



MODELOVANJE I TESTIRANJE DEVETOFAZNE SINHRONE MAŠINE SA STALNIM MAGNETIMA NA ROTORU ZA RAD U VETROAGREGATU „HALIADE“

9 PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE MODELING AND TESTING FOR OPERATION IN WINDTURBINE ”HALIADE“

Jovana Todorović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu su opisane glavne karakteristike sinhronih mašina, kao i njihova uloga u pretvaranju energije vetra u električnu energiju. Zatim je dat matematički model devetofazne sinhrono mašine sa stalnim magnetima. Na osnovu ovog modela je implementirana mašina u Typhoon HIL Control Center Schematic Editor-u. Rezultati simulacije rada mašine za date parametre mašine i režim praznog hoda su prikazani grafički. Na kraju rada je predstavljen i koncept vektorskog upravljanja ovom mašinom, odnosno upravljanja naponima statora da bi se ostvarile željene statorske struje.

**Ključne reči:** *Sinhrona mašina, modelovanje i testiranje sinhrono mašine, vektorsko upravljanje sinhronom mašinom*

**Abstract** – *This paper describes the main characteristics of synchronous machines as well as their role in the conversion of wind power to electrical power. Then, a mathematical model of 9 phase permanent magnet synchronous machine is given. The machine is implemented in Typhoon HIL Control Center Schematic Editor based on this mathematical model. Simulation results for given parameters and no-load condition are presented graphically. At the end of this paper, the vector control concept is shown in the case of this machine, i.e. the control of the stator voltages in order to achieve desired stator currents.*

**Keywords:** *Synchronous machine, synchronous machine modeling and testing, vector control of synchronous machine*

**1. UVOD**

Veća efikasnost sinhrono mašine od asinhrono mašine predstavlja značajnu prednost, usled globalnog nedostatka energije i potrebe za štednjom.

Pri konverziji energije vetra u električnu mogu se koristiti sporohodni višepolni sinhroni generatori. Ovi generatori se vezuju direktno sa vetroturbinom, odnosno bez posredstva reduktora, što je njihova ogromna prednost. Modelovana mašina predviđena je za rad u vetroagregatu „Haliade“, koji General Electric pravi i testira u fran-

cuskom gradu Sen Nazer. Ovo je jedan od najvećih i naj-snažnijih vetroagregata na svetu. Njegova snaga je 6 MW. U drugom delu rada date su karakteristike sinhronih mašina i njihova primena u pretvaranju energije vetra u električnu. U trećem delu je dat matematički model mašine. Četvrti deo je posvećen rezultatima simulacije dok je peti deo konceptu vektorskog upravljanja ovom mašinom. Poslednja dva dela su zaključak i literatura za pisanje ovog rada.

**2. KARAKTERISTIKE SINHRONIH MAŠINA I ULOGA U PRETVARANJU ENERGIJE VETRA U ELEKTRIČNU**

Mogući radni režimi sinhrono mašine su generatorski (proizvodnja aktivne, proizvodnja/potrošnja reaktivne energije), motorski (potrošnja aktivne, proizvodnja/potrošnja reaktivne energije) i kompenzatorski. Kompenzatorski režim predstavlja motorski prazan hod. Reaktivna energija se takođe može trošiti ili proizvoditi. U generatorskom režimu rada ulazna snaga je mehanička dok je u motorskom režimu električna.

Sinhrona mašina može raditi na krutu ili sopstvenu mrežu gde napaja individualne potrošače.

Sinhrona mašina se uglavnom koristi kao generator. U generatorskom režimu kroz provodnike rotora teče jednosmerna struja usled koje nastaje stalno magnetno polje koje preseca provodnike statora i u njima indukuje elektromotornu silu. Kod trofaznog namotaja, indukovane elektromotorne sile svake faze su jednake po amplitudi, a vremenski pomerene za jednu trećinu periode. Ako se stator optereti nekim simetričnim opterećenjem onda će kroz namotaje statora teći struje vremenski pomerene za jednu trećinu periode. Ove struje formiraju Teslino obrtno polje, a brzina obrtanja rotora je jednaka brzini obrtanja ovog polja, odakle potiče naziv sinhrono mašine.

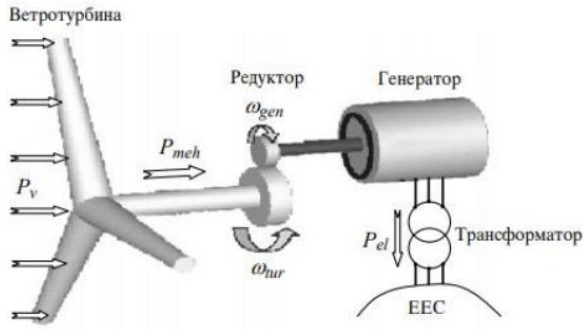
U elektromotornim pogonima se umesto standardnih sinhronih mašina sa pobudnim namotajem koriste sinhrono mašine kod kojih su na rotor ugrađeni stalni magneti. Ovim se postiže jednostavnija konstrukcija mašine, a mašina je pouzdanija jer nema problema sa napajanjem rotorskog namotaja iz jednosmernog izvora [4].

**2.1 Princip konverzije energije vetra u električnu energiju**

Na slici 2.1 prikazana je pojednostavljena šema konverzije energije vetra u električnu u vetroagregatima koji su priključeni na mrežu.

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je dr Stevan Grabić, vanr. prof.**



Slika 2.1 -Pojednostavljena šema konverzije energije vetra u električnu energiju

Kinetička energija vetra se transformiše u mehaničku energiju pomoću vetroturbine. Mehanički reduktor prilagođava brzinu obrtanja vetroturbine zahtevanoj brzini generatora. Električni generator može biti sinhroni ili asinhroni, a može raditi sa fiksnom ili promenljivom brzinom obrtanja. Prilagođavanje napona generatora elektroenergetskom sistemu se vrši pomoću energetskog transformatora.

Osnovni nedostatak vetroagregata je korišćenje reduktora između turbine i generatora. Ova mana je izbegnuta kod koncepta sa sporohodnim višepolnim sinhronim generatorom sa stalnim magnetima koji se povezuje direktno sa vetroturbinom, a prema mreži pomoću pretvarača.

Vetroagregati sa sporohodnim sinhronim vetrogeneratorima se koriste za agregate malih snaga (300 kW), ali i za vetroagregate većih snaga. Mana im je velika cena zbog korišćenja nestandardne mašine i konvertora velike snage. Zbog velikog broja polova, generator ima veliku masu i prečnik [3].

### 3. MATEMATIČKI MODEL DEVETOFAZNE SINHRONE MAŠINE U ROTIRAJUĆEM dq KOORDINATNOM SISTEMU

Primenom Klarkove i Parkove transformacije dobija se matematički model devetofazne sinhrone mašine u dq domenu, koji je jednostavnija predstava mašine, pogodnija za analizu njenog rada [1].

Jednačine električnog podsistema glase:

$$[u_{dq}] = [R] * [i_{dq}] + \frac{d[\psi_{dq}]}{dt} + \omega_r * \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * [\psi_{dq}] \quad (1)$$

$$[\psi_{dq}] = [L_{dq}] * [i_{dq}] + [\psi_{PM}] \quad (2)$$

gde su:  $[R] = \text{diag}[R_s \ R_s \ R_s \ R_s \ R_s \ R_s]$  – dijagonalna matrica termogenih otpornosti statorskih namotaja,  $[u_{dq}] = [u_{dx} \ u_{qx} \ u_{dy} \ u_{qy} \ u_{dz} \ u_{qz}]^T$  - vektor dq napona trofaznih statorskih namotaja x, y i z,  $[i_{dq}] = [i_{dx} \ i_{qx} \ i_{dy} \ i_{qy} \ i_{dz} \ i_{qz}]^T$  – vektor struja statorskih namotaja x, y i z u dq domenu,  $[\psi_{dq}] =$

$[\psi_{dx} \ \psi_{qx} \ \psi_{dy} \ \psi_{qy} \ \psi_{dz} \ \psi_{qz}]^T$  – vektor fluksnih obuhvata statorskih namotaja x, y i z u dq domenu,  $[\psi_{PM}] = [\psi_{PM} \ 0 \ \psi_{PM} \ 0 \ \psi_{PM} \ 0]^T$  – vektor fluksvea stalnih magneta na rotoru,  $\omega_r$  – električna ugaona brzina rotora.

Matrica induktivnosti ima sledeći oblik:

$$[L_{dq}] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{dxdy} & M_{dxqy} & M_{dxdz} & M_{dxqz} \\ 0 & L_q & -M_{dxqy} & M_{dxdy} & -M_{dxqz} & M_{dxdz} \\ M_{dxdy} & -M_{dxqy} & L_d & 0 & M_{dxdy} & M_{dxqy} \\ M_{dxqy} & M_{dxdy} & 0 & L_q & -M_{dxqy} & M_{dxdy} \\ M_{dxdz} & -M_{dxqz} & M_{dxdy} & -M_{dxqy} & L_d & 0 \\ M_{dxqz} & M_{dxdz} & M_{dxqy} & M_{dxdy} & 0 & L_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

gde su  $L_d, L_q$  – sopstvene induktivnosti namotaja d ili q ose odgovarajućeg sada dvofaznog namotaja, dok ostale induktivnosti predstavljaju međusobne induktivnosti između d i q, d i d ili q i q osa odgovarajućih namotaja x, y, z.

Moment konverzije glasi:

$$m_{el} = \frac{3}{2}P \left( (\psi_{dx}i_{qx} - \psi_{qx}i_{dx}) + (\psi_{dy}i_{qy} - \psi_{qy}i_{dy}) + (\psi_{dz}i_{qz} - \psi_{qz}i_{dz}) \right) \quad (4)$$

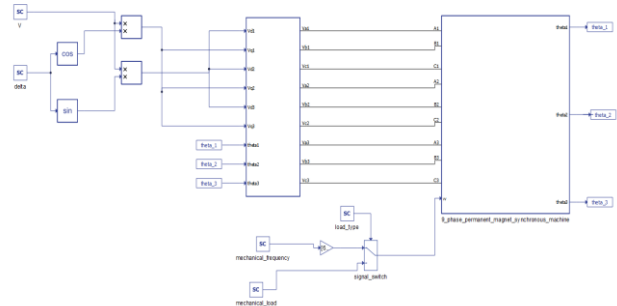
Jednačine mehaničkog podsistema mašine imaju sledeći oblik:

$$m_{el} - m_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

gde su:  $m_{el}$  - moment konverzije; P - broj pari polova;  $m_m$  - mehanički moment;  $J_m$  - moment inercije;  $\omega_m$  - mehanička ugaona brzina.

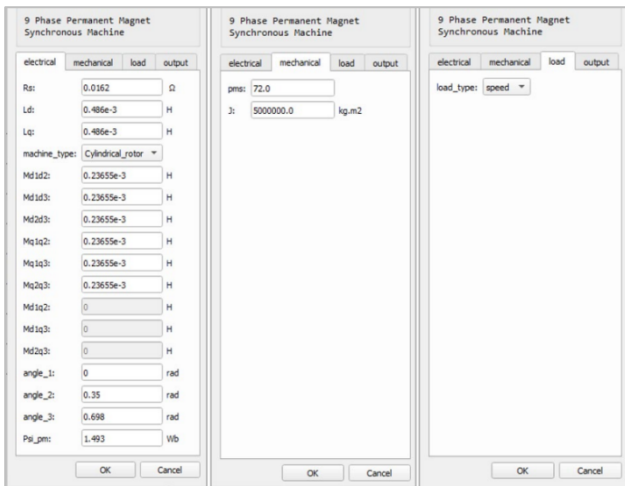
### 4. REZULTATI SIMULACIJE RADA MAŠINE ZA REŽIM PRAZNOG HODA

Na slici 4.1 prikazan je model mašine implementirane u Typhoon HIL Schematic Editor –u. Na SCADA se zadaju amplituda faznog napona i ugaon opterećenja mašine. Na osnovu njih se računaju d i q komponente napona koje se inverznom Parkovom transformacijom transformišu u fazne napone koji se dovode na ulaze mašine.



Slika 4.1 - Model mašine u Typhoon HIL Schematic Editor-u

Pored ovih napona na ulaz mašine se dovode mehanička brzina ili mehanički moment u zavisnosti od tipa regulacije mašine (po brzini/momentu). Putem maske dodeljene komponenti, koja je prikazana na slici 4.2 unose se parametri mašine.



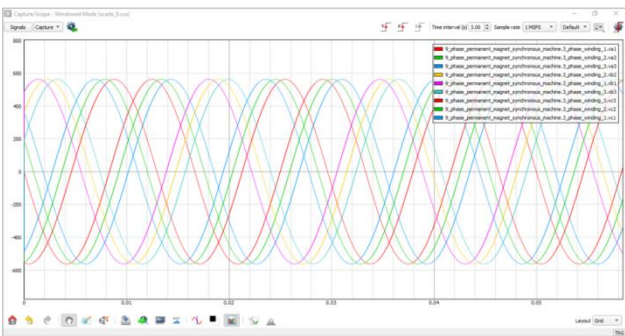
Slika 4.2 - Parametri mašine

Ogled praznog hoda izvodi se uz pretpostavku da su statorske struje približno jednake nuli. Na osnovu jednačina naponske ravnoteže (1) i fluksnih obuhvata (2), sledi da je uz tu pretpostavku napon d ose jednak nuli dok je napon q ose jednak  $\omega_r \cdot \psi_{PM}$ .

Ukoliko je mašina modelovana kao na slici 4.1, tj. zadaju se amplituda faznog napona (V) i ugao opterećenja (delta), sledi da je  $V = V_q$ ,  $V_d = 0$ , za  $\delta = 0$ . Ovi naponi se inverznom

Parkovom transformacijom transformišu u fazne napone, koji se dovode na ulaze mašine (kao tri trofazna naponska izvora).

Za date parametre mašine, nominalnu brzinu ( $f = 60\text{Hz}$ ) i režim praznog hoda dobijaju se sledeći odzivi napona, struja i elektromehaničkog momenta, prikazani na slikama 4.3, 4.4 i 4.5, respektivno.

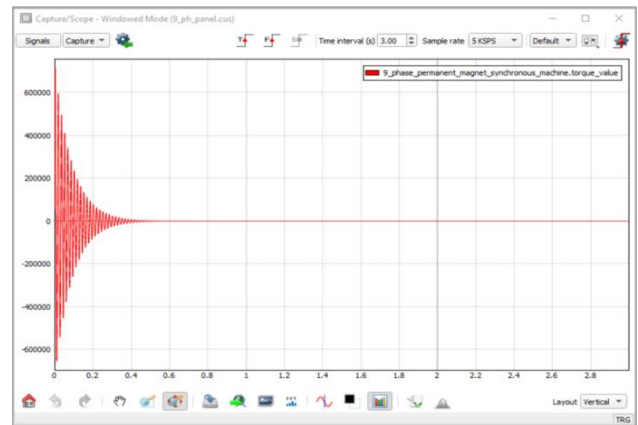


Slika 4.3 - Fazni naponi statorskih namotaja – prazan hod



Slika 4.4 - Fazne struje statorskih namotaja – prazan hod

Sa prikazanih rezultata vidi se da struje i razvijeni moment nakon 0.4 s dobijaju nulte vrednosti što je i očekivano za režim praznog hoda.



Slika 4.5 - Elektromehanički moment mašine – prazan hod

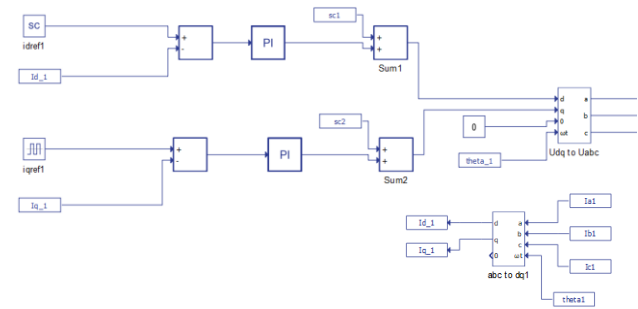
## 5. VEKTORSKO UPRAVLJANJE DEVETOFAZNOM SINHRONOM MAŠINOM SA STALNIM MAGNETIMA

Vektorsko upravljanje je koncept koji se pojavljuje 1960-ih godina, ali glavni razvoj i primena vektorskog upravljanja počela je pojavom brzih i jeftinijih mikroprocesora.

Koncept vektorskog upravljanja se zasniva na pronalaženju dve veličine kojima će se nezavisno upravljati fluksom i momentom.

Poduzna komponenta statorske struje upravlja fluksom dok poprečna upravlja momentom. Regulaciju vektora struje u dq domenu vrše dva nezavisna strujna regulatora. Nezavisan rad strujnih regulatora je ostvaren zahvaljujući dekuplovanju, odnosno eliminisanju komponenta koje ne zavise od d komponente struje iz jednačine naponske ravnoteže d ose. Takođe i iz jednačina naponske ravnoteže q ose eliminišu se komponente koje ne zavise od q komponente vektora struje. Eliminisanje komponente se dodaju na izlaz PI regulatora struje [2].

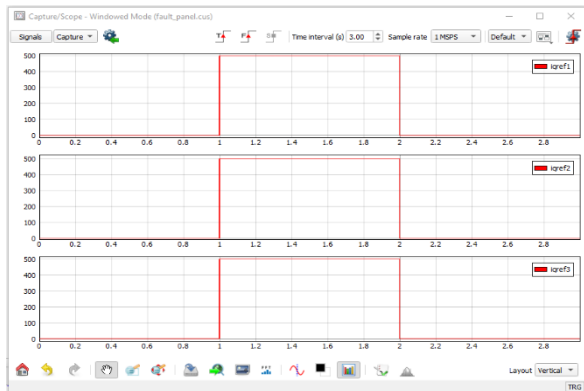
Na slici 5.1 prikazana je regulacija d i q komponenti struje jednog statorskog namotaja devetofazne sinhronne mašine u Typhoon HIL Schematic Editor-u. Analogno se vrši i regulacija struja ostalih namotaja.



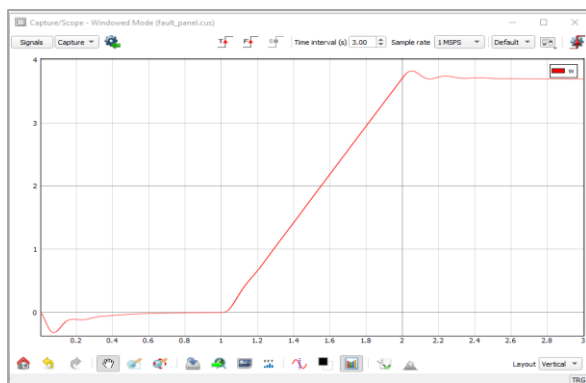
Slika 5.1 – Regulacija d i q komponente struje jednog statorskog namotaja

Referenca struje d ose se drži na nuli, da bi se ostvarilo upravljanje momentom preko struje q ose. Na izlaze regulatora se dodaju dekuplujući članovi. Regulatori upravljaju d i q komponentama napona tako da se razlike između referentnih i merenih vrednosti d i q komponenti struja svedu na nulu. Naponi se iz dq domena transformišu u abc domen i dovode na mašinu.

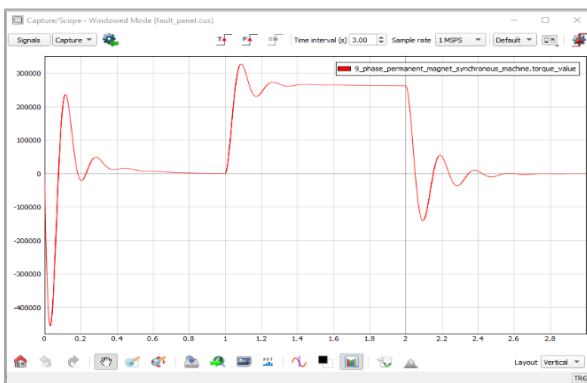
Kod vektorski upravljane devetofazne sinhronne mašine umesto dva regulatora kao kod trofazne sinhronne mašine, postoji 6 regulatora, zbog postojanja tri trofazna statorska namotaja. Dekuplujući članovi se dobijaju iz jednačina naponske ravnoteže (1) i fluksnih obuhvata (2). Princip je isti kao kod trofazne mašine. Na slici 5.3 dat je odziv brzine mašine za referentne vrednosti struja  $i_d = 0$  i  $i_q$  vrednosti na slici 5.2. Na slici 5.4 prikazan je elektromehanički moment vektorski upravljane mašine za date referentne struje.



Slika 5.2 - Referentne vrednosti struja q ose

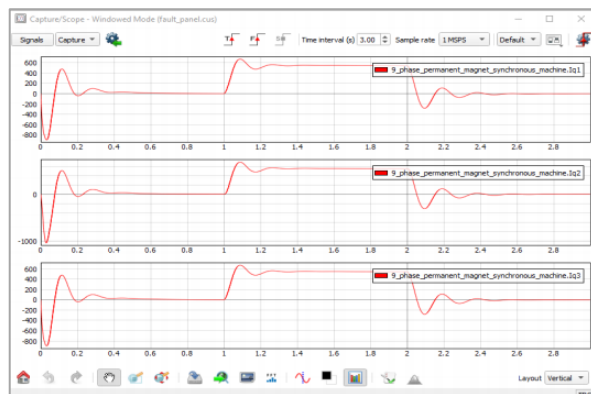


Slika 5.3 - Odziv brzine vektorski upravljane devetofazne sinhronne mašine



Slika 5.4 - Elektromehanički moment vektorski upravljane devetofazne sinhronne mašine

Kao što se vidi iz dobijenih rezultata, brzina se zadržava na nuli dok je referenca q struje na nuli, kad referenca q struje promeni vrednost na 500A, brzina počinje da raste, da bi se zaustavila na nekoj vrednosti padom reference q struje ponovo na nulu. Na slici 5.5 prikazane su merene vrednosti struja q ose.



Slika 5.5 - Merene vrednosti struja q ose vektorski upravljane devetofazne sinhronne mašine

Sa slika 5.4 i 5.5 se vidi da elektromehanički moment prati odziv q struje, jer smo referencu d struje postavili na nulu.

## 6. ZAKLJUČAK

Sporohodni višepolni sinhroni generator sa permanentnim magnetima rešava glavni nedostatak vetroagregata – korišćenje reduktora između turbine i generatora.

Rezultati dobijeni modelovanjem ove mašine u Typhoon HIL Schematic Editoru-u su u skladu sa očekivanim ponašanjem sinhronih mašina poznatim iz dosadašnje teorije i praktične primene.

Vektorskim upravljanjem ovom mašinom postignuta je kontrola napona d i q ose tako da stvarne vrednosti struja tih osa prate referentne. U daljim analizama rada ove mašine bi se moglo uzeti u obzir modelovanje gubitaka i uticaj zasićenja magnetnog kola.

## 7. LITERATURA

[1] Vladan Vučković, *Opšta teorija električnih mašina*, Nauka Beograd, 1992.

[2] Darko P. Marčetić, *Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima*, FTN Izdavaštvo, 2014.

[3] A. Josifović, *Vetroturbine*, Diplomski rad, Mašinski fakultet, Beograd

[4] Branko Mitraković, *Sinhronne mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1983.

### Kratka biografija:



**Jovana Todorović** je rođena u Novom Sadu 1995. godine. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka 2018. godine iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi. Master rad je odbranila 2020. godine, na istom fakultetu, na smeru Energetika, elektronika i telekomunikacije – Energetska elektronika i električne mašine.