

## Proračun i analiza graničnih režima sinhronog generatora s obzirom na pregrevanja krajnjih paketa limova statora

Miloje Kostić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[mkostic@ieent.org](mailto:mkostic@ieent.org)

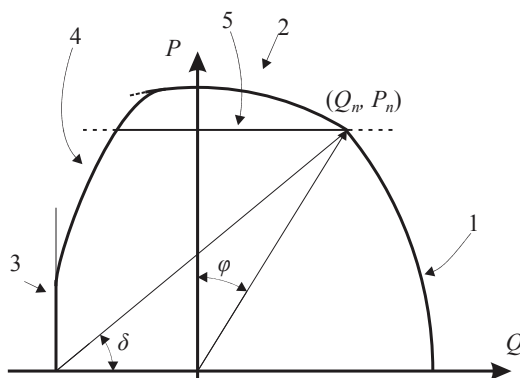
**Kratak sadržaj:** U radu je predložen i opisan pojednostavljeni postupak za definisanje graničnih režima na pogonskom dijagramu generatora s obzirom na zagrevanje krajeva statora. Prvo je sprovedena pojednostavljena analiza rasutog aksijalnog fluksa koji prodire u krajnje limove statora i odgovarajućih gubitaka snage. Potom je data analiza eksperimentalnih istraživanja povišenja temperature krajeva statora i kvalitativno-kvantitativna analiza efekata. Opisan je pojednostavljeni postupak za definisanje graničnih režima s obzirom na zagrevanje krajeva statora, a to je ilustrovano na primeru konstruisanja odgovarajuće linije na pogonskom dijagramu za razmatrani generator prividne snage 727 MVA (B2). Navedena linija konstruisana po predloženom postupku se približno poklapa sa odgovarajućom linijom koja je konstruisana na osnovu složenih i dugotrajnih eksperimentalnih ispitivanja proizvođača i korisnika generatora. Na osnovu dobijenih rezultata i provera se pokazuje da je predloženi metod verifikovan pa se primena ovog jednostavnijeg postupka preporučuje za upotrebu uporedo sa drugim postupcima, bar, kada su u pitanju slični sinhroni generatori u Elektroprivredi Srbije.

**Ključne reči:** turbogenerator, pogonski dijagram, zagrevanje krajeva statora

### 1. Uvod

Pored nominalnih parametara generatora:  $U_n$ ,  $I_n=I_{a,n}$ ,  $S_n=1.73U_nI_{a,n}$ ,  $\cos\varphi_n$  (ili  $P_n=S_n\cos\varphi_n$  i  $Q=S_n\sin\varphi_n$ ) i nominalne struje pobudnog namotaja (rotora)  $I_m$ , zadaju se i reaktanse koje karakterišu statički režim generatora. Generatori ne mogu biti u potpunosti definisani sa navedenim nominalnim

parametrima. Uobičajeni ograničavajući kriterijumi za režime rada generatora se karakterišu i definišu preko pogonskog dijagrama, sl.1.



Slika 1. Pogonski dijagram generatora sa cilindričnim rotorom (turbogeneratora) kolom

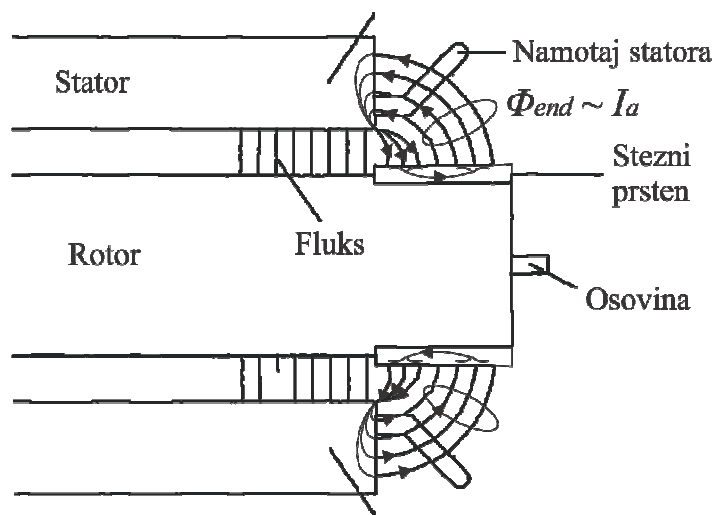
Pogonski dijagram na sl.1 se sastoji od četiri linije [1, 2, 3, 4, 5]:

- (1) U oblasti visokih reaktivnih snaga,  $Q_G \geq Q_{G,n}$ , ograničavajući kriterijum je nominalna struja namotaja pobude ( $I_f = I_{f,n}$ ), linija 1.
- (2) Nominalna struja namotaja statora ( $I_a = I_{a,n}$ ) definiše deo kružne linije 2 poluprečnika  $S = S_n$  ( $S_n$  je nominalna prividna snaga generatora u MVA), pa apscisa bilo koje tačke na dijagramu definiše aktivnu ( $P$ ) a ordinata odgovarajuću reaktivnu snagu ( $Q$ ) generatora.
- (3) Data linija stabilnosti mašine je definisana iz kriterijuma da je ugao snage  $\delta \leq 90^\circ$ , linija 3.
- (4) Do pregrevanja krajnjih paketa limova statora dolazi kada aksijalni magnetni fluks pređe određenu vrednost što se često dešava kada je generator opterećen reaktivnom kapacitivnom snagom, pa je to naznačeno odgovarajućom linijom 4.

Granične linije s obzirom na granične temperature (namotaja statora, namotaja pobude ili krajnjeg paketa limova) bitno zavise od funkcionisanja rashladnog sistema i mogu biti promenjene u eksploataciji. Na pogonskom dijagramu (sl. 1) je naznačena i nominalna snaga generatora, linija 5.

Problemi sa pregrevanjem krajeva jezgra statora se, po pravilu, uočavaju kada je generator (pored aktivne) opterećen sa kapacitivnom reaktivnom snagom, tj. u potpobuđenom režimu. Osnovni razlog za dodatno povišenje temperature krajeva jezgra statora je aksijalni fluks ( $\Phi_{end}$ ) koji pod uglom od  $90^\circ$  prodire u krajnje limove statora i indukuje vrtložne struje koje ih dodatno zagrevaju, sl.2. Iako je gustina fluksa  $B_{end} < B_{r-j}$  ( $B_{r-z}$  – gustina radijalnog fluksa kroz zupce statora) javljaju se značajni gubici u gvožđu tih limova pošto je vrlo velika površina limova kroz koju upravno prodire aksijalni fluks. Na intenzitet tog fluksa utiče i zasićenje magnetnog kola koje obrazuje fluks  $\Phi_{end}$ , a najviše zasićenje krajeva zubaca statora. Pošto su napon i elektromotorna sila iza reaktanse rasipanja najmanji u režimu sa kapacitivnom reaktivnom snagom, to je i zasićenje zubaca statora najmanje u tom režimu. Sa tim

stavom se slažu skoro svi autoru u udžbeničkoj i naučnoj literaturi. Kada je u pitanju dominantni uzročnik ove pojave, tj. dominantna magnetopobudna sila (MPS) za stvaranje aksijalnog fluksa, do delimičnog neslaganja dolazi već i u udžbeničkoj literaturi. Tako se u [1, 2] navodi da pomenuti fluks potiče od MPS namotaja statora ( $MPS_{stat}$ ) i MPS namotaja rotora ( $MPS_{rot}$ ), a povećana vrednost  $B_{end}$  je posledica manje fazne razlike između  $MPS_{stat}$  i  $MPS_{rot}$ . U [3] se navodi da ovo polje predstavlja rasuto polje namotaja rotora  $\Phi_{end-rot}$  i da je osnovni fluks kroz zupce ( $\Phi_{ef}$ ) dodatno uvećan zbog manje vrednosti rezultantnog fluksa ( $\Phi_{ef} + \Phi_{end-rot}$ ) pri kapacitivnom opterećenju. Naša eksperimentalna istraživanja dovode u sumnju oba ova stava o poreklu dominantnog dela aksijalnog fluksa. Tačnije, zaključuje se da dodatni aksijalni fluks, koji je posledica opterećivanja mašine od praznog hoda do razmatranog režima ( $\Phi_{end,a} = \Phi_{end} - \Phi_{end,0}$ ), u najvećoj meri zavisi od fluksa bočnog rasipanja namotaja statora kao i kod asinhronih motora [6, 7].



Slika 2. Aksijalni fluks od rasipanja ( $\Phi_{end}$ ) na krajevima statora

## 2. Kvantitativna i kvalitativna analiza rasutog aksijalnog fluksa i gubitaka snage u krajnjim limovima statora

Ova pojednostavljena analiza se zasniva na dve pretpostavke:

- da aksijalni fluks ( $\Phi_{end} = \Phi_{end,a}$ ) kroz krajnje limove statora (sl.2), koji je posledica opterećivanja mašine od praznog hoda do razmatranog režima ( $\Phi_{end,a} = \Phi_{end} - \Phi_{end,0}$ ), u najvećoj meri predstavlja fluks bočnog rasipanja namotaja statora,
- da je magnetno kolo kola koje obrazuje fluks  $\Phi_{end}$  (zajedno sa  $\Phi_{ef}$ ), približno, zasićeno na delu zubaca statora kao magnetno kolo za osnovni fluks ( $\Phi_{ef}$ )

Polazi se od činjenice da značajan aksijalni fluks postoji i u režimu praznog hoda ( $\Phi_{end0}$ ) što znači da potiče od pobudne struje rotora [8], i praktično zavisi od magnetnog fluksa u međugvožđu mašine [1], ali se sa opterećivanjem generatora dodatno povećava ( $\Phi_{end0} + \Phi_{end,a}$ ).

Kako je fluks  $\Phi_{end0}$  u fazi sa rezultatnom pobudnom strujom koja prednjači za  $90^\circ$  fazoru napona generatora ( $\underline{U}_a$ ), komponenta fluksa  $\Phi_{end,a}$  je u fazi sa fazorom struje generatora koja zaostaje za ugao ( $\varphi$ ) iza  $\underline{U}_a$ , tako da ugao između fazora  $\Phi_{end0}$  i  $\Phi_{end,a}$  iznosi ( $90 + \varphi$ ), pa aritmetička vrednost ukupnog aksijalnog fluksa,  $\Phi_{en} = \Phi_{end0} + \Phi_{end,a}$ , iznosi:

$$\Phi_{end} = \sqrt{\Phi_{end0}^2 + \Phi_{end,a}^2 - 2\Phi_{end0} \cdot \Phi_{end,a} \cdot \sin \varphi} \quad (1)$$

gde je

$\varphi > 0$  (i  $\sin \varphi > 0$ ) za reaktivno opterećenje induktivnog karaktera,

$\varphi < 0$  (i  $\sin \varphi < 0$ ) za reaktivno opterećenje kapacitivnog karaktera, i

$\varphi = 0$  (i  $\sin \varphi = 0$ ) za opterećenje generatora sa čisto aktivnom snagom.

Na osnovu izraza (1) se može kvalitativno objasniti zašto su vrednosti fluksa  $\Phi_{end}$  (i odgovarajućih gubitaka snage) najveće u režimu kapacitivnih opterećenja kada je  $\varphi < 0$ , tj. kada je  $\sin \varphi < 0$ . Poseban interes predstavljaju režimi sa

- sa čisto aktivnom snagom  $\varphi = 0$ , i
- režimi sa kapacitivnim reaktivnim opterećenjem,  $(-0.1) \leq \sin \varphi \leq 0$ .

Na osnovu izraza (1) se zaključuje da su tada najveće vrednosti ukupnog aksijalnog fluksa,  $\Phi_{en} = \Phi_{end0} + \Phi_{end,a}$ , i da približno iznosi

$$\Phi_{end} \approx \sqrt{\Phi_{end0}^2 + \Phi_{end,a}^2} \quad (2)$$

Drugi koristan zaključak, koji se izvodi na osnovu izraza (2), upućuje na mogućnost da se ukupni gubici u krajnjim limovima statora mogu posmatrati kao superpozicija odgovarajućih komponenti gubitaka u praznom hodu i komponente gubitaka koji se javljaju sa opterećenjem mašine.

Vrednosti napona, a time osnovnog i aksijalnog rasutog fluksa, se vrlo malo menjaju u režimu sa datom aktivnom snagom, tako da je komponenta odgovarajućih gubitaka u praznom hodu približno stalna. To znači da je pregrevanje krajnjih limova statora uslovljeno (približno) samo sa komponentom gubitaka koji se javljaju sa opterećenjem mašine. Time se pojednostavljuje analiza i omogućava da se definišu dozvoljena maksimalna opterećenja:  $P$  i  $Q_C = f_C(P)$  ili  $Q_C$  i  $P = f_P(Q_C)$ , s obzirom na granične temperature pregrevanja krajnjih limova statora, u zavisnosti samo od komponente

gubitaka koja potiče od komponente aksijalnog fluksa ( $\Phi_{end,a}$ ) koja se javlja sa opterećenjem mašine.

Treba pretpostaviti da komponenta dodatnog aksijalnog fluksa koja se javlja sa opterećenjem ( $\Phi_{end,a}$ ) predstavlja vektorski zbir aksijalnih flukseva rasipanja krajeva namotaja statora ( $\Phi_{end,st}$ ) i krajeva namotaja rotora ( $\Phi_{end,rot}$ ). Pri čemu je prvi fluks srazmeran struji opterećenja statora ( $\Phi_{end,st} \sim I_a$ ) a drugi komponenti pobudne struje koja kompenzuje magnetnu reakciju indukta ( $I_{af}$ ), tj.  $\Phi_{end,rot} \sim I_{af}$ , pa je  $\Phi_{end,a} = \Phi_{end,st} + \Phi_{end,rot}$ . Iako su komponente magnetnog fluksa koje stvaraju struje  $I_a$  i  $I_{af}$  u međugvožđu međusobno jednake (poništavaju se), očigledno je da je odgovarajući aksijalni fluks rasipanja krajeva statora  $\Phi_{end,st} > \Phi_{end,rot}$  (aksijalnog fluksa rasipanja krajeva rotora), jer su krajevi namotaja statora bliži razmatranim krajnjim limovima statora. Tako se dodatni aksijalni fluks koja se javlja sa opterećenjem ( $\Phi_{end,a}$ ) može sračunati po izrazu

$$\Phi_{end,a} \cong \frac{i_a}{K_S} K_{end,st} - \frac{i_{af}}{K_S} K_{end,rot} \quad (3)$$

gde su

$K_S$  –koeficijent zasićenja magnetnog kola generatora, a

$K_{end,st}$  i  $K_{end,rot}$  – redom, koeficijenti rasipanja za aksialne flukseve krajeva statora i krajeva rotora, i  $K_{end,st} > K_{end,rot}$ . Kako je  $i_{af} = (-i_a)$ , to se izraz (3) može pisati u obliku

$$\Phi_{end,a} \cong \frac{i_a}{K_S} (K_{end,st} - K_{end,rot}) \quad (4)$$

tj. u obliku koji je pogodan za dalju analizu

$$\Phi_{end,a} \cong i_a / K_S \quad (5)$$

Na osnovu izraza (5) se može utvrditi još jedan razlog zašto su vrednosti fluksa  $\Phi_{end}$  (i odgovarajućih gubitaka snage) najveće u režimu kapacitivnih opterećenja, tj. sa strujom  $I_a = I_{aP} - jI_{aC}$  (gde su  $I_{aP}$  i  $I_{aC}$  aktivna i kapacitivna komponenta struje statora). Naime, u režimu kapacitivnih opterećenja napon generatora  $U_a$  i elektromotorna sila iza reaktanse rasipanja  $E_t = U_a - X_l I_C$ , imaju najmanje iznose, pa je i najmanja vrednost koeficijenta zasićenja ( $K_S$ ) magnetnog kola,  $K_S \rightarrow K_{S,min} = 1$ .

Tačniji proračuni ovog polja i gubitaka snage, u oblasti koja obuhvata krajnje limove statora, su dati u brojnim radovima u poslednje 3-4 decenije, i uglavnom se zasnivaju na proračunu dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih elektromagnetnih polja [8, 9, 10]. Dodatni problem predstavlja proračun gubitaka snage i odgovarajućih povišenja temperature. Mogući problemi sa pregrevanjem krajnjih limova statora se identifikuje sa merenjem temperatura krajeva statora koje su, po pravilu, više nego temperature jezgra statora u

unutrašnjosti. Pri merenju temperature je važno da se temperaturni senzori postave na mesta gde su te temperature najviše, pošto je u [10] pokazano da su najveće vrednosti aksijalnih flukseva ( $\Phi_{end}$ ) na mestima između faznih namotaja susednih faza. Iako gustine aksijalnog fluksa ( $B_{end}$ ) u krajnim limovima zubaca statora dostižu 300-400 mT [9] ona već u unutrašnjim limovima (na udaljenostima oko 100 mm) opada na ispod 100 mT, ali odgovarajući gubici snage u tim limovima mogu dostići gubitke snage od osnovnog (radijalnog) fluksa i dovesti do značajnog povećanja gubitaka snage i temperature.

Interesantni su rezultati proračuna gustine aksijalnog fluksa u unutrašnjosti krajnjih zubaca u ravni na dubini od 10mm od spoljne bočne površine statora duž radijalne koordinate ( $r$ ), za generator snage 500 MW [10]. Gustina aksijalnog fluksa je najveća u podnožju zuba i smanjuje se na 20-30% u korenu zuba, a pada na zanemarljivu vrednost kada se malo udaljimo radijalno u unutrašnjost jezgra ispod korena zuba. Zbog važnosti rezultata tih istraživanja za ovu analizu, u tabeli 1 se daju relevantni podaci o karakterističnim vrednostima gustine aksijalnog fluksa ( $B_{end}$ ), na osnovu podataka iz [10, sl. 4].

Tabela 1. Gustina aksijalnog fluksa ( $B_{end}$ ) duž radijalne koordinate ( $r$ ), u ravni na dubini od 10 mm ( $z=10$  mm) od spoljne bočne površine statora.

| Radijalno odstojanje od podnožja zuba (mm)                | Podnožje 0                    | Zubac 10 | Zubac 20 | Zubac 30 | Koren 50 | Jezgro 65 |
|---|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Režimi opterećenja:                                       | Gustina aksijalnog fluksa (%) |          |          |          |          |           |
| 1. Opterećenje sa $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{cap}$ | 100                           | 55       | 44       | 36       | 30       | 10        |
| 2. Opterećenje sa $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{ind}$ | 76                            | 41       | 31       | 24       | 22       | 7         |
| 3. Prazan hod: $U_a=U_{an}$ $I_a=0$                       | 70                            | 37       | 28       | 21       | 15       | 4         |

Na osnovu podataka u tabeli 1, dolazi se do zaključka o približnoj stalnosti odnosa gustina aksijalnog fluksa duž radijalne koordinate ( $r$ ) zupca statora u režimu sa nominalnom strujom i  $\cos\varphi=0.95_{cap}$  ( $B_{end,0.95cap}$ ) i gustina aksijalnog fluksa u režimu sa nominalnom strujom i  $\cos\varphi=0.95_{ind}$  ( $B_{end,0.95ind}$ ), tj. da je  $B_{end,0.95cap}/B_{end,0.95ind}\approx 0.75$ . Kako struje opterećenja imaju jednake vrednosti u oba režima, to na osnovu izraza (1) se može zaključiti da se radi o približnoj stalnosti odnosa koeficijenata  $K_{S,0.95cap}/K_{S,0.95ind}=1/0.75=1.33$ . Naši proračuni i analize, na primeru generatora snage 727 MVA pokazuju da je odnos odgovarajućih koeficijenata zasićenja magnetnog kola za osnovni fluks,  $K_{S,0.95cap}/K_{S,0.95ind}$ , približno oko vrednosti 1,35. Da je razlika u zasićenja magnetnog kola značajan uzrok pomenute razlike u vrednostima  $B_{end,0.95cap}$  i  $B_{end,0.95ind}$  se navodi i u [8]. Podaci u tabeli 1 pokazuju da su značajne gustina aksijalnog fluksa i u režimu praznog hoda ( $B_{end0}$ ), koje potiču od pobudne struje rotora [10], i praktično su srazmerne gustini magnetnog fluksa u međugvožđu mašine [1].

Vrednosti odgovarajućih gubitaka snage su date u tabeli 2, na osnovu podataka iz [10, sl.7], za navedene karakteristične režime opterećenja, režimi 1, 2 i 3. S obzirom na cilj rada - da se dokaže kvalitativna zavisnost  $\Phi_{end,a} \sim I_a / K_s$  - sračunate su vrednosti gustine dodatnih gubitaka snage (%) koji nastaju zbog opterećenja generatora. Oni predstavljaju razliku gustina ukupnih gubitaka snage duž aksijalne koordinate (z) statora u odgovarajućem režimu i tih gubitaka u režimu praznog hoda. Vidi se da su vrednosti gustine dodatnih gubitaka snage (%), duž aksijalne koordinate (z) statora, znatnije veće u režimu sa kapacitivnom reaktivnom snagom ( $I_a=I_{an}$  i  $\cos\varphi=0,95_{cap}$ ), vrsta 4 u tabeli 2, nego u režimu sa induktivnom reaktivnom snagom ( $I_a=I_{an}$  i  $\cos\varphi=0,95_{ind}$ ), vrsta 4.

Dosadašnja istraživanja su pokazala da preduzimanje dodatnih mera dovodi do manjeg ili većeg smanjenja aksijalnog fluksa a time i do smanjenja odgovarajućih gubitaka snage i povišenja temperature krajeva statora, [10, 11]. Iz klasične [1] i savremene literature [10] je poznato da stepenasta izvedba krajnjih limova statora smanjuje aksijalni fluks a time i gubitke u krajnim delovima jezgra statora, u režimu praznog hoda i u režimu opterećenja. Dalje se pokazuje da dolazi do smanjenja gubitaka u krajnjim limovima statora sa povećavanjem dužine bočnih delova namotaja statora (za 4%) i bočnih delova namotaja rotora (za 6) %, Dodatno sa smanjenjem ugla krajeva bočnog namotaja statora u odnosu na osu mašine sa  $30^\circ$  na  $15^\circ$ , razmatrani gubici snage se smanjuju za 6-15%. Dok obrnuto, povećanje tog ugla na  $45^\circ$  dovodi do povećanja ovih gubitaka za 10-18% [10]. Pokazuje da gubici u krajnjim limovima statora mogu biti značajno smanjeni ako se stezni prsten rotora (sl.1) izradi od nemagnetnog materijala [12]. Objašnjenje je u činjenici da se time smanjuje reluktansa magnetnog kola za razmatrani aksijalni fluks.

Tabela 2: Gustina ukupnih gubitaka snage (%) duž aksijalne koordinate (z) statora, počev od bočne površine limova ( $z=0$ ) gde je gustina gubitaka u jezgru statora najveća (100%)

| Radialno odstojanje od podnožja zuba (mm)                 | Bočna površina<br>0   | Unutar jezgra<br>10 | Unutar jezgra<br>20 | Unutar jezgra<br>50 | Unutar jezgra<br>100 | Unutar jezgra<br>185 |
|---|---|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Režimi opterećenja:                                       | Gustina gubitaka snage (%)                                  |                     |                     |                     |                      |                      |
| 1. Opterećenje sa $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{cap}$ | 100   | 78                  | 62                  | 49                  | 40                   | 28                   |
| 2. Opterećenje sa $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{ind}$ | 50  | 34                  | 28                  | 20                  | 14                   | 10                   |
| 3. Prazan hod: $U_a=U_{an}$ $I_a=0$                       | 42  | 29                  | 18                  | 5                   | 0                    | 0                    |
| Režimi opterećenja:                                       | Gustina <u>dodatnih</u> gubitaka snage (%) zbog opterećenja |                     |                     |                     |                      |                      |
| 4=1-3: Za $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{cap}$         | 58  | 49                  | 44                  | 43                  | 40                   | 28                   |
| 5=2-3: Za $I_a=I_{an}$ i $\cos\varphi=0.95_{ind}$         | 8   | 5                   | 10                  | 15                  | 14                   | 10                   |

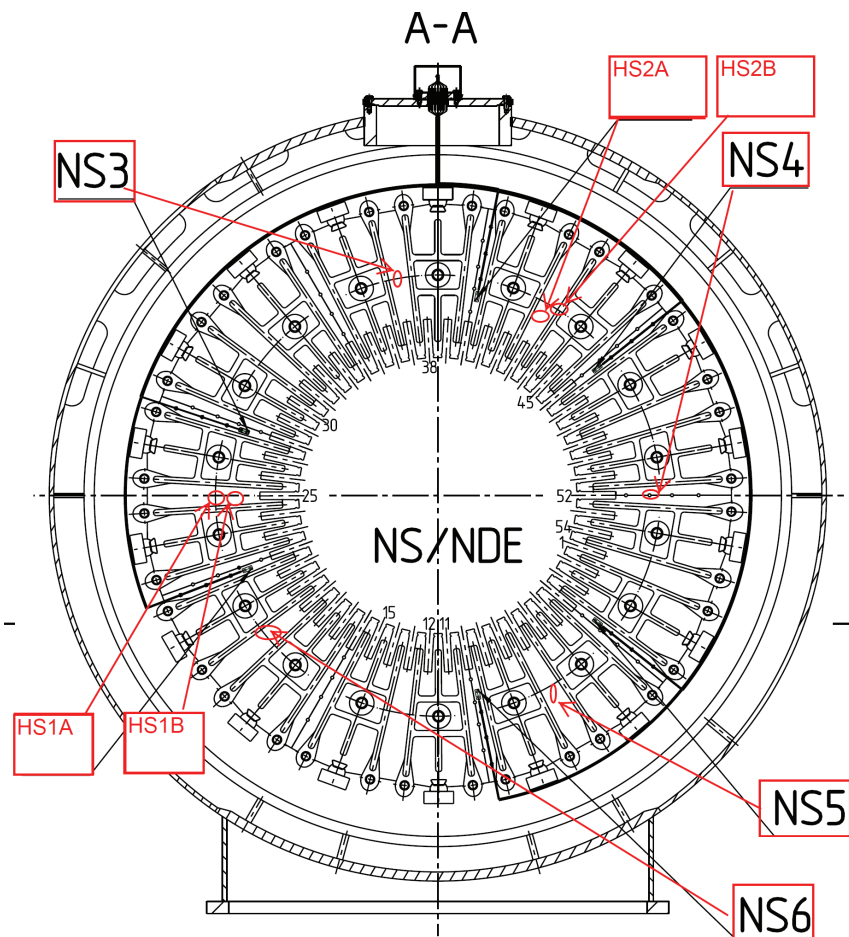
Na osnovu podataka u tabeli 2 se vidi da gustina gubitaka snage ( $W/dm^3$ ) u krajnjim limovima može biti veći za 2-3 puta u odnosu na gubitke u unutrašnjosti jezgra. Značajno je da je povećanje gustina gubitaka snage u krajnjim limovima, za oko dva puta veće u režimu sa nominalnom strujom i faktorom snage  $\cos\varphi=0,95_{cap}$  u odnosu na režim sa nominalnom strujom i  $\cos\varphi=0,95_{ind}$ .

### **3. Eksperimentalna istraživanja povišenja temperature krajeva statora i kvantitativno-kvalitativna analiza efekata**

#### **3.1. Eksperimentalna istraživanja povišenja temperature krajeva statora i kvantitativno-kvalitativna analiza efekata**

Na steznoj ploči krajeva statora generatora snage 727 MVA registrovani su delimično otopljeni segmentni spojevi koji su promenili boju, [13]. Prema iskustvu proizvođača generatora (Alstom), takve pojave su znak ubrzanog starenja steznih ploča usled visokog magnetnog opterećenja tih delova, uglavnom kada je generator u potpobuđenom režimu (opterećen sa kapacitivnom reaktivnom snagom). Iz tih razloga je doneta odluka da se ugrade senzori kako bi se merila temperatura krajnjih limova statora na odgovarajućim mestima (ukupno 6) duž kružnog luka statora, sl.3. Na dva mesta je utvrđeno značajno povećanje temperature (mesto sa sensorima HS1A i HS1B, i mesto sa HS2A i HS2B), dok su na četiri mesta izmerene normalne temperature (mesta NS3, NS4, NS5 i NS6), sl.3.





izmene-remont 2014

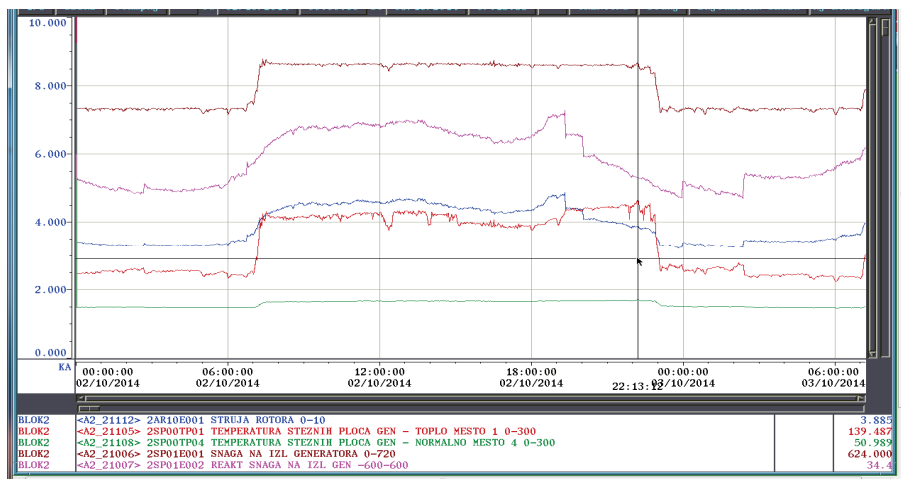
geänderte Lage der Wi.-El.

HS 1,2 = Heissstelle / Hot Spot 1, 2

NS 3,4,5,6 = Normalstelle / Normal Spot 3,4,5,6

Slika 3. Raspored ugrađenih 6 senzora zmerenje temperature krajnjih limova duž obima statora: dva mesta sa značajnim povišenjem temperature (mesto sa HS1A i HS1B, i mesto sa HS2A i HS2B), i četiri mesta sa normalnom temperaturom (mesta NS3, NS4, NS5 i NS6)

Na sl. 4 je dat uporedni prikaz rezultata izmerenih temperature krajnjih limova statora na mestu sa značajnim povećanjem temperature (toplo mesto HS) i mestu sa normalnom temperaturom (normalno mesta NS), u °C, kao i odgovarajuće vrednosti izmerene struje rotora (kA), aktivne (MW) i reaktivne snage (MVar) [14].



Slika 4. Uporedni prikaz rezultata merenja temperature krajnjih limova statora na mestu sa većim (HS) i mestu sa manjim porastom temperature (NS), kao i struje rotora (kA), aktivne (MW) i reaktivne snage (MVA<sub>r</sub>)

### 3.2. Uporedna analiza temperature krajnjih limova statora i aksijalnog fluksa rasipanja

Postavljen je zadatak da se, na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja datih u vidu dijagrama na sl. 4, utvrdi kvalitativna (pa i kvantitativna) zavisnost između povišenja temperature krajnjih limova statora i aksijalnog fluksa rasipanja,  $\Phi_{end,a} \sim I_a / K_s$ , a time i zavisnost temperature od režima opterećenja generatora. U tom cilju se obavljaju odgovarajući proračuni, za izabrane režime opterećenja generatora, kako bi se utvrdile vrednosti odnosa  $i_a / K_{ds} \sim \Phi_{end,a}$ . U tabeli 3, uporedo su date izračunate vrednosti odnosa  $i_a / K_{ds}$  i izmerene vrednosti odgovarajućih temperatura, na mestu gde su izmerene značajno povišene temperature ( $T_{HS}$ ). U cilju kvalitativne analize, prvo se utvrđuje rang lista navedenih vrednosti  $i_a / K_{ds}$  i  $T_{HS}$ , posebno za svaku, pa se potom ispituje korelacija između ranga tih vrednosti, kako bi se izveo zaključak o pomenutoj korelaciji. Uz kvalitativnu analizu određenih odstupanja, sprovodi se i odgovarajuća analiza uzroka eventualnih odstupanja u datoj korelaciji a time se sprovodi i uprošćena kvantitativna analiza zavisnosti,  $T_{HS} \sim \Phi_{end,a} \sim i_a / K_{ds}$ .

Tabela 3: Uporedni prikaz rezultati eksperimentalnih merenja ( $T_{HS}$ ) i izračunatih vrednosti  $i_a / K_{ds}$  za pet režima generatora B2 snage 727MVA

|     | P     | Q     | $u_a$  | $i_a$  | $K_{ds}$ | $i_a / K_{ds}$ | $T_{HS}$ | Rang |   |
|-----|-------|-------|--------|--------|----------|----------------|----------|------|---|
| Rež | MW    | Mvar  | pu     | pu     |          | pu             | Ra       |      |   |
| 1.  | 627,8 | 280,9 | 1,0095 | 0,9365 | 1,26     | 0,743          | 4        | 133  | 3 |
| 2.  | 624,8 | 34,9  | 0,9719 | 0,885  | 1,09     | 0,812          | 1        | 139  | 1 |
| 3.  | 617,1 | 21,2  | 0,9686 | 0,8763 | 1,08     | 0,811          | 2        | 137  | 2 |
| 4.  | 595,5 | 92,5  | 0,979  | 0,8461 | 1,11     | 0,762          | 3        | 124  | 4 |
| 5.  | 524,5 | 62    | 0,9714 | 0,7473 | 1,14     | 0,656          | 5        | 71   | 5 |

Ukoliko se izuzme režim 1 uočava se skoro direktna korelacija rang liste razmatranih vrednosti  $i_a/K_{ds}$  i  $T_{HS}$ ). Znatnije odstupanje postoji kada je u pitanju režim 1- iako je za režim 1 vrednost  $i_a/K_{ds}$  na 4. mestu, ipak je rang vrednosti  $T_{HS}$  na 3. mestu. Objašnjenje bi moglo biti u činjenici da je u ovom režimu napon  $u_a$  viši za 3-4% dok je elektromotorna sila iza reaktanse rasipanja ( $e_t = u_a + x_t i_a$ ) viša za 9-10%, u odnosu na ostale režime. Za toliko (9-10%) su veći osnovni fluks i deo aksijalnog fluksa koji je srazmeran istom, pa su i odgovarajući osnovni gubici u gvožđu statora i dodatni gubici u krajnjim limovima statora veći za 18-20%, pa bi se time mogao objasniti viši rang vrednosti  $T_{HS}$  i  $T_{NS}$  (ubedljivo 3. mesto), u odnosu na rang vrednosti  $i_a/K_{ds}$  (4. mesto). Na osnovu analize navedenih eksperimentalnih rezultata dokazuje se približna važnost izraza (1), odnosno mogućnost da se vrednosti odnosa  $i_a/K_{ds}$  koristi kao kriterijum za određivanje dozvoljenih vrednosti struje statora generatora  $i_a$  za režime kada su najveće vrednosti navedenog odnosa, tj. treba da bude  $i_a/K_{ds} \leq (i_a/K_{ds})_{max}$ .

#### 4. Pojednostavljeni postupak za definisanje graničnih režima na pogonskom dijagramu s obzirom na zagrevanje krajeva stator

Polazeći od činjenice da se na osnovu kriterijuma  $i_a/K_{ds} = (i_a/K_{ds})_{max}$  mogu odrediti dozvoljene maksimalne vrednosti opterećenja kada su najveće vrednosti odnosa  $i_a/K_{ds}$ , proračuni i analize, na primeru generatora snage 727 MVA pokazuju da je odnos odgovarajućih koeficijenata zasićenja magnetnog kola za osnovni fluks,  $K_{S,0.95cap}/K_{S,0.95ind}$ , približno oko vrednosti 1,35. To znači da u režimu sa kapacitivnom reaktivnom snagom najveća dozvoljena opterećenja po struji moraju biti znatno niža u odnosu na režime sa induktivnom reaktivnom snagom. Najtačnije je ukoliko se granična linija 4 na pogonskom dijagramu (sl.1) konstruiše tako da, pri odgovarajućim opterećenjima, izmerena temperatura krajnjih paketa limova statora ne pređe najvišu dozvoljenu temperaturu ( $T_{max}$ ), tj. da odgovara kriterijumu

$$T_{kr-st} = f(P, Q) \leq T_{max} \quad (6)$$

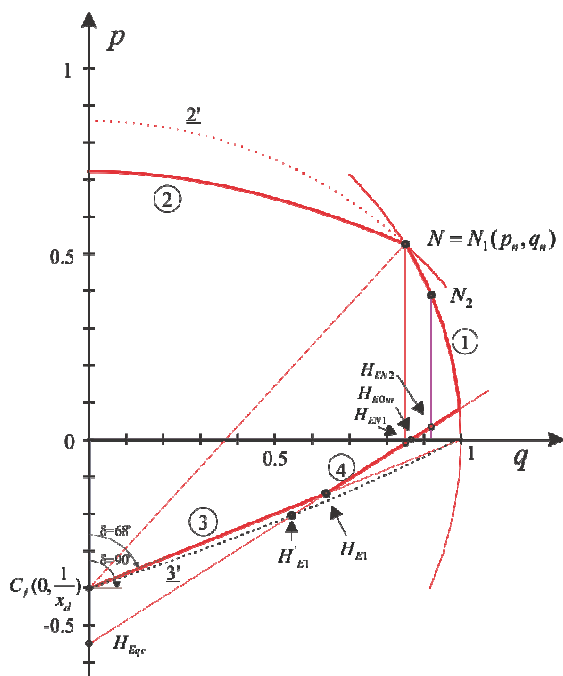
Treba primetiti da je to relativno težak zadatak jer treba voditi računa da su senzori temperature pravilno montirani u području krajnjih limova (imaju dobar kontakt sa tim limovima) i da su postavljeni na odgovarajuća mestima gde su temperature najviše (rasuti fluks i gubici snage su najveći na mestima između pojaseva namotaja dve susedne faze). Zbog toga se primenjuju i drugi postupci za konstruisanje navedene granična linije 4 na pogonskom dijagramu (sl.1). Ako se zanemare razlike u gubicima snage u gvožđu statora od osnovnog fluksa, onda se može smatrati da se opterećenja, koja definišu granična linija 4 na pogonskom dijagramu (sl.1), mogu odrediti iz uslova

$$i_a/K_S \leq (i_a/K_S)_{max} \quad (7)$$

Stav koji je definisan u jednačini (7) se detaljnije obrazlaže pomoću sledeće analize. Naime, ukupni aksijalni fluksa rasipanja u režimu opterećenja se može predstaviti kao algebarski zbir

- aksijalnog fluksa koji postoji u praznom hodu, komponente ( $\Phi_{end,0}$ ), i
- komponente aksijalnog fluksa kroz krajnje limove statora (sl.2), koji je posledica opterećivanja mašine od praznog hoda do razmatranog režima,  $\Phi_{end,a} \sim I_a / K_s$ .

Time je i povišenje temperature od praznog hoda do razmatranog režima, zavisno od ove druge komponente aksijalnog fluksa,  $\Phi_{end,a}$ . U tom cilju se obavljaju odgovarajući proračuni, za izabrane režime opterećenja generatora, kako bi se odredile vrednosti odnosa  $i_a / K_{ds} \sim \Phi_{end,a}$ .



Slika 5. Pogonski dijagram generatora B2 727 MVA (od četiri linije 1, 2, 3 i 4) sa prikazom postupka za konstruisanje linije 4 koja definiše granične režime s obzirom na maksimalno dopušteno zagrevanje krajnjih limova statora

Npr. za konstruisanje nove granične linije 4 kao na pogonskom dijagramu, za generator B2 727 MVA (sl.5), maksimalna vrednost odnosa  $(i_a / K_{ds})_{max}$  je određena na osnovu izračunate vrednosti za režim opterećenja sa  $P=630$  MW i  $Q=0$  MVar (tj. za opterećenja  $p=s=0.866$ pu,  $u=1$ pu), koja su bila zastupljena u noćnim satima tokom više decenija pa su to najviše vrednosti odnosa  $i_a / K_{ds}=0,866/1,16=0,7466$ , koje se sa sigurnošću mogu prihvatiti, pa se za razmatrani generator usvaja  $(i_a / K_{ds})_{max}=0,7466$ . Kako se granična linija 4 može približno aproksimirati pravom, to je za njenu

konstrukciju, pored utvrđene tačke na apscisi  $H_{Eom}$  (0,866; 0), sl.5, dovoljno odrediti još jednu tačku. Sa dovoljnom tačnošću se određuje tačka (0,  $q_C$ ) u kojoj ova prava preseca ordinatu. Kako se radi o čisto kapacitivnom opterećenju ( $s=q_C$ ), napon  $u_a$  je niži za 9-10% ( $u \approx 0,935pu$ ) a elektromotorna sila iza reaktanse rasipanja ( $e_t = u_a + x_t$   $i_a = u_a - x_t$   $i_{qC} = 0,935 - 0,25 \cdot 0,746 = 0,740$ ) je niža za 26%, u odnosu na nominalnu vrednost ( $u_n = 1pu$ ), pa se može pretpostaviti da je mašina nezasićena ( $K_S = 1$ ). Na osnovu toga se određuje odgovarajuće čisto kapacitivno opterećenje za tačku (0,  $q_C$ ), tj.:  $q_C = u_C \cdot i_{aC,max} = u_C \cdot (i_{a,max}/1) = 0,740 \cdot 0,746/1 = 0,552$ , pa su koordinate tačke u kojoj ova prava preseca ordinatu,  $H_{Eqc}$  (0; 0.552), čime je određena prava kroz tačke  $H_{Eom}$  i  $H_{Eqc}$ .

Tako je linija 4, koja na pogonskom dijagramu definiše granične režime s obzirom na maksimalno dopušteno zagrevanje krajnjih limova statora, deo navedene prave od tačke  $H_{E1}$  (u kojoj ona preseca liniju 3 - liniju stabilnosti mašine je definisana iz kriterijuma da je ugao snage  $\delta = 70^\circ \leq 90^\circ$ , pa sve do tačke u kojoj seče liniju 1 - kružna linije 1 poluprečnika  $S = S_n$  ( $S_n$  je nominalna prividna snaga generatora u MVA), kod koje apscisa bilo koje tačke definiše aktivnu ( $P$ ) a ordinata odgovarajuću reaktivnu snagu ( $Q$ ) generatora.

Interesantno je primetiti da tako konstrisana linije 4, koja definiše granične režime s obzirom na maksimalno dopušteno zagrevanje krajnjih limova statora, se približno poklapa sa odgovarajućom linijom koja je konstruisana na osnovu eksperimentalnih ispitivanja [14] po kriterijumu da maksimalne izmerene temperature krajnjih limova statora ne pređu najviše dopuštene vrednosti. To je potvrda da je, opisani pojednostavljeni postupak za definisanje graničnih režima na pogonskom dijagramu s obzirom na zagrevanje krajeva statora, dovoljno tačan za praktičnu upotrebu i da se može koristiti uporedo sa drugim postupcima. Kako je na osnovu ispitivanja [13], linija 4 jedina koja je značajnije promenjena na pogonskom dijagramu, u odnosu na prvobitni pogonski dijagram koja je dobijen od proizvođača, to se, bar za prve provere, preporučuje da se po opisanom pojednostavljeni postupak definišu granični režimi za slične generatore, npr. generatori A3, A4, A5 i A6 u TENT-u A, pošto prve procene pokazuju da bi taj deo mogao, takođe, biti restriktivniji u odnosu na važeći pogonski dijagram.

## 5. Zaključak

U radu je predložen i opisan pojednostavljeni postupak za definisanje graničnih režima na pogonskom dijagramu generatora s obzirom na zagrevanje krajeva statora. Primena datog postupka je ilustrovano na primeru konstruisanja odgovarajuće linije na pogonskom dijagramu za razmatrani generator prividne snage 727 MVA (B2). Na osnovu dobijenih rezultata i provera se pokazuje da je predloženi metod verifikovan pa se primena ovog jednostavnijeg postupka preporučuje za upotrebu uporedo sa drugim postupcima, bar, kada su u pitanju slični sinhroni generatora u Elektroprivredi Srbije

## Zahvalnica

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije o okviru projekta TR33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora primenom novih mernih metoda ispitivanja “.

Zahvaljujemo se i operativnim inženjerima TENT-B, koji su nam obezbedili podatke iz eksperimentalnih ispitivanja koji su dati na sl. 3 i sl. 4.

## Literatura

- [1] I. Boldea, *Synchronous Generators - The Electric Generator Handbook*. Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group. 2006.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw -Hill, Inc. 1994.
- [3] Y. Hase, *Handbook of Power System Engineering*. John Wiley & Sons. 2007.
- [4] J. Hunt, "Capability Curves and Excitation Requirements of Saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, br. 7, 1967, str. 855-859. PAS-86(7): 855-859. doi: 10.1109/TPAS.1967.291752
- [5] M.M. Adibi and D.P. Milanicz, "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines." *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 9, br. 1, 1994, str. 29-40. February.
- [6] M. Liwshitz-Garik and C.C. Whipple, *Alternating-current Machines*. New York, Toronto, London: D.Van Nostrand Company. 1961
- [7] B.J. Chalmers, *Electromagnetic Problems of A. C. Machines*. London: Chapman & Hall LTD. 1965. pp. 102, by EC4.J.
- [8] D D. Howe, P.B. Hammond and M.I. Meche, "Examination of the Axial Flux in Stator Cores with Particular reference to Turbogenerators." *IEE Proceedings*, vol. 121, br. 12, 1974
- [9] D.A.H. Jacobs, R.H. Minors, C.J. Myerscough, J.G. Steel and M.I. Mech, "Calculation of Losses in the End Region of Turbogenerators." *IEE Proceedings*, vol. 124, br. 12, 1977
- [10] B.C. Mecrow, A.G. Jack, C.S. Cross, "Elektromagnetic Design of Turbogenerators Stator in End Region", *IEE Proceedings*, Vol. 136, No.6, November 1989.
- [11] P.J. Tavner and A.F. Anderson, "Core Faults in Large Generators", *IEE Proceedings-Electr. Power Appl.*, Vol. 152, No.6, November 2005.

- [12] Z.M. Kuchinskaia, "New Design of Hydrogenerator Poles", *Department of Hydrogenerator, Electrosila St. Petersburg, Russia*, pp. 6.
- [13] Generator TENT B2 (WT23s- 106AF3), Kritični nalazi – Promena boje I rastopljena mesta na steznim pločama, *Interni izveštaj Termoelekrane Nikola Tesla B, 2011*.
- [14] Generator TENT B2 (WT23s- 106AF3), Rezultati eksperimentalnih merenja u vidu uporednih hronoloških dijagrama:  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $U_G(t)$ ,  $I_f(t)$ ,  $T_{HS}(t)$  i  $T_{NS}(t)$ , *Interni izveštaji Termoelekrane Nikola Tesla B, 2011*.

**Abstract:** A new simplified procedure for defining the limiting operating regimes on the generator capability curve, with respect to stator end core heating, is proposed and described in this paper. First of all, a simplified analysis of axial flux leakage that penetrates into the end plates of the stator is carried out and the corresponding power losses are calculated. Then the analysis of measured point temperature increases over the stator end core, and a qualitative and quantitative overview of the effects, are presented. A simplified procedure for defining the limiting regime with regard to the heating stator end core, which is illustrated for the case of an operating diagram for a given generator of apparent power of 727 MVA (B2) is also described. The given limiting line constructed using this method is similar to the appropriate line constructed on the basis of complex and lengthy factory and on-site tests performed by the manufacturer and the user. According to the results and the check, the proposed method has been proved and the application of the simplified procedure can be recommended for use along with other procedures, at least when it comes to similar synchronous generators in Serbia's Electric Power Industry.

**Keywords:** steam turbo generator, capability curve, stator end core heating

## Calculation and Analysis of Generator Limiting Regimes with Respect to Stator End Core Heating

Rad primljen u uredništvo: 06.10.2015. godine  
Rad prihvaćen: 18.10.2015. godine

