

9. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Drago Ban
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
drago.ban@fer.hr

Branko Tomićić
KONČAR – Generatori i motori d.d.
btomicic@koncar-gim.hr

Tonko Mikecin
KONČAR – Generatori i motori d.d.
tmikecin@koncar-gim.hr

Dag Rodinis
KONČAR – Generatori i motori d.d.
drodinis@koncar-gim.hr

Edvin Havić
KONČAR – Generatori i motori d.d.
ehavic@koncar-gim.hr

SINKRONI GENERATORI ZA INDUSTRIJSKE KOGENERACIJE I DISTRIBUIRANU PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

SAŽETAK

Na svjetskom tržištu je raspoloživo više veličina i vrsta plinskih turbina za industrijske kogeneracije i druga postrojenja distribuirane proizvodnje električne energije. Za potrebe proizvođača plina na hrvatskom tržištu od posebnog su interesa postrojenja s plinskim turbinama snaga od 2,8 - 7 MW. Za kogeneracijsko postrojenje domaća industrija može isporučiti sinkroni generator i parni dio a turbina kao vrlo sofisticiran stroj se proizvodi u samo nekoliko zemalja svijeta. U ovom je referatu obrađen posebni tip sinkronog generatora optimiranog za plinske elektroagregate smještene u specijalnim kontejnerima izgrađenim i testiranim za upotrebu u eksplozijski ugroženim prostorima. Generatori su trofazni sinkroni, 4-polni, napona 6 do 11 kV, za snage prilagođene snagama plinskih turbina do 7MW.

Ključne riječi: Sinkroni generator, industrijsko kogeneracijsko postrojenje, plinski elektroagregat

SYNCHRONOUS GENERATORS FOR INDUSTRIAL COGENERATIONS AND DISTRIBUTED GENERATION OF ELECTRIC ENERGY

SUMMARY

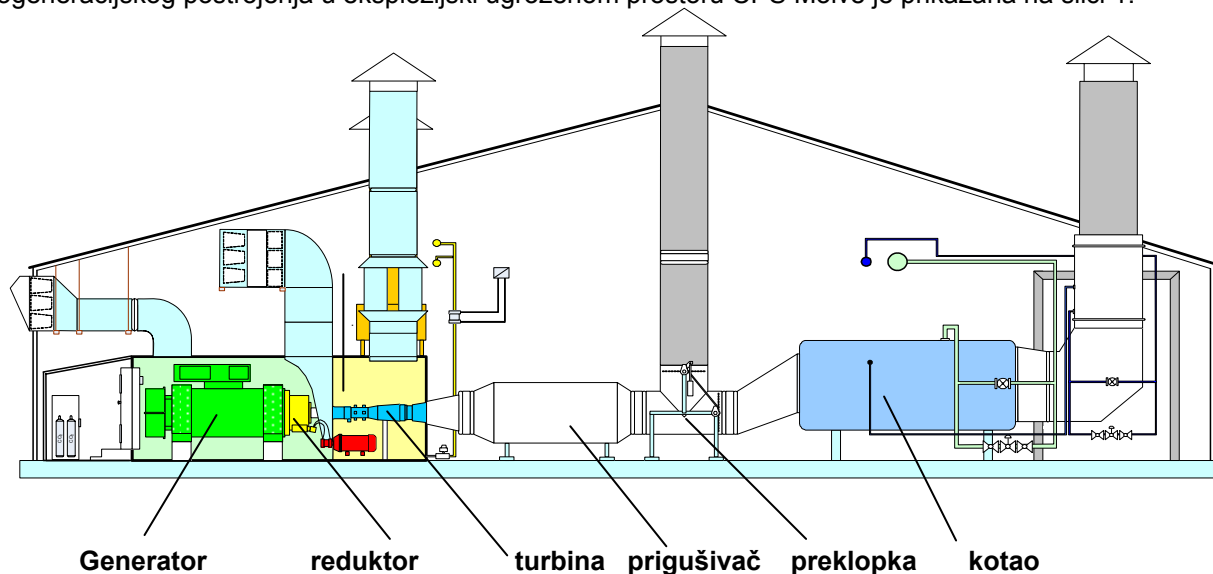
Several types and sizes of gas turbines for industrial cogenerations and other plants for distributed generation of electric energy are available on the market. The producers of natural gas on the Croatian market are especially interested in facilities with gas turbines of power ratings ranging from 2,8 to 7 MW. For cogeneration plants the domestic industry can deliver synchronous generators and the steam section, while the gas turbine, which is a very sophisticated machine, is manufactured in only several countries in the world. This paper elaborates a newly developed type of a synchronous generator optimized for natural gas electrical plants, which is located in a special container built and tested for utilization in plants at risk of explosive atmospheres used for processing and transport of natural gas. The generators are three-phase, four-pole synchronous machines for voltages 6 to 11 kV, 50 Hz and power ratings adjusted to power ratings of gas turbines up to 7 MW

Key words: Synchronous generator, industrial cogenerations, gas electrical aggregate

1. UVOD

Na svjetskom tržištu (USA, Europa, Japan) je raspoloživo više veličina i vrsta plinskih turbina za industrijske kogeneracije (istovremena proizvodnje električne energije i toplinske energije neophodne za tehnološki proces) i druga postrojenja distribuirane proizvodnje električne energije. Za potrebe proizvođača plina na hrvatskom tržištu od posebnog su interesa plinske turbine reda snaga od 2,8 - 7 MW. U postrojenjima INA-Naftaplin (CPS Molve, Etan-Ivanićgrad) kogeneracijska postrojenja su u eksploataciji više od 20 godina. Osim parnog dijela oprema takvih postrojenja je pretežito uvozna.

U nekoliko zadnjih godina domaća elektroindustrija je uspjela plasirati vlastiti generator za ugradnju u kontejnere kogeneracijskih postrojenja u eksplozijski ugroženim prostorima. U suradnji sa stranim isporučiteljem plinskih turbina, ključne plinske i regulacijske opreme, ugovorena je izrada sinkronih generatora koji su u svemu optimirani prema specifikacijama za kogeneracijska postrojenja. Budući da se radi o posebnoj izvedbi generatora u nastavku se daje kratki prikaz specifikacija, izvedbe i specifičnosti generatora. Prezentira se jedan konkretni primjer generatora koji je ugrađen u energani centralne plinske stanice Molve (CPS Molve). Generator je u pogonu od 2006. godine. Arhitektura kogeneracijskog postrojenja u eksplozijski ugroženom prostoru CPS Molve je prikazana na slici 1.



Slika1. Arhitektura kogeneracijskog sustava na CPS Molve

Spoj turbine i generatora je preko planetarnog reduktora kojim se brzina plinske turbine od 14250 o/min smanjuje na 1500 o/min [3]. Vrući ispušni plinovi iz turbine (oko 540°C) se usmjeravaju preko prigušivača buke i mimovodne preklopke u dimocjevni kotao gdje se stvara vodena para potrebna za popratna grijanja i druge tehnološke potrebe [1].

2. SINKRONI GENERATOR

2.1. Specifičnosti izvedbe generatora za montažu u kontejneru

Generator za kontejnersko kogeneracijsko postrojenje prikazano na slici 1. treba: prilagodbu konstrukcije i svih detalja za montažu u kontejneru unaprijed određenih dimenzija, zračno hlađenje vlastitim ventilatorom na osovini uzimanjem zraka iz dovoda iz kojih se prisilno osigurava i zrak za protueksplozijsku zonu u trajnom radu agregata, izvesti za precizna spajanja njegove osovine i osovine planetarnog reduktora montirnog na ležajnom štitu generatora.

Pored navedenog generator treba imati visoku pogonsku pouzdanost, "brushles" izvedbu uzbude, generator s trajnim magnetima za uzbudu glavnog uzbuđnika (PMG), automatski digitalni regulator

napona. Generator je predviđen za trajni rad, otočno i paralelno s mrežom HEP-a. Strujne i naponske transformatore za regulaciju, mjerenja i zaštitu treba ugraditi u posebnu priključnu kutiju smještenu na gornjoj strani generatora.

Dizajnom generatora predvidjeti i mogućnost povećanja njegove snage ako bi to eventualno bilo ostvario revitalizacijom (engleski, up grade) postojeće turbine ili ugradnjom nove veće snage.

2.3 Izvedba generatora za kogeneraciju na CPS Molve

Projektni podaci generatora na temelju tehničkih specifikacija za konkretnu namjenu su:

Nazivna snaga	$S = 6250 \text{ KVA}$ (kod temperature okoline 40°C)
Nazivni napon	$U = 6300 \text{ V} \pm 5\%$
Frekvencija	$50 \pm 0,12 \text{ Hz}$
Nazivna struja	$I_n = 573 \text{ A}$
Frekvencija	$f = 50\text{Hz}$
Sinkrona brzina vrtnje	$n_s = 1500 \text{ r/min}$
Brzina pobjega	$n = 1800 \text{ r/min}$
Broj polova	$2p = 4$
Faktor snage	$\cos\varphi = 0,8 - 1$
Klasa izolacije statora i rotora	F
Zagrijavanje statora i rotora	u klasi F
Broj faza	$m = 3$
Spoj faza	zvijezda
Pogon trajni	S1

Pogonski stroj generatora je plinska turbina Rolls Royce Alison tipske oznake KB5 ili KB7. Snaga turbine KB 5 ovisi o temperaturi okoline, tlaku zraka i nadmorskoj visini. U konkretnim uvjetima pri 15°C , 1013 mbar i 200 m nadmorske visine ona iznosi 3698 kW.

Hlađenje generatora je vlastito, zrakom, s prigradenim ventilatorom na osovini generatora. Ležajevi generatora se podmazuju uljem pri čemu se ležaj na pogonskoj strani podmazuje uljem iz zajedničkog sustava agregata a ležaj na suprotnoj strani maznim prstenom.

Mjerni strujni i naponski transformatori neophodni za regulaciju, mjerenje i zaštitu su smješteni u posebnu priključnu kutiju na generatoru kako se to vidi na slici 4.

Uzbudnu struju daje mali trofazni sinkroni generator invertirane koncepcije smješten na rotoru generatora kako je vidljivo na načelnoj shemi uzbude prikazanoj na slici 3.

Električna energija iz generatora se odvodi s dva paralelna visokonaponska kabela do postojeće 35/6 kV trafostanice CPS Molve, gdje se generator sinkronizira na javnu mrežu HEP-a. U normalnim pogonskim uvjetima generator radi sinkroniziran sa javnom mrežom dajući jedan dio električne energije u mrežu, a u slučaju ispada mreže radi odvojeno u paraleli sa još 2 ili 3 slična generatora.

2.4 Izvedba statorskog paketa i namota

Statorski paket je izrađen od dinamo limova debljine 0,5 mm, specifičnih gubitaka 3,3 W/kg kod indukcije 1,5 T. Limovi statora su isječeni iz jednog komada čime je pojednostavljena konstrukcija i izrada, te osigurana kompaktnost cijelog paketa. Svi su izolacijski materijali u klasi F a namot sa statorskim paketom je nakon svih spajanja i naponskih ispitivanja impregniran u vakuumu prema tvorničkom tehnologijskom postupku vakuum tlačne impregnacije. Projektom predviđeno zagrijavanje statorskog namota odgovara klasi F. Svi su počeci i krajevi namota izvedeni u posebno izvedenu priključnu kutiju na generatoru u svrhu montaže opreme za sve predviđene zaštite generatora u pogonskim režimima rada (vidi fotografiju na slici 4.).

2.5 Dizajn rotora

Rotorski paket je izrađen od čeličnih limova debljine 2,2 mm, laserskom tehnikom obrade polova, utora, prigušnog kaveza i spoja na osovini. Zračni raspored je oblikovan tako da se njegov iznos povećava od sredine pola prema krajevima kako bi se postigao najpovoljniji valni oblik napona na stezaljkama

generatora. Na svakom polnom stopalu nalazi se 12 utora u koje je ugrađen prigušni namot od okruglih bakrenih vodiča.

Posebnost je ove izvedbe da je cijeli oblik rotora isječen iz jednoga lima. Time su izbjegnuta mjesta učvršćenja pojedinih glavnih dijelova u cjelinu, te je poboljšana mehanička čvrstoća sklopa i pojednostavnjen tehnološki postupak izrade rotorskog paketa. Limovi za rotor su izrezani laserskom tehnologijom.

Rotorski namot je formiran od pravokutnih bakrenih vodiča izoliranih lakom. Svici rotorskog namota oblikovani su izravnim namatanjem žice na polove. Između rotorskog paketa i namota nalazi se izolacija debljine 3 mm na bazi tvrdog staklenog tkiva. Zbog niske mehaničke čvrstoće ovakve koncepcije namatanja rotora po cijeloj aksijalnoj dužini rotora su postavljene aluminijske potpore radi dopunskog učvršćenja namota. Čelne strane namota učvršćene su pomoću čeličnih letvi zavarenih za čelne strane pola koje su vijcima pričvršćene za osovinu.

2.6 Optimiranje magnetskog i ventilacijskog kruga stroja

Zbog relativno malog raspoloživog prostora za smještaj generatora u kontejner s ostalim uređajima, ventilacija generatora je izvedena kao aksijalna. Aktivni dio se hladi zrakom koji se dovodi i odvodi kroz otvore smještene na kućištu (vidi sliku 4.). Cirkulacija zraka kroz generator forsirana je aksijalnim ventilatorom na osovini.

Kako se može vidjeti na slici 2. hlađenje statora omogućeno je strujanjem zraka kroz aksijalne kanale u zubima statora, te kroz kanale koji se nalaze između utorskih klinova i zračnoga raspورا. Osim toga stator se hladi preko vanjske površine paketa po kojoj također struji zrak, a ta je oblikovana posebnim formiranjem u svrhu povećanja rashladne površine.

Hlađenje rotora ostvareno je također strujanjem zraka kroz aksijalne kanale. Aksijalni kanali se nalaze na potpori, a po tri rupe za hlađenje su smještene na svakoj polnoj papučici. Dio rotorskih gubitaka se odvodi i strujanjem zraka kroz kanale između statorskog klina i zračnoga raspورا. Rotorski namot se hladi i preko čelnih ploha, zbog čega su svitci na tome dijelu oblikovani s kanalom za strujanje zraka.

2.7 Elektromagnetski proračun

Za elektromagnetski projekt generatora je kombinirana primjena klasične analitičke metode i metode konačnih elemenata (MKE). Zbog potrebe optimiranja ventilacijskog i magnetskog kruga relativno komplicirane geometrije prema slici 2. odabrana je MKE. Proračun polja za konfiguraciju na slici 2 se obavlja polazeći od izraza [1]:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S}, \quad (1)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S}, \quad (2)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (3)$$

gdje su:

E – jakost električnoga polja u vodičima,

B – magnetska indukcija,

H – jakost magnetskog polja,

J - gustoća struje,

C – krivulja koja omeđuje plohu S,

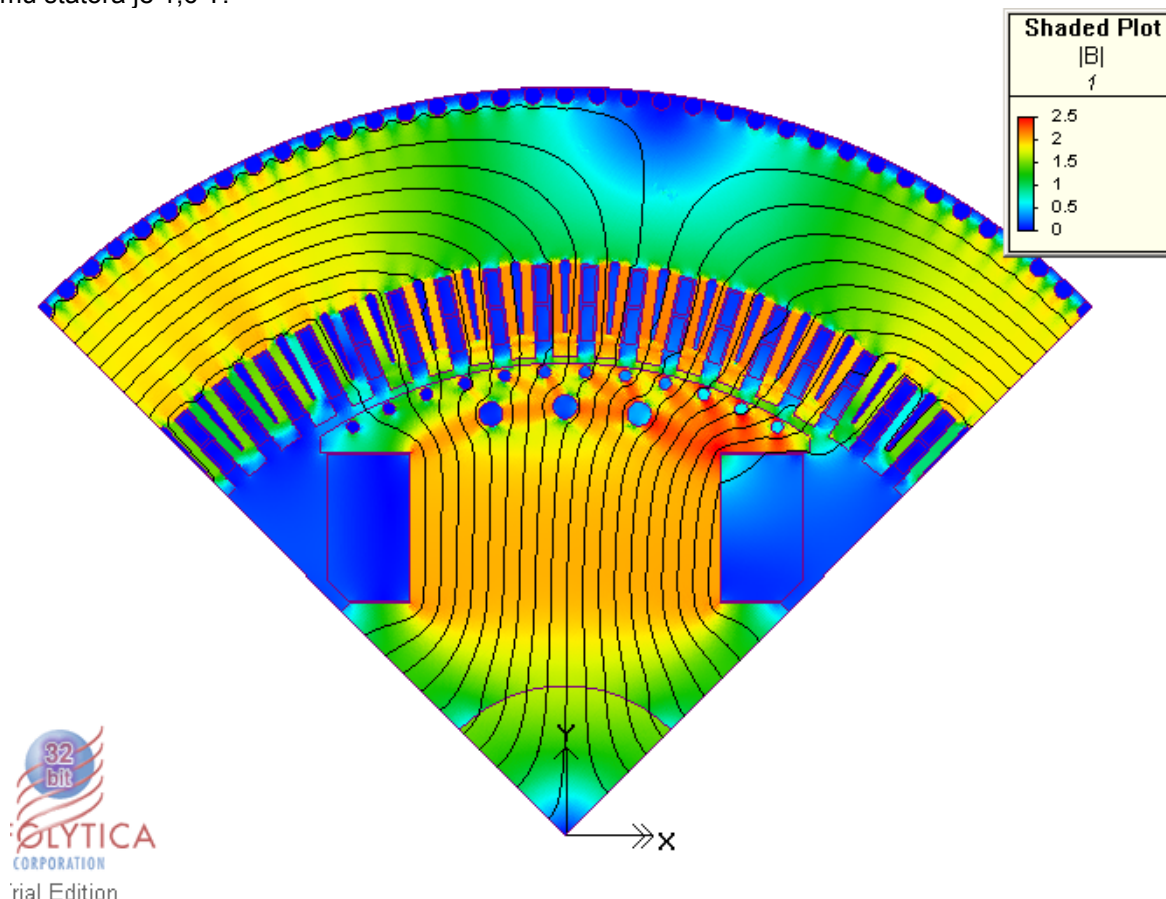
S – ploha unutar koje se računa polje,

n – jedinični vektor normalan na površinu S.

Algoritam po kojemu se obavlja rješavanje polja ugrađen je u korišteni programski paket MagNet [3]. Pristup proračunu uključuje izradu odgovarajućeg modela, zadavanje početnih i graničnih uvjeta, te karakteristika svih ugrađenih materijala. Nakon toga se pristupa generiranju mreže, te odabir reda polinoma po kojemu se obavlja proračun. Raspored i veličina elemenata mreže je važna jer o njoj ovisi

trajanje i točnost proračuna. Povećanjem gustoće mreže, te reda polinoma povećava se točnost proračuna, ali i produžuje njegovo trajanje.

Rezultati statičkog proračuna polja kod nazivnog opterećenja generatora su prikazani na slici 2. Magnetska opterećenja pojedinih dijelova magnetskog kruga se mogu očitati s mjerila u gornjem desnom kutu. Utor za hlađenje u zubu statora je oblikovan tako da magnetska indukcija na statoru ne prelazi iznos od 2 T. Na rotoru su također magnetska opterećenja velika, te iznose 2 T u polnoj jezgri, a na pojedinim dijelovima polne papuče dosižu iznos od 2,2 T. Utori za hlađenje u polnome stopalu su također smješteni na mjestima gdje najmanje smetaju prolazu magnetskoga toka. Najveći iznos magnetske indukcije u jarmu statora je 1,6 T.



Slika 2. Silnice magnetskog polja nazivno opterećenog generatora

2.8 Podaci o korisnosti reaktancijama i vremenskim konstantama

Rezultati proračuna i ispitivanja korisnosti generatora u ovisnosti o veličini opterećenja i faktoru snage su prikazani u tablici I., proračuna i mjerenja reaktancija generatora u tablici II., a u tablici III. su rezultati proračuna i mjerenja vremenskih konstanti.

Tablica I. Korisnost generatora u ovisnosti o faktoru snage i opterećenju

Opterećenje %	Korisnost (%)			
	$\cos\varphi = 0,8$		$\cos\varphi = 1$	
	Računato	Mjereno	Računato	Mjereno
100	97,1	97,1	97,8	97,7
75	97,0	96,9	97,7	97,6
50	96,6	96,4	97,3	97,1
25	94,5	94,0	95,6	95,2

Tablica II. Reaktancije generatora

Reaktancija	Računato (%)	Mjereno (%)
Uzdužna (zasićena) X_d	262,1	259,2
Uzdužna (nezasićena) X_d	328,4	337,6
Prolazna u uzdužnoj osi X'_d	31,9	27,2
Početna u uzdužnoj osi X''_d	17	19
Poprečna X_q (nezasićena)	164,2	-
Poprečna X_q (zasićena)	53,7	-
Početna u poprečnoj osi X''_q	16,5	-
Inverzna X_2	16,8	19,1
Nulta X_0 (nezasićena)	7,4	13,0

Tablica III. Vremenske konstante (nezasićeno stanje)

Vremenska konstanta	Računato (s)	Mjereno (s)
T''_d	0,131	0,078
T''_q	0,027	-
T'_{d0}	7,33	-
T'_d	0,713	0,645
T_a	0,077	0,120
T''_{d0}	0,246	-
T''_{q0}	0,271	-

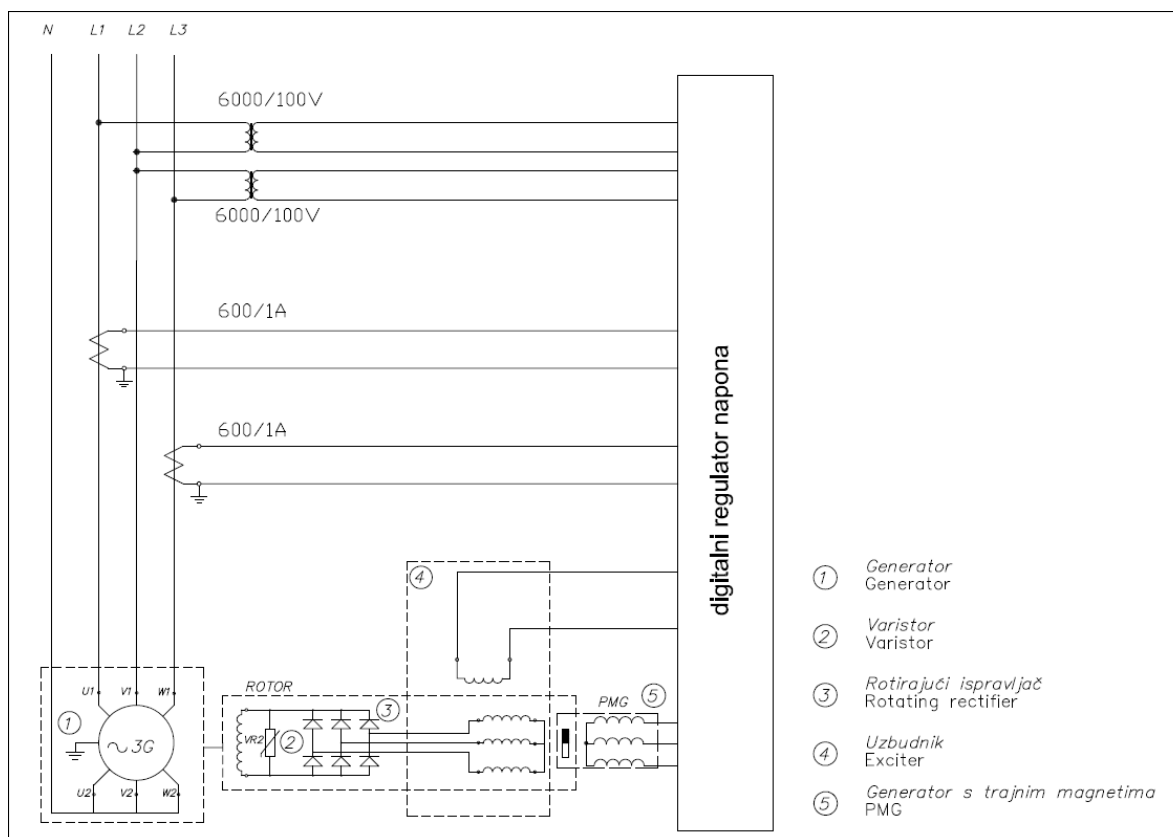
3. UZBUDNI SUSTAV GENERATORA

Generator ima na osovini prigraden sinkroni uzбудnik invertirane koncepcije (polovi na statoru, trofazna armatura na rotoru) i rotirajući diodni ispravljač. Uzbudna energija za uzбудnik se uzima sa stezaljki malog trofaznog generatora s trajnim magnetima (PMG), smještenog na istoj osovini s generatorom, kao što je ilustrirano načelnom shemom uzbude na slici 3.

Nazivni napon uzbude je 120 V, nazivna struja uzbude 148 A.

Digitalni regulator napona je izveden kao PI regulator s unutrašnjom povratnom vezom po struji uzbude uzбудnika i P regulatorom struje.

Kao opcija može se uključiti regulator jalove snage generatora PI tipa.



Slika 3. Načelna shema uzbuđnog sustava generatora za postrojenje CPS Molve

4. GENERATOR U FAZI ZAVRŠNIH ISPITIVANJA

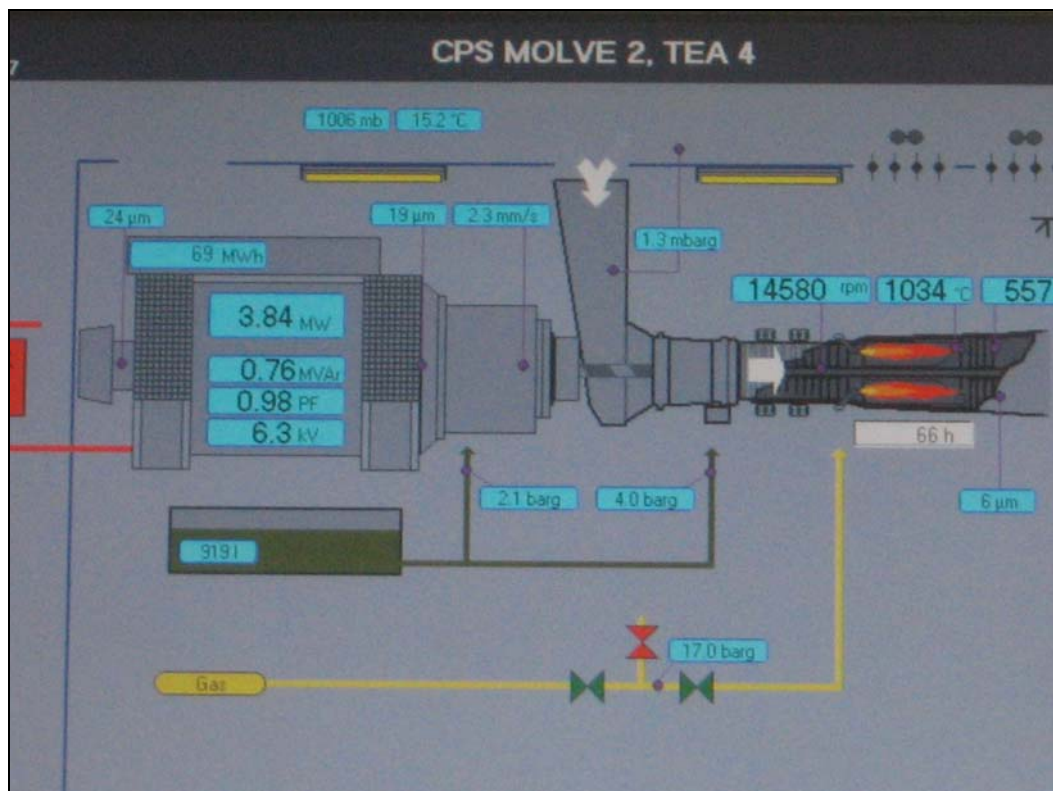
Na slici 4. je prikazan generator u fazi nakon završenih ispitivanja u tvornici i priprema za transport u Veliku Britaniju gdje treba biti ugrađen u kontejner spojen sa turbinom i svom pratećom opremom te podvrgnut ispitivanjima opterećen nazivnom radnom snagom (opterećenje na otpore, $\cos\varphi = 1$). Nakon tih ispitivanja kontejner je dopremljen na lokaciji energane CPS Molve 2 i ugrađen u elektranu. Nakon toga su provedena brojna ispitivanja mehaničkih i elektromehaničkih stanja agregata kao i protueksplozijske zaštite cijelog kontejnera.



Slika 4. Generator u fazi priprema za isporuku u Veliku Britaniju

Jedno tipično stanje opterećenja s prikazom ključnih pogonskih parametara generatora i turbine je prikazano na slici 5.

Stvarno opterećenje generatora određeno je trenutnim potrebama elektroenergetskog sustava Molve. Zbog relativno guste kableske mreže u sustavu CPS Molve faktor snage generatora je često blizu jedan. Sva stanja agregata se prate "on line" sustavom upravljanja i monitoringa.



Slika 5. "On- line" trenutno stanje opterećenja generatora 10.01.2007

5. ZAKLJUČAK

U referatu je prezentirana jedna vrlo specifična izvedba sinkronog generatora namijenjenog za industrijska kogeneracijska postrojenja i slične namjene u distribuiranoj proizvodnji električne energije.

Opisani su temeljni problemi koji su se morali projektno i konstrukcijski riješiti da bi generator zadovoljio sve tehničke zahtjeve uključujući i zahtjeve za protueksplozijsku zaštitu.

Prema rezultatima ispitivanja generatora u pogonskim uvjetima zadovoljavaju sve tražene parametre.

Pokazalo se da domaća elektroindustrija može ravnopravno s najpoznatijim proizvođačima u svijetu graditi posebne izvedbe generatora s pripadajućim uzbudnim sustavima i automatskim digitalnim regulatorom napona.

6. LITERATURA

- [1] CENTRAX, Gas turbine, tehnička dokumentacija, Molve project 2004.
- [2] D. Ban et altri: Optimalizacija i proširenje kogeneracijskog sustava pogona Molve, Studija izvedivosti, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju, 2004.
- [3] Magnet Version 6.5. "Tutorials", Infolytica Corporation 2000.
- [4] Projektna, konstrukcijska i ispitna dokumentacija društva Končar-GIM.