



## ISPITIVANJE NELINEARNOG VBR MODELA SINHRONE MAŠINE U REALNOM VREMENU

## VERIFICATION OF NONLINEAR VBR MODEL OF SYNCHRONOUS MACHINE IN REAL TIME

Luka Novaković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – ELEKTROTEHNIKA

**Kratak sadržaj** – *U radu je priložena nova vrsta modelovanja sinhrone mašine. U početku je izvedena opšta teorija modelovanja mašina, a potom proširena za slučaj modelovanja mašina u vidu tzv. VBR namotaja. Obrazložene su prednosti i mane ovog pristupa u odnosu na tradicionalnu dq predstavu sinhroni mašina, a potom je model proširen da obuhvata i magnetnu saturaciju mašine. Nakon detaljnog izvođenja jednačina, model mašine je ispisana u programskim jezicima i implementiran u biblioteku softvera „Typhoon HIL control centar“. Model je detaljno ispitana u uslovima stacionarnog stanja, dinamičkih procesa i oblasti saturacije pomoći analitičkih formula i softverskog okruženja „ANSYS Maxwell“.*

**Ključne reči:** *Sinhrona mašina, magnetna saturacija, FEA, Typhoon HIL, Maxwell ANSYS*

**Abstract** – *A new type of synchronous machine modeling is presented in this paper. Initially, a general theory of machine modeling was derived, and then extended to the case of machine modeling in the form of the so-called. VBR winding. The advantages and disadvantages of this approach in relation to the traditional QD representation of synchronous machines are explained, and then the model is extended to include magnetic saturation of the machine. After deriving the equations in detail, the machine model was written in programming language and implemented in the "Typhoon HIL control center" software library. The model was tested in detail in the conditions of steady state, dynamic processes and saturation areas using analytical formulas and software environment "ANSYS Maxwell".*

**Keywords:** *Synchronous machine, magnetic saturation, FEA, Typhoon HIL, Maxwell Ansys*

### 1. UVOD

Modelovanje i simulacije energetskih sistema je važna disciplina potrebna za izučavanje ponašanja mašina i ostatka kola pri željenim uslovima. Poseban fokus se stoga mora ostaviti na precizno opisivanje, ne samo stacionarnih stanja, nego i dinamike koja do njih dovodi. U ovu svrhu koriste se softverski simulatori koji iterativno rešavaju jednačine datog sistema.

### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, docent.

Kompjuterske simulacije kola najčešće traju daleko duže nego sami procesi u realnim eksperimentima što onemogućava komunikaciju kontrolera i simulacije kao vid detaljnog testiranja. U tu svrhu koriste se "on-line" simulatori čije su računice ograničene fiksnim vremenskim korakom simulacije u kojem se moraju izračunati sve jednačine sistema. Ovaj rad se fokusira na razvoj Voltage-Behind-Reactance (VBR) tipa modela sinhrone mašine sa namotanim rotorom (u daljem tekstu SMNR) za svrhu simulacije u realnom vremenu. Prethodne implementacije ove mašine za rešavače u simuliranom vremenu već postoje [1], [2], [3] i ovaj rad se referiše na njih.

Cilj rada je fleksibilna, nezahtevna i numerički stabilna nadogradnja već postojeće sinhrone mašine u dq domenu sa strujnim izvorima za primenu u realnom vremenu. Za primer je izabrana SMNR u *Typhoon-HIL* [4] biblioteci, zbog čega se neće gubiti na opštosti. Ovim putem se objedinjuje moderna teorija VBR modelovanja i brojne prednosti testiranja modela sa sinhronom mašinama u realnom vremenu.

### 2. IMPLEMENTACIJA VBR MODELA SMNR

Pri implementaciji električnih mašina u rešavače električnih kola u softverska okruženja za analizu i dizajn (*Simulink, PSIM, Plecs, Typhoon Schematic Editor...*), potrebno je izvesti izlazne signale mašina u naponske, odnosno strujne izvore. Često se matematičko izvođenje drastično razlikuje za ova dva vida implementacije, pa samim tim i određene numeričke prednosti i mane ovih implementacija.

#### 2.1. Prednosti i mane postojećeg dq modela

Pri implementaciji SMNR je u praksi najčešće korišten model statora i rotora čiji se reprezentacije u vidu strujnih izvora kao na slici 1. Ovaj vid modelovanja dozvoljava izvođenje modela gde je razvoj jednačina i matrica stanja intuitivan i jednostavno dobijen. Kako su statorski i rotorski namotaj uprošteni strujnim izvorima, uticaj svih parametara mašina ogleda se u direktno u modelu mašina ali ne i u eksternom kolu. Inherentna mana strujnih izvora jeste u tome što se stanja prekidača i induktora mogu degradirati kada se nalaze redno vezana sa njima. Strujni izvori direktno diktiraju vrednostima struja grana, ne uzimajući u obzir beskrajnu impedansu otvorenog prekidača, ili fizički nestvarnu situaciju beskrajno strme promene struje induktora. U ovakvim okolnostima se

moraju izvesti jednofazna, odnosno trofazna snaber kola čija je uloga povećanje numeričke stabilnosti sistema. Saber kola se izvode pomoću pomoću otpornika, nekada redno vezanim sa kondenzatorima ili induktorima, i oni utiču na pojavljivanje parazitnih struja koja smanjuju preciznost rešenja simulacija.

## 2.2. Prednosti novog VBR modela

Drugi oblik izlaznih signala jesu kontra-elektronske sile statora i rotora kao na slici 1. One, zajedno sa impedansom statora i rotora i ostatkom eksternog kola dalje formiraju struje ovih namotaja.

Ovakvo predstavljanje SMNR zahteva daleko složenije izvođenje matematičkog modela, čije se izračunavanje ne može predstaviti samo pomoću matrice stanja već u zamenskih varijabli struja magnećenja.

$$i_{zq} = i_{mq} + \frac{\lambda_{mq}(L_{lkq1} + L_{lkq2})}{L_{lkq1}L_{lkq2}} = \frac{\lambda_{mq}}{L''_{mqu}} \quad (1)$$

$$i_{zd} = i_{md} + \frac{\lambda_{md}}{L_{lkd}} = \frac{\lambda_{md}}{L''_{mdu}} \quad (2)$$

Značenja individualnih promenjivih i parametara dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Značenja individualnih veličina

$i_{mq}, i_{md}$	Struje magnećenja po $q$ i $d$ osi
$\lambda_{mq}, \lambda_{md}$	Fluksni obuhvati magnećenja po $q$ i $d$ osi
$L_{lkq1}, L_{lkq2}, L_{lkd}$	Rasipne induktivnosti prigušnih namotaja po $q$ i $d$ osi
$L''_{mqu}, L''_{mdu}$	Subtranzijentne induktivnosti po $q$ i $d$ osi

Prednost ovakve implementacije je to što impedansa mašine inherentno predstavlja snaber kolo.

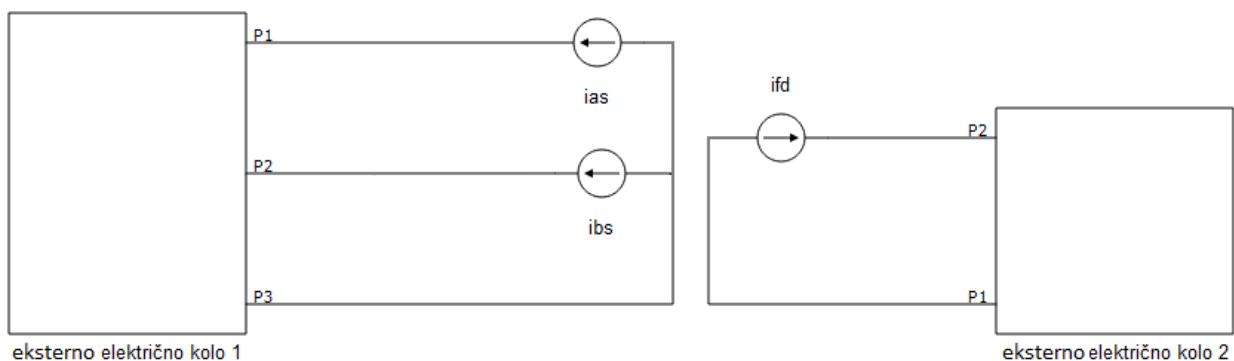
## 2.3. Saturacija

Model je dalje proširen tako da uključuje magnetnu saturaciju što dodatno usložnjava izvođenje modela tako da jednačine (1) i (2) moraju biti modifikovane u jednačine (3) i (4)

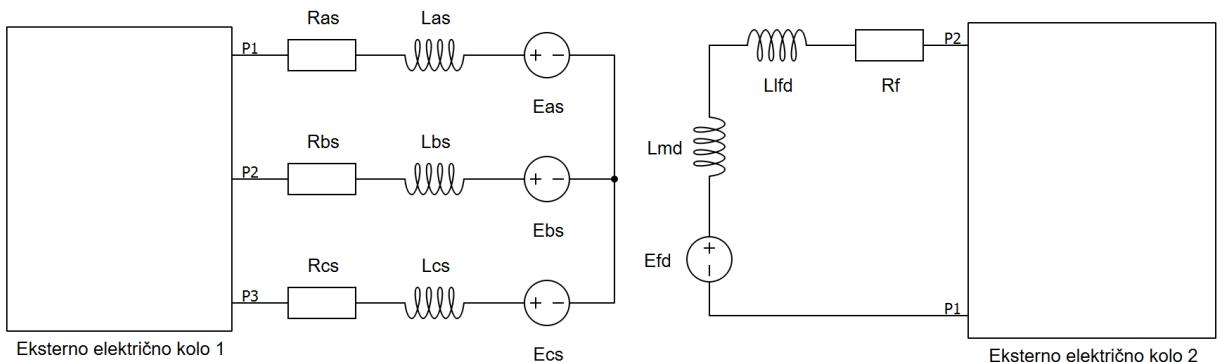
$$\lambda_{mq} = F_q(i_{zq}, i_{zd}) \quad (3)$$

$$\lambda_{md} = F_d(i_{zq}, i_{zd}) \quad (4)$$

Fluksevi magnećenja postaju složene funkcije zamenskih promenjivih magnećenja što drastično otežava računske operacije pre pokretanja modela.



Slika 1. Standardni dq model SMNR sa strujnim izvorima



Slika 2. Izvedeni VBR model SMNR sa naponskim izvorima

## 3. REZULTATI

Nakon implementacije potrebno je verifikovati model SMNR u stacionarnim, dinamičkim i testovima saturacije. Potvrđeno je da se u toku simulacije za zadate parametre eksternog kola i parametara mašina, simulacija sa VBR implementacijom ponaša u skladu sa analitičkom jednačinama sa relativnom greškom od najviše 1%.

### 3.1. Test iznenadnog kratkog spoja

Osim u uslovima stacionarnog stanja, potrebno je da model zadovoljava ponašanja u tranzijentnim procesima. Jedan od standardnih testova sinhronih mašina je test iznenadnog kratkog spoja, usled čega je mašina izložena brzim dinamičkim interakcijama rotora i statora.

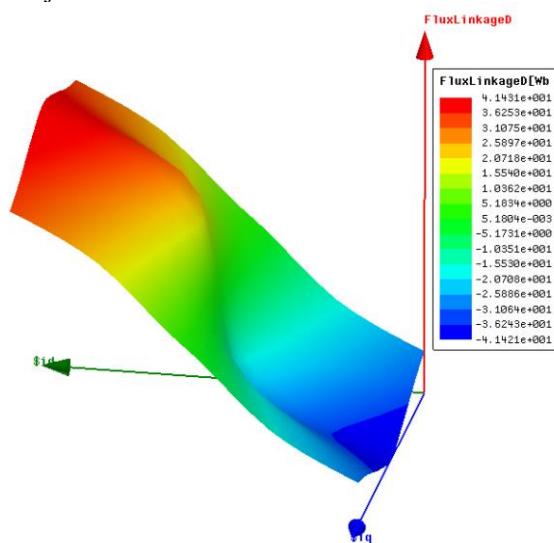
Potvrđeni su rezultati simulacije sa dobijenim rezultatima iz softverskog okruženja Maxwell ANSYS na tabeli 2.

Tabela 2. Operatorske vremenske konstante

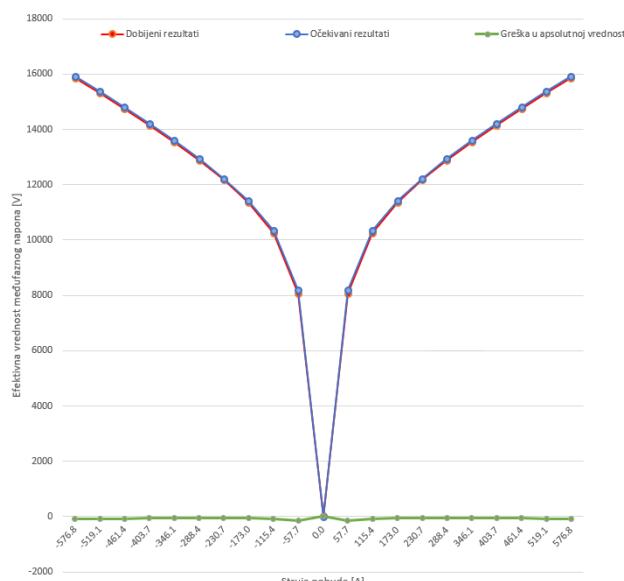
Naziv konstante	HIL	Analitički (RMXport)
$\tau_d'$	0.66950 s	0.680853 s
$\tau_d''$	0.01103 s	0.013306 s
$\tau_q''$	0.01536 s	0.025150 s

### 3.2. Test magnetne saturacije

Jedna od krucijalnih fizičkih pojava svake električne mašine jeste magnetna saturacija feromagnetskih materijala.



Slika 3. Oblik magnetne saturacije izveden iz softverskog okruženja ANSYS Maxwell



Slika 4. prikaz rezultata ogleda praznog hoda. Upoređeni su očekivani i dobijeni rezultati, kao i apsolutna greška na istoj skali

Najčešće je i za manje značajne analize potrebno da model mašine može da oponaša ovaj fizički efekat. Stoga je sproveden i test praznog hoda na osnovu analiziranih tabela magnetne saturacije oblika prikazanog na slici 3.

Rezultati pokazuju zadovoljavajuću sličnost očekivanih i dobijenih rezultata. Relativna greška nenultih vrednosti praznog hoda ne prelaze 2% i mogu se videti na slici 4.

### 4. ZAKLJUČAK

Izvedeni model SMNR zadovoljava odgovarajuće potrebe preciznosti u statičkim i dinamičkim simulacijama kao i u uslovima visoke magnetne saturacije. Model ima svoje prednosti u inherentnim snubber kolima ali i mane usled obimne numeričke računice potrebne pre početka simulacija.

Ovaj model je namenjen da se koristi zajedno sa tradicionalnim QD modelom u zavisnosti od zahteva eksternih električnih kola u simulacijama u realnom vremenu.

### 5. LITERATURA

- [1] N. Amiri, S. Ebrahimi, J. Jatskevich and H. W. Dommel, "Saturable and Decoupled Constant-Parameter VBR Model for Six-Phase Synchronous Machines in State-Variable Simulation Programs," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 4, pp. 1868-1880, Dec. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2907268.
- [2] F. Therrien, M. Chapariha, J. Jatskevich, "Constant-parameter synchronous machine model including main flux saturation," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 6, pp. 477–487, Jul. 2016.
- [3] M. Chapariha, F. Therrien, J. Jatskevich and H. W. Dommel, "Constant-Parameter Circuit-Based Models of Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 441-452, June 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2385099.
- [4] <https://www.typhoon-hil.com/>

### Kratka biografija:



**Luka Novaković** rođen je u Novom Sadu 1997. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine 2020. godine. kontakt: novakovicluka97@gmail.com