for Magnetic Model Identification with Online Adaptation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, let. 58, št. 3, str. 3578–3588, maj 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3151039.
- [5] F. Luise, S. Pieri, M. Mezzarobba in A. Tassarolo, "Regenerative Testing of a Concentrated-Winding Permanent-Magnet Synchronous Machine for Offshore Wind Generation—Part II: Test Implementation and Results," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, let. 48, št. 6, str. 1791–1796, nov. 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2221120.
- [6] M. Zabaleta, "Permanent Magnet Multiphase Machine Modeling and Control for MV Wind Energy Applications," Doktorska disertacija, Liverpool John Moores University, 2018. Dostopno: <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/8818/>

- [7] P. H. Mellor, R. Wrobel in D. Holliday, "A computationally efficient iron loss model for brushless AC machines that caters for rated flux and field weakened operation," v *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, ZDA, maj 2009, str. 490–494. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075251.

**Klemen Drobnič** je leta 2007 diplomiral, leta 2012 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo vodenje in modeliranje električnih pogonov, energijsko učinkovitost pogonov ter večfazne pogonske tehnologije.

**Anton Darovic** je leta 2020 diplomiral, leta 2023 pa magistriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo področje večfaznih ter večnivojskih enosmernih in izmeničnih močnostnih pretvornikov.

**Andraž Rihar** je leta 2012 diplomiral, leta 2016 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je trenutno tudi zaposlen v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko. Raziskovalno je aktiven na področju razvoja večfaznih in večnivojskih pretvornikov, dodatno pa se ukvarja tudi z računalniškim modeliranjem malih hidroelektrarn.

**Mitja Nemeč** je leta 2003 diplomiral, leta 2008 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Ukvarja se s področjem diagnostike, krmiljenja in regulacije močnostne elektronike s poudarkom na električnih pogonih, precizijskih virih in aktivnih filterih.

**Vanja Ambrožič** je leta 1986 diplomiral, leta 1993 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo močnostno elektroniko in regulirane elektromotorske pogone.