

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

---

Zoran Milojković  
KONČAR – Generatori i motori d.d.  
[zmilojkovic@koncar-gim.hr](mailto:zmilojkovic@koncar-gim.hr)

Josip Študir  
KONČAR – Generatori i motori d.d.  
[jstudir@koncar-gim.hr](mailto:jstudir@koncar-gim.hr)

Josip Polak  
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.  
[ipolak@koncar-institut.hr](mailto:ipolak@koncar-institut.hr)

Marijan Petričić  
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.  
[petrinic@koncar-institut.hr](mailto:petrinic@koncar-institut.hr)

Zlatko Maljković  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[zlatko.maljkovic@fer.hr](mailto:zlatko.maljkovic@fer.hr)

## **PRIMJENA MAGNETSKIH KLIHOVA U STATORSKIM UTORIMA HIDROGENERATORA**

### **SAŽETAK**

Magnetski klinovi se desetljećima koriste za zatvaranje utora statorskih paketa na asinkronim i sinkronim motorima te sinkronim generatorima relativno malih snaga, do oko 5 MVA.

Primjena magnetskih klinova je opravdana iz dva bitna razloga: prvo, radi smanjenja površinskih gubitaka na rotoru zbog nazubljenosti paketa i drugo, radi smanjenja uzbudne struje zbog povećanja efektivnog zračnog raspورا. Primjenom magnetskih klinova povećava se rasipni magnetski tok statora, odnosno povećava se rasipna reaktancija zbog povećane magnetske permeabilnosti klina u odnosu na nemagnetske klinove. To se koji puta nameće kao poželjno rješenje, jer se povećanjem rasipne reaktancije statorskog namota povećavaju početne reaktancije što djeluje na smanjenje struja udarnih kratkih spojeva.

U radu su opisana iskustva stečena u primjeni magnetskih klinova na dva relativno velika generatora 34 MVA, 10,5 kV, 187,5 min<sup>-1</sup>, s aspekta tehnologije ugradnje magnetskih klinova i ostvarenih karakteristika generatora.

**Ključne riječi:** magnetski klin, statorski paket, utor, sinkroni stroj, hidrogenerator

## **APPLICATION OF MAGNETIC WEDGES FOR STATOR SLOTS OF HYDROGENERATORS**

### **SUMMARY**

Magnetic wedges are using for decades for closing stator core slots in induction – asynchronous as well as in synchronous motors and synchronous generators of relatively small outputs, approximately up to 5 MVA.

Application of the magnetic wedges is warranted from two reasons, the first in purpose of reducing rotor surface losses due to toothed stator core, and the second in purpose of reducing field current because of increasing effective air-gap. By application of magnetic wedges, leakage of magnetic flux is increased, because of increased magnetic permeability of wedges compared with nonmagnetic wedges. Sometimes it is obtruded as desirable solution, because, by increasing the stator leakage reactance, the subtransient reactances are increasing, what is acting onto decreasing of suddenly short circuit currents.

The paper describes gain experience in usage of magnetic wedges on two relative large generators 34 MVA, 10.5 kV, 187.5 rpm, from aspects of technology installation of magnetic wedges and also achieved generator characteristics.

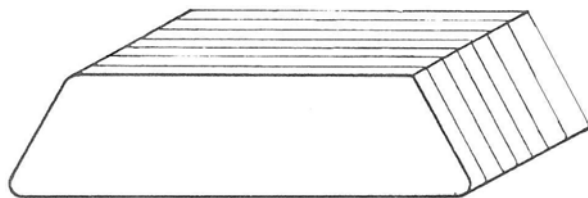
**Key words:** magnetic wedge, stator core, slot, synchronous machine, hydro-generator

## 1. UVOD

Kod asinkronih i sinkronih motora, te sinkronih generatora  $> 1$  MVA statorski namoti se izrađuju od profilnih vodiča u obliku svitaka ili štapova. Svici, donosno štapovi, ulažu se u otvorene utore, koji u odnosu na poluotvorene utore izazivaju u cirkularnom smjeru puno veću promjenu magnetske indukcije u zračnom rasporu stroja. Promjena je periodična, a perioda te promjene poklapa se s utorskim korakom. Magnetska indukcija koja ovisi o nazubljenosti statorskog paketa može se razložiti u Fourierov niz, na osnovni utorski harmonik i više utorske harmonike. S obzirom da indukcija u zračnom rasporu pulzira s utorskom frekvencijom, ona izaziva dodatne gubitke u željezu na površini rotora, ali i u prigušnom namotu. Zbog nazubljenosti statorskog paketa efektivni zračni raspor između statora i rotora se povećava za određeni iznos. Prema tome, pri izračunavanju potrebne uzbudne struje nužne za stvaranje određene indukcije u zračnom rasporu, valja računati s njegovom efektivnom vrijednošću, koja je u odnosu na stvarni zračni raspor uvećana za takozvani Carterov faktor.

Povećani površinski gubici u željezu rotora i gubici u prigušnom namotu dovode do smanjenja korisnosti električnog stroja. Isto tako, zbog povećanja efektivne vrijednosti zračnog raspora povećava se i uzbudna struja, što opet rezultira povećanjem gubitaka u stroju, odnosno dovodi do smanjenja njegove korisnosti. Ako se usporedba vrši sa strojem s nemagnetskim klinovima, primjenom magnetskih klinova, amplituda pulzacije indukcije uslijed nazubljenosti paketa se smanjuje. Smanjuje se i efektivna vrijednost zračnog raspora što dovodi do smanjenja uzbudne struje. Oba ova efekta vode ka smanjenju gubitaka u stroju, odnosno do povećanja njegove korisnosti.

No, primjenom magnetskih klinova, u odnosu na nemagnetske, povećava se poprečna magnetska vodljivost utora, što dovodi do povećanja rasipnog magnetskog toka statorskog namota, odnosno njegove rasipne reaktancije. Zbog povećanja rasipnog toka statorskog namota povećava se i ukupni magnetski tok u zubima paketa opterećenog generatora. Stoga su veći gubici u zubima paketa, a povećano zasićenje u zubima vodi na povećanje uzbudne struje i uzbudnih gubitaka. Imajući u vidu sve navedene efekte ugradnje magnetskih klinova, kod projektiranja električnog stroja valja za svaki stroj odabrati najpovoljnije rješenje.



Slika 1. - Skica poprečno lameliranog magnetskog klina



Slika 2 - Fotografija zone utor-zub (uvećano)

Prva primjena magnetskih klinova od proizvođača u Hrvatskoj, prema spoznajama autora ovog referata, je zabilježena pedesetih godina prošlog stoljeća u ondašnjem "Rade Končaru" u Zagrebu prilikom prematanja jednog motora čiji su klinovi bili od nemagnetskog materijala. Klinovi su bili načinjeni od štancanih limova, međusobno zalijepljeni (sl. 1).

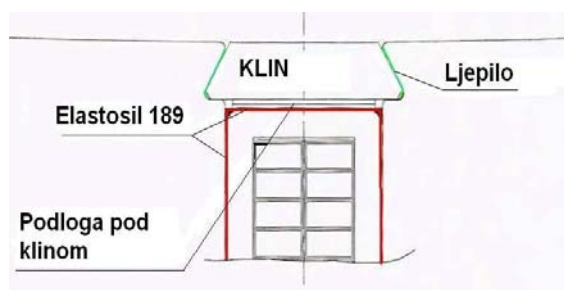
Prema [2] prvi patenti u vezi s magnetskim klinovima prijavljeni su već na prelasku s 19. na 20. stoljeće. Praktički potpuna pouzdanost u primjeni magnetskih klinova u našoj zemlji je postignuta 70-tih godina prošlog stoljeća. Prema [1], najvećim nedostacima većine izvedbi statora s magnetskim klinovima smatra se nepouzdanost mehaničkog spoja klina s limovima paketa, zbog čega dolazi do pojave rasklinjavanja i ispadanja klinova iz utora.

Prema [1], u razvoju tadašnje nove serije visokonaponskih motora za opću namjenu i za energetiku, isprobavane su različite tehnologije izrade i ugradnje klinova. Nakon eksperimentiranja s više različitih izvedbi, u tadašnjoj proizvodnji

visokonaponskih motora usvojeni su magnetski klinovi na bazi takozvanog željeznog kita. Željezni kit je gusta plastična masa, napravljena od posebno formiranih čestica mekog željeza s dodacima za punjenje i kompaktizaciju, miješanjem s epoksidnim smolama u vakuumskoj miješalici. S tako dobivenom masom, relativne permeabilnosti  $\mu_r = 7 \div 10$ , popunjavani su otvoreni utori motora u koje je prethodno uložen potpuno izrađen i ispitani statorski namot. Nakon što su utori zatvoreni, slijedio je proces otvrdnjavanja i sušenja u peći, na temperaturama do 130 °C. Struktura materijala takvog klina vidljiva je u utorskom presjeku na slici 2

## 2. UGRADNJA KLINOVA NA GENERATORIMA 34 MVA

Statori generatora 34 MVA, na kojima su primijenjeni magnetski klinovi, relativno su velikih dimenzija (promjer provrta statorskog paketa je 5,67 m) te zbog gabarita nije bila moguća primjena izolacijskog sustava u vakuum kompakt tehnici (engl. „global vacuum impregnation system“). Kod kompakt VPI sustava, svrsishodna je ugradnja prethodno izrađenih magnetskih klinova prije impregnacije po uobičajenom postupku kao za nemagnetske klinove (od čistog izolacionog materijala), jer se za vrijeme impregnacije klinovi zalijepe za paket i dijelove namota koji su s njime u kontaktu. Kohezivne sile između klinova i statorskog paketa znatno su veće od sila koje se javljaju u pogonu, tako da nema opasnosti od razlabavljenja i rasklinjavanja.



Slika 3 – Skica ugradnje klina

Kod ovih generatora, štapovi su prije ulaganja impregnirani, u ovom slučaju u vakuum tlačnoj tehnici (VPI) i ispitani. Kod njihovog ulaganja i učvršćenja u utore bilo je nužno pronaći pouzdan način učvršćenja klinova, tako da oni, bez razlabavljenja, mogu izdržati životni vijek statorskog namota. Koristeći dosadašnja iskustva iz prakse, provjereni su magnetskih klinovi iz više materijala kao i više načina njihovog učvršćenja. Što se tiče materijala, odlučili smo se za magnetski vodljivi laminat, klase izolacije F, koji se sastoji od staklenog platna kao nosioca, željeza u prahu i epoksidne smole kao

veziva. Štapovi se u utoru učvršćuju tvrdim zaklinjavanjem, pomoću traka iz tvrdog staklenog tkanja impregniranog epoksidnom smolom (HGW), različitih debljina, koje se ulažu između klina i štapa (podloge pod klinom). Da se osigura tvrdoća zaklinjavanja u utorima na duži period (životni vijek generatora), između podloge pod klinom i štapa nanosi se elastosil. Magnetski klinovi se za paket dodatno učvršćuju lijepljenjem, pomoću epoksidnog dvokomponentnog ljepila, koje se na klinove nanosi neposredno prije zaklinjavanja. Način ugradnje klinova prikazan je na slici 3.

Izbor epoksidnog dvokomponentnog ljepila izvršili smo u suradnji s proizvođačem magnetskih klinova. To je najkvalitetnije ljepilo za ovu namjenu (lijepljenje metala i HGW-a) s obzorom na mehaničku čvrstoću, otpornost na ljuštenje i termičku stabilnost. Vlačna čvrstoća primijenjenog epoksidnog ljepila je 20 MPa, takozvani modul smika (DIN 53445) je 1,2 GPa na 50 °C, odnosno 180 MPa na 100 °C. Ovakav način utorskog učvršćenja statorskog namota i magnetskih klinova smatramo najboljim za duži niz godina (životni vijek generatora) u odnosu na druge načine koje smo ispitivali (zaklinjavanje samo pomoću elastosila, lijepljenje s 4-komponentnom araditnom smjesom).

Tablica I. Magnetske značajke materijala za magnetske klinove

Magnetske značajke	Mj. jed.	Iznos						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Magnetska indukcija	T	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Relativan permeabilnost	-	2,8	2,9	2,8	2,7	2,4	2,2	1,9
Jakost magnetskog polja	A/cm	500	1000	1500	2000	2500	3000	
Magnetska indukcija	T	0,17	0,32	0,46	0,56	0,64	0,69	

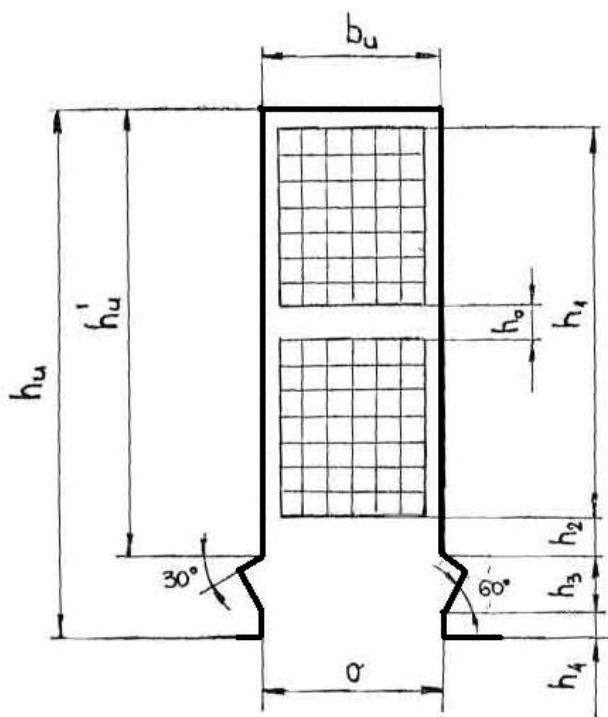
Tablica II. Ostale tehničke značajke materijala za magnetske klinove

Značajke	Ispitna metoda	Mj. Jed.	Iznos
Gustoća	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	3,5
Čvrstoća na savijanje na 23°C /150°C	ISO 178	MPa	≥ 150 / ≥ 120
Modul elastičnosti na 23°C /150°C	ISO 178	GPa	≈ 14,5 / ≈ 11,5
Otpor	IEC 167	Ω × cm	≥ 1 × 10 <sup>6</sup>
Udio željeza		%	≈ 75
Udio stakla		%	≈ 7
Udio smole		%	≈ 18
Temperaturni indeks	IEC 216	°C	≈ 155

Provedeno je ispitivanje magnetskih klinova na temperaturno starenje, na temperaturi 160 °C. Mjerena su čvrstoća na savijanje i magnetska permeabilnost, nakon 500 i 1000 h. 1000 h na 160 °C je ekvivalentno > 60000 h na 100 °C, odnosno > 200000 h na 80 °C. U dostavnom stanju savojna čvrstoća je bila 176, nakon 500 h 172, a nakon 1000 h 163 MPa. Relativna magnetska permeabilnost je mjerena u tri točke magnetske indukcije: 0,5 , 0,7 i 1,0 T. Ovdje navodimo samo vrijednosti za 0,5 T. U dostavnom stanju je bila 2,4 , nakon 500 h 2,31 , a nakon 1000 h 2,28 (r. j.).

Ocjena je da s povišenjem temperature nema degradacije magnetskih svojstava i savojne čvrstoće, već je prisutno samo prirodno starenje materijala. Zbog toga se može očekivati jednak vijek trajanja magnetskih klinova i izolacijskog sustava kao i kod primjene nemagnetskih klinova.

## 2. UTJECAJ MAGNETSKIH KLINOVA NA KARAKTERISTIKE GENERATORA – IZRAČUN



Slika 4 – Otvoreni utor - dimenzije

Kao što je rečeno u uvodu, magnetski klinovi u mnogo čemu mijenjaju karakteristike generatora: Carterov faktor te u vezi s njim i efektivni iznos zračnog raspora, amplitudu magnetske indukcije uslijed nazubljenosti statorskog paketa i s njom u vezi površinske gubitke na rotoru, magnetsku vodljivost utora te s njom u vezi rasipnu reaktanciju statorskog namota. Kako, prema opće poznatoj nadomjesnoj shemi za sinkrone strojeve, rasipna reaktancija ima udjela i u svim ostalim reaktancija (sinkronim, prelaznim i početnim u „d“ i „q“ osi), mijenjaju se i njihove vrijednosti.

Rasipna reaktancija statorskog namota (u relativnim jedinicama), prema opće poznatoj teoriji može se izračunati iz produkta takozvanog faktora reaktancija ( $K_r$ ) i magnetske vodljivosti statorskog namota  $\lambda_{SN}$ , koja se dobiva zbrajanjem utorske vodljivosti  $\lambda_u$ , vodljivosti glava namota  $\lambda_{gl}$ , i vodljivosti kruna zuba. Uz pomoć [9] i [10] rasipna reaktancija statorskog namota  $X_l$  je:

$$X_l = \lambda_{SN} K_r = (\lambda_u + \lambda_z + \lambda_{gl}) K_r \quad (1)$$

gdje je:

$$K_r = \frac{\xi_{n1} A}{\sqrt{2} \cdot B_{10}} \text{ faktor reaktancija, Am / Vs} \quad (1a)$$

$$\lambda_u = C_x k_x \lambda'_u, \text{ magnetska vodljivost utora, Vs/Am} \quad (1b)$$

$$\lambda'_u = \frac{h_1}{3b_u} + \frac{h_2}{b_u} + \frac{h_3 + h_4}{b'_u} - \text{relativna magnetska vodljivost utora} \quad (1c)$$

$$\lambda_z = C_x k_x \lambda'_z, \text{ rasipna vodljivost krune zuba, Vs/Am} \quad (1d)$$

$$\lambda'_z = 0,07 \frac{b_{z20}}{3\delta_0} + 0,2 - \text{relativna rasipna vodljivost krune zuba} \quad (1e)$$

$$\lambda_{gl} = 1,37 \cdot 10^{-6} \frac{\tau_p}{L} \left( \frac{l_{gl}}{\tau_p} - 0,64 \frac{y}{Q} \right) - \text{rasipanje glava namota} \quad (1f)$$

$$C_x = \frac{7,9 \cdot 10^{-6}}{\xi_{n1}^2 Q} \text{Vs/Am} \quad (1g)$$

$$k_x = 0,31 + 0,69 \frac{y}{Q} \quad (1h)$$

- $b'_u$  - širina utora u području klina reducirana ovisno o relativnoj magnetskoj permeabilnosti klina i zasićenja glave zuba
- $\xi_{n1}$  – faktor statorskog namota za osnovni harmonik,
- $B_{10}$  – amplituda osnovnog harmonika magnetske indukcije u zračnom rasporu, T
- $y$  – korak statorskog namota
- $Q$  – broj statorskih utora na pol
- $b_{z20}$  – širina zuba na provrtu statorskog paketa
- $\delta_0$  - širina zračnog raspora u osi pola
- $\tau_p$  - širina polnog koraka na provrtu statorskog paketa
- $L$  – dužina statorskog paketa
- $l_{gl}$  - dužina glava statorskog namota

Ostale dimenzije koje se navode u prethodnim formulama vidljive su iz skice na slici 4.

S obzirom da je rasipanje krune zuba relativno malog udjela u ukupnom rasipanju statorskog namota, ovdje ga nećemo detaljno razmatrati, mada, promatrano zasebno, njegovo povećanje je poprilično.

Rasipanje glava namota se ne mijenja s promjenom materijala klinova, te stoga niti njega nećemo ovdje razmatrati.

Na ovom generatoru, rasipna reaktancija statorskog namota je 15,6 % ako su klinovi iz nemagnetskog (čisto izolacijskog materijala), odnosno 17,87 % ako su klinovi iz magnetskog materijala ( $\mu_r = 2,8$ ), što je povećanje za oko 15 %.

Za izračun Carterovog faktora u literaturi se mogu naći formule, koje su uglavnom poznate i dovoljno precizne za praktičnu uporabu, tako da ih ovdje nećemo navoditi. Za njegovo izračunavanje, u slučaju kada se koriste klinovi iz magnetskog materijala, pretpostavili smo da se efektivni iznos otvora utora sve više smanjuje što je relativna permeabilnost klina veća, tako da smo stvarni otvor utora nadomjestili s efektivnim iznosom koji je u odnosu na stvarni manji za određeni iznos, ovisno o zasićenju i magnetskim prilikama. Uz tu pretpostavku Carterov faktor se smanjio sa 1,068 (klinovi iz nemagnetskog materijala) na 1,011 (klinovi iz magnetskog materijala). Uzimajući u obzir smanjenje Carterovog faktora, efektivna vrijednost zračnog raspora smanjena je za 5,4 %. Sukladno tome smanjila se i uzbudna struja potrebna za magnetiziranje zračnog raspora, to jest u istom postotnom iznosu. Uzbudna struja kod nazivnog opterećenja smanjila se za 2,88 %, a ohmski gubici u uzбудnom namotu za 5,7 %. To smanjenje je samo s naslova smanjenja uzbudne struje. Stvarno smanjenje gubitaka u uzбудnom namotu je i veće od navedenog zbog niže temperature uzбудnog namota.

S obzirom da se reakcija armaturnog namota ne mijenja s promjenom materijala klinova statorskog paketa, uzbudna struja kratkog spoja se nije promijenila. Međutim, kako se je smanjila uzbudna struja praznog hoda, sinkrone reaktancije u uzdužnoj i poprečnoj osi izražene u relativnim

jedinicama su se povećale s ovog naslova za oko 5 %. Ako se tome doda i povećanje zbog udjela rasipne reaktancije, onda je ukupno povećanje sinkronih reaktancija (u r.j.) oko 8 %.

Proračunska vrijednost nezasićene prelazne reaktancije u uzdužnoj osi  $X'_d$  povećala se s 28,24 na 30,51 %, a zasićene s 28,24 na 30,51 %. S obzirom da uzdužna reaktancija u poprečnoj osi jednaka je sinkronoj reaktanciji  $X_q$ , to jest povećala se za oko 8 %.

Početne reaktancije u uzdužnoj i poprečnoj osi su se također povećale, ali samo zbog povećanja rasipne reaktancije statorskog namota. Nezasićena vrijednost uzdužne reaktancije  $X''_d$ , prema izračunu je povećana s 19,6 na 21,87 %, a zasićena vrijednost s 18,8 na 21,07 %. Poprečna reaktancija  $X''_q$ , prema izračunu je povećana s 24,4 na 26,67 % - nezasićena vrijednost, odnosno s 23,74 na 26,01 % - zasićena vrijednost.

Što se tiče gubitaka snage, ugradnjom magnetskih klinova neki se gubici mijenjaju.

Prema izračunu, od gubitaka u željezu u praznom hodu jedino se rotorski površinski gubici mijenjaju, tako da su kod izvedbe s magnetskim klinovima manji za oko 16 kW, odnosno ukupni gubici u željezu u praznom hodu se smanjuju s 121,7 na 106,4 kW.

Gubici kratkog spoja i u bakru i željezu su praktično bez promjena, odnosno povećanje je neznatno, s 239 kW u izvedbi s nemagnetskim klinovima na 241 kW u izvedbi s magnetskim klinovima. To povećanje je samo zbog utjecaja trećeg harmonika u zubima statora, s 26,1 kW na 28,1 kW.

Već smo prije kazali da ugradnja magnetskih klinova se odražava na smanjenje uzbudne struje, pa prema tome i na gubitke u uzbudnom namotu. Gubici su se smanjili s 107,8 na 102,3 kW (računato na 75 °C), što je smanjenje za 5,5 kW.

Gubici ventilacije i gubici u ležajima se ne mijenjaju zbog ugradnje magnetskih klinova. Međutim, ako bi se mogla mijenjati i geometrija ventilatorskih lopatica, sami ventilatori i svi elementi ventilacijskog kruga, onda bi se zbog manjih gubitaka moglo koji kilovat uštedjeti i na ventilaciji, a da nadtemperature aktivnih dijelova ostanu na istim vrijednostima. Ovako, bez promjena ventilacije, ostati će isti ventilacijski gubici, ali će temperature aktivnih dijelova biti niže za koji °C.

Sveukupno, gubici snage su manji za 18,8 kW.

Pored navedenog, promjene su i u kutu opterećenja, sinhronizirajućem momentu i sinkronizirajućoj snazi. Te promjene su neznatne u ovom slučaju, ali su ipak prisutne. Kut opterećenja se povećao za 0,81 °el, odnosno za 0,014 radijana.

### 3. IZMJERENE VELIČINE

Na jednom od dva generatora 34 MVA, 10,5 kV, 187,5 min<sup>-1</sup> izvršena su mjerenja s nemagnetskim i magnetskim klinovima. Mjereni su gubici snage, reaktancije i ostale karakteristične veličine.

Gubici u željezu u praznom hodu s nemagnetskim klinovima su 143,95 kW (temperatura paketa je 34,9 °C), odnosno 124,9 kW (temperatura paketa je 39,6 °C). Isti gubici na istom generatoru s magnetskim klinovima su 111,7 kW (temperatura paketa je 49,2 °C), odnosno 107 kW (temperatura paketa 57,4 °C). Navedene razlike u temperaturama paketa sa magnetskim i nemagnetskim klinovima su uzrokovane razlikama u protoku vode kroz hladnjake zraka generatora i temperaturama ulazne vode.

Gubici u bakru uzbudnog namota su 105,7 kW s nemagnetskim klinovima, odnosno 97,45 kW s magnetskim klinovima. Vrijednosti struja za nazivnu radnu točku su dobivene iz krivulja regulacije, jer tijekom mjerenja nisu bili ostvareni uvjeti nazivnog opterećenja. U prvom slučaju uzbudna struja je 655,4 A, u drugom 630,4 A.

Gubici kratkog spoja su praktično nepromijenjeni i iznose 224,4 kW.

Ostali gubici, obzirom na materijal klina, su nepromijenjeni.

Rasipna reaktancija statorskog namota s nemagnetskim klinovima je 11,76 %, a s magnetskim klinovima 16,73 %, što je povećanje oko 5 %.

Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi (zasićena vrijednost) dobivena iz omjera uzbudne struje kratkog spoja i uzbudne struje praznog hoda je 104,5 % za nemagnetske, 107,04 % za magnetske.

Prelazne i početne reaktancije u izvedbi s nemagnetskim klinovima nisu mjerene, a u izvedbi s magnetskim klinovima udarni kratki spoj je napravljen samo u jednoj točki, pri linijskom naponu 5040 V (48 % nazivnog napona), tako da to mjerenje treba uzeti s rezervom. Početna reaktancija u uzdužnoj osi, dobivena grafičkom razradom oscilograma je 33,5 %. Početna reaktancija iz pokusa napajanja parova faza je 30,6 %.

Kod generatora A, uzбудna struja praznog hoda s nemagnetskim klinovima je 343,5 A, odnosno 337,8 A s magnetskim klinovima. Generator B je rađen samo s magnetskim klinovima, a njegova izmjerena uzbudna struja praznog hoda je 334,67 A.

Uzbudna struja kratkog spoja s nemagnetskim klinovima je 359 A odnosno 361,6 A s magnetskim klinovima. Na generatoru B izmjerena je uzbudna struja kratkog spoja 360,9 A.

Faktor odstupanja valnog oblika linijskog napona izmjenjenog na stezaljkama naponskog mjernog transformatora (mjerenje obavljeno prema IEEE 115) je 0,58 % s nemagnetskim klinovima, a 1,19 % s magnetskim klinovima. Prema američkoj regulativi, faktor odstupanja valnog oblika („Deviation factor“) je maksimalno dozvoljen 10 % (ANSI C50.12 -82, NEMA MG 5.1-1974), prema donedavna važećem IEC 60034 odstupanje trenutne vrijednosti naponskog vala od virtualne sinusoide ne smije biti više od 5 % tjemene vrijednosti napona. U sadašnjem IEC-u oblik naponskog vala je definiran preko ukupnog harmonijskog izobličenja linijskog napona („Total harmonic distortion“) koji može biti maksimalno 5 %.

Takozvani telefonski harmonijski faktor (THF) je 0,032 % s nemagnetskim, odnosno 0,259 % s magnetskim klinovima. Razlika je zbog značajnijeg udjela nekih od harmonika, na primjer treći harmonik u drugom slučaju je veći no što je u prvom. No iako su međusobne razlike velike, u oba slučaja ovaj faktor je znatno bolji od ugovorom definiranog 1,5 %.

#### **4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA NA IZVEDENIM GENERATORIMA**

Iz navedenih rezultata ispitivanja na izvedenim generatorima (2 kom) može se zaključiti da su ispitane vrijednosti u velikoj mjeri prema očekivanju, odnosno u skladu s izračunatim vrijednostima.

Možda smanjenje uzbudne struje praznog hoda nije onoliko koliko je proračunom ustanovljeno, ali treba imati u vidu da je zamjena nemagnetskih klinova s magnetskim izvršena nakon što je rotor izvađen iz statora. Samo vađenje i ponovno stavljanje rotora u provrt statora može rezultirati promjenom zračnog raspora i po obodu i po dužini stroja (koncentričnost rotora i statora nisu jednake prije i nakon vađenja rotora).

Smanjenje uzbudne struje kod nazivnog opterećenja je u skladu s proračunom: 630,4 A u izvedbi s magnetskim klinovima u odnosu na 655,4 A u izvedbi s nemagnetskim klinovima. Smanjenje je 3,8 % (prema proračunu smanjenje je 2,88 %).

Sukladno smanjenju uzbudne struje, smanjeni su i gubici u uzbuđnom namotu za oko 8 % (prema proračunu smanjenje je oko 6 %).

Glede gubitaka snage, na temelju provedenih ispitivanja ne može se sa sigurnošću tvrditi koliki je udio magnetskih klinova na smanjenju gubitaka. Naime, temperature paketa u ispitivanjima s magnetskim i nemagnetskim klinovima nisu potpuno jednake. Za obje izvedbe rađena su dva mjerenja s različitim protocima vode. Prvo mjerenje je s protokom vode prilagođenim da porast temperature rashladne vode bude < 6 K. Drugo mjerenje je izvršeno s prigušenim protokom vode, s namjerom da se temperatura paketa prilagodi pogonskoj temperaturi s nominalnim opterećenjem. Međutim i kod ovog mjerenja temperatura paketa je bila niža od radne, ali su evidentirani manji gubici u željezu kada je temperatura paketa viša. U izvedbi s nemagnetskim klinovima smanjenje je znatno izraženije nego što je kod izvedbe s magnetskim klinovima. Mišljenje autora je, da to značajnije smanjenje gubitaka u izvedbi s nemagnetskim u odnosu na izvedbu s magnetskim klinovima je zbog površinskih gubitaka na rotoru, kojih u izvedbi s magnetskim klinovima gotovo da i nema. Samo smanjenje gubitaka u željezu s povišenjem temperature statorskog paketa i površine rotora je zbog povećanja opora željeza uslijed čega dolazi do smanjenja jakosti vrtložnih struja, jer se inducirani napon u promatranoj petlji vrtložnih struja ne mijenja. No, unatoč što se ne može sa sigurnošću tvrditi koliki je udio magnetskih klinova na smanjenju gubitaka u željezu, zbog razlike u temperaturi paketa s magnetskim i nemagnetskim klinovima, ipak se može reći da je okvirno smanjenje u ovom slučaju  $15 \div 20$  %, što je vrlo značajno s obzirom na uštedu energije. Ako se ovo razmatranje generalizira i na druge strojeve s otvorenim utorima, može se reći da smanjenje gubitaka u željezu može biti i veće i manje od vrijednosti dobivenih na ovim generatorima. Koliko će ono biti, ovisiti će o odnosima otvora utora i zračnog raspora i o magnetskom (indukcija u zračnom rasporu) i električnom opterećenju (linijska gustoća struje na provrtu statorskog paketa) koja određuju amplitudu pulsirajuće magnetske indukcije.

Izmjereno povećanje rasipne reaktancije statorskog namota je veće od izračunatog. Kod generatora s nemagnetskim klinovima izmjerena rasipna reaktancija (11,76 %) znatno je manja od izračunate (15,6 %). Kod generatora s magnetskim klinovima izmjerena rasipna reaktancija je također manja od izračunate, ali ne tako značajno: 16,73 % izmjereno, 17,87 % izračunato.

Znatnije povećanje rasipne reaktancije u odnosu na izračunato, može biti, zbog razlike u relativnoj magnetskoj permeabilnosti. Isto tako mogući uzrok znatnijeg povećanja rasipne reaktancije u

odnosu na izračunato je razlika između proračunske (deklarirane) i stvarne vrijednosti relativne magnetske permeabilnosti.

Naime, računato je s  $\mu_r = 2,8$  (prema kataloškim podacima proizvođača), međutim prema nekim autorima, za slučajeve magnetskih klinova koji imaju više od 50 % volumena željeza,  $\mu_r$  je > 5, pa čak do 10.

Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi, zasićena vrijednost, za generator s nemagnetskim klinovima je 104,5 %, a za generator s magnetskim klinovima je 107,4 %. Povećanje je oko 3 %. Prema izračunu očekivano povećanje je 8 % što se ipak nije dogodilo.

Kod početnih reaktancija izmjereno povećanje je iznad izračunatog. Prema izračunu početna reaktancija  $X''_d$  se trebala promijeniti s 18,8 na 21,1 %, a na generatoru s magnetskim klinovima izmjereno je: 33,5 % iz oscilograma trofaznog kratkog spoja i 30,6% iz pokusa napajanja parova faza. Na generatoru s nemagnetskim klinovima ova mjerenja nisu obavljena. Značajno odstupanje početne reaktancije na generatoru s magnetskim klinovima objašnjavamo time da je mjerenje rađeno sa sniženim naponom i u samo jednoj točki, tako da nije bilo moguće ekstrapolacijom ustanoviti kolika je početna reaktancija pri nazivnom naponu. Zbog sniženog napona zona kruna zubi statorskog paketa i zona prigušnog kaveza su nezasićene, te se stoga magnetski rasipni tok prigušnog kaveza zatvara i preko zračnog raspora i preko zuba statora. Smatramo da bi se ova slika rasipnog toka pri punom nazivnom naponu promijenila. Što se samih početnih reaktancija tiče, primjena magnetskih klinova ima pozitivan predznak jer se njihovom primjenom početne reaktancije povećaju, što doprinosi smanjenju početnih (udarnih) struja kratkog spoja i omogućava primjenu prekidača manjih rasklopnih struja (snaga). Ovo je naročito poželjno kod strojeva koji imaju relativno niske početne reaktancije, kao npr. brzohodni hidrogeneratori. No, treba biti svjestan da magnetski klinovi također doprinose povećanju prelaznih i sinkronih reaktancija. Prelazne reaktancije utječu na dinamičku, a sinkrone na statičku stabilnost stroja. S povećanjem ovih reaktancija smanjuje se stabilnost stroja. Za ove generatore izrađena je studija stabilnosti pogona u postojećem – realnom elektroenergetskom sustavu uzimajući najnepovoljniju konfiguraciju mreže. Stabilnost je analizirana s nezasićenim reaktancijama generatora  $X_d = 1,22$ ,  $X_q = 0,72$ ,  $X'_d = 0,589$ ,  $X''_d = 0,335$ ,  $X''_q = 0,37$  (r.j.), uzimajući u obzir i varijaciju napona od nazivnog +10, - 5 %. Studija je pokazala da i s ovakvim parametrima generatori udovoljavaju zahtjevima Mrežnih pravila elektroenergetskog sustava.

## 5. POGONSKA ISKUSTVA GENERATORA S PRIMJENJENIM MAGNETSKIM KLINOVIMA

Prvi od dva generatora 34 MVA, 10,5 kV, 187,5 min<sup>-1</sup> s ugrađenim magnetskim klinovima je u pogonu od rujna 2005. godine. Drugi generator, također s ugrađenim klinovima u pogonu je od studenog 2007. godine.

U svibnju 2006. godine, na prvom generatoru izvršen je pregled svih klinova i kompletno učvršćenje namota. Nije došlo do popuštanja učvršćenja ili razlabavljenja klinova.

Oba generatora od puštanja u pogon rade u projektiranim pogonskim uvjetima. Sa strane korisnika nije bilo nikakvih pritužbi ili primjedbi. S obzirom da je prvi generator u komercijalnom pogonu već pune četiri godine, te drugi dvije godine, može se reći da je primijenjeni način učvršćenja magnetskih klinova sa stajališta pogonske sigurnosti u potpunosti prihvatljiv.

## 6. ZAKLJUČAK

Primjena magnetskih klinova u svrhu smanjenja gubitaka u željezu, prije svega površinskih gubitaka na rotoru je opravdana, pogotovu kod generatora s relativno nepovoljnim odnosom širine otvora utora prema širini zračnog raspora.

Primjena magnetskih klinova je opravdana i zbog smanjenja efektivnog iznosa zračnog raspora te stoga i Carterovog faktora u odnosu na nemagnetske klinove, uslijed čega je manja i uzbudna struja generatora. Zbog manje uzbudne struje manji su i gubici snage u uzbudnom namotu.

Iz prethodna dva razloga ukupni gubici snage u generatoru su manji, što predstavlja značajnu uštedu električne energije.

U slučajevima kada smo, izborom prekidača, prisiljeni početne struje kratkih spojeva zadržati u određenim granicama, jedno od rješenja može biti i ugradnja magnetskih klinova u utore statorskog paketa. Njihovom se primjenom povećavaju početne reaktancije, odnosno smanjuju početne struje kratkih spojeva.

Primjenom magnetskih klinova povećavaju se sinkrone i prelazne reaktancije te zbog toga statička i dinamička stabilnost generatora može biti upitna, što valja provjeriti.



U pogledu vrste magnetskih klinova, kako glede materijala tako i njihovih izvedbe, te u pogledu načina učvršćenja klinova postoje više mogućnosti koje valja unapređivati i pratiti.

Na konkretnom slučaju ugradnje magnetskih klinova na dva generatora snage 34 MVA, na temelju pogonskog iskustva, s obzirom da je prvi generator u komercijalnom pogonu već pune četiri godine, a drugi generator dvije godine, može se reći da je primijenjeni način učvršćenja magnetskih klinova sa stajališta pogonske sigurnosti u potpunosti prihvatljiv.

## 7. LITERATURA

- [1] D. Ban, D. Rodinis, Nediljko Knezović: Poboljšanje karakteristika asinhronih motora za energetiku ugradnjom utorskih klinova iz feromagnetskog materijala, R 11.30, XVIII savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije (CIGRE), Budva, 1987.
- [2] V. Teodorović : O feromagnetskim zatvaračima žljebova električnih mašina naizmjenične struje, Elektrotehnika. 1973, br.4
- [3] B. J. Chalmers et alri.: Performance of some magnetic slot Wedges in an open-slot induction motor. PROC.IEE, Vol. 114, 1967. No 2.
- [4] H. Keuth: Magnetischer PROTOFER-Nutverschluss für elektrische maschinen, Siemens Zeitschrift, 1970. Heft 12. 736-740.
- [5] W. Nürnberg, R. Hanitsch, J. Woelken: Magnetische Nutverschlusskeile in elektrischen Maschinen, VDE/IEC Symposium: Eigenschaften elektrisch leitender magnetischer Materialien (1971).
- [6] A. Gahleitnor: Eine neue Reihe von Drehstrom-Asynchronmotoren großer Leistung, Siemens-Zeitschrift. 40 (1966). Beiheft "Motoren für industrielle Antriebe".
- [7] I. Kovačević, A. Streck: Neue Reihe oberflächengekühlter Drehstrom-Käfigmotoren großer Leistung, Brown Boveri Mitteilungen, Band 57 (1970) H. 6/7.
- [8] T. Mikecin, M. Mađerčić: Poboljšanje faktora korisnog djelovanja asinkronog motora primjenom statorskih utorskih klinova iz feromagnetskog materijala, 2. savjetovanje HK CIGRE Šibenik – Primošten, 1995, R, 15.03
- [9] W. Schuisky: Berechnung elektrischer Maschinen, Springer-Verlag, Beč, 1960.
- [10] A. I. Voljdek: Električeskie mašiny, Energija, Lenjingrad, 1978.