

Regulacija napona i učestanosti dizel električnog agregata opterećenog asinhronim motorom

Đorđe Pavlović, Aleksandra Grujić, Ivana Vlajić-
Naumovska

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd, Srbija

djordjep@viser.edu.rs, aleksandrag@viser.edu.rs,
ivanav@viser.edu.rs

Željko V. Despotović

Institut "Mihajlo Pupin", Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija

zeljko.despotovic@pupin.rs

Sadržaj—Dizel električni agregati (DEA) su zastupljeni u brojnim primenama u električnim instalacijama kao rezervni ili samostalni izvori napajanja, ali i kao izvori napajanja koji mogu raditi u paralelnom spoju sa električnom mrežom. Ekspanzija korišćenja obnovljivih izvora energije i hibridnih sistema napajanja takođe je nametnula upotrebu DEA. U ovom radu su na osnovu postojećih modela u MATLAB/Simulink okruženju prikazani struktura regulacionog kola i parametriranje regulatora napona i učestanosti jednog konkretnog DEA. Motivacija za ovo istraživanje je bila činjenica da u literaturi, a takođe i kod proizvođača DEA, ovi podaci nisu dostupni, a veoma su bitni za projektantske praktične primene. Analiziran je uticaj uključenja i isključenja asinhronog motora kao "najkritičnijeg" opterećenja za DEA. Na kraju su u okviru simulacionih rezultata prikazani tranzijentni odzivi karakterističnih veličina sistema.

Gljučne reči- Dizel motor, sinhroni generator, regulator brzine, regulator pobude, regulator napon, regulator učestanosti

I. UVOD

Svet svakodnevno postaje sve više i više zavisian od električne energije, a pouzdano i neprekidno napajanje od vitalnog je značaja za funkcionisanje i neometan rad velikog broja objekata i ustanova kao što su bolnice, banke, telekomunikacione kompanije, fabrike, računarski centri, šoping molovi, itd. Funkcionisanje ovih objekata zavisi od stalnog i neometanog dotoka električne energije, koja im je neprekidno potrebna. Dok je za manje potrošače (pojedinačni računari, medicinska oprema, itd.) dovoljno obezbediti UPS (*Uninterruptible Power Supply*), veći potrošači zahtevaju besprekidna napajanja iz samostalnih i posebnih izvora električne energije [1-3]. Savremeni hibridni sistemi napajanja, koji u osnovi najčešće koriste obnovljive izvore energije (bazne stanice mobilne telefonije, "OFF-grid" sistemi napajanja i sl.), takođe ne mogu da garantuju stalnost i konstantnost napajanja bez rezervnog izvora napajanja [1], [4]. Najčešće korišćeni izvori rezervnog napajanja u ovim sistemima su dizel električni agregati (DEA).

DEA su u osnovi sinhroni generatori električne energije, pokretani dizel motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS motorima). Sinhroni generatori koji se ugrađuju u DEA su najčešće trofazni samo-pobudni, bez četkica. Pored sinhronog generatora i dizel motora, osnovni delovi ovako složenog

elektromehaničkog sistema su i regulatori pobude (izlaznog napona) i brzine (izlazne frekvencije). Veoma bitan element jednog ovakvog sistema je i akumulatorski blok (izvor jednosmerne struje) koji obezbeđuje energiju za početni start SUS motora. Dimenzionisanje DEA se najčešće vrši prema maksimalnoj jednovremenoj snazi potrošača koje napaja i prema dozvoljenom padu napona na njegovim krajevima[5].

Najzahtevniji slučaj za projektovanje DEA je kada on za opterećenje ima jedan ili više asinhronih motora. Asinhroni motori sa kratko-spojenim rotorom, koji se danas najčešće koriste u praksi, imaju polaznu struju 5÷8 puta veću od nominalne. Ova struja je najkritičnija za DEA, pošto direktno upuštanje asinhronog motora DEA „vidi“ kao kratak spoj. Prilikom proticanja ove struje dolazi do pada napona na sinhronoj reaktansi generatora, tako da se kao krajnji rezultat javlja niži napon na izlazu od nominalnog. Ovaj pad napona u realnim slučajevima je u opsegu 5%÷30% [1] [5].

Da bi navedeni sistem radio stabilno, potrebno je izvršiti adekvatno puštanje u rad asinhronog motora, kao i pravilnu regulaciju napona pobude sinhronog generatora i regulaciju brzine obrtanja SUS motora, odnosno regulaciju izlaznog napona i učestanosti DEA.

Prethodno navedene činjenice su bile motivacija za formiranje simulacionog modela jednog realnog sistema koji čine: DEA (SUS motor i samo-pobudni sinhroni generator) sa pripadajućim regulacionim kolima (regulator pobude i regulator brzine), trofazni asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom i termički potrošači. Pri tome treba napomenuti da termički potrošači nisu kritični, odnosno da ne predstavljaju udarno opterećenje DEA. Jedan ovakav sistem, koji je realan u praktičnim primenama, analiziran je u ovom radu. Urađene su simulacije za nekoliko karakterističnih režima i prikazani tranzijentni odzivi karakterističnih veličina DEA (izlazni napon, napon pobude, brzina obrtanja, struja itd..).

II. OPIS SIMULACIONOG MODELA

Osnovna struktura simulacionog modela sistema koga čine DEA, asinhroni motor i termička potrošnja je data na Sl.1. Simulacioni model DEA se sastoji od četiri osnovna funkcionalna bloka: model motora sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS), model sinhronog samo-pobudnog

generatora, brzinskog regulatora i regulatora pobude. Takođe, u modelu je implementiran i trofazni prekidač za uključenje asinhronog motora. Sinhroni generator je modelovan prema standardu koji je dat u literaturi [6]. Asinhroni motor je modeliran sistemom jednačina (1)÷(5), po „ d^c “ i „ q^c “ osi :

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs} / dt + \omega \varphi_{ds} \quad (1)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds} / dt - \omega \varphi_{qs} \quad (2)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr} / dt + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (3)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr} / dt - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (4)$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

Ekvivalentne šeme asinhronog motora po „ d^c “ i „ q^c “ osi, za koje važe prethodno napisane jednačine, date su na Sl.2. Svi parametri (otpornosti, induktivnosti, fluksevi) su označeni u skladu sa oznakama osa, a rotorske veličine su svedene na statorsku stranu. Jednačina (5) daje izraz za obrtni elektromagnetni momenat.

Termička potrošnja je modelovana sa fiksnim trofaznim otpornikom odgovarajuće vrednosti i snage (1÷15kW). Merenje struja i napona je ostvareno postojećim blokovima u biblioteci korišćenog softvera.

III. STRUKTURA REGULATORA

Za regulaciju učestanosti i napona DEA su od najvećeg značaja regulator brzine dizel motora (turbinski regulator) i regulator pobude (naponski regulator). Funkcionalna blok šema sistema regulacije DEA je data na Sl.3. Referentne ulazne veličine su zadata brzina obrtanja ω_{ref} i zadata vrednost napona pobude V_{ref} . Na funkcionalnoj šemi se uočava vektor signala \underline{m} koji ustvari predstavlja matricu kolonu u kojoj figurišu svi relevantni signali (struje, naponi, električna i mehanička snaga, momenat, brzine i sl.) iz bloka sinhroni generator. U ovoj simulaciji od interesa su dva signala: napon generatora i brzina obrtanja rotora. Blok za de-multipleksiranje DEMUX signal napona na krajevima se rasporeže na „ d^c “ i „ q^c “ komponentu, koje se uvode u blok regulatora pobude i oni predstavljaju signale povratne sprege po naponu. Signal stvarne brzine ω se uvodi u blok regulatora brzine.

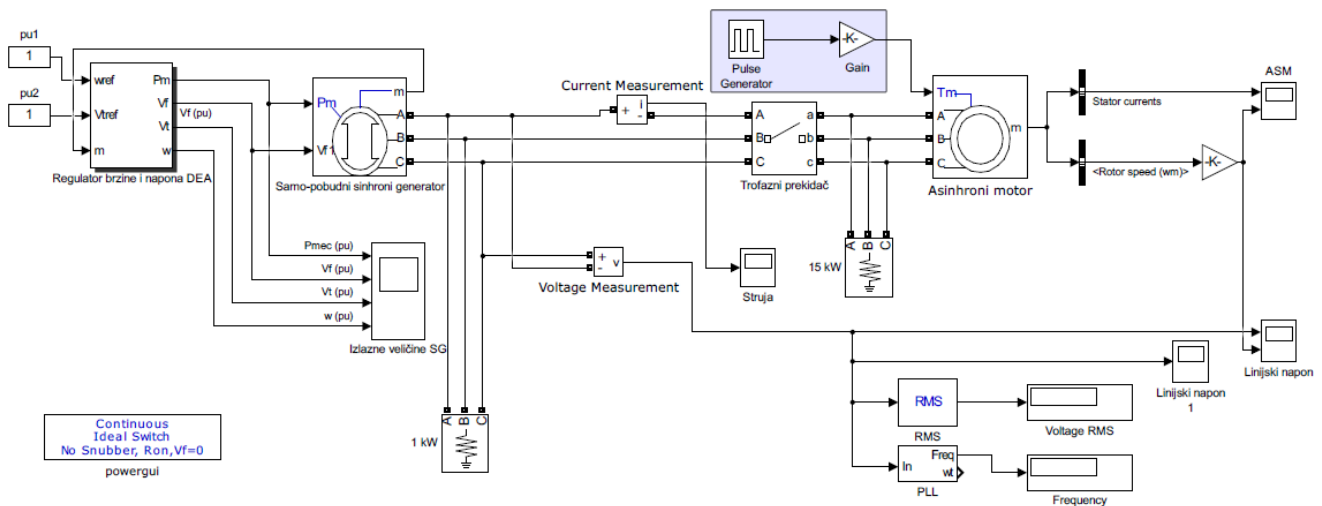
A. Simulacioni model dizel motora i regulatora brzine

Matematički model dizel motora je baziran na modeliranju sistema za ubrizgavanje goriva i transportnom kašnjenju. Ovaj model, detaljno opisan u literaturi [7], dat je dinamičkom jednačinom:

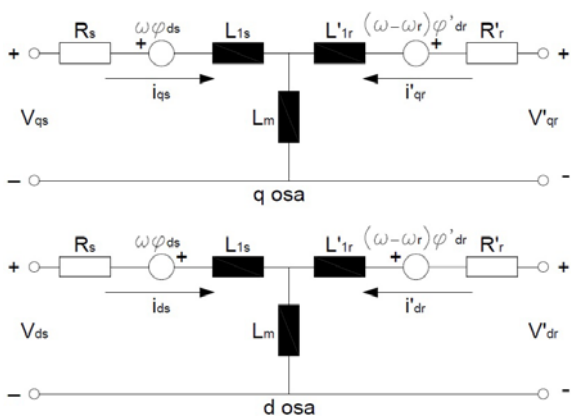
$$\tau_d dT_m / dt = T_m + k_d v_\infty (t - t_d) \quad (6)$$

Gde su:

- τ_d - vremenska konstanta sistema za ubrizgavanje goriva
- k_d - statičko pojačanje dizel motora
- t_d - transportno kašnjenje dizel motora (vreme potrebno da se razvije momenat na njegovom vratilu)
- v_∞ - izlaz iz regulatora brzine dat u r.j.



Slika 1. Funkcionalna blok šema simulacionog modela sistema za regulaciju napona i učestanosti DEA



Slika 2. Ekvivalentne šeme asinhronog motora po „d“ i „q“ osi

$$\Delta\omega / V_\omega = k_2 \frac{Ts \frac{1+k_1k_2}{k_1k_2} + 1}{Ts+1} \quad (7)$$

$$k_2 = K_R \quad (8)$$

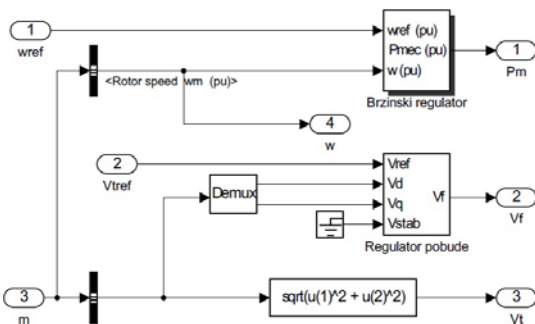
$$T_4 = T \frac{1+k_1k_2}{k_1k_2} \quad (10)$$

$$T_5 = T \quad (11)$$

B. Regulator pobude

Struktura regulatora pobude je prikazana na Sl.6. Ona je bazirana na referentnom standardu iz ove oblasti [9]. Komponente „d“ i „q“ napona sinhronog generatora se preko multipleksera MUX uvode u blok za izračunavanje efektivne vrednosti napona, a potom u niskopropusni filter jediničnog pojačanja i vremenske konstante τ_r . Izlazni signal iz ovog filtra se dovodi na priključak (-) višezlaznog sabirača, kao što je prikazano na Sl.5. Referentna vrednost napona pobude V_{ref} se dovodi na (+) ulaz sabirača. U okviru bloka za regulaciju pobude je ostvarena interna povratna sprega po naponu pobude V_f . Napon pobude se preko bloka za filtraciju koji ima dominantno diferencijalno dejstvo dovodi na (-) ulaz sabirača. Parametri bloka za filtraciju su pojačanje k_{fd} i vremenska konstanta T_{fd} . Osnovni element ove upravljačke strukture predstavlja blok glavnog regulatora pobude, koji je određen pojačanjem K_a i vremenskom konstantom T_a . Blok koji se odnosi na proporcionalno zasićenje (saturaciju), određuje opseg promene pobudnog napona E_{min} i E_{max} . Vrednost E_{max} određuje maksimalnu vrednost napona pobude, odnosno pobudne struje, pošto je u određenim tranzijentnim režimima potrebno obezbediti značajnije vrednosti pobudne struje. Vrednost E_{min} određuje minimalni pobudni napon, odnosno pobudnu struju.

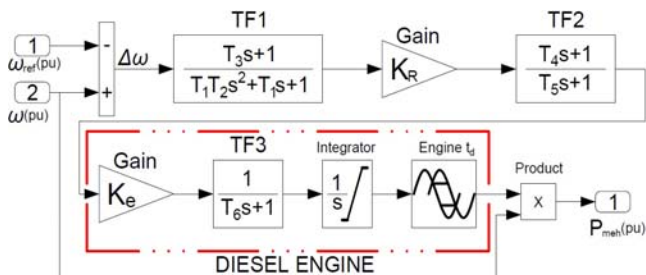
Izlazni trofazni tiristorski pretvarač kojim se energetske pobuđuje pobudni namotaj sinhronog generatora je modelovan prenosnom funkcijom koja u sebi sadrži pojačanje K_e i vremensku konstantu T_e . Vremenska konstanta T_e modeluje kašnjenje tiristorskog ispravljača koje za slučaj punoupravljivog tiristorskog mosta iznosu približno trećinu periode ulaznog naizmeničnog napona.



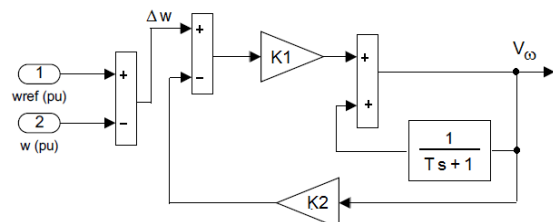
Slika 3. Blok šema regulacionog dela

Opisani dinamički sistem je prikazan u "s"-domenu na Sl.4 uokvirenim blokom. Aktuatorski deo dizel motora je predstavljen simulacionim blokovima: pojačanjem K_e , funkcijom prenosa prvog reda TF3 sa vremenskom konstantom T_6 , integratorom $1/s$ i blokom kojim se simulira transportno kašnjenje t_d .

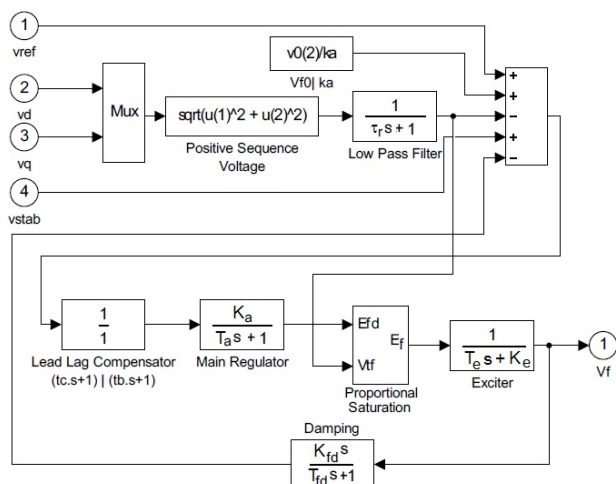
Regulator brzine je predstavljen sa dva bloka TF1 i TF2, prema preporukama koje su date u literaturi [8], a koje se odnose na TURBINE – DEGOV: Woodward Diesel Governor. Regulator je realizovan kao serijski PID regulator. Blok TF1 predstavlja blok sa proporcionalno-diferencijalnim (PD) dejstvom. Parametri ovog bloka su vremenske konstante T_1 , T_2 i T_3 . Blok TF2 predstavlja „anti-wind up“ PI regulator čiji su parametri vremenske konstante T_4 i T_5 . Struktura ovog regulacionog bloka je data na Sl.5. Prenosna funkcija ovog bloka je data relacijama:



Slika 4. Blok regulatora brzine



Slika 5. Struktura „anti-wind up“ PI regulatora



Slika 6. Blok šema regulatora pobude

IV. REZULTATI SIMULACIJE

Na osnovu predstavljenog modela i generisanog simulacionog kola sa Sl.1 su izvršene simulacije nekoliko tranzijentnih režima rada DEA, koji se najčešće susreću u praktičnim aplikacijama. Jedan režim se odnosi na slučaj kada je na krajeve DEA priključena konstantna aktivna potrošnja i istovremeno se pokreće asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom u praznom hodu. Drugi režim se odnosi na slučaj kada je na krajeve DEA priključena konstantna potrošnja i vrši se naglo opterećenje i rasterećenje asinhronog motora. Treći režim se odnosi na slučaj kada se vrši naglo opterećenje i rasterećenje aktivnog potrošača.

Parametri blokova sinhronog generatora i asinhronog motora koji su korišćeni u simulaciji su dati u tabelama 1-2.

TABELA I. PARAMETRI SINHRONOG GENERATORA

Parametri sinhronog generatora			
1.	Nominalna prividna snaga	S_n	60kVA
2.	Nominalni napon	U_n	400V
3.	Broj pari polova	p	2

TABELA II. PARAMETRI ASINHRONOG MOTORA

Parametri asinhronog motora			
1.	Nominalna snaga na vratilu	P_n	15kW
2.	Nominalni napon	U_n	400V
3.	Broj pari polova	p	2

TABELA III. PARAMETRI DIZEL MOTORA

Parametri dizel motora			
1.	Nominalna snaga	P_n	100kW
3.	Transportno kašnjenje	T_d	0.022s

TABELA IV. PARAMETRI BRZINSKOG REGULATORA

Parametri brzinskog regulatora			
1.	Pojačanje	$K=K_R \cdot K_e$	4
2.	Izlazne granice regulatora (p.u.)	T_{fmin}/T_{fmax}	0/1.1

TABELA V. PARAMETRI NAPONSKOG REGULATORA

Parametri naponskog regulatora			
1.	Pojačanje	K_a	10
2.	Vremenska konstanta	T_a	0.004
3.	Izlazne granice regulatora (p.u.)	E_{fmin}/E_{fmax}	0.1/2.5

A. Režim startovanja neopterećenog asinhronog motora sa direktnim upuštanjem i priključenim termičkim potrošačima

Na Sl.7 su prikazani talasni oblici napona sinhronog generatora, brzine asinhronog motora i brzine na vratilu sinhronog generatora za režim direktnog upuštanja u rad asinhronog motora sa kratkospojenim rotorom snage 15kW i konstante termičke potrošnje snage 15kW. Prilikom direktnog starta asinhronog motora uočava se maksimalni pad napona od 30% i njegov porast na nominalnu vrednost u intervalu od 0.2s. Zaletanje asinhronog motora se ostvaruje za 2s. Brzina sinhronog generatora u trenutku starta asinhronog motora opadne za 30% i u intervalu od 1s dostiže nominalnu vrednost.

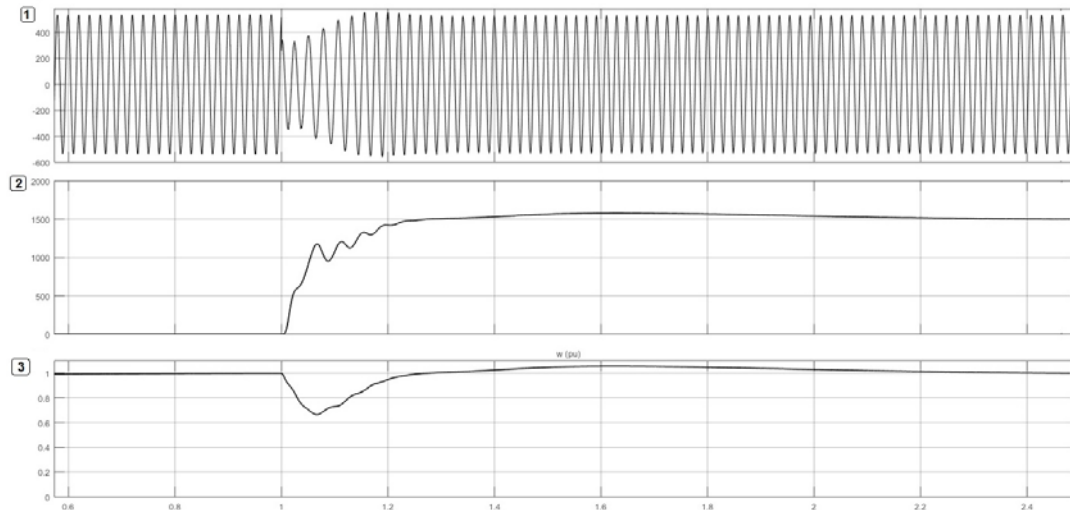
B. Režim opterećivanja asinhronog motora nominalnim opterećenjem i priključenim termičkim potrošačima

Na Sl.8. su prikazani talasni oblici napona sinhronog generatora, brzine asinhronog motora i brzine na vratilu sinhronog generatora za režim naglog opterećenja asinhronog motora nominalnim opterećenjem. Termička potrošnja je fiksna i iznosi 15kW. U ovom tranzijentnom režimu se uočava značajno manji pad napona na sinhronom generatoru u odnosu na prethodni režim (pad napona je manji od 5%). Brzina asinhronog motora je opala za 15%, dok je brzina sinhronog generatora opala za 17%. Tranzijentni režim u ovom slučaju traje 0.5s.

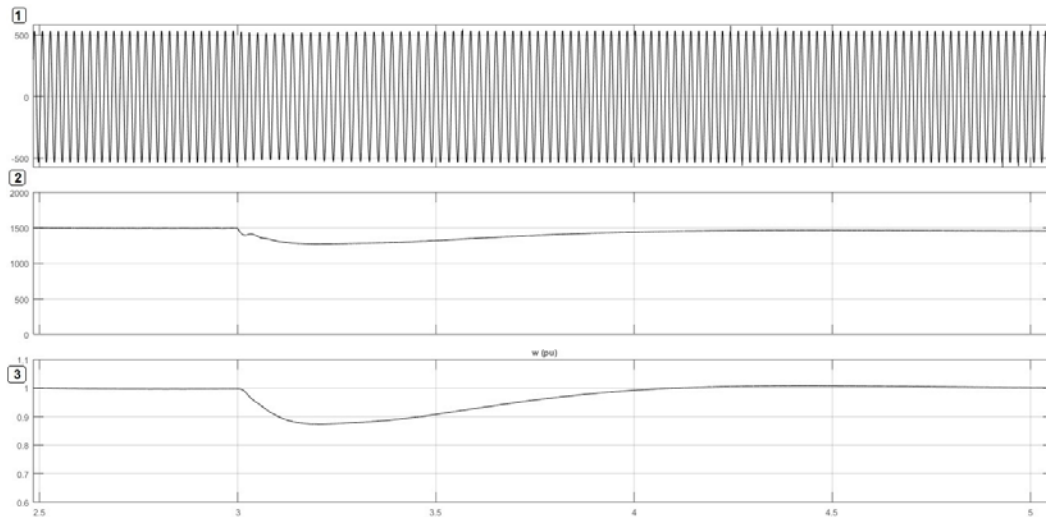
C. Režim opterećivanja asinhronog motora nominalnim opterećenjem i priključenim termičkim potrošačima

Na Sl.9 su dati snimci napona sinhronog generatora i brzine na njegovom vratilu pri naglom opterećenju i nakon toga, pri naglom rasterećenju termičke potrošnje. Snaga termičke potrošnje iznosi 15kW. Prilikom naglog opterećenja uočava se pad napona manji od 5%, dok se pri rasterećenju uočava naponski prebačaj manji od 5%. Tranzijentni period u oba slučaja traje oko 1s.

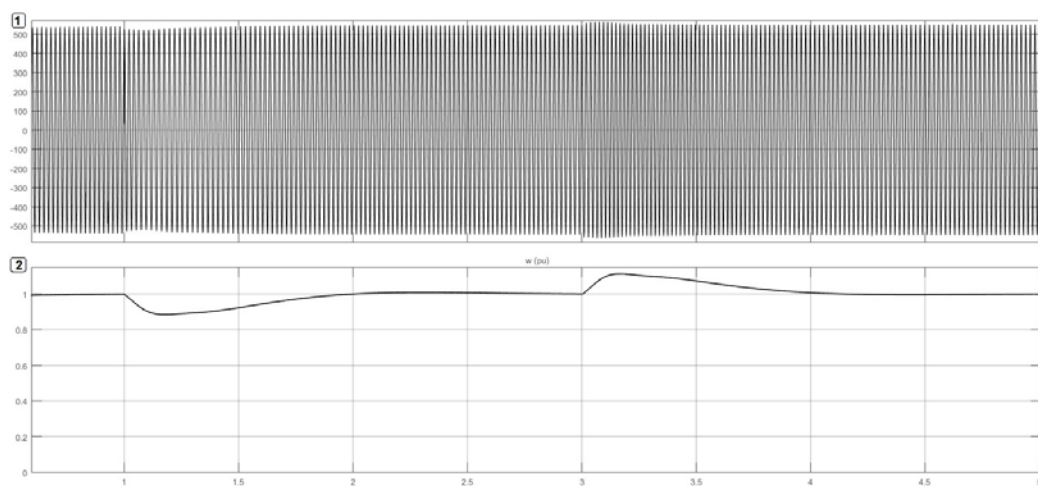
Na Sl.10 je prikazan tranzijentni odziv napona i učestanosti jednog realnog DEA opterećenog asinhronim motorom. Parametri ovog sistema odgovaraju parametrima koji su korišćeni u simulaciji režima startovanja iz odeljka A.



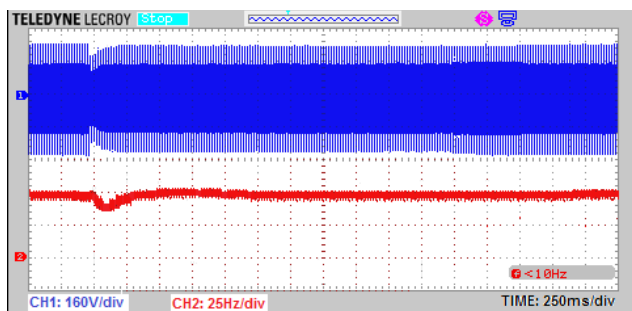
Slika 7. Simulacioni talasni oblici napona sinhronog generatora (talasni oblik 1), brzina asinhronog motora (talasni oblik 2) i brzina na vratilu sinhronog generatora (talasni oblik 3)



Slika 8. Simulacioni talasni oblici napona sinhronog generatora (talasni oblik 1), brzina asinhronog motora (talasni oblik 2) i brzina na vratilu sinhronog generatora (talasni oblik 3)



Slika 9. Simulacioni talasni oblici napona sinhronog generatora (talasni oblik 1) i brzine na vratilu sinhronog generatora (talasni oblik 2)



Slika 10. Tranzijentni odzivi DEA 60kVA, 3x 400V, 50Hz, pri startovanju asinhronog motora 15kW; snimak 1-linijski napon, snimak 2-učestanost napona.

Simulacioni rezultat dobijen na Sl.7 u potpunosti odgovara tranzijentnom odzivu realnog DEA, koji je prikazan na Sl.10.

V. ZAKLJUČAK

U radu su opisani problemi napajanja potrošnje iz DEA koja se sastoji od asinhronog motora i termičkih potrošača. Termički potrošači nisu kritični, već je najkritičniji start asinhronog motora. U cilju dobijanja karakterističnih odziva napona i brzine DEA, formirano je simulaciono kolo koje odgovara jednom realnom sistemu. Opisan je simulacioni model DEA (dizel motor i sinhroni generator) sa pripadajućim regulatorima brzine i naponskim regulatorom pobude. Regulator brzine određuje izlaznu učestanost, a regulator pobude izlazni napon DEA. Takođe, u radu je data kompletna regulaciona struktura celokupnog sistema. Analiziran je uticaj direktnog uključivanja asinhronog motora na termičku potrošnju, kao i uticaj njegovog naglog opterećenje. Ovi režimi su najkritičniji za DEA. Takođe, analiziran je i uticaj naglog opterećenja i naglog rasterećenja DEA kada je kao potrošač prisutna termička potrošnja bez prisustva asinhronog motora. Na kraju su u okviru simulacionih rezultata prikazani tranzijentni odzivi karakterističnih veličina sistema.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Dr Aleksandru Ribiću, dipl.el.inž. iz Instituta Mihajlo Pupin u Beogradu, na korisnim savetima i sugestijama kod projektovanja regulacionog kola DEA.

LITERATURA

- [1] Z. Radaković, M. Jovanović, "Specijalne električne instalacije", Akademska misao, Beograd, 2006, pp.26-39.
- [2] D. Rajković, Z. Janda, "Sistemi za besprekidno napajanje električnom energijom", Agencija Spiridonović Beograd, 1999.

- [3] Z. Radaković, Z. Janda, "Aspekti napajanja regulisanog elektromotornog pogona sa asinhronim motorima sa dizel-električnog agregata", Zbornik radova sa VIII konferencije energetske elektronike u Novom Sadu, 1995.
- [4] V. Rajasekaran, A. Merabet, H. Ibrahim, "Modeling, simulation and development of supervision/control system for hybrid wind diesel system supplying an isolated load" Technical report 2012.
- [5] A. Stošić, "Projektovanje i izvođenje električnih instalacija", Građevinska knjiga, Beograd, 2008.
- [6] IEEE Std. 1110-2002 Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses, IEEE Std., 2003.
- [7] M.Torres, L.A.C.Lopes, "Inverter-Based Generator Emulator for the Study of Frequency Variation in a Laboratory-Scale Autonomus Power System", Energy and Power Engineering, 2013, 5, pp.274-283.
- [8] TURBINE-GOVERNOR MODELS Standard Dynamic Turbine-Governor Systems in NEPLAN Power System Analysis Tool, V555, NEPLAN AG Smarter tools, 2014
- [9] IEEE Std. 421.5-2005 (Revision of IEEE Std. 421.5-1992) Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE

ABSTRACT

Diesel electric generators (DEG's) are represented in a number of applications in electrical installations as "back-up" or independent power supplies, but also as a power source that can operate in parallel with the electricity network. The expansion of using renewable energy sources and hybrid power system is also imposed the use of DEG's. In this paper, based on existing simulation models in MATLAB / Simulink software, are presents the structure of the control loop and the parameterization of the voltage and frequency regulators of a concrete DEG. The motivation for this research was the fact that in the literature, and also by the manufacturer of DEG's, these data were not available, but are very important for the practice design. This paper analyzes the influence of starting-up and turn-off an asynchronous motor as the "most critical" load of the DEG. Finally, within the simulation results are shown the transient response of characteristic values of the system.

THE VOLTAGE AND FREQUENCY CONTROL OF DIESEL ELECTRIC GENERATOR LOADED WITH ASYNCHRONOUS MOTOR

Đorđe Pavlović
 Željko V. Despotović
 Aleksandra Grujić
 Ivana Vlajić-Naumovska