

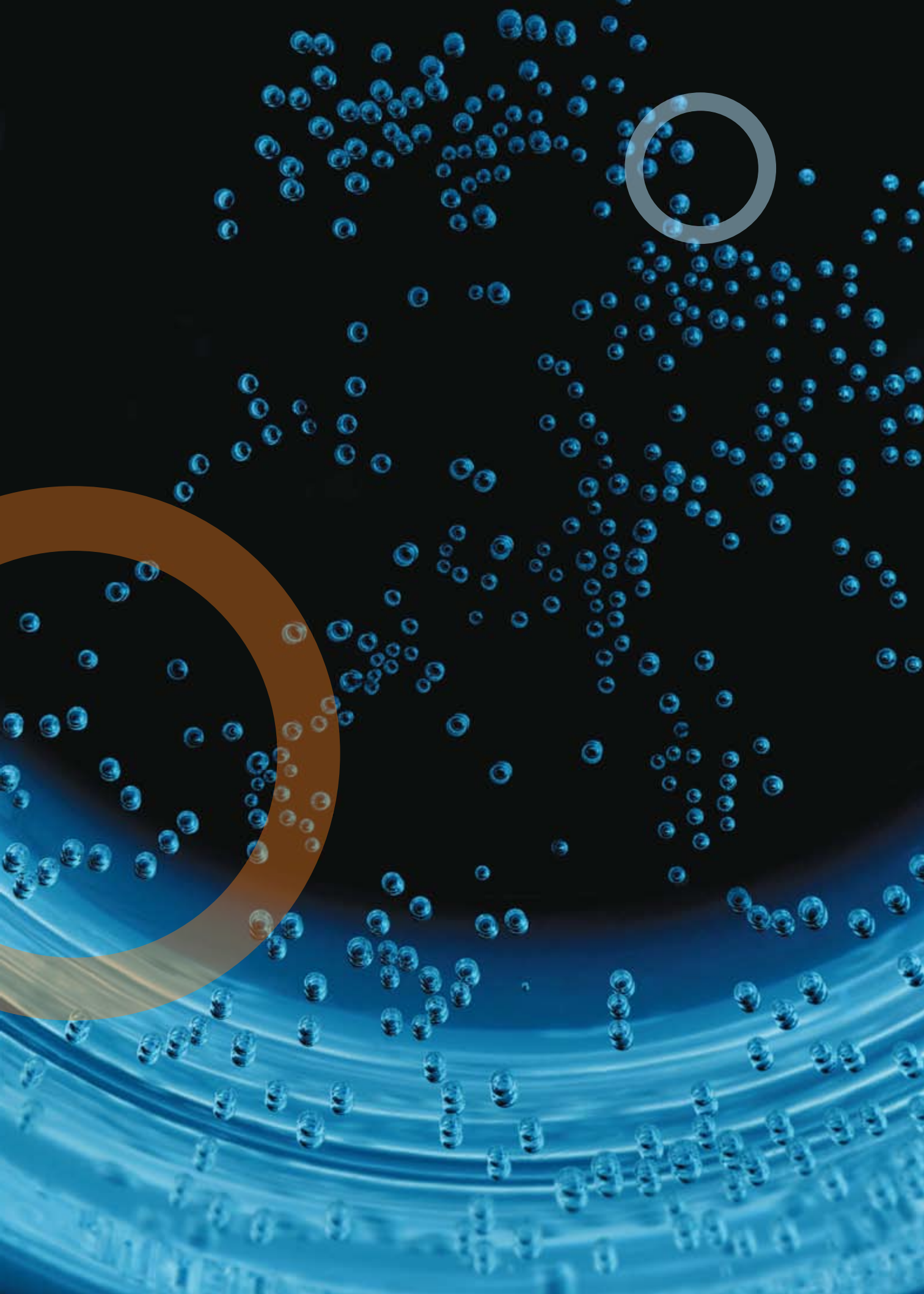
ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN I KONSTRUKCIJSKA IZVEDBA BESKONTAKTNOG UZBUDNOG SUSTAVA BRUSHLESS EXCITATION SYSTEM ELECTROMAGNETIC DESIGN AND ANALYSES

Livio Šušnjić, Rijeka, Hrvatska

Sustav uzbude beskontaktnog sinkronog generatora (SG) sadrži glavni uzbudnik, generator s permanentnim magnetima (PMG) sa polovima na rotoru (konzekventni polovi) kao posljedica razdiobe permanentnih magneta, i automatski regulator napona (AVR). Za oba stroja dana je konstrukcijska izvedba i proračun. Karakteristike razmatranih strojeva dobivene su metodom konačnih elemenata (MKE) u vremenskoj domeni s pridijeljenim vanjskim električnim krugom. Izrađen je eksperimentalni stroj i prikazani su rezultati ispitivanja.

The brushless synchronous generator (SG) excitation system consists of a main exciter, a permanent magnet generator (PMG) of consequent rotor poles type, and an automatic voltage regulator (AVR). Both exciter machines have been properly designed and analysed. The machines performances are obtained by time stepping finite-element method (FEM) coupled with the external electrical circuit. An experimental machine is built and the measured results are given.

Ključne riječi: beskontaktni sinkroni generator; elektromagnetski proračun; metoda konačnih elemenata; uzbudni sustav
Keywords: brushless synchronous generator; electromagnetic design; excitation system; finite element method



1 UVOD

Beskontaktni sinkroni generatori (SGs) snage općenito do 5 MVA su primjenjivi kao glavni izvori u brodskom električnom sustavu. Pored zadovoljavanja IEC standarda brodski generatori moraju zadovoljavati zahtjeve klasifikacijskog društva. Uzbudni sustav napaja SG uzbudnom strujom radi regulacije napona ili reaktivne snage za zadani operativni režim rada. Tipični AC beskontaktni sustav uzbude SG sadrži PMG s izlaznim veličinama koje su elektronički upravljive nakon ispravljanja, a napajaju glavni uzbudnik na statoru, a namotom armature na rotoru [1]. Pri razmatranju uzbudnog sustava nužno je uzeti u obzir različite zahtjeve. Upravljački krug AVR je izoliran od utjecaja nelinearnog opterećenja što je značajna osobina ovog uzbudnog sustava. Odgovarajuća konstrukcijska izvedba i elektromagnetski proračun glavnog i tzv. pilot uzbudnika (PMG) rezultiraju zadovoljavajućim upravljanjem naponom u statičkom i dinamičkom načinu rada [2]. Od strane klasifikacijskih društava npr. [3], postavljaju se sljedeći zahtjevi za uzbudni sustav:

- osigurano napajanje strujom uzbude za nazivno opterećenje generatora,
- osigurano napajanje strujom uzbude za preopterećenje u vrijednosti 1,5 puta nazivne struje generatora pri nazivnom naponu i faktoru snage 0,6 ind,
- odgovarajuće napajanje uzbudnom strujom za stacionarnu struju kratkog spoja generatora u vrijednosti od približno 3 do 5 puta nazivne vrijednosti struje,
- dinamički propad napona i stabilizacija napona trebaju biti unutar propisanih vrijednosti.

Za slučaj kvara, kao što je kratki spoj, uzbudni sustav mora omogućiti odgovarajuće napajanje uzbudnom strujom što rezultira strujom generatora od tri do pet puta većom od nazivne vrijednosti, a to omogućuje selektivnu zaštitu. U ovom radu prikazana je konstrukcijska izvedba glavnog uzbudnika i pilot uzbudnika (PMG) i njihov elektromagnetski proračun za primjenu u uzbudnom sustavu 6-polnog sinkronog generatora snage 1 070 kVA i frekvencije 60 Hz. Zahtjev za uzbudom za slučaj preopterećenja generatora od 1,5 puta nazivne vrijednosti struje je automatski zadovoljen ispunjenjem zahtjeva po uzbudi za slučaj kratkog spoja. Prikazan je tijek proračuna za zadanu geometriju uzbudnika uz zadana konstrukcijska ograničenja. Uzbudnici su analizirani MKE u vremenskoj domeni primjenom software Flux2D [4], radi dobivanja uzbudnih karakteristika i potvrde da li te karakteristike zadovoljavaju. PMG je proračunat MKE u sprezi sa Matlab-Simulink programom [5]. AVR kao dio uzbudnog sustava je uključen u proračunsku domenu sa svojim

1 INTRODUCTION

Brushless synchronous generators (SGs) generally sizing up to 5 MVA are used as the main units for the ship's electrical systems. In addition to the satisfying IEC standard, marine alternators also conform to the requirements of classification societies. The excitation system supplies the SG field current to control either terminal voltage or the reactive power to set point. The typical AC brushless excitation system of the SG contains PMG with output that is electronically controlled after rectification to supply the DC excitation of the inside-out synchronous exciter as is shown in [1]. In the design process of the excitation system it is necessary to take into account various design aspects. The important feature of this excitation system is that the AVR control circuit is isolated from the effects of non-linear load. The carefully matched electromagnetic design of the main exciter and pilot exciter machine (PMG) result in a highly satisfactory static and dynamic voltage control behavior [2]. From classification society rules e.g. [3], the following requirements of the excitation system are:

- adequate supply of field current for nominal load,
- adequate provision of field current for an overload of 1,5 times the rated currents at a rated voltage at p.f. = 0,6 lagg,
- adequate provision of field current for the generator sustained short-circuit current of approximately 3 to 5 times the rated current,
- dynamic voltage dip and voltage recovery time have to be acc. specified values.

During a fault operation such as the short circuit, the excitation system has to be capable of supplying enough field current resulting in three to five times the rated current at generator output. This enables the use of graded protective relaying. In this paper, the main exciter and pilot exciter (PMG) electromagnetic design is given for a 6 poles synchronous generator rated 1 070 kVA with a frequency of 60 Hz. The excitation requirement for overloading this generator with 1,5 times the rated current is automatically satisfied by fulfilling excitation requirements for the short circuit. Design principles associated with the exciters are given along with critical design constraints. Both exciter machines are analyzed by a time stepping FEM using software Flux2D [4], in order to check if their performance is satisfactory. PMG is analyzed by FEM coupling to a Matlab-Simulink program [5]. AVR as a part of the excitation system is introduced by its power circuit. Requirements for dynamic voltage

energetskim krugom. Zbog opsega, zahtjevi za dinamičkim promjenama napona nisu obrađeni u ovolikom radu. U zadnjem poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati koji pokazuju dobro slaganje s rezultatima proračuna.

changes aren't treated in this paper. The last section presents the test results which show good agreement with the computed results.

2 PRORAČUN I KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE UZBUDNIKA

2 EXCITERS DESIGN

Proces konstrukcije i elektromagnetskog proračuna uključuje sljedeće:

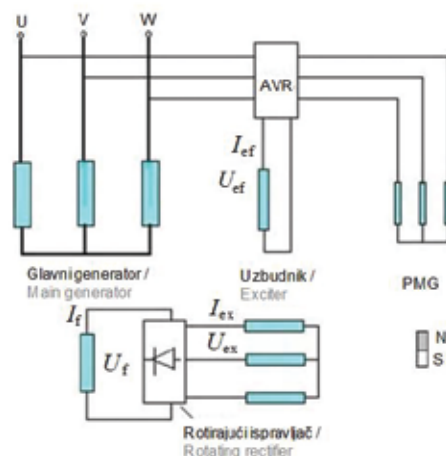
The electromagnetic design process includes the following:

- topologiju od interesa,
- početne konstrukcijske i proračunske podatke,
- elektromagnetski proračun,
- izlazne rezultate proračuna.

- topologies of interest,
- initial design data,
- electromagnetic design,
- design output data.

Topology of the considered synchronous generator excitation system is shown in Figure 1.

Topologija razmatranog uzbuđenog sustava sinkronog generatora prikazana je na slici 1.



Slika 1 — Topologija uzbuđenog sustava sinkronog generatora
Figure 1 — Topology of the synchronous generator excitation system

2.1 Podaci uzbudnika

2.1 Exciter rating

Dimenzioniranje uzbudnika ovisno je o nazivnim vrijednostima za napon i struju uzbuđenog generatora (V_m, I_m). Maksimalni napon i struja uzbudnika određeni su naponom i strujom uzbuđenog generatora (V_r, I_r) za slučaj kratkog spoja generatora, osiguravajući pri tome 3-struku vrijednost nazivne struje generatora. Zahtijevane vrijednosti struja i napona uzbuđenog generatora prikazani su u tablici 1. Ove vrijednosti dobivene su mjerenjima na eksperimentalnom stroju. Alternativna mogućnost dobivanja ovih podataka, za slučaj da eksperimentalni stroj nije na raspolaganju, je numeričkim proračunom metodom konačnih elemenata [6].

The exciter rating depends on the generator rated field voltage and current (V_m, I_m). Maximum exciter rating is determined with field voltage and current (V_r, I_r) for generator short circuit, providing 3 times the rated current. The required field currents and voltages in order to start the exciter's design are given in the Table 1. These data are obtained by measurement on an experimental machine. An alternative possibility to obtain these data in the case experimental machine is not available is calculation by finite element analysis as is shown in [6].

Tablica 1 – Struja i napon uzbuđe generatora
Table 1 – Field currents and voltages

Nazivno opterećenje / Rated load		Kratki spoj / Short circuit	
I_m, A	V_m, V	I_f, A	V_f, V
97	155	221	354

2.2 Početno dimenzioniranje uzbuđnika

Pomoću podataka u tablici 1 određuju se struja i napon namota armature uzbuđnika. Proračun se nastavlja radi određivanja protjecanja za namot statora uzbuđnika uz pomoć fazorskog dijagrama za sinkroni stroj. Faktor snage uzima se 0,95 a indukcija u zračnom rasporu jednakom 0,33 T za nazivno opterećenje. Podaci dobiveni proračunom i izborom geometrije prikazani su u tablici 2 a temelje na analitičkom proračunu i iskustvu projektanta. Uzimajući u obzir smanjenje vremena u kojem se generira napon dovodi do ograničenja za vrijednost tranzijentne reaktancije ispod 0,3. Glavni udio za tu reaktanciju predstavlja rasipna reaktancija armature. Njeno smanjenje je moguće izborom širokih a ne dubokih utora armature i kraćih glava namota armature. Zahtijeva se i manji broj utora za isti izlazni DC napon V_m .

2.2 Initial exciter sizing

The data in Table 1 is used to derive the exciter's armature current and voltage. Calculation proceeds in order to determine the exciter's field ampere-turns with the help of the synchronous machine phasor diagram. The power factor is chosen as 0,95 and the air-gap flux density is equal to 0,33 T for the rated load condition. Prediction and selection of the geometrical data given in the Table 2 is based on analytical calculation and designer experience. Taking into account the reduction in voltage response time leads to severe limitation of the AC exciter transient reactance value, below 0,3. The main part of its value is the armature leakage inductance. Reducing it is possible by choosing wide and not so deep armature slots and short end connections. It also requires a smaller number of slots for the same output DC voltage V_m .

Tablica 2 – Geometrijski parametri uzbuđnika
Table 2 – Exciter geometric parameters

Veličina / Quantity	Vrijednost / Value
Aksijalna dužina / Axial length	130 mm
Vanjski promjer statora / Stator outer diameter	511 mm
Unutarnji promjer statora / Stator inner diameter	330 mm
Dužina zračnog raspora / Air-gap length	1,1 mm
Broj polova / Number of poles	8
Broj rotorskih faza / Number of rotor phases	3
Spoj / Connection	Y
Broj utora na rotoru / Number of rotor slots	24

2.3 Početne dimenzije pilot uzbuđnika (PMG)

Rotor pilot uzbuđnika je cilindričan i sadrži 8 obodno porazdijeljenih otvorenih utora i 8 rotorskih zubi. Dva NdFeB magneti u obliku kvadra postavljeni su u svaki od utora. Permanentni magneti su magnetizirani svi u istom smjeru formirajući N-polove, na taj način magnetski tijekom prolazi i feromagnetskom stazom između permanentnih magneti formirajući S polove. Kaže se da su feromagnetski polovi posljedično

2.3 Initial sizing pilot exciter (PMG)

The rotor of the consequent-poles PMG is cylindrical and consists of 8 circumferentially distributed open slots and 8 rotor teeth. Two block shaped NdFeB magnets are placed within each of the slots. The permanent magnets are magnetized in the same direction forming N-poles, so that magnet flux has to circulate round through the iron poles between the permanent magnets. Thus the iron poles are consequently

ili konzekventno magnetizirani. Otuda se ovaj stroj naziva i stroj s konzekventnim polovima [7] i [8]. Frekvencija struja i napona za pilot uzбудnik jednaka je 160 Hz.

Odabir geometrijskih podataka prikazan u tablici 3 temeljen je na analitičkom proračunu magnet-skog kruga. Postoji zahtjev za veličinu promjera statora i provrta rotora radi mehaničke integracije pilot uzbudnika na generatorsku ne-pogonsku stranu. Također je važno procijeniti najteži slučaj demagnetizacije magneta. Razmatrana je jakost magnetskog polja proizvedena armaturnom strujom u namotu statora.

magnetized as S-poles. Therefore, this machine is known as a consequent-pole machine, [7] to [8]. The PMG is designed for a frequency equal to 160 Hz.

Prediction of the geometrical data in the Table 3 is based on the analytical calculation of the magnetic circuit. Construction requirements such as stator core diameter and rotor bore diameter are prescribed in order to mechanically integrate the pilot exciter at the generators non driving end side. It is important to estimate the worst-case demagnetizing condition in the magnet. The magnetic field intensity produced by the armature current in the stator winding is considered.

Tablica – 3 PMG podaci
Table 3 – PMG data

Veličina / Quantity	Vrijednost / Value
Aksijalna dužina / Axial length	42 mm
Vanjski promjer stat ora / Outer stator diameter	305 mm
Unutarnji promjer statora / Inner stator diameter	195 mm
Dužina zračnog raspora / Air-gap length	1 mm
Broj polova / Number of poles	16
Broj rotorskih faza / Number of phases	3
Spoj / Connection	Y
Broj utora na rotoru / Number of stator slots	48
Debljina PM / PM thickness	8,5 mm
Parametri PM pri / PM parameter at 20 °C	$B_r = 1,16 \text{ T}$
	$H_c = 860 \text{ kA/m}$
	$\rho = 0,15 \text{ E-5 } \Omega\text{m}$

3 2D ANALIZA MKE

Nakon analitičkih proračuna, izbora početnih dimenzija i konstrukcijske izvedbe, proces proračuna se nastavlja primjenom analize MKE i, ako se pokaže nužnim, početna se geometrija mijenja sve dok se cilj ne postigne. 2D magnetsko polje je opisano sljedećom jednačzbom, [9]:

3 2D FEM ANALYSES

After prediction of the initial exciters design, the design process continue by using FEM analyses and if necessary the initial design could be modified until the objectives are met. The 2D magnetic field is described by the following equation, [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) = -\vec{J}_0 - \vec{J}_M - \vec{J}_e, \quad (1)$$

gdje je:

- \vec{A} – magnetski vektorski potencijal,
- \vec{J}_0 – gustoća struje namota statora,
- \vec{J}_M – gustoća ekvivalentne struje magnetiziranja, a
- \vec{J}_e – gustoća vrtložnih struja.

Simulacija opterećenja za konstantnu brzinu vrtnje je temeljena na tranzijentnoj 2D analizi magnetskog polja primjenom MKE u sprezi s vanjskim električnim krugom. Jednadžbe magnetskog polja i jednadžbe električnog kruga rješavaju se simultano. Analiza je provedena vremenskom koračnom metodom.

3.1 Simulacija uzбудnika

Energetski krug je prikazan na slici 2 i opisan je sa 2D elementima domene MKE i vanjskog električnog kruga. Domena MKE je predstavljena uzbudnim namotom uzbudnika i trofaznim namotom armature. U seriji s armaturnim svicima, rasipni induktivitet glava namota određen je analitički i pridodan električnom krugu. Vanjski električni krug sadrži trofazni rotirajući ispravljač čije su izlazne stezaljke spojene na uzbudni namot generatora. Uzbudni namot predstavljen je koncentriranim parametrima, induktivitetom i ohmskim otporom.

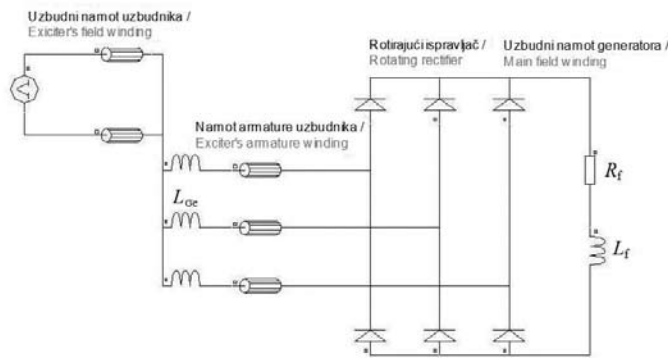
where is:

- \vec{A} – the magnetic vector potential,
- \vec{J}_0 – the stator winding current density,
- \vec{J}_M – the equivalent magnetizing current density, and
- \vec{J}_e – the eddy current density.

Simulation of the load condition at constant speed is based on the transient 2D FEM analysis of the magnetic field coupled with the external electrical circuit. The magnetic field equations and the circuit equations are solved simultaneously. The analysis has been done by time-stepping method.

3.1 Exciter simulation

The electrical power circuit is shown in Figure 2. and is described with, 2D FEM domain circuit elements and external circuit. The FEM domain is represented by the exciter's field winding and three-phase armature winding. In series with armature coils, end winding inductance predicted analytically is added. The external circuit consists of a three-phase rotating rectifier connected to a generator field winding. The field winding is represented by lumped parameters, inductance and resistance.



Slika 2 – Električni krug uzbudnika
Figure 2 – Exciter electrical circuit

Induktivitet namota uzbuđe L_f za cilindričnu izvedbu rotora je [1]:

The field inductance L_f for cylindrical rotor design is predicted as follows acc. [1]:

$$L_f = L_{fm} + L_{fl} \quad (2)$$

gdje je:

where is:

- L_{fm} – glavni induktivitet, a
- L_{fl} – rasipni induktivitet.

- L_{fm} – the main field inductance, and
- L_{fl} – the leakage field inductance.

Glavni induktivitet je:

The main field inductance is:

$$L_{fm} = \frac{2p\mu_0 N_f^2 \tau l \frac{\tau_p}{\tau}}{g \cdot K_c (1 + K_{sd})} \quad (3)$$

gdje je:

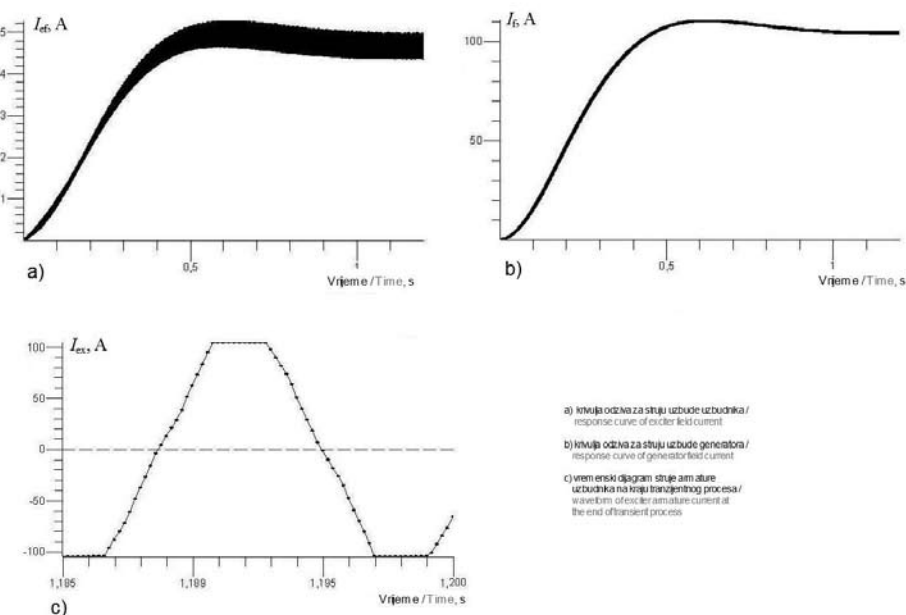
N_f – broj zavoja namota uzbude,
 p – broj pari polova,
 l – aksijalna dužina paketa,
 τ – polni razmak,
 τ_p – dužina pola,
 g – zračni raspor,
 K_c – Carterov koeficijent i
 K_{sd} – koeficijent redukcije magnetizirajuće reaktancije u d osi.

where is:

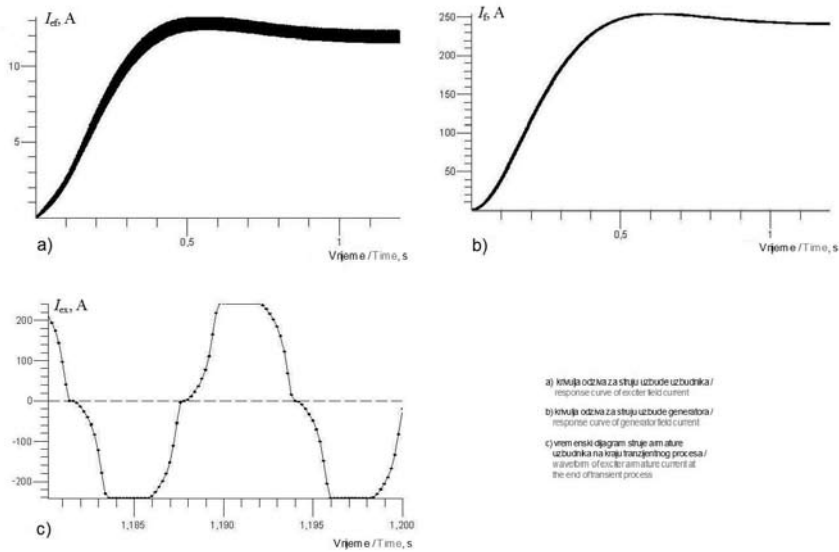
N_f – the number of field winding turns,
 p – number of poles pairs,
 l – the stack length,
 τ – the pole pitch,
 τ_p – the pole span,
 g – the airgap,
 K_c – the Carter coefficient and
 K_{sd} – a reduction coefficient of the d axis magnetizing reactance.

Ciljevi ovog proračuna jesu dobivanje vrijednosti struje uzbude zadane u tablici 1. Početne dimenzije i podaci za uzбудnik mogu se u manjoj mjeri promijeniti ako je to nužno, kao i ulazna vrijednost za uzbudni napon uzbudnika dok se iterativnim proračunom ne postignu ciljevi. Za nazivno opterećenje i kratki spoj generatora, krivulje struje uzbude uzbudnika, struje uzbude generatora i vremenski dijagram struje armaturnog namota uzbudnika prikazani su na slikama 3 i 4.

The objectives of this calculation are to obtain the value of field currents given in Table 1. The exciter's initial design could be slightly modified if necessary, as with the input value of the exciter's field voltage too, and reiterated until calculation objectives are met. Corresponding to generator rated load and short circuit, response curves of exciter field current and main field current and waveform of the exciter armature current are shown in Figure 3. and Figure 4 respectively.



Slika 3 – Nazivno opterećenje generatora
 Figure 3 – Generator rated load



Slika 4 – Kratki spoj generatora
Figure 4 – Generator short circuit

Stacionarne vrijednosti za struju uzbuđe uzbuđnika i uzbuđnu struju generatora su izračunate na kraju tranzijentnog procesa (slike 3 i 4) i dane u tablici 4. Vrijednosti uzbuđne struje generatora su nešto veće od onih prikazanih u tablici 1.

The steady state values of the exciter field current and main field current are predicted at the end of transient process (Figures 4 to 5) and are given in Table 4. The values of the field currents are slightly higher than that given in Table 1.

Tablica 4 – Struja uzbuđe uzbuđnika i uzbuđna struja generatora
Table 4 – Exciter field current and main field current

Nazivno opterećenje / Rated load		Kratki spoj / Short circuit	
I_{ef} , A	I_f , A	I_{ef} , A	I_f , A
4,7	103	12,4	240

3.2 Simulacija pilot uzbuđnika

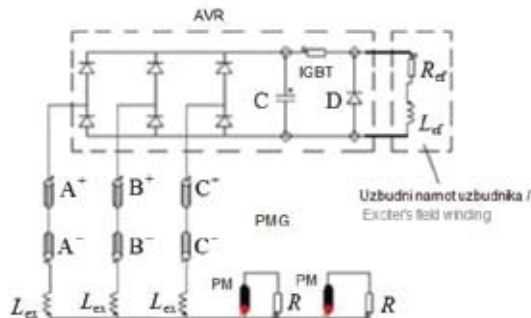
Cilj simulacije pilot uzbuđnika je postići zadane vrijednosti u tablici 4. Električni energetski krug sadrži elemente iz 2D MKE domene i vanjski električni krug, a prikazan je na slici 5.

Domena MKE je predstavljena s tri statorske faze i permanentnim magnetima. Vanjski električni krug je predstavljen s trofaznim ispravljačem, kondenzatorom, IGBT tranzistorom, otporom i induktivitetom uzbuđnog namota uzbuđnika. Svaki fazni namot je modeliran s finožičnim svicima i induktivitetom glava namota. Namot statora pilot uzbuđnika je spojen na 6-pulsni ispravljački most na kojeg je priključen IGBT tranzistor i koncentrirani parametri uzbuđnog namota uzbuđnika. U isto-

3.2 Pilot exciter simulation

The goal of pilot exciter simulation is to fulfill the given data from Table 4. The electrical power circuit which consists of 2D FEM domain circuit elements and external circuit is shown in Figure 5.

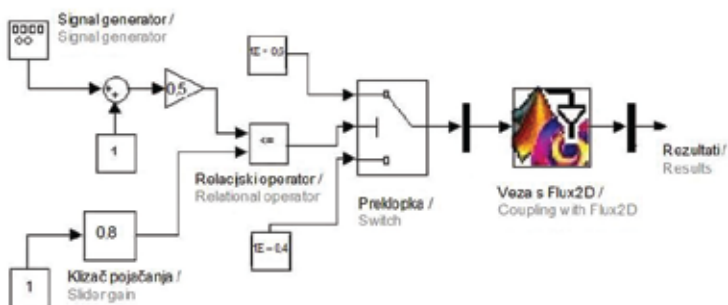
The FEM domain is represented by three stator phases and permanent magnets. The external circuit is represented by three phase rectifier, capacitor, IGBT transistor, exciter's field winding resistance and inductance. Each phase winding is modelled with stranded coils and end winding inductance. PMG stator winding is connected through a six-pulse diode rectifier followed by IGBT transistor and field winding lumped param-



Slika 5 — Električni krug za pilot uzbudnik
Figure 5 — Pilot exciter electrical circuit

smjernom međukrugu spojen je kondenzator na izlazne stezaljke ispravljača. IGBT tranzistor (engl. *chopper*) djeluje periodično s periodom T , ostaje u stanju vođenja za vrijeme $t_{on} = \delta T$, uz $0 < \delta < 1$. Varijabla δ predstavlja omjer između vremena vođenja i periode djelovanja IGBT tranzistora. Frekvencija djelovanja IGBT tranzistora je konstantna i fiksirana na 660 Hz. Na uzbudni namot uzbuđnika je spojena poredna dioda. Za modeliranje električnog kruga permanentnog magneta potrebno je osigurati da struja ne teče izvan magneta. Iz ovog razloga na krajeve permanentnog magneta spojen je otpor visoke vrijednosti ($1E + 0,6 \Omega$). Za simulaciju upravljanja IGBT, MKE je u sprezi s Matlab-Simulink programom. Prekidanje IGBT ovisi o opterećenju glavnog generatora. IGBT je modeliran otporom čija je vrijednost mala u tijeku vođenja i vrlo velika u zapornom stanju. U stanju vođenja vrijednost otpora iznosi $1E - 0,4 \Omega$, dočim u zapornom stanju otpor je $1E + 0,6 \Omega$. Za generator s konstantnom brzinom vrtnje u stacionarnom operativnom radu, δ je konstanta. Simulink upravlja vrijednošću otpora. U Matlab-Simulink modelu prikazanom na slici 6, δ se može kontinuirano mijenjati promjenom položaja klizača pojačanja.

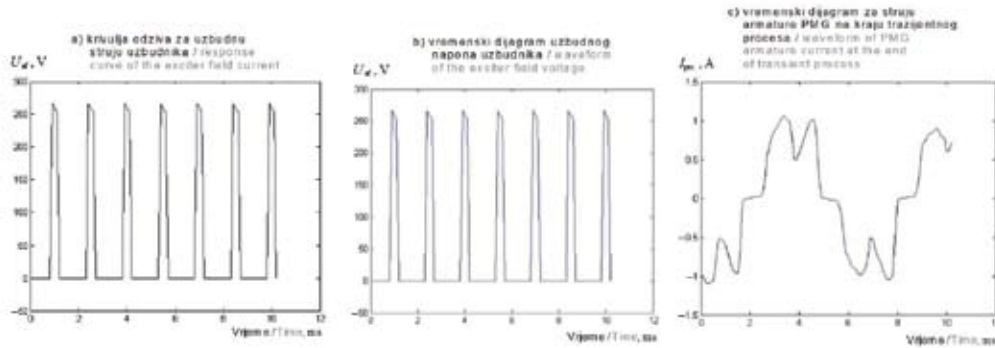
eters. The DC link capacitor is connected across rectifier terminals. The IGBT transistor (chopper) is operated periodically with a period T and remains closed for the time $t_{on} = \delta T$, with $0 < \delta < 1$. The variable δ is the duty ratio or duty cycle of a chopper. Switching frequency of the IGBT transistor is constant and fixed at 660 Hz. The exciter's field winding is shunted by a freewheeling diode. To model the permanent magnets electrical circuit, no current flow outside the permanent magnet should be provided. For this reason at the ends of permanent magnets the high value resistances ($1E + 0,6 \Omega$) are connected. To simulate the control of IGBT, the FEM is coupled to the Matlab-Simulink program. The switch states of IGBT depend on the main generator load condition. The IGBT is modelled by resistances with a very low value to model on-state and very large value to model off-state. In the following, the on state is represented by a resistance of $1E - 0,4 \Omega$, and the off state by a resistance of $1E + 0,6 \Omega$. For a generator operating at constant speed and steady load, the duty ratio is constant. Simulink controls the value of the resistance. In the Matlab-Simulink model shown in Figure 6., the duty ratio can be changed continuously by changing the slider gain value.



Slika 6 — Matlab-Simulink model za proračun PMG
Figure 6 — Matlab-Simulink model for the PMG calculation

Za vrijednost $\delta = 0,2$, odziv uzbudne struje uzбудnika, vremenski dijagram uzbudnog napona uzбудnika i vremenski dijagram struje armature za PMG su prikazani na slikama 7a, 7b i 7c.

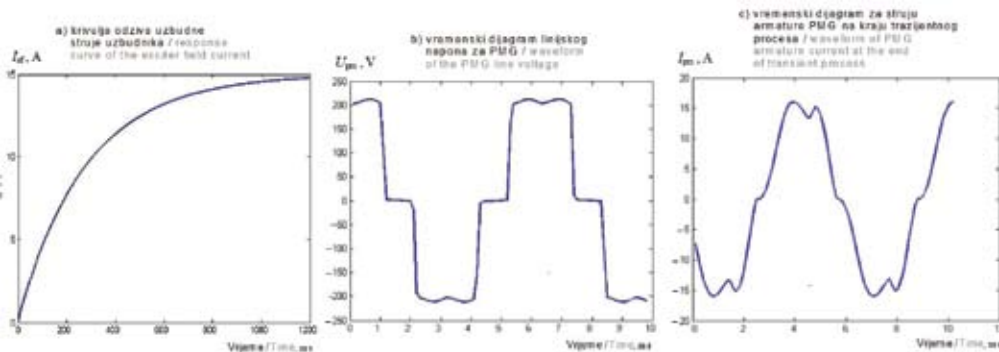
Corresponding to $\delta = 0,2$, the exciter field current response, exciter field voltage waveform and PMG armature current waveform are shown in Figure 7a, Figure 7b and Figure 7c, respectively.



Slika 7 — Opterećenje generatora, $\delta = 0,2$
Figure 7 — Generator loading, $\delta = 0,2$

Za $\delta = 1$, odziv uzbudne struje uzбудnika, vremenski dijagram linijskog napona i struje armature za PMG su prikazani na slikama 8a, 8b i 8c.

Corresponding to $\delta = 1$, the exciter field current response, PMG line voltage and armature current waveform are shown in Figure 8a, Figure 8b and Figure 8c respectively.



Slika 8 — Kratki spoj generatora, $\delta = 1$
Figure 8 — Generator short circuit, $\delta = 1$

Vrijednost uzbudne struje i napona uzбудnika su prikazani u tablici 5.

The value of exciter's field current and voltage are given in Table 5.

Tablica 5 – Proračunate vrijednosti za uzbudnu struju i napon uzбудnika
Table 5 – Calculated exciter field current and voltage

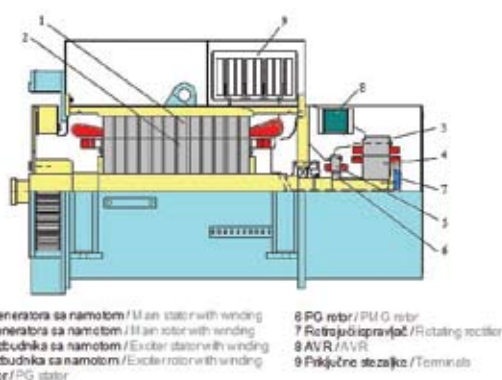
Opterećenje / Load, $\delta = 0,2$		Kratki spoj / Short circuit, $\delta = 1$	
I_{ef} , A	V_{ef} , V	I_{ef} , A	V_{ef} , V
3,7	50,3	14,8	203

4 EXPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

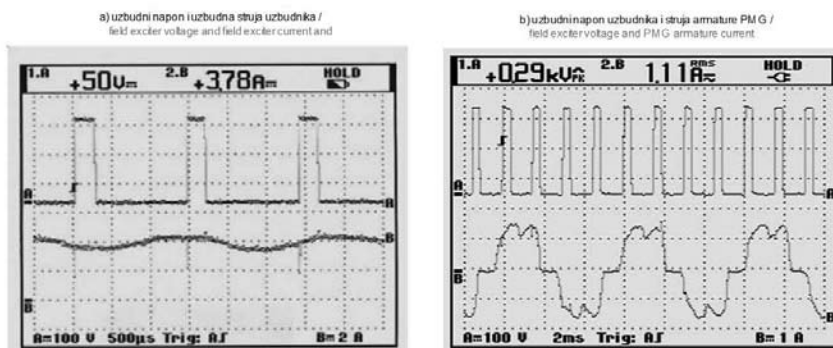
Za verifikaciju rezultata numeričke analize, izrađen je eksperimentalni stroj (slika 9) na kojemu su izvedena ispitivanja. Vremenski dijagrami za uzbudnu struju i napon uzбудnika za stacionarno opterećenje generatora prikazani su na slici 10a, vremenski dijagrami za uzbudni napon uzbudnika i struju armature za PMG su prikazani na slici 10b. Vremenski dijagrami uzbudnog napona uzbudnika i struju armature za PMG za slučaj kratkog spoja generatora prikazani su na slici 11.

4 EXPERIMENTAL VERIFICATION

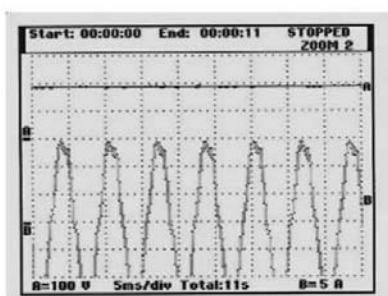
To further verify results of the numerical analyses, measurement have been made on the manufactured experimental machine in Figure 9. Waveforms of the field exciter's voltage and current are shown in Figure 10a, waveforms of the field exciter voltage and PMG armature current are shown in Figure 10b. The waveforms of the field exciter voltage and PMG armature current for the case of the main generator short circuit are shown in Figure 11.



Slika 9 — Aksijalni presjek sinkronog stroja
 Figure 9 — Axial cross section of the synchronous machine



Slika 10 — Stacionarno opterećenje generatora, mjereni oblici
 Figure 10 — Generator steady loading, measured waveforms



Slika 11 — Kratki spoj generatora: uzbudni napon uzbudnika i struja armature PMG-a
 Figure 11 — Generator short circuit: field exciter voltage and PMG armature current

U tablici 6 prikazana je usporedba rezultata proračuna i mjerenja za struju i napon uzbude uzbuđnika.

The values of exciter field current and voltage obtained by calculation are compared with measurements and given in Table 6.

Tablica 6 – Struja i napon uzbude uzbuđnika, usporedba rezultata proračuna i mjerenja
Table 6 – Exciter field current and voltage, calculation versus test

	Opterećenje / Load, $\delta = 0,2$		Kratki spoj / Short circuit, $\delta = 0,2$	
	I_{ef} , A	V_{ef} , V	I_{ef} , A	V_{ef} , V
Izračun / Calculation	3,7	50,3	14,8	203
Test / Test	3,78	51,4	14,2	193

Potrebno je naglasiti da za slučaj kratkog spoja generatora struja uzbude uzbuđnika ne smije biti manja od 12 A (prema tablici 1). Za uzbudnu struju uzbuđnika od 14,2 A, izmjerena je struja kratkog spoja 3,7 puta veća od nazivne.

It should be noted that for the case of the generator short circuit exciter field current shouldn't not be less than 12 A (acc. Table 1). With an exciter field current of 14,2 A, the corresponding generator short circuit current obtained with measurement is 3,7 times the rated one.

5 ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja elektromagnetski proračun i konstrukcijsku izvedbu uzbudnog sustava beskontaktnog sinkronog generatora za primjenu na brodu. Prikazana procedura proračuna i izbora konstrukcijske izvedbe uzimaju u obzir zahtjeve i ograničenja primjene. Svrha ovog elektromagnetskog proračuna uzbudnog sustava ima tri glavna cilja.

Prvi cilj je osiguranje dovoljne vrijednosti uzbudne struje za stacionarno opterećenje i kratki spoj generatora.

Drugi cilj je vezan na dinamičke promjene napona generatora, odnosno stabilizaciju napona u vremenu prema zahtjevima klasifikacijskog društva. Ovaj cilj jest ispunjen zajednički, odgovarajućim parametrima generatora, AVR karakteristikama, i odzivom uzbudnog sustava.

Treće, realizacijom zasebnog izvora napajanja, kao što je stroj s konzekventnim polovima na rotoru, ostvaruje se pouzdano, robusno i transparentno rješenje za uzbudni sustav sinkronog generatora. Eksperimentalna ispitivanja su izvedena s ciljem potvrđivanja rezultata numeričkih proračuna. Rezultati i vremenski dijagrami uzbudnih struja i napona dobiveni proračunom pokazuju manje odstupanje u usporedbi s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

5 CONCLUSION

This paper presents the electromagnetic design of an excitation system of a brushless synchronous generator for marine application. The given design procedure has treated application requirements and constraints. Thus, in this paper the purpose of electromagnetic design of the excitation system has three main objectives.

The first of these is to provide enough excitation current for steady state loading and for short circuit of the main generator.

The second one is connected to generator dynamic voltage changes, to preserve voltage recovery time acc. classification society rules. That objective is the task of generator parameters, AVR characteristics, but the role of excitation system response is important as well.

Thirdly, designing a separate power source such as consequent rotor poles machine offers a reliable, robust and transparent solution for the excitation system of the synchronous generator. Experimental tests have been performed to validate the results obtained by numerical calculations. The computed values and waveforms of the exciter's current and voltage closely match the test values.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] BOLDEA, I., Synchronous Generators, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006
- [2] DEPSEER, H., SPERLING, P.G., New Range of Brushless Synchronous Generators, Siemens Power Engineering, 5,1984
- [3] DNV, Rules for Classification of Ships, Part 4, Chapter 8, Electrical Installations, 2007
- [4] FLUX 2D V.10.1, CAD package for electromagnetic and thermal analysis using finite elements, CEDRAT, 2007
- [5] Matlab 7.1 – Simulink, Model Based and System based design, The Math Works, 2007
- [6] SUSNJIĆ, L., HAZNADAR, Z., Combined genetic algorithm – 2D finite element analysis applied to synchronous machines, Electromotion, 4, 2001, Mediamira Science Publisher
- [7] SUSNJIĆ, L. et al, Consequent Poles Electrical Machine–Design and Analysis, EDPE 2005, Dubrovnik, 2005
- [8] HENDERSHOT, J.R., MILLER, T.J.E., Design of brushless permanent magnet motors, Magna Physics Publishing and Clarendon press, Oxford, 1994
- [9] YOSHIDA, K. et al, Eddy-Current Loss Analysis in PM of Surface-Mounted-PM SM For Electric Vehicles, Compumag, Sapporo, 1999
- [10] ADKINS, B., HARLEY, R.G., The General Theory of Alternating Current Machines, Chapman and Hall, London, 1975

Adrese autora: Authors' Addresses:

Izv. prof. dr. sc. Livio Šušnjić livio.susnjic@riteh.hr Sveučilište u Rijeci Tehnički fakultet Vukovarska 58 51000 Rijeka Hrvatska	Prof Livio Susnjic PhD livio.susnjic@riteh.hr University in Rijeka Faculty of Engineering Vukovarska 58 51000 Rijeka Croatia
---	---

Uredništvo primilo rukopis:
2009-06-20

Manuscript received on:
2009-06-20

Prihvaćeno:
2009-08-01

Accepted on:
2009-08-01