HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNOG VIJEĆA ZA VELIKE ELEKTROENERGETSKE SUSTAVE – CIGRÉ



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

Igor Vidaković, dipl. ing. KONČAR – Energetika i transport d.d. igor.vidaković@koncar-ket.hr

Miroslav Mađerčić, dipl. ing. KONČAR – Energetika i transport d.d. miroslav.madercic@koncar-ket.hr Mr. sc. Branko Tomičić, dipl. ing. KONČAR – Generatori i motori d.d. btomicic@koncar-gim.hr

Zvonko Čulig, dipl. ing. KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d. zculig@koncar-institut.hr

# ISPITIVANJE I PUŠTANJE U POGON GENERATORA ZA VJETROAGREGAT

## SAŽETAK

U članku je ukratko prikazana izvedba novoga tipa sinkronog generatora za vjetroelektranu. Dan je pregled obavljenih ispitivanja, te su prikazani najvažniji rezultati dobiveni proračunom i mjerenjem. Rezultati ispitivanja su pokazali da se primjenom suvremenih metoda proračuna mogu dobiti pouzdani i točni rezultati. Na osnovi dobivenih rezultata je zaključeno da generator zadovoljava sve tehničke zahtjeve, ta da se može pristupiti serijskoj proizvodnji. Na temelju iskustva s gradnjom ovoga generatora moguće je nastaviti rad na razvoju vjetroagregata prvenstveno onih većih snaga.

Ključne riječi: sinkroni generator, vjetroagregat, ispitivanje generatora,

# **TESTING AND PUTTING INTO OPERATION OF WIND TURBINE GENERATOR**

## SUMMARY

#### SUMMARY

In this paper is presented a short description of design of new type of synchronous generator for wind turbine. It is given an overview of applied tests, and some most important results are presented. Testing results shows that the application of modern tools for calculation can obtain reliable and accurate results. Based on obtained results, it can be concluded that generator fulfils all technical demands and it is apt for serial production. With experience gained on designing and manufacturing of this generator it is possible to continue with development of wind turbines, primarily those of greater power.

Key words: sinchronous generator, wind turbine, generator testing

## 1. UVOD

Specifičnost pogona vjetroelektrane predstavlja mala brzina turbine i njena promjenjivost. Mnoga suvremena rješenja uključuju primjenu multiplikatora između turbine i generatora, kako bi se većom brzinom na osovini omogućila primjena generatora uobičajene izvedbe. Budući da multiplikator pogoršava stupanj korisnoga djelovanja, smanjuje pouzdanost elektrane i poskupljuje izvedbu, u svijetu su sve zanimljivija rješenja koja ga isključuju.

Danas se susreću rješenja s raznim vrstama generatora koji mogu biti: sinkroni sa statičkom uzbudom ili s permanentnim magnetima, odnosno asinkroni kavezni ili kliznokolutni dvostruko napajani. Uobičajeno rješenje bez multiplikatora je sa sinkronim generatorom, koji daje napon promjenjive veličine i frekvencije, te se preko AC-DC-AC pretvarača spaja na mrežu.

U nekoliko zadnjih godina domaća elektroindustrija je razvila i izgradila novi tip sinkronog generatora namijenjenog za izravno spajanje na turbinu pogonjenu vjetrom. Turbina se vrti promjenjivom brzinom tako da frekvencija napona iznosi od 5 do 13,5 Hz, a napon se mijenja u granicama od 250 do 690 V. Nazivna snaga generatora kreće se u granicama od 200-1000 kVA. Uzbuda generatora je osigurana iz statičkog istosmjernog izvora.

U ovom referatu je ukratko prikazana izvedba novoga tipa sinkronog generatora za vjetroelektranu. Specifičnosti ove izvedbe generatora su: prilagodba konstrukcije za montažu u gondoli, visoka pogonska pouzdanost, rad na mreži promjenjivog napona i frekvencije, te vrlo složeni sustav upravljanja.

Kvaliteta izvedbe je potvrđena brojnim mjerenjima koja su obavljena u tvornici, te na terenu. Osim ispitivanja koja se standardno provode na sinkronim generatorima (prazni hod, kratki spoj, zagrijavanje, udarni KS...) provedena su i mnoga specijalna koja su potrebna radi usklađivanja generatora s ostalom opremom. Ispitivanja su provedena primjenom suvremene opreme. U referatu je dan pregled obavljenih ispitivanja, te su istaknuti dobiveni rezultati. Na osnovi dobivenih rezultata je zaključeno da generator zadovoljava sve tehničke zahtjeve, ta da se može pristupiti serijskoj proizvodnji. Na temelju iskustva s gradnjom ovoga generatora moguće je nastaviti rad na razvoju vjetroagregata prvenstveno onih većih snaga.

## 2. NAZIVNI PODACI GENERATORA

Generator za vjetroagregat ima slijedeće nazivne podatke:

Nazivna snaga: 200-1000 kVA Nazivni napon: 250-690 V Nazivna struja: 462-837 A Brzina vrtnje: 10-27 min-1 Faktor snage: 1,0 Nazivni napon uzbude: 106-155 V Nazivna struja uzbude: 77-109 A Broj polova: 60

## 3. KONSTRUKCIJA AKTIVNOG DIJELA STROJA

#### 3.1. Statički dio stroja

Statički dio stroja načinjen je od visokokvalitetnih neorjentiranih dinamo limova debljine 0,5 mm, te specifičnih gubitaka od 3,3 W/kg kod magnetske indukcije od 1,5 T. Na statoru se nalazi 360 ravnomjerno raspoređenih utora u koje je smješten armaturni namot. Utori su poluotvoreni i zaobljenog oblika, a zatvoreni su klinovima od materijala na bazi tvrdog staklenog tkiva. Radi učvršćenja paketa, na oba kraja smještene su tlačne ploče s tlačnim prstima.

Armaturni namot načinjen je od okruglih bakrenih vodiča izoliranih lakom. Svaki se zavoj sastoji od dionih vodiča, a ukupni broj zavoja u svitku je 8. Zbog visokih naponskih naprezanja, koji su posljedica rada na pretvaraču frekvencije, između svakoga zavoja nalazi se međuzavojna izolacija koja osigurava pouzdan rad u takvim pogonskim uvjetima. Glavna izolacija načinjena je od materijala na bazi nomex-a, te je nakon tehnološkog postupka ulaganja, cijeli namota impregniran lakom u vakuumu. Namot je izveden kao jednoslojni s tri paralelne grane po fazi, te spojen u zvijezdu.

## 3.2. Rotirajući dio stroja

Rotorski paket načinjen je od dinamo limova debljine 0,5 mm, te specifičnih gubitaka od 5,3 W/kg kod magnetske indukcije od 1,5 T. Rotor ima istaknute polove trapeznog oblika kako bi se dobio najpovoljniji valni oblik napona na stezaljkama armature. Stoga je zračni raspor oblikovan tako da je na krajevima 1,5 puta veći nego na sredini pola. Na svakom polnom stopalu nalazi se 6 rupa u koje je smješten prigušni namot načinjen od okruglih bakrenih vodiča. Polovi su učvršćeni pomoću svornjaka na čeličnu glavinu.

Rotorski namot je načinjen od pravokutnih bakrenih vodiča izoliranih lakom. Namot je izveden kao višeslojni, a svici su oblikovani prethodnim namatanjem na kalupe, te navučeni na polove. Između

rotorskog paketa i namota nalazi se izolacija debljine 3 mm na bazi tvrdog staklenog tkiva. Čeone strane namota učvršćene su pomoću krajnjih polnih ploča koje su napravljene od čelika.

#### 4. ISPITIVANJE

#### 4.1. Prazni hod i kratki spoj

U ispitnoj stanici KONČAR-Generatori i motori d.d. obavljeno je ispitivanje generatora u praznome hodu i kratkome spoju. Oba pokusa su obavljena kod brzine vrtnje 27 min-1 što odgovara frekvenciji od 13,5 Hz. Rezultati ovih ispitivanja su uspoređeni s rezultatima dobivenim proračunima.

Za proračun karakteristika praznoga hoda uporabljene su analitička metoda [1], te metoda koja uključuje primjenu metode konačnih elemenata (MKE), a koja je ugrađena u programski paket MagNet [2]. Pristup proračunu MKE uključuje izradu odgovarajućeg modela, zadavanje početnih i graničnih uvjeta, te karakteristika svih ugrađenih materijala. Nakon toga se pristupa generiranju mreže, te odabiru reda polinoma po kojemu se obavlja proračun. Kako bi se dobila karakteristika praznoga hoda načinjeno je više statičkih proračuna za razne vrijednosti uzbudnih struja, pri čemu je magnetski tok, obuhvaćen armaturnim namotom, preračunat na fazni napon [3]. Budući da je stroj aksijalno simetričan, svi proračuni polja su obavljeni u 2D. Slika polja u praznome hodu kod nazivne uzbudne struje je prikazana na slici 1. Opterećenja pojedinih dijelova magnetskoga kruga mogu se očitati s mjerila u gornjem desnom kutu slike.





Slika 1 Magnetsko polje generatora u praznome hodu kod nazivnog napona

Na slici 2 prikazane su karakteristike praznoga hoda dobivene proračunima te mjerenjem. Karakteristika dobivena analitičkim proračunom pokazuje odstupanje već u nezasićenom dijelu koje iznosi do 20 %. Mogući razlog odstupanja je pojednostavnjen algoritam proračuna magnetskog polja u zračnome rasporu, budući da u tom području karakteristike praznoga hoda, utjecaj željeznih dijelova nije značajan. Karakteristika praznoga hoda dobivena proračunom pomoću MKE dobro se slaže s izmjerenom u području napona koji je niži od nazivnoga, ali pokazuje odstupanje u zasićenom dijelu karakteristike što bi mogla biti posljedica utjecaja lamelirane izvedbe paketa što proračunom pomoću 2D nije uzeto u obzir



Slika 2: Karakteristike praznoga hoda

Proračun karakteristike kratkoga spoja obavljen je analitičkom metodom, te je prikazan na slici 3. Na istoj slici je prikazana i karakteristika kratkoga spoja dobivena mjerenjem.



Slika 3: Karakteristike kratkoga spoja

Sa slike je vidljivo da je odstupanje izmjerenih vrijednosti struje kratkoga spoja od izračunatih vrijednosti minimalno u cijelome području.

## 4.2. Valni oblik napona

U praznome hodu obavljeno je snimanje valnog oblika faznog i linijskog napona pomoću osciloskopa. Snimljeno je 283 točaka po jednoj periodi, te su prikazane na slikama 4 i 5. Valni oblik napona je dobiven također i računski pomoću programa MagNet koji uključuje MKE. Simulacija je obavljena primjenom 2D proračuna polja koji u sebi uključuje i vrtnju rotora.



Slika 4. Valni oblik faznoga napona



Slika 5. Valni oblik linijskoga napona

Na slikama je vidljivo dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja. U valnom obliku faznoga napona opaža se treći harmonik koji je posljedica oblika zračnog raspora, a kojega nema u linijskom naponu. U oba valna oblika prisutan je harmonički član koji je posljedica nazubljenja zračnoga raspora zbog utora. Najveće odstupanje valnog oblika linijskog napona od sinusnog iznosi 5,6 % što zadovoljava IEC propis.

## 4.3. Zagrijavanje i hlađenje

Pokus zagrijavanja izvedenog generatora je načinjen u kratkome spoju. Srednja vrijednost struje armature je iznosila 730 A, a struja uzbude iznosila je 79 A uz napon od 87 V. Srednja temperatura armaturnoga namota izmjerena pomoću ugrađenih termometara iznosila je 130°C, a uzbudnoga namota, izmjerena U-I metodom, je iznosila 41°C. Na kraju mjerenja, temperatura okoline je iznosila 28°C, pa je dobiveno zagrijanje armaturnoga namota termometrima od 102 K, a uzbudnoga namota od 13 K. Podaci o temperaturama su očitani nakon 5 sati trajanja pokusa. Na kraju pokusa zagrijavanja izvršeno je mjerenje otpora armaturnog namota U-I metodom, te je dobivena srednja temperatura od 121°C, što odgovara zagrijanju namota od 93 K.

Na osnovi rezultata ispitivanja se može zaključiti da očekivano zagrijavanje svih namota u nazivnoj točki iznositi neće preći dopušteno za klasu izolacije H.

#### 4.4. Mjerenje raektancija

U svrhu određivanja parametara nadomjesne mreže obavljeni su pokusi udarnog kratkog spoja, te dvopolnog kratkog spoja. Udarni kratki spoj je načinjen kod napona 200 V i brzine vrtnje od 27 min<sup>-1</sup>. Izmjerene vrijednosti reaktancija su uspoređene s onima dobivenim analitičkim proračunom pomoću programskog paketa PROGIP, te prikazane u tablici 1.

Parametar	Račun	Mjerenje	Odstupanje
	(p.u.)	(p.u.)	(%)
Sinkrona reaktancija u d-osi (nezasićena)	2,19	2,15	1,86
Sinkrona reaktancija u d-osi (zasićena)	1,82	1,81	0,55
Prolazna reaktancija u d-osi	0,646	0,634	1,89
Početna reaktancija u d-osi	0,409	0,502	18,5
Reaktancija inverzne simetrične komponente	0,416	0,510	18.4

**Tablica 1**: Reaktancije generatora dobivene proračunom i mjerenjem

Najveće odstupanje računske od izmjerene vrijednosti reaktivnog otpora iznosi 18,5 % a dobiveno je za reaktanciju inverzne simetrične komponente. Ostala odstupanja su minimalna, a sva su unutar tolerancija danih IEC propisima.

#### 4.5. Ispitivanje vibracija

Mjerenje vibracija izvršeno je u generatorskom radu. Obuhvaćena su slijedeća mjerna mjesta: spoj centralnog dijela kućišta generatora i glavnog nosača, kućište paketa statora i paoci generatora, statorski paket, glave namota i osovinski rukavac.



Slika 6. Dijelovi vjetroagregata

Na rotor vjetroagregata, preko kardanskog vratila, spojen je elektromotorni pogon koji je osiguravao vrtnju. Vibracijski signali s akcelerometara, signal brzine vrtnje i signal faznog napona generatora snimljeni su pomoću višekanalnog analizatora.

Na slici 7 vide se odazivi vibracija za mjerna mjesta spoja kučišta generatora i glavnog nosača (Kućište) i kućište statora (Stator) u aksijalnom (Z) i radijalnom (X) smjeru. Vibracije ne prelaze 4mm/s.



Slika 7. Ukupne vibracije za mjerna mjesta kućipta statora i glavnog nosaća i mjerno mjesto kućište statora

Na slikama 8 i 9 vide se aksijalni i radijalni odazivi vibracija na mjernom mjestu kućišta paketa. U ovim odzivima radijalne vibracije neznatno prelaze preko 4mm/s. Aksijalne vibracije ne prelaze 2mm/s. S obzirom na postavljene uvjete za rad generatora od 4mm/s, dobivene vrijednosti vibracija zadovoljavaju kriterije.



Slika 8. Radijalne vibracije kućišta paketa (2 - 200 Hz)



Slika 9. Aksijalne vibracije kućišta paketa (2 - 200 Hz)

## 5. ZAKLJUČAK

Primjenom suvremenih alata u projektiranju sinkronih generatora moguće je dobiti pouzdane i točne rezultate što su potvrdila sva provedena ispitivanja u tvornici. Rezultati proračuna i ispitivanja su pokazali da ovaj tip generatora zadovoljava sve postavljene zahtjeve i električne i mehaničke, te da se može pristupiti serijskoj proizvodnji. Dobiveni rezultati pokazuju da se može nastaviti rad na razvoju ove vrste generatora za vjetroagregate koji bi uključivao jedinice veće nazivne snage.

## 6. LITERATURA

[1] Z. Čulig, J. Šaban, D. Zaharija: Podloge za elektromagnetski proračun sinkronih strojeva s istaknutim polovima na rotoru za područje srednjih i malih snaga.

[2] Magnet Version 6.5. "Tutorials", Infolytica Corporation 2000.

[3] B.Tomičić: Primjena suvremenih alata u projektiranju hidrogeneratora, 7. savjetovanje HO CIGRE, Cavtat 6-10 studenog 2005.