SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Damir Žarko

ANALIZA ZASIĆENIH REAKTANCIJA TURBOGENERATORA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Magistarski rad

Zagreb, 1999.

Magistarski rad je izrađen na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Mentor: prof. dr. sc. Drago Ban

Rad ima 89 listova.

Rad br.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. Dragi Banu za znanstveno i stručno usmjeravanje te pomoć i poticanje na završetak poslijediplomskog studija.

Posebno zahvaljujem roditeljima i sestri koji su mi uvijek pružali podršku tijekom moga školovanja i dodatno me motivirali za rad.

Dr. Ivanu Mandiću i dr. Vladi Ostoviću hvala za korisne savjete i pomoć tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem kolegicama i kolegama iz tvrtki "KONČAR - Generatori i motori" i "KONČAR – Institut za elektrotehniku" koji su mi pomogli prikupiti literaturu i tehničke podatke neophodne za izradu magistarskog rada.

Zahvaljujem i Sanji Seferović, profesorici hrvatskog jezika, koja je pregledala tekst i ispravila gramatičke i pravopisne pogreške.

Članovi Zavoda za elektrostrojarstvo i automatizaciju su svojim razumijevanjem pomogli da ovaj rad bude na vrijeme dovršen. Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

- 1. Prof.dr.sc. Zlatko Maljković predsjednik
- 2. Prof.dr.sc. Drago Ban mentor
- 3. Doc.dr.sc. Ivan Mandić-Viša tehnička škola Zagreb

Povjerenstvo za obranu u sastavu:

- 1. Prof.dr.sc. Zlatko Maljković predsjednik
- 2. Prof.dr.sc. Drago Ban mentor
- 3. Doc.dr.sc. Ivan Mandić-Viša tehnička škola Zagreb

Datum obrane: 29.03.1999.

S A D R Ž A J

1.	UVOD	1
2.	TEORETSKE OSNOVE ZA PRORAČUN REAKTANCIJA	3
3.	PRORAČUN RASIPNE REAKTANCIJE GLAVA STATORSKOG NAMOTA	8
	3.1 Teoretske osnove za proračun rasipne reaktancije glava namota	8
	3.1.1 Proračun induktiviteta	10
	3.1.2 Geometrija glave namota	11
	3.2 Podaci sinkronog turbogeneratora	15
	3.2.1 Krivulje magnetiziranja statorskog lima i željeza rotora	17
	3.3 Rezultati proračuna	18
4.	PRORAČUN SINKRONIH REAKTANCIJA	24
	4.1 Nezasićene sinkrone reaktancije	24
	4.1.1 Model za numerički proračun nezasićenih sinkronih reaktancija	27
	4.1.2 Rezultati proračuna nezasićenih sinkronih reaktancija	29
	4.2 Zasićene sinkrone reaktancije	31
	4.2.1 Proračun polja u zadanoj radnoj točki	33
	4.2.2 Rezultati proračuna zasićenih reaktancija	37
5.	PRORAČUN PRIJELAZNE REAKTANCIJE	46
	5.1 Nezasićena prijelazna reaktancija	46
	5.1.1 Model za numerički proračun nezasićene prijelazne reaktancije	47
	5.1.2 Rezultat proračuna nezasićene prijelazne reaktancije	47
	5.2 Zasićena prijelazna reaktancija	48
	5.2.1 Model za numerički proračun zasićene prijelazne reaktancije	48
	5.2.2 Rezultat proračuna zasićene prijelazne reaktancije	49
6.	PRORACUN POCETNIH REAKTANCIJA	52
	6.1 Nezasićene početne reaktancije	52
	6.1.1 Model za numerički proračun nezasićenih početnih reaktancija	52
	6.1.2 Rezultat proračuna nezasićenih početnih reaktancija	52
	6.2 Zasićene početne reaktancije	55
	6.2.1 Model za numerički proračun zasićenih početnih reaktancija	55
_	6.2.2 Rezultat proračuna zasićenih početnih reaktancija	56
7.	USPOREDBE REZULTATA PRORACUNA I REZULTATA MJERENJA	59
8.		61
L		63
P	OPIS OZNAKA	65
P	RILOG A: Iznos Neumannovog integrala za dvije linije u proizvoljnom	70
D 1	položaju u prostoru	70
ן ק	KILUG B: Ispis programa <i>xgl</i>	73
۲l C	KILUG C: Ispis programa <i>fourier</i>	85
SI	АZЕЛАК	86
A	βδικαυι	87
		88

1. UVOD

Sinkroni strojevi su važan dio elektroenergetskog sustava, jer se u njima vrši elektromehanička pretvorba energije. Svojom ukupnom nazivnom snagom oni predstavljaju raspoloživi elektroenergetski potencijal sustava, a svojom prisutnošću, tj. svojim vlastitim parametrima i karakteristikama, zajedno s ostalim elementima u sustavu određuju njegove karakteristike, kako u normalnim pogonskim uvjetima, tako i pri različitim kvarnim stanjima. Parametri sinkronog stroja koji pri tome imaju naročito važnu ulogu su reaktancije. Poznato je da iznos sinkrone reaktancije utječe na stabilnost rada, naročito u kapacitivnom području, dok početne i prijelazne reaktancije određuju tijek prijelaznih pojava i strujne udarce pri različitim udarnim kratkim spojevima. Zbog toga je važno da se već u fazi projektiranja što točnije odrede reaktancije stroja čime se u velikoj mjeri može predvidjeti njegovo ponašanje u pogonu.

Od dviju osnovnih vrsta sinkronih strojeva, onih s istaknutim polovima ili hidrogeneratora i strojeva s cilindričnim rotorom ili turbogeneratora, predmet su analize u ovom radu turbogeneratori. Obzirom na ograničenost hidropotencijala, ne samo u našoj zemlji, nego i u cijelom svijetu, turbogeneratori već sada predstavljaju, a u budućnosti će još i više, osnovu svakog elektroenergetskog sustava. Budući da pri gradnji novih strojeva uvijek postoji tendencija postizanja sve većih jediničnih snaga, koje danas dostižu već fantastičnih 1700 MVA, to nužno dovodi do potrebe maksimalnog iskorištenja materijala tako da specifična električna i magnetska opterećenja materijala često poprimaju granične dozvoljene vrijednosti. Stoga je u projektiranju važno točno proračunati stroj.

Analitički proračun reaktancija, ali i ostalih parametara sinkronog stroja, otežava njegova složena geometrija i nelinearnost karakteristika magnetskih materijala. Numeričke metode, a naročito metoda konačnih elemenata korištena u ovom radu, imaju u tom smislu velike prednosti. Složenost geometrije ne predstavlja problem, jer se promatrano područje (poprečni presjek stroja) dijeli na veći broj jednostavnih elemenata trokutastog ili nekog drugog oblika na kojima se rješavaju parcijalne diferencijalne jednadžbe vektorskog magnetskog potencijala koje opisuju magnetsko polje u stroju. Nelinearnost materijala se rješava primjenom numeričkih iterativnih postupaka. Iako je metoda konačnih elemenata razvijena u pedesetim godinama ovog stoljeća, njena značajnija primjena u analizi rada električnih strojeva počela je tek ranih sedamdesetih. Razlog je tome što se numerički proračun magnetskog polja u stroju svodi na rješavanje sustava nelinearnih algebarskih jednadžbi za što je pogodno računalo. Do pojave integriranih sklopova u sedamdesetim godinama računala nisu bila dovoljno moćna ni brza za rješavanje takvih problema.

Reaktancije sinkronog turbogeneratora se mogu relativno jednostavno izračunati analitički, no taj proračun je ograničen na nezasićeno stanje stroja. U normalnom pogonskom stanju generator je redovito zasićen, što rezultira različitim iznosima reaktancija za svaku novu radnu točku. Taj utjecaj je davno spoznat i analiziran u literaturi, primjerice [2,3,4], često spominjanoj u novijim radovima koji se bave problemom proračuna zasićenih reaktancija [15,24]. Jedni od prvih radova u kojima je ovaj problem rješavan numerički bili su [5,9]. Glavni nedostatak navedenih radova je zanemarenje magnetske sprege između d i q osi, poznate kao "cross-saturation effect". U literaturi se mogu pronaći primjeri usporedbe rezultata numeričkog proračuna i mjerenja zasićenih rektancija gdje je uzet u obzir i taj efekt [7,10,24]. Pokazalo se, što je u ovom radu i potvrđeno, da je za definiranje točnog modela zasićenog sinkronog stroja potrebno uzeti u obzir magnetsku spregu između d i q osi. Jedan od načina je uvođenje dodatnih reaktancija u naponske jednadžbe u rotirajućem d, q sustavu za što su podloge uzete iz [15].

Od literature koja se bavi proračunom rekatancija metodom konačnih elemenata važno je spomenuti [12,13,25], odakle su korištene teoretske podloge iznesene u ovom radu.

Početne i prijelazne reaktancije su parametri definirani u određenim trenucima prijelazne pojave koja nastupa pri simetričnom tropolnom udarnom kratkom spoju. Ta činjenica omogućuje proračun reaktancija simuliranjem magnetskih prilika u stroju u početnom i prijelaznom stanju, tj. samo za ta dva vremenska trenutka umjesto proračuna polja za cijelu prijelaznu pojavu. Važna je analiza utjecaja zasićenja na iznose tih reaktancija, jer je za proračun udarne struje kratkog spoja, prema kojoj se dimenzionira rasklopna oprema i zaštita generatora, mjerodavna zasićena početna reaktancija. Mjerenjima se taj utjecaj ne može uzeti u obzir, jer se ona vrše pri sniženom naponu zbog potencijalno destruktivnog učinka udarnog kratkog spoja pri nazivnom naponu ili zbog problema zagrijavanja uzbudnog namota pri mjerenju napajanjem parova faza. U oba slučaja se pri sniženom naponu dobivaju iznosi nezasićenih reaktancija.

Zasićene početne i prijelazne reaktancije su u ovom radu računate pomoću ekvivalentnog magnetostatičkog modela u kojem su nepoznate struje inducirane u uzbudnom i prigušnom namotu te masivnim dijelovima rotora zamijenjene odgovarajućim rubnim uvjetima [13].

U radu je s naročitom pažnjom analizirana rasipna reaktancija glava namota, jer ona čini 30 - 50 % iznosa početnih i prijelaznih reaktancija. Složena geometrija čeonog prostora zahtijeva primjenu analitičke metode proračuna ili 3D metode konačnih elemenata. Numerički proračun 3D metodom konačnih elemenata je dugotrajan obzirom na vrijeme potrebno za kreiranje modela i na trajanje samog proračuna te zahtijeva primjenu računala vrhunskih karakteristika, što ga čini neekonomičnim za rješavanje te vrste problema. Stoga je u radu korišten složeni analitički pristup prema metodi opisanoj u [6,11] koja je poboljšana preciznijom definicijom geometrije glava namota.

Osnovna geometrija svih modela sinkronog turbogeneratora korištenih u numeričkim proračunima je kreirana programskim paketom **AutoCAD 13**. Kreiranje mreže konačnih elemenata, proračuni polja te grafički prikazi rezultata su vršeni komercijalnim programskim paketom **Magnet 5.2**. Program za proračun rasipne reaktancije glava namota je napisan u programskom jeziku **FORTRAN 77**.

Svi proračuni opisani u radu su izvedeni na primjeru jednog dvopolnog sinkronog turbogeneratora snage 247 MVA. Oni bi se također mogli primijeniti na višepolne sinkrone strojeve s cilindričnim rotorom i na strojeve s istaknutim polovima.

2. TEORETSKE OSNOVE ZA PRORAČUN REAKTANCIJA

Definicije većine parametara sinkronog stroja i eksperimentalne metode njihovog određivanja su normirane [21] i temelje se na dvoosnoj teoriji električnih strojeva. Prema dvoosnoj teoriji se jednadžbe višefaznog simetričnog stroja, bez obzira na broj faza, uvijek mogu svesti na ekvivalentni dvofazni sustav na statoru i rotoru. Pritom ostaje sačuvana vjernost opisa stroja obzirom na elektromagnetski moment i energetske odnose u stroju, a struje se u stvarnim namotima mogu izraziti kao linearne kombinacije struja dvofaznog sustava.

Svojstva električnog stroja općenito bitno ovise o matrici induktiviteta čiji je proračun u domeni teorije elektromagnetskih polja. Točniji proračun induktiviteta, koji je vrlo važan pri projektiranju električnih strojeva, danas se temelji na numeričkom rješavanju polja u dijelovima ili cijelom volumenu stroja. U ovom radu je modeliran jedan polni korak dvopolnog turbogeneratora, a polje je računato metodom konačnih elemenata. Većina članova matrice induktiviteta sinkronog stroja ovisi o kutu zakreta rotora, što je prema općem modelu sinkronog stroja nužan uvjet za elektromehaničku pretvorbu energije [28].

Sinkroni strojevi se u pravilu grade kao trofazni s armaturnim namotom na statoru te s uzbudnim i prigušnim namotom na rotoru. Računa se, dakle, da postoji šest namota: tri fazna namota na statoru, uzbudni namot na rotoru čija os se podudara s uzdužnom osi rotora, uzdužni prigušni namot i poprečni prigušni namot. Za stroj s cilindričnim rotorom namoti su shematski prikazani na slici 2.1.



Sl. 2.1. Namoti u sinkronom stroju i rotirajuće d, q osi

Sustav naponskih jednadžbi u originalnim koordinatama se sastoji od tri jednadžbe za armaturni krug, jedne za uzbudni krug i dvije za prigušni namot. U matričnom obliku se jednadžbe mogu pisati kao

$$[u] = [R][i] + [L]\frac{d[i]}{dt} + \omega \frac{d[L]}{d\gamma}[i]$$
(2.1)

Vektori napona i struja su

$$\begin{bmatrix} u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_a \\ -u_b \\ -u_c \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$
(2.2)

Matrice [R] i [L] su kvadratne matrice otpora i induktiviteta, a kut γ predstavlja kut između osi faze A statora i uzdužne osi rotora (sl. 2.1.). Matrica induktiviteta se može napisati u sažetom obliku pomoću četiri submatrice

$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix}^T & \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(2.3)

gdje $[L_s]$ predstavlja submatricu induktiviteta statora, $[L_r]$ submatricu induktiviteta rotora, a $[L_{sr}]$ submatricu međuinduktiviteta. U donjem lijevom kutu matrice se javlja transponirana submatrica međuinduktiviteta, jer je matrica induktiviteta simetrična obzirom na glavnu dijagonalu.

Članovi submatrica na dijagonali su induktiviteti statorskih i rotorskih namota, a ostali članovi su međuinduktiviteti odgovarajućih namota.

$$\begin{bmatrix} L_{a}(\gamma) & M_{ab}(\gamma) & M_{ac}(\gamma) \\ M_{ab}(\gamma) & L_{b}(\gamma) & M_{bc}(\gamma) \\ M_{ac}(\gamma) & M_{bc}(\gamma) & L_{c}(\gamma) \end{bmatrix}$$
(2.4)

$$\begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{af}(\gamma) & M_{aD}(\gamma) & M_{aQ}(\gamma) \\ M_{bf}(\gamma) & M_{bD}(\gamma) & M_{bQ}(\gamma) \\ M_{cf}(\gamma) & M_{cD}(\gamma) & M_{cQ}(\gamma) \end{bmatrix}$$
(2.5)

$$\begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f & M_{jD} & 0 \\ M_{jD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$
(2.6)

Analitički prikaz prilika u sinkronom stroju se temelji na pretpostavci da u zračnom rasporu postoji samo osnovni harmonik polja. Uz zanemarenje promjene magnetske vodljivosti zračnog raspora zbog utora u kojima su smješteni namoti, funkcija magnetske vodljivosti zračnog raspora se može pojednostavljeno prikazati s prva dva člana beskonačnog reda

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_2 \cos(2\gamma) \tag{2.7}$$

D. Žarko: Magistarski rad

To znači da i induktivitete koji se odnose na tok u zračnom rasporu treba izraziti s dva člana $L_{\lambda o}$ i $L_{\lambda 2}$ od kojih je jedan proporcionalan članu vodljivosti λ_o , a drugi članu λ_2 . Uzimajući to u obzir, submatrica [L_s] glasi:

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma} + L_{\lambda \sigma} & M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} & M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} \\ M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} & L_{\sigma} + L_{\lambda \sigma} & M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} \\ M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} & M_{s} - \frac{L_{\lambda \sigma}}{2} & L_{\sigma} + L_{\lambda \sigma} \end{bmatrix} + L_{\lambda 2} \begin{vmatrix} \cos 2\gamma & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\gamma \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(2\gamma - \frac{2$$

Kod strojeva s cilindričnim rotorom član $L_{\lambda 2}$ je jednak nuli, pa elementi u submatrici $[L_s]$ postaju neovisni o kutu γ . Samoinduktiviteti namota statora se sastoje od rasipnog dijela L_{σ} i dijela koji odgovara toku kroz zračni raspor. Međusobne magnetske veze pojedinih faza se sastoje od dijela M_s koji pripada tokovima koji ne prolaze kroz zračni raspor (npr. u glavi namota, uz dvije faze u istom utoru) i dijela koji pripada toku kroz zračni raspor.

Submatrica $[L_{sr}]$ definira magnetske veze namota statora i svih namota na rotoru.

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{1dm} \cos \gamma & M_{1Dm} \cos \gamma & M_{1Qm} \sin \gamma \\ M_{1dm} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{1Dm} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{1Qm} \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1dm} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{1Dm} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{1Qm} \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$
(2.9)

Pri tome je M_{Idm} međuinduktivitet faze armaturnog namota i uzbudnog namota kada im se osi poklapaju, a M_{IDm} i M_{IQm} su maksimalne vrijednosti međuinduktiviteta kada se poklapaju osi statorskog namota prve faze i prigušnog namota u uzdužnoj osi, odnosno u poprečnoj osi.

Elementi submatrice induktiviteta rotora $[L_r]$ nisu funkcija položaja rotora.

Nedostatak ovako definirane matrice induktiviteta [*L*] je ovisnost dijela njenih elemenata o položaju rotora, tj. o kutu γ . Transformacijom koordinata iz originalnog *a,b,c* koordinatnog sustava u rotirajući *d,q,0* sustav dobiva se matrica čiji su članovi neovisni o položaju rotora. Kompletna matrica transformacije svih veličina u naponskim jednadžbama (2.1) je

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.10)

Kompletna inverzna matrica transformacija je onda

$$[C]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\gamma & 2\cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 2\cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0\\ 2\sin\gamma & 2\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 2\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0\\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$
(2.11)

Uvrštavanjem vektora napona i struje u transformiranim d,q,0 koordinatama u naponske jednadžbe (2.1) dobiva se

$$\begin{bmatrix} u_{dq^{0} fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq^{0} fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_{abc fDQ} \end{bmatrix} \frac{d \left(\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq^{0} fDQ} \end{bmatrix} \right)}{dt} + \\ + \begin{bmatrix} C^{-1} \end{bmatrix} \omega \frac{d \begin{bmatrix} L_{abc fDQ} \end{bmatrix}}{d\gamma} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq^{0} fDQ} \end{bmatrix}$$
(2.12)

Sređivanjem jednadžbe (2.12) dobiva se transformirana matrica induktiviteta koja glasi:

$$\begin{bmatrix} L_{d} & 0 & 0 & M_{fd} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_{q} & 0 & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_{0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{fd} & 0 & 0 & L_{f} & M_{fD} & 0 \\ \frac{3}{2}M_{dD} & 0 & 0 & M_{fD} & L_{D} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{qQ} & 0 & 0 & 0 & L_{Q} \end{bmatrix}$$
(2.13)

Element L_d predstavlja induktivitet fiktivnog namota koji rotira istom brzinom vrtnje kao i namoti na rotoru i koji se nalazi u takvom položaju da se njegova os uvijek podudara s osi uzbudnog namota. Veličina struje u tom fiktivnom namotu koji rotira bit će tolika da će proizvoditi upravo toliko protjecanje u uzdužnoj osi koliko će u toj osi iznositi zbroj protjecanja struja u stvarnim faznim namotima. Slično vrijedi i za induktivitet L_q , ali s razlikom da se os tog fiktivnog namota podudara s poprečnom osi rotora. Induktivitet L_o će proizvoditi nultu komponentu toka, samo ako teče nulta komponenta struje, tj. ako zbroj struja u fazama nije jednak nuli. Induktiviteti armaturnog namota u novim koordinatama pomnoženi s kružnom frekvencijom odgovaraju uzdužnoj, poprečnoj i nultoj reaktanciji.

$$X_{d} = \omega L_{d} = \omega \left[L_{\sigma} + \frac{3}{2} \left(L_{\lambda \sigma} + L_{\lambda 2} \right) \right]$$
(2.14)

$$X_{q} = \omega L_{q} = \omega \left[L_{\sigma} + \frac{3}{2} \left(L_{\lambda \sigma} - L_{\lambda 2} \right) \right]$$
(2.15)

$$X_o = \omega L_o = \omega (L_\sigma + 2M_s)$$
(2.16)

Teoretski su kod turbogeneratora, kod kojeg je $L_{\lambda 2} = 0$, reaktancije X_d i X_q jednake. Razlika između njih ipak postoji kao što je kasnije pokazano proračunom pomoću metode konačnih elemenata.

Norma IEC 34-4 [21] prihvaća ovakav model sinkronog stroja i prema njemu definira eksperimentalno određivanje odgovarajućih parametara stroja. Normom se za analizu prijelaznih stanja u sinkronom stroju u direktnoj osi uzimaju u obzir tri reaktancije (sinkrona, prijelazna i početna) i dvije vremenske konstante (početna i prijelazna), a u poprečnoj osi dvije reaktancije (sinkrona i početna) i jedna vremenska konstanta (početna). Također se uzima u obzir i vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kratkog spoja.

Predmet ovog rada je proračun i analiza navedenih reaktancija metodom konačnih elemenata, no i spomenute vremenske konstante se mogu računati konačnim elementima kao što je opisano u [27]. Budući da je rasipna reaktancija X_{σ} sastavni dio reaktancija statorskih namota, metodologiji njenog proračuna je posvećeno posebno poglavlje. Pri tome je problem proračuna rasipne reaktancije glava namota vrlo specifičan.

Rezultati teoretskih razmatranja i proračuna rektancija se uspoređuju s rezultatima mjerenja provedenih na jednom novom turbogeneratoru izrađenom u tvrtki *"KONČAR-generatori" d.d.*

3. PRORAČUN RASIPNE REAKTANCIJE GLAVA STATORSKOG NAMOTA

Glave namota se smatraju neaktivnim dijelom stroja, jer ne sudjeluju u elektromehaničkoj pretvorbi energije, no nužne su, jer povezuju vodiče u utorima koji leže pod raznoimenim polovima. Između vodiča u glavama namota postoje induktivne veze koje utječu na ukupni induktivitet namota, a time i na iznose reaktancija sinkronog stroja.

Metodom konačnih elemenata se u dvije dimenzije mogu izračunati samo reaktancije aktivnog dijela stroja, kako u stacionarnom stanju, tako i u početnom i prijelaznom stanju tropolnog udarnog kratkog spoja. To je moguće, jer se cijeli aktivni dio stroja može projicirati u ravninu na koju su svi vodiči armaturnog i uzbudnog namota okomiti. Takva ravnina ne postoji u prostoru gdje su smještene glave namota, jer vodiči u njima formiraju složenu trodimenzionalnu krivulju.

Problem proračuna polja u čeonom prostoru, a time i reaktancije glava namota, može se riješiti primjenom 3D metode konačnih elemenata, no tu bi se osim diskretizacije dijelova samog stroja morao diskretizirati i okolni prostor kroz koji se rasipno polje glava namota zatvara. Zbog veličine modela problem bi bio teško rješiv i za moderna komercijalno dostupna računala. Osim toga je potrebno uzeti u obzir i vrijeme potrebno za definiranje takvog modela koje se mjeri u tjednima, što navodi na zaključak da je takav pristup ekonomski upitan. Ono što preostaje je analitički pristup.

Analitički izrazi za proračun rasipne reaktancije glava namota koji se obično mogu naći u literaturi se baziraju ili na drastičnom pojednostavljenju geometrije čeonog prostora, ili na upotrebi raznih empirijskih formula ograničene točnosti.

Jedan točniji analitički proračun koji uzima u obzir prostorni položaj vodiča u glavama namota je razvijen u *"KONČAR-Elektrotehničkom institutu"* i opisan u [6,11]. Također je načinjen i program napisan u programskom jeziku FORTRAN 77 koji je u proširenom obliku korišten u ovoj radnji. Programska lista je dana u prilogu B.

3.1 Teoretske osnove za proračun rasipne reaktancije glava namota

U stroju se po svojoj strukturi bitno razlikuju dva osnovna područja : područje jezgre i područje glava namota. U području glava namota vodiči opisuju trodimenzionalnu krivulju koje se može po segmentima eksplicitno matematički izraziti. U području željezne jezgre vodiči se prostiru pravocrtno i okomiti su na granicu između željeza i zraka. Željezo ima značajan utjecaj na raspored magnetskog polja u području glava namota, što se može uzeti u obzir metodom odslikavanja [6,11]. U tom pristupu se uvode sljedeće pretpostavke:

- permeabilnost željeza je konstantna,
- površina željezne jezgre se proteže u beskonačnost, tj. predstavlja poluprostor konstantne permeabilnosti,
- utjecaj utora, zračnog raspora i osovine na raspored polja se zanemaruje,
- vodiči u željeznoj jezgri se protežu u beskonačnost,
- glave namota su pri proračunu međuinduktiviteta predstavljene beskonačno tankim vodičima,
- za proračun vlastitog induktiviteta se uzima da je vodič okruglog presjeka s površinom jednakom površini presjeka stvarnog pravokutnog vodiča.

Principni model glave namota je prikazan na slici 3.1.a. Taj model se može konstruirati od para beskonačno dugih vodiča (sl. 3.1.b) i polubeskonačnog kruga (sl. 3.1.c). Na polje beskonačnih vodiča u zraku ne utječe željezo zbog njihovog okomitog položaja u odnosu na granicu zrak-željezo. Polje zbog struje u krugu na slici 3.1.c se može odrediti iz tog kruga i njegove zrcalne slike (sl. 3.1.d). Krugovi na slikama 3.1.b i 3.1.d se superponiraju dajući konačni sistem (sl. 3.1.e) za proračun polja u zraku. U zrcalnoj slici petlje smještene ispred magnetskog poluprostora (sl. 3.1.c) teče struja određena permeabilnošću poluprostora, a računa se prema izrazu

$$I' = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} I$$
(3.1)

gdje je

 μ_r – relativna permeabilnost željeza I – iznos struje u petlji





3.1.1 Proračun induktiviteta

Glave namota između kojih se računa međuinduktivitet se mogu shematski prikazati prema slici 3.2.



Sl. 3.2. Principni model glava namota za proračun međuinduktiviteta prikazan u ravnini

Prema [11] se za međuinduktivitet može pisati

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi I} \int_{ABCDE} \left[I \int_{GLJKM} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + I' \int_{GPM} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + (I + I') \left(\int_{FG} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + \int_{MN} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} \right) \right]$$
(3.2)

Trodimenzionalna kontura glave namota se nadomješta proizvoljnim brojem ravnih dijelova. Tada se integrali u jednadžbi (3.2) izražavaju kao suma integrala tipa (Neumannov integral)

$$N = \cos\varphi \int_{A}^{B} dl_{1} \int_{a}^{b} \frac{dl_{2}}{r}$$
(3.3)

za sve moguće kombinacije ravnih segmenata u oba svitka na slici 3.2. Kut φ u jednadžbi (3.3) predstavlja kut između vektora smjera pravaca na kojima leže ravni segmenti za koje se računa Neumannov integral.

Iznos integrala u jednadžbi (3.3) za dvije linije u proizvoljnom položaju u prostoru kao i za neke specijalne slučajeve njihovog međusobnog položaja se može analitički izračunati i eksplicitno izraziti [1,6,11], što je dano u prilogu A.

Pri proračunu vlastitog induktiviteta glave namota se uzima da je vodič okruglog presjeka čiji unutarnji induktivitet se računa prema izrazu

$$L_u = \frac{\mu_0}{8\pi} l_g \tag{3.4}$$

gdje je

lg – duljina vodiča u glavi namota

Pri proračunu vanjskog induktiviteta ravnog vodiča konačne duljine potrebno je izračunati ulančeni tok od površine vodiča do beskonačnosti. Budući da je u beskonačnosti vektorski magnetski potencijal jednak nuli, proračun vanjskog induktiviteta se svodi na izračunavanje Neumannovog integrala između dvije paralelne linije duljine l razmaknute za d/2, gdje je d promjer vodiča. Za svaki ravni segment na glavi namota se računa tok koji on ulančuje zbog struje koja njime teče kao i tok koji uzrokuje struja u svim drugim segmentima. Samoinduktivitet glave namota je onda jednak sumi unutarnjeg i vanjskog induktiviteta.

3.1.2 Geometrija glave namota

Trodimenzionalna kontura koju opisuje vodič u glavi namota se definira kao niz prostornih koordinata rubnih točaka svakog ravnog segmenta pri čemu su koordinate kraja jednog segmenta ujedno i koordinate početka sljedećeg.

Vodiči u glavi armaturnog namota leže na plohi koja predstavlja plašt krnjeg stošca (sl. 3.3.). Kut γ predstavlja polovicu koraka svitka.

Na slici 3.4. je prikazan pogled na glavu namota u ravnini aksijalnog presjeka generatora. U točkama O_g i O_d se nalaze vrhovi stožaca na čijim plaštevima leže vodiči koji izlaze iz gornjeg, odnosno donjeg sloja utora.

Kada se plašt stošca razvije u ravninu, vodiči u glavi namota su savijeni u obliku luka evolvente kružnice, što je prikazano na slikama 3.5. i 3.6. Navedene slike kvalitativno vrijede za vodiče koji izlaze iz gornjeg i za vodiče koji izlaze iz donjeg sloja utora.

Jednadžba evolvente u parametarskom obliku općenito glasi [18]:

$$x(t) = a\sin t - at\cos t \tag{3.5}$$

$$y(t) = a\cos t + at\sin t \tag{3.6}$$

gdje je

a – polumjer razvojnog kruga evolvente

U (R, ψ) koordinatnom sustavu prema slici 3.6. jednadžbe (3.5) i (3.6) glase:

$$R(t) = \sqrt{(at)^2 + a^2}$$
(3.7)

$$\psi(t) = t - \operatorname{arctg} t \tag{3.8}$$

Koordinate točaka koje leže na plaštu stošca razvijenom u ravnini se mogu preračunati u prostorne cilindrične koordinate transformacijama

$$\rho(t) = \sin \alpha \sqrt{(at)^2 + a^2} \tag{3.9}$$

$$\varphi(t) = \frac{t - \arctan t}{\sin \alpha} \tag{3.10}$$

$$z(t) = \cos \alpha \sqrt{(at)^2 + a^2}$$
(3.11)

gdje je

 α – kut između izvodnice i visine stošca



Sl. 3.3. Principni prikaz trodimenzionalne krivulje koju opisuje vodič u glavi namota



Sl. 3.4. Pogled na svitak armaturnog namota u aksijalnom presjeku



Sl. 3.5. Plašt stošca razvijen u ravninu



Sl. 3.6. Evolventa kružnice s oznakama karakterističnih veličina

Koordinate točaka M i S označenih na slikama 3.5. i 3.6. te polumjer razvojnog kruga evolvente a određuju se postupkom opisanim u [20]. Između polumjera R_M u ravnini i polumjera ρ_M koji je jedna od poznatih prostornih koordinata može se prema jednadžbama (3.7) i (3.9) pisati odnos

$$R_M = \frac{\rho_M}{\sin \alpha} \tag{3.12}$$

Polumjer razvojnog kruga evolvente se računa prema izrazu

$$a = N_1 \frac{b_s + s_{rgl}}{2\pi \sin \alpha} \tag{3.13}$$

gdje je

 N_1 – broj utora statora b_s – širina štapa u glavi svitka s_{rgl} – razmak štapova u glavama dvaju susjednih svitaka

Budući da točka M leži na evolventi kružnice, vrijedi

$$R_M = \sqrt{\left(at_M\right)^2 + a^2} \implies t_M = \sqrt{\left(\frac{R_M}{a}\right)^2 - 1}$$
(3.14)

Kut ψ_M se onda određuje prema jednadžbi (3.8)

$$\psi_M = t_M - \arctan t_M \tag{3.15}$$

Širina svitka odgovara dvostrukom kutu γ na slici 3.3.

$$\gamma = \frac{2\pi}{N_1} \frac{y_1}{2} = \frac{\pi}{N_1} y_1 \tag{3.16}$$

gdje je

 y_1 – širina svitka izražena brojem utorskih koraka

Da bi se odredile prostorne koordinate točaka na evolventi, potrebno je definirati točku S. Točka S je u odnosu na točku M prostorno razmaknuta za kut γ . Na plaštu stošca razvijenom u ravnini će onda kut ψ_S biti

$$\psi_s = \psi_M + \gamma \sin \alpha \tag{3.17}$$

Iz dijagrama na slici 3.7. koji predstavlja funkciju $\psi = f(t)$ dobiva se parametar t_s .

$$t_{S} = f^{-1}(\psi_{S}) \tag{3.18}$$



Sl. 3.7. Funkcionalna ovisnost kuta ψ o parametru t

Uz poznati parametar t_S prostorne koordinate točke S se računaju prema jednadžbama (3.9), (3.10) i (3.11). Prostorne koordinate točaka na evolventnom dijelu glave svitka se određuju raspodjelom razlike parametara ($t_S - t_M$) na proizvoljni broj dijelova te proračunom koordinata za svaki parametar posebno.

3.2 Podaci sinkronog turbogeneratora

Sve analize su vršene na primjeru jednog novoizrađenog turbogeneratora proizvedenog u tvrtki *"KONČAR-generatori" d.d.* Taj je stroj odabran zato što su svi njegovi podaci bili dostupni i što će vjerojatno biti moguće da se neki od teoretski dobivenih rezultata provjere mjerenjem na mjestu eksploatacije generatora u TE PLOMIN.

Osnovni podaci:

Snaga	$S_n = 247 \text{ MVA}$
Napon	$U_n = 13800 \text{ V}$
Struja	$I_n = 10346 \text{ A}$
Faktor snage	$\cos\varphi_n = 0.85$
Frekvencija	f = 50 Hz
Brzina vrtnje	$n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Broj faza	<i>m</i> = 3
Spoj faza	\checkmark
Hlađenje	vodikom
Duljina statorskog paketa	l = 3700 mm
Broj paralelnih grana	$a_p = 2$



Sl. 3.8. Poprečni presjek turbogeneratora

3.2.1 Krivulje magnetiziranja statorskog lima i željeza rotora

a) Statorski paket

Proizvođač	EBG	
Kvaliteta	135-50 A	
Debljina	[mm]	0.5
Gustoća	[kg/dm ³]	7.6
Spec. gubici (B=1.0 T)	[W/kg]	1.35
Spec. gubici (B=1.5 T)	[W/kg]	3.30

Tablica 3.1. Osnovni podaci o statorskom limu

Krivulja magnetiziranja na slici 3.9. je definirana u 45 točaka koje su određene iznosom magnetske indukcije B i jakosti polja H. Interval vrijednosti magnetske indukcije unutar kojeg je definirana krivulja magnetiziranja se programskim paketom **Magnet 5.2**. kvadrira i

dijeli na 40 jednakih dijelova. U svakom dijelu se kreira kubni polinom kojim se onda opisuje krivulja magnetiziranja. Polinomi se kreiraju tako da se osigura neprekidnost funkcije i njene prve derivacije. To znači da se krivulja magnetiziranja može u potpunosti definirati iznosom jakosti polja i nagibom krivulje na rubu svakog od 40 dijelova, što zahtijeva pohranjivanje samo 82 broja [19].



Sl. 3.9. Krivulja magnetiziranja statorskog lima

b) Rotorski čelik

Tip	DIN 1700	06 24 Ni 8
	С	0.24 %
	Mn	0.68 %
	Si	0.26 %
Kemijski sastav	Р	0.015 %
	S	0.01 %
	Cr	0.20 %
	Mo	2.32 %

Tablica 3.2. Osnovni podaci o čeliku rotora

Krivulja magnetiziranja za čelik rotora je definirana s 84 parova vrijednosti magnetske indukcije B i jakosti polja H.



Sl. 3.10. Krivulja magnetiziranja rotorskog čelika

3.3 Rezultati proračuna

Opisani princip određivanja prostorne geometrije svitka zajedno s proračunom induktiviteta se izvodi fortranskim programom čija lista je dana u prilogu B.

Rezultat proračuna geometrije je prikazan na slici 3.11. Glava svitka je definirana u 20 točaka, što znači da se sastoji od 19 ravnih segmenata. Evolventni dio svake strane svitka sastoji se od sedam segmenata. Na slici 3.12. su prikazane sve glave namota koje predstavljaju kompletni model. Prikazani modeli predstavljaju samo dio namota izvan paketa. Ostatak koji se dobije zrcalnim odslikavanjem se kreira automatski, transformacijom koordinata točaka označenih na slici 3.11. prema shemi prikazanoj na slikama 3.1. i 3.2.

Međuinduktiviteti se računaju između prve glave svitka i svih ostalih koje se dobiju zakretanjem svake prethodne za kut koji odgovara jednom utorskom koraku. Na taj način se međuinduktivitet između bilo koje dvije glave svodi na proračun međuinduktiviteta između prve glave i još jedne.

Međusobno djelovanje glava namota unutar jedne faze se dobiva sumiranjem međuinduktiviteta prve glave i svih ostalih unutar faze. Dobiveni rezultat se množi s dva čime se uzimaju u obzir jednaki odnosi na suprotnoj strani stroja, odnosno statorskog paketa.

Međuinduktivitet između dvije faze sadrži sumu međuinduktiviteta svake glave namota iz jedne faze i svake glave namota iz druge faze. Zbog jednakih prilika na suprotnoj strani stroja i ova suma se množi s dva. Zbog simetrije je međuinduktivitet između bilo koje dvije faze jednak.

Ukupni induktivitet po fazi je jednak sumi samoinduktiviteta i međuinduktiviteta s druge dvije faze. Uz postojanje paralenih grana dobiveni rezultat se dijeli s njihovim brojem na kvadrat (a_p^2) , jer je induktivitet po fazi proporcionalan broju zavoja spojenih u seriju na kvadrat.



Sl. 3.11. Trodimenzionalni prikaz modela glave namota



Sl. 3.12. Trodimenzionalni prikaz kompletnog modela glava namota

Za različite iznose permeabilnosti željeza su izračunati međuinduktiviteti između prve glave namota i svih ostalih, što je na slici *3.13*. prikazano kao funkcija kuta zaokreta svake sljedeće glave u odnosu na prvu.

Krivulje na slici 3.13. dobivene s $\mu_r=0$ i $\mu_r=10000$ predstavljaju granice između kojih se realno mogu očekivati stvarni iznosi međuinduktiviteta.



Sl. 3.13. Ovisnost međuinduktiviteta o međusobnom položaju glava namota i relativnoj permeabilnosti željeza

U tablici 3.3. se nalaze izračunate vrijednosti rasipne reaktancije glava namota za različite iznose relativne permeabilnosti željeza. Uz $\mu_r=1$ utjecaj željeza je zanemaren. Slučaj kada je $\mu_r=0$ simulira idealizirano stanje u kojem bi vrtložne struje inducirane u željezu u potpunosti sprečavale prodor rasipnog polja u statorski paket. Programskim paketom **Magnet 5.2** je određena relativna permeabilnost lima statora u linearnom dijelu karakteristike magnetiziranja koja iznosi $\mu_r=6978$. Idealizirani slučaj $\mu_r=\infty$ je simuliran zadavanjem iznosa permeabilnosti reda veličine 10^9 .

	$X_{ m gl}\left[\Omega ight]$	x _{gl} [p.u.]
$\mu_r = 0$	0.061132	0.0793
$\mu_r = 1$	0.085524	0.1109
$\mu_r = 6978$	0.109928	0.1426
$\mu_r = \infty$	0.109935	0.1426

Tablica 3.3. Rasipna reaktancija glava namota za različite iznose permeabilnosti željeza

Rasipnu reaktanciju glava namota je teško izmjeriti neovisno o rasipanju u aktivnom dijelu stroja. Stoga, da bi se izračunati rezultati mogli na neki način usporediti sa izmjerenim vrijednostima, potrebno je izračunati i rasipnu reaktanciju aktivnog dijela stroja.

Prema IEC normama [21] rasipna reaktancija X_{σ} se određuje tako da se armaturni namot napaja simetričnim trofaznim sustavom napona uz izvađeni rotor. Reaktancija koja se mjeri na taj način sadrži i dio koji se odnosi na magnetski tok koji se zatvara u prostoru u kojem se inače nalazi rotor. Taj dio reaktancije ne predstavlja rasipnu reaktanciju, pa ga treba izmjeriti i oduzeti od ukupne reaktancije namota jedne faze. Mjerenje se vrši pomoću svitka koji se postavlja na provrtu statora. Glave svitka su savinute u radijalnom smjeru da ne bi došlo do ulančenja rasipnog toka glava namota. Duljina svitka je jednaka aktivnoj duljini stroja, a širina odgovara jednom polnom koraku. Mjeri se napon U_c induciran u svitku. Rasipna reaktancija se određuje prema izrazu

$$X_{\sigma} = X_a - X_b \tag{3.19}$$

gdje je

 X_a – ukupna reaktancija jedne faze

 X_b – reaktancija zbog dijela toka koji se zatvara u prostoru u kojem se inače nalazi rotor

Reaktancija X_b uz poznati napon U_c se određuje prema izrazu

$$X_b = \frac{U_c}{I_a} \frac{w_{fgr} f_n}{w_c}$$
(3.20)

gdje je

 I_a – struja armature

*w*_{fgr} – broj zavoja po fazi i paralelnoj grani

 f_n – faktor namota

w_c – broj zavoja mjernog svitka

Simulacija za određivanje rasipne reaktancije aktivnog dijela stroja se provodi 2D metodom konačnih elemenata po istom principu po kojem se vrši i mjerenje. Načinjen je model polovice stroja u kojem je dio koji normalno pripada rotoru zamijenjen zrakom. Druga polovica stroja je nadomještena periodičnim rubnim uvjetima na liniji presjeka. Koristi se linearna magnetostatička simulacija.



Sl. 3.14. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu rasipne reaktancije X_{σ}

Proračun reaktancije X_a za aktivni dio stroja se provodi jednako kao u slučaju nezasićene reaktancije X_d (poglavlje 4.1.). Ukupna reaktancija X_a je jednaka sumi rezultata dobivenog metodom konačnih elemenata i rasipne reaktancije glava namota.

Napon U_c potreban za proračun reaktancije X_b se određuje iz raspodjele vektorskog magnetskog potencijala na provrtu statora.



Sl. 3.15. Vektorski magnetski potencijal na provrtu statora

Harmoničkom analizom krivulje na slici 3.15. je izračunat osnovni harmonik A_1 . Efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona U_c se onda računa prema izrazu

$$U_c = 2\frac{1}{\sqrt{2}}\omega A_1 l \tag{3.21}$$

gdje je

 ω – kružna frekvencija

l – duljina statorskog paketa

Uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti u jednadžbu (3.20) se dobiva reaktancija X_b .

Usporedba izmjerene rasipne reaktancije dobivene pri standardnim ispitivanjima koje je izvršio proizvođač "*KONČAR-generatori*" *d.d.* prije isporuke novog generatora i izračunatih vrijednosti dobivenih za različite iznose permeabilnosti željeza uzete pri proračunu rasipne reaktancije glava namota su dane u tablici *3.4.*

IZRAČUNATO	$X_a[\Omega]$	X _b [Ω]	$X_{\sigma}[\Omega]$	$x_{\sigma}[p.u.]$
$\mu_r = 0$	0.3631	0.2362	0.1269	0.1646
$\mu_r = 1$	0.3877	0.2362	0.1515	0.1965
$\mu_r = 6978$	0.4121	0.2362	0.1759	0.2281
$\mu_r = \infty$	0.4121	0.2362	0.1759	0.2281
IZMJERENO	0.3789	0.2457	0.1332	0.1728

Tablica 3.4. Usporedba izračunatih i izmjerene rasipne reaktancije

Rezultati proračuna dobiveni za ovaj konkretni stroj pokazuju da se uzimanjem u obzir utjecaja željeza zadavanjem permeabilnosti μ_r različite od nule dobivaju najveće razlike između izračunate i izmjerene rasipne reaktancije x_{σ} . Izmjerenoj vrijednosti reaktancije x_{σ} najbliži je rezultat dobiven uz $\mu_r = 0$. Model kod kojeg je $\mu_r = 0$ predstavlja imaginarni slučaj kojim se simulira utjecaj induciranih vrtložnih struja u masivnom željezu. Budući da se mjerenje provodi s izvađenim rotorom, a statorski paket je lameliran i konačnih dimenzija za razliku od početnih pretpostavki uzetih pri kreiranju modela glava namota, bilo kojim od navedenih iznosa permeabilnosti uzima se približno u obzir samo dio stvarnih prilika u stroju.

Za poračun svih ostalih reaktancija sinkronog turbogeneratora potrebno je uzeti u obzir rasipnu reaktanciju glava namota, pa se za ovaj konkretni stroj prema rezultatima u tablici 3.4. može uzeti reaktancija x_{gl} dobivena za $\mu_r = 0$ ili za $\mu_r = 1$. Za donošenje općenitog zaključka o točnosti opisanog postupka proračuna reaktancije x_{gl} za različite iznose relativne permeabilnosti željeza μ_r bilo bi potrebno izvršiti proračune na većem broju turbogeneratora različitih snaga i dimenzija i po potrebi još poboljšati sam postupak.

4. PRORAČUN SINKRONIH REAKTANCIJA

4.1 Nezasićene sinkrone reaktancije

Model sinkronog stroja se, kao što je navedeno u poglavlju 2, formira uz pretpostavku da je stroj nezasićen, a u zračnom rasporu postoji samo osnovni harmonik polja. Transformacijom koordinata iz originalnog a,b,c koordinatnog sustava u rotirajući d,q,0 sustav formira se matrica induktiviteta čiji članovi su neovisni o položaju rotora. Vlastiti induktiviteti armaturnog namota u novim koordinatama su proporcionalni sinkronoj reaktanciji u uzdužnoj i poprečnoj osi.

Prema IEC 34-4 standardu [21] sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi (X_d) je jednaka omjeru osnovnog harmonika napona induciranog u jednoj fazi statorskog namota od direktne komponente ulančenog magnetskog toka (ψ_d) koji stvara direktna komponenta struje armature (i_d) i osnovnog harmonika te struje uz vrtnju rotora sinkronom brzinom.

Poprečna sinkrona reaktancija (X_q) je jednaka omjeru osnovnog harmonika napona induciranog u jednoj fazi statorskog namota od poprečne komponente ulančenog magnetskog toka (ψ_q) koji stvara poprečna komponenta struje armature (i_q) i osnovnog harmonika te struje uz vrtnju rotora sinkronom brzinom.

Simulacije za određivanje X_d i X_q započinju teoretskim razmatranjem. U d,q,0 koordinatnom sustavu vrijede jednadžbe [23]

$$\begin{bmatrix} \Psi_{d} \\ \Psi_{q} \\ \Psi_{q} \\ \Psi_{0} \\ \Psi_{f} \\ \Psi_{D} \\ \Psi_{D} \\ \Psi_{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{d} & 0 & 0 & M_{fd} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_{q} & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_{0} & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_{f} & M_{fD} & 0 \\ \frac{3}{2}M_{fd} & 0 & 0 & M_{fD} & L_{D} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{qQ} & 0 & 0 & 0 & L_{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d} \\ i_{q} \\ i_{0} \\ i_{f} \\ i_{D} \\ i_{Q} \end{bmatrix}$$
(4.1)

Ako su struja uzbude i_f , struja prigušnog namota u direktnoj osi i_D i struja prigušnog namota u poprečnoj osi i_Q jednake nuli, sinkrone reaktancije se računaju prema izrazima

$$X_{d} = \omega \frac{\psi_{d}}{i_{d}} \qquad \text{i} \qquad X_{q} = \omega \frac{\psi_{q}}{i_{q}} \tag{4.2}$$

Teoretski se reaktancija X_d može izmjeriti priključivanjem armaturnog namota sinkronog generatora na simetrični trofazni napon pri čemu se os rezultantnog okretnog polja statora podudara s direktnom osi uz vrtnju rotora sinkronom brzinom i otvorene stezaljke uzbudnog namota. Sličan postupak se može primijeniti i za mjerenje poprečne sinkrone reaktancije X_q , samo se u ovom slučaju rezultantno okretno polje statora podudara s poprečnom osi. Iako se ovi postupci ne primjenjuju u praksi, mogu se jednostavno simulirati metodom konačnih elemenata. Budući da je duljina paketa, tj. aktivnog dijela sinkronog turbogeneratora, znatno veća od promjera stroja, može se pretpostaviti da su u većem dijelu paketa silnice magnetskog polja okomite na aksijalnu os paketa. U tome se slučaju za numeričku analizu elektromagnetskog polja u aktivnom dijelu stroja može koristiti 2D metoda konačnih elemenata.

Za određivanje reaktancije X_d metodom konačnih elemenata potrebno je definirati model u kojem će biti tok $\psi_q=0$ i struje $i_f=i_D=i_Q=0$. Os uzbudnog namota (*d* os) se mora podudarati s osi faze *A*, tj. kut γ na slici 2.1 mora biti jednak nuli.

Stvarne vrijednosti struja u fazama, za koje će biti ispunjeni navedeni uvjeti, računaju se koristeći transformacije (4.3) prema [23]

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\gamma & 2\cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 2\cos\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ 2\sin\gamma & 2\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 2\sin\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
(4.3)

Pretpostavi li se da su statorske struje $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$, a kut $\gamma=0$, tada je $i_d=i_a$, a $i_q=i_0=0$. Odatle slijedi da je $\psi_q=\psi_0=0$. Ako se ponovo primijeni transformacija koordinata, ovoga puta za tok ψ , dobiva se

$$\begin{bmatrix} \psi_{a} \\ \psi_{b} \\ \psi_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{d} \\ \psi_{q} \\ \psi_{q} \end{bmatrix}$$

$$\psi_{q} = 0$$

$$\psi_{q} = 0$$

$$\psi_{0} = 0 \end{cases} \implies \begin{array}{l} \psi_{a} = \psi_{d} \\ \psi_{b} = \psi_{c} \end{array}$$

$$(4.4)$$

Odatle slijedi da se X_d može izračunati prema (4.2) uvrštavajući u jednadžbu ulančeni tok ψ_a i struju i_a .

Za proračun reaktancije X_q mora se poprečna os (q os) podudarati s osi faze A, tj. mora biti $\gamma=90^{\circ}$. Ako su statorske struje $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$, tada je $i_q=i_a$, a $i_d=i_0=0$. Nakon transformacije koordinata prema (4.4) dobiva se

Ovo razmatranje vrijedi ukoliko je prisutnost viših harmonika u ulančenom toku pojedinih faza zanemariva. Budući da turbogenerator ima cilindrični rotor, kod njega nema izražene magnetske nesimetrije kao kod generatora s izraženim polovima, pa je i prisutnost viših harmonika u ulančenom toku znatno manja.

U harmoničkom sastavu magnetskog toka je najizraženiji treći harmonik koji je istofazan u sve tri faze, što kao posljedicu ima pojavu nulte komponente toka. Treći harmonik se može eliminirati transformiranjem trenutnih vrijednosti ulančenog toka i struja pojedinih faza u rezultirajuće vektore [12]. Projekcija rezultirajućeg vektora neke veličine na os bilo koje faze daje trenutnu vrijednost te veličine u dotičnoj fazi.

Ako su ψ_a , ψ_b i ψ_c trenutne vrijednosti ulančenog toka pojedinih faza u trenutku *t*, onda se u tom vremenskom trenutku može definirati rezultirajući vektor

$$\underline{\psi} = \frac{2}{3} \left(\psi_a e^{j\theta_a} + \psi_b e^{j\theta_b} + \psi_c e^{j\theta_c} \right)$$
(4.6)

gdje su \mathcal{G}_a , \mathcal{G}_b i \mathcal{G}_c kutevi između osi namota pojedinih faza i realne osi referentnog koordinatnog sustava u kompleksnoj ravnini.

Kao realna os referentnog koordinatnog sustava može se uzeti os faze A, pa je onda

$$\mathcal{G}_a = 0, \quad \mathcal{G}_b = -\frac{2\pi}{3}, \quad \mathcal{G}_c = \frac{2\pi}{3}$$
(4.7)

Neka se pretpostavi da postoji nulta komponenta ulančenog magnetskog toka, tj. da za trenutne vrijednosti toka vrijedi

$$\psi_a + \psi_b + \psi_c = 3\psi_0 \tag{4.8}$$

Realni dio rezultirajućeg vektora predstavlja njegovu projekciju na os faze A.

$$\operatorname{Re}\underline{\psi} = \frac{2}{3}\left(\psi_a + \psi_b \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + \psi_c \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) = \frac{2}{3}\left[\psi_a - \frac{1}{2}\left(\psi_b + \psi_c\right)\right]$$
(4.9)

Ako se u (4.9) uvrsti jednadžba (4.8), dobiva se

$$\operatorname{Re} \underline{\psi} = \frac{2}{3} \left[\psi_a - \frac{1}{2} \left(3\psi_0 - \psi_a \right) \right] = \psi_a - \psi_0$$
(4.10)

Projekcije na osi preostale dvije faze će biti

$$\psi_b - \psi_0 \quad \text{i} \quad \psi_c - \psi_0 \tag{4.11}$$

Iz ovog razmatranja se može zaključiti da, iako sastavne komponente rezultirajućeg vektora sadrže nulte komponente, projekcije samog vektora na osi pojedinih faza ne sadrže te komponente. Korištenjem rezultirajućih vektora zadovoljen je osnovni uvjet u definiciji reaktancije, a to je da su struja i ulančeni tok sinusne veličine jednake frekvencije i faznog pomaka.

4.1.1 Model za numerički proračun nezasićenih sinkronih reaktancija

Direktna i poprečna komponenta struje i ulančenog toka predstavljaju projekcije rezultirajućih vektora armaturne struje i toka na direktnu i poprečnu os. Trenutne vrijednosti toka koje ulančuju pojedine faze računaju se numerički metodom konačnih elemenata.

Za simulaciju je dovoljno diskretizirati jedan polni korak turbogeneratora, a ostatak stroja nadomjestiti rubnim uvjetima.



Sl. 4.1. Poprečni presjek polnog koraka turbogeneratora s označenim čvororvima na kojima su definirani rubni uvjeti

Vanjski obod statora je definiran kao ekvipotencijala, tj. postavljeni su Dirichletovi rubni uvjeti prema slici 4.1.

$$A|_{AB} = 0 \tag{4.12}$$

Na radijalnim linijama rotora, zračnog raspora i statora uzduž kojih je izvršen presjek stroja definirani su periodički uvjeti. Prema tim uvjetima dijametralno suprotne rubne linije isječka imaju iste apsolutne vrijednosti vektorskog magnetskog potencijala, ali suprotnog predznaka.

$$A|_{AC} = -A|_{BC} \tag{4.13}$$

Mreža konačnih elemenata kojom je diskretizirano područje proračuna je kreirana automatski programom **Magnet 5.2**. Mreža se sastoji od 10150 elemenata i 5120 čvorova od kojih 32 imaju definirane Dirichletove rubne uvjete, a 28 periodičke uvjete (sl. *4.1*.).

Položaj rotora u odnosu na stator generatora je u modelu nepromjenjiv. Model je kreiran tako da se os faze *A* podudara s osi uzbudnog namota, tj. direktnom osi. Trofazni sinkroni turbogeneratori se izvode s dvoslojnim simetričnim namotom s cjelobrojnim brojem utora po polu i fazi. U ovom konkretnom slučaju je fazni namot izveden s dvije paralelne grane. Raspored namota po utorima razmatranog turbogeneratora je prikazan na slici *4.3*.

Položaj rezultirajućeg vektora armaturne struje u odnosu na direktnu os je određen trenutnim vrijednostima struja u pojedinim fazama. Struje u vodičima statora se mijenjaju po kosinusnom zakonu tako da vrijedi

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \tag{4.14}$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{4.15}$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{4.16}$$



Sl. 4.2. Mreža konačnih elemenata za proračun nezasićenih sinkronih reaktancija



Sl. 4.3. Raspored namota po utorima statora i rotora

Realni i imaginarni dio rezultirajućeg vektora struje predstavlja direktnu i poprečnu komponentu struje. Isto vrijedi i za ulančeni tok. Uzimajući u obzir jednadžbe (4.6) i (4.9) može se pisati

$$\psi_{d} = \frac{2}{3} \left[\psi_{a} - \frac{1}{2} \psi_{b} - \frac{1}{2} \psi_{c} \right]$$
(4.17)

$$i_{d} = \frac{2}{3} \left[i_{a} - \frac{1}{2} i_{b} - \frac{1}{2} i_{c} \right]$$
(4.18)

$$\psi_q = \frac{1}{\sqrt{3}} (\psi_c - \psi_b) \tag{4.19}$$

$$i_{q} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(i_{c} - i_{b} \right) \tag{4.20}$$

Za proračun reaktancije X_d potrebno je postaviti rezultirajući vektor struje u direktnu os. To će biti zadovoljeno kada je struja faze A maksimalna, tj. kada je $\omega t=0$. Tada vrijedi $i_{\alpha} = i_{\alpha} = -\frac{i_{\alpha}}{2}$

$$t_b - t_c - 2$$

Za reaktanciju X_q mora struja u fazi A biti jednaka nuli, što će biti zadovoljeno kada je
 π

 $\omega t = \frac{\pi}{2}$. Tada se rezultirajući vektor struje nalazi u poprečnoj osi, a za fazne struje vrijedi $i_a = 0, i_b = -i_c$.

Za proračun nezasićenih sinkronih reaktancija koristi se linearna magnetostatička simulacija. Program **Magnet 5.2** pri tome uzima vrijednost permeabilnosti s linearnog dijela krivulje magnetiziranja za svaki nelinearni materijal korišten u modelu i vrši proračun s konstantnom permeabilnošću u svim zatvorenim diskretiziranim područjima u kojima je dotični materijal definiran. Zbog linearnih odnosa u modelu mogu se iznosi struja u armaturnom namotu proizvoljno odabrati.

U dvodimenzionalnom statičkom linearnom magnetskom polju vektorski magnetski potencijali zadovoljavaju Poissonovu diferencijalnu jednadžbu [29]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \tag{4.21}$$

gdje su

 A_z – komponenta vektorskog magnetskog potencijala u smjeru z osi

 J_z – komponenta vektora gustoće struje u smjeru z osi

 μ – magnetska permeabilnost

Rezultat proračuna polja su iznosi vektorskog magnetskog potencijala u čvorovima mreže konačnih elemenata. Iznosi potencijala unutar elemenata mreže se dobivaju interpolacijom .

4.1.2 Rezultati proračuna nezasićenih sinkronih reaktancija

Linearnom magnetostatičkom simulacijom reakcije armature u d osi dobivena je raspodjela vektorskih magnetskih potencijala za jedan polni korak prikazana na slici 4.4.

U proračunu su korišteni elementi prvog reda s linearnom razdiobom vektorskog magnetskog potencijala unutar elemenata.

Ulančeni tok svake faze po jediničnoj duljini stroja je izračunat kao suma srednjih vrijednosti vektorskih magnetskih potencijala u vodičima te faze uzimajući u obzir smjer struje u svakom pojedinom vodiču. Direktna komponenta struje i ulančenog toka se računaju prema jednadžbama (4.17) i (4.18). Reaktancija X_d se računa prema izrazu

$$X_{d} = X_{ad2} + X_{gl} = 2\pi f l \frac{\psi_{d}}{a_{p} i_{d}} + X_{gl}$$
(4.22)

gdje je f nazivna frekvencija, l ukupna duljina statorskog paketa, ψ_d direktna komponenta ulančenog toka izračunata za jednu paralelnu granu po jediničnoj duljini stroja, i_d direktna komponenta struje jedne paralelene grane, a_p broj paralelnih grana i X_{gl} rasipna reaktancija glava statorskog namota.



Sl. 4.4. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X_d

Dio X_{ad2} se računa metodom konačnih elemenata i sastoji se od reaktancije reakcije armature i rasipne reaktancije u aktivnom dijelu stroja. Tom dijelu treba dodati i rasipnu reaktanciju glava namota X_{gl} izračunatu u poglavlju 3. Uzeta je reaktancija $x_{gl} = 0.1109$ p.u. dobivena za slučaj kada je μ_r =1. Rezultati proračuna su prikazani u tablici 4.1.

Raspodjela vektorskih magnetskih potencijala za slučaj poprečne sinkrone reaktancije X_q je prikazana na slici 4.5. Reaktancija X_q se računa prema izrazu

$$X_{q} = X_{aq2} + X_{gl} = 2\pi f l \frac{\psi_{q}}{a_{p} i_{q}} + X_{gl}$$
(4.23)

Rezultati proračuna su prikazani u tablici 4.1. Iznosi struja i ulančenih tokova u tablici dani su za jednu paralelnu granu. Reaktancije izračunate jednadžbama (4.22) i (4.23) su preračunate na jedinične vrijednosti dijeljenjem s baznom vrijednošću reaktancije koja iznosi

$$X_{B} = \frac{U_{B}}{I_{B}} = \frac{U_{nf}}{I_{nf}} = \frac{U_{n}^{2}}{S_{n}} = \frac{13800^{2}}{247 \cdot 10^{6}} = 0.771\Omega$$
(4.24)



Sl. 4.5. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X_q

Tablica 4.1. Nezasićene sinkrone reaktancije izračunate linearnom magnetostatičkom simulacijom

i _a	i _b	ic	i _d	Ψa	ψ_b	Ψc	ψ_d	x _{ad2}	Xd
[A]	[A]	[A]	[A]	[Vs/m]			[p.u.]	[p.u.]	
1000	-500	-500	1000	2.842	-1.438	-1.438	2.854	2.151	2.262
ia	i _b	ic	iq	Ψa	Ψb	Ψc	Ψq	X _{aq2}	Xq
i _a [A]	i _b [A]	i _c [A]	iq [A]	Ψa	ψ _b [Vs	ψ _c s/m]	ψ_q	x _{aq2} [p.u.]	x _q [p.u.]

4.2 Zasićene sinkrone reaktancije

Pod opterećenjem je zasićenje pojedinih dijelova sinkronog stroja različito za svaku radnu točku. Zbog djelovanja reakcije armature dolazi do pomaka osi rezultantnog protjecanja u odnosu na direktnu os, što rezultira nesimetričnom raspodjelom reluktancija. Zbog toga i reaktancije postaju funkcija radne točke.

U zasićenom stanju više ne vrijedi princip superpozicije na kojem počiva klasični nezasićeni model sinkronog stroja. U nezasićenom stroju za stacionarno stanje mogu se pisati naponske jednadžbe

$$-u_d = Ri_d + \omega \psi_q \tag{4.25}$$

$$-u_a = Ri_a - \omega \psi_d \tag{4.26}$$

pri čemu su ulančeni tokovi

$$\psi_d = L_d i_d + M_{df} i_f \tag{4.27}$$

$$\psi_a = L_a i_a \tag{4.28}$$
Utjecaj struja i_d , i_q i i_f se može pojedinačno promatrati i odatle računati parametre L_d , L_q i M_{fd} , što je korišteno pri proračunu nezasićenih sinkronih reaktancija. U zasićenju takav pristup ne vrijedi, jer nedostatak bilo koje struje u jednadžbama (4.27) i (4.28) mijenja magnetske prilike u stroju, a time i iznose spomenutih parametara. Princip superpozicije se ipak može primijeniti i za zasićeno stanje uz korištenje metode konačnih elemenata. Za odabranu radnu točku se najprije iterativnim postupkom izračuna polje u stroju nelinearnom magnetostatičkom simulacijom. Time je za svaki čvor u mreži konačnih elemenata izračunat reluktancije. odgovarajući iznos Linearnom magnetostatičkom simulacijom uz nepromijenjene iznose reluktancija u čvorovima se onda postupkom opisanim u poglavlju 4.1 računaju zasićene reaktancije X_d i X_q .

Reaktancije X_d i X_q nisu dovoljne da bi u zasićenom stanju vrijedile naponske jednadžbe (4.25) i (4.26). Kada se pri proračunu zasićene X_d protjecanje armature postavi u direktnu os, ono rezultira ne samo direktnom komponentom ψ_d magnetskog toka, nego se javlja i poprečna komponenta ψ_{qd} kao posljedica nesimetrične raspodjele reluktancije oko direktne osi. To je tzv. magnetska sprega između d i q osi [15]. Tok ψ_{qd} djeluje nasuprot toka ψ_q , a njegov utjecaj se uzima u obzir uvođenjem reaktancije X_{qd} za koju po analogiji s izrazima (4.22) i (4.23) vrijedi

$$X_{qd} = 2\pi f l \frac{\psi_{qd}}{a_p i_d} \tag{4.29}$$

Takva sprega postoji i u slučaju kada se protjecanje armature nalazi u q osi, tj. javlja se direktna komponenta toka ψ_{dq} pomoću koje se može izračunati reaktancija X_{dq} prema izrazu

$$X_{dq} = 2\pi f l \frac{\psi_{dq}}{a_p i_q} \tag{4.30}$$

U opterećenom generatoru ukupni tok ψ_d određuje i međuinduktivna veza između faznog i uzbudnog namota M_{df} . U nezasićenom stroju struja i_f stvara tok samo u direktnoj osi, no u zasićenom stanju javlja se tok ψ_{qf} i u poprečnoj osi, tj. postoji magnetska sprega između uzbudnog namota i armaturnog namota u q osi zbog čega se uvodi međuindukivitet M_{qf} . Parametri M_{df} i M_{qf} , odnosno reaktancije X_{df} i X_{qf} se određuju metodom konačnih elemenata tako da se uz struju koja teče samo uzbudnim namotom izračunaju ulančenu tokovi ψ_{df} i ψ_{qf} za jednu paralelnu granu armaturnog namota. Iz jednadžbi

$$X_{df} = 2\pi f l \frac{\psi_{df}}{i_f}$$
(4.31)

$$X_{qf} = 2\pi f l \frac{\psi_{qf}}{i_f} \tag{4.32}$$

se dobivaju tražene reaktancije.

Jednadžbe za ulančene tokove (4.27) i (4.28) sada prelaze u oblik

$$\psi_{d} = L_{d}i_{d} - L_{da}i_{a} + M_{df}i_{f} \tag{4.33}$$

$$\psi_q = L_q i_q - L_{qd} i_d - M_{qf} i_f \tag{4.34}$$

Ako se izrazi (4.33) i (4.34) uvrste u naponske jednadžbe (4.25) i (4.26), dobivaju se jednadžbe za zasićeno stanje [15].

$$u_{d} = -Ri_{d} - X_{q}i_{q} + X_{qd}i_{d} + X_{qf}i_{f}$$
(4.35)

$$u_{q} = -Ri_{q} + X_{d}i_{d} - X_{dq}i_{q} + X_{df}i_{f}$$
(4.36)

4.2.1 Proračun polja u zadanoj radnoj točki

Reaktancije u zasićenju ovise o radnoj točki generatora pa je za svaku promjenu opterećenja potrebno izvšiti novi proračun polja u stroju i odatle odrediti nove iznose reaktancija. Uz poznate nazivne vrijednosti statorske struje I_n i napona U_n , neko stacionarno pogonsko stanje generatora definirano je relativnim vrijednostima napona, struje i faktora snage $(u, i, \cos \varphi)$. Proračun polja za neko opterećenje metodom konačnih elemenata je iterativni postupak određivanja uzbudne struje i položaja rezultirajućeg vektora armaturne struje takvih da inducirani napon u_i i njegov fazni pomak u odnosu na struju φ_i po svom iznosu odgovaraju dotičnom pogonskom stanju. Ovdje se koristi iterativna metoda prema [17]. Model generatora je isti kao pri proračunu nezasićenih sinkronih reaktancija.

Projekcije rezultirajućeg vektora armaturne struje na magnetske osi faza A, B i C predstavljaju trenutne vrijednosti struja u tim fazama.



Sl. 4.6. Položaj rotora i rezultirajućeg vektora struje u odnosu na magnetske osi faza u trenutku t=0

Uz prikaz pomoću kosinusne funkcije trenutne vrijednosti struja u vodičima faza su

$$i_a = I_m \cos\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) \tag{4.37}$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t - \psi - \frac{7\pi}{6}\right) \tag{4.38}$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t - \psi + \frac{\pi}{6}\right) \tag{4.39}$$

gdje je

$$I_m = \frac{\sqrt{2I_n}}{a_p}i - \text{tjemena vrijednost struje u vodiču armaturnog namota za promatrano pogonsko stanje}$$

 ψ – kut između rezultirajućeg vektora armaturne struje i q osi

Inducirani napon izračunat metodom konačnih elemenata ne obuhvaća pad napona na radnom otporu r i rasipnoj reaktanciji x_{gl} glava statorskog namota. Zbog toga za napon U na stezaljkama generatora i njegov fazni pomak φ prema statorskoj struji treba odrediti vrijednosti induciranog napona U_{io} i faznog pomaka φ_{io} (sl. 4.7.) koji se traže pri proračunu metodom konačnih elemenata.

$$u_{io} = \sqrt{(u\cos\varphi + ir)^2 + (u\sin\varphi + ix_{gl})^2} \quad [p.u.]$$
(4.40)

$$\varphi_{io} = \operatorname{arctg}\left(\frac{u\sin\varphi + ix_{gl}}{u\cos\varphi + ir}\right)$$
(4.41)

$$U_{io} = u_{io}U_{nf} \qquad [V] \qquad (4.42)$$

Relativna vrijednost radnog otpora r određuje se analitički, a relativna vrijednost reaktancije x_{gl} određuje se postupkom opisanim u poglavlju 3.

Inducirani napon generatora je složena funkcija uzbudne struje I_f i kuta ψ , od kojih svaki utječe istovremeno na njegov iznos U_i i fazni pomak φ_i . Promjenom uzbudne struje se mijenja iznos osnovnog harmonika uzbudnog protjecanja Θ_f , a promjenom kuta ψ mijenja se položaj osnovnog harmonika armaturnog protjecanja Θ_a . O rezultantnom protjecanju Θ koje je vektorski zbroj protjecanja Θ_a i Θ_f ovise iznos i fazni pomak induciranog napona. U vektorskom dijagramu na slici 4.7. umjesto protjecanja prikazane su struje. U tom slučaju se armaturna struja preračunava na uzbudnu stranu. Time se dobiva struja I'_a koja bi, da teče u uzbudnom namotu, dala isto protjecanje kao struja I_a u armaturnom namotu. Kod turbogeneratora vrijedi [23]

$$1.35 \frac{w_a f_{n1}}{p} I_a = 0.637 \frac{w_f f_{nf}}{p} I'_a$$
(4.43)

gdje je

 w_a – broj u seriju spojenih zavoja jedne faze

- f_{n1} faktor namota osnovnog harmonika
- *p* broj pari polova
- w_f broj zavoja uzbudnog namota
- f_{nf} faktor uzbudnog namota

Odavde slijedi armaturna struja preračunata na uzbudnu stranu

$$I'_{a} = 2.12 \frac{w_{a} f_{n1}}{w_{f} f_{nf}} I_{a}$$
(4.44)

Približne vrijednosti uzbudne struje i kuta ψ za prvu iteraciju uzimaju se iz rezultata klasičnog (analitičkog) elektromagnetskog proračuna.

Za proračun induciranog napona U_i koriste se iznosi vektorskog magnetskog potencijala u vodičima armaturnog namota dobiveni metodom konačnih elemenata. Za jedan položaj rotora u odnosu na stator trenutni iznos magnetskog toka po jedinici duljine stroja koji ulančuje svaki vodič statora odgovara srednoj vrijednosti z komponente vektorskog magnetskog potencijala \vec{A} po presjeku vodiča. Za trenutni položaj rotora vrijednost A_z dobivena za svaki vodič zapravo predstavlja po jednu točku na valnom obliku $A_z=A_z(t)$ za jedan vodič kada bi se rotor zakretao. Broj točaka koje se mogu dobiti unutar jedne periode jednak je broju utora na statoru. Numeričkom Fourierovom analizom se računaju Fourierovi koeficijenti a_1 i b_1 osnovnog harmonika A_{z1} valnog oblika $A_z=A_z(t)$.

$$A_{z1}(t) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t = A_{z1} \cos(\omega t - \delta_i)$$
(4.45)

gdje je

 $A_{z1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ – amplituda osnovnog harmonika vektorskog magnetskog potencijala u vodiču statora

$$\delta_i = arctg\left(\frac{b_1}{a_1}\right)$$
 – fazni pomak osnovnog harmonika induciranog napona u odnosu na *q* os (sl. 4.7.)

Uzimajući srednju vrijednost osnovnog harmonika vektorskog magnetskog potencijala A_{z1} u gornjem i donjem sloju utora efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona induciranog u jednoj fazi se računa prema jednadžbi

$$U_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega A_{z1} l \frac{N_{1} z_{u1} f_{n1}}{m a_{v}}$$
(4.46)

gdje je

$$\omega$$
 – kružna frekvencija

l – duljina paketa

- N_1 broj utora statora
- z_{u1} broj vodiča u utoru statora
- f_{n1} faktor namota za osnovni harmonik napona
- m broj faza
- a_p broj paralelnih grana

Fazni pomak induciranog napona i armaturne struje se računa prema izrazu

$$\varphi_i = \psi - \delta_i \tag{4.47}$$

Kut opterećenja je

$$\delta = \psi - \varphi \tag{4.48}$$

Odstupanja induciranog napona U_i i njegovog faznog pomaka φ_i dobivenih u n-toj iteraciji od traženih vrijednosti su

$$\Delta u_i = \frac{U_i - U_{io}}{U_{io}} 100 \quad [\%]$$
(4.49)

$$\Delta \varphi_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{io}}{\varphi_{io}} 100 \,[\%] \tag{4.50}$$

Ako su odstupanja veća od željenih tolerancija, proračun se nastavlja u (n+1) - oj iteraciji, s korigiranim vrijednostima uzbudne struje i kuta ψ . Nova vrijednost kuta ψ za (n+1) - vu iteraciju određuje se na sljedeći način:

$$\Delta \psi = \frac{\psi}{\psi + \delta} (\varphi_{io} - \varphi_i)$$
(4.51)

$$\psi_{n+1} = \psi_n + \Delta \psi \tag{4.52}$$

Nova vrijednost uzbudne struje I_f se određuje tako da se najprije vrijednost rezultantne struje I_r na slici 4.7. korigira u omjeru traženog i dobivenog induciranog napona.

$$I_{r(n+1)} = \frac{U_{io}}{U_i} I_{r(n)}$$
(4.53)

Struja uzbude se onda dobiva iz trokuta određenog strujama I_f , I'_a i I_r (sl. 4.7.).



Sl. 4.7. Vektorsko-fazorski dijagram za trenutak t=0 s približnim i traženim veličinama u iterativnom postupku

Iterativni postupak se prekida kada su odstupanja dobivenog induciranog napona Δu_i i faznog kuta $\Delta \varphi_i$ manja od odabranih tolerancija. Vrijednosti uzbudne struje, kuta opterećenja i drugih veličina iz zadnje iteracije smatraju se rezultatima proračuna metodom konačnih elemenata za promatrano pogonsko stanje.

4.2.2 Rezultati proračuna zasićenih reaktancija

Na primjeru proračuna zasićenih reaktancija za nazivnu radnu točku može se provjeriti ispravnost naponskih jednadžbi (4.35) i (4.36).

Približni iznosi uzbudne struje I_f i kuta ψ pri nazivnom opterećenju za prvu iteraciju su izračunati klasičnim (analitičkim) elektromagnetskim proračunom [8]. Dobivene su vrijednosti

$$I_f = 2485.5 \text{ A}$$

 $\psi = 71.16^0$

Za rasipnu reaktanciju glava namota uzeta je vrijednost izračunata u poglavlju 3. za slučaj kada je $\mu_r=1$.

$$X_{gl} = 0.085524 \ \Omega$$

 $x_{gl} = 0.1109 \ \text{p.u.}$

Radni otpor faze armaturnog namota je izračunat analitički za hladno stanje (20 ⁰C) prema izrazu

$$R_{1f20} = \frac{N_1 \cdot z_{u1} \cdot l_{v1}}{m \cdot a_p^2 \cdot S_{v1} \cdot \kappa_{20}}$$
(4.54)

gdje je

 $l_{v1} = l + l_g$ – duljina jednog vodiča (l – duljina paketa, l_g – duljina glave namota)

 N_1 – broj utora statora z_{u1} – broj vodiča u utoru statora m – broj faza a_p – broj paralenih grana S_{v1} – površina presjeka vodiča κ_{20} – specifična vodljivost bakra na 20 ⁰C

U proračunima je korišten otpor u toplom stanju (75 °C)

$$R_{1f75} = R_{1f20} \cdot [1 + \alpha \cdot (75 - 20)] = 1.5326 \,\mathrm{m}\Omega \tag{4.55}$$

$$r = 0.002 \,\mathrm{p.u.}$$

Konačni rezultati dobiveni postupkom opisanim u prethodnom poglavlju su prikazani u tablici 4.2.

	tražene vrij.	izračunate vrij.	pogreška [%]
$U_i[V]$	14686	14696	0.068
$\phi_i [^0]$	36.813	36.797	0.042
	izmjereno	izračunato	r
$I_{f}[A]$	2526.7	2521	

Tablica 4.2.	Rezultat iterativnog proračuna polja u stroju metodom konačnih eleme-
	nata za nazivno opterećenje (U_n =13800 V, I_n =10334 A, $\cos \varphi_n$ =0.85)

Zbog djelovanja reakcije armature rezultantno protjecanje, a time i polje u stroju, u nazivnoj radnoj točki je pomaknuto u odnosu na os uzbudnog namota.



Sl. 4.8. Linije konstatnog vektorskog magnetskog potencijala pri nazivnom opterećenju



Sl. 4.9. Valni oblik napona induciranog u vodiču armaturnog namota pri nazivnom opterećenju

Linearnom magnetostatičkom simulacijom uz pohranjene iznose reluktancija u čvorovima mreže konačnih elemenata izračunate su reaktancije pri nazivnom opterećenju.

Reaktancije	$[\Omega]$
X_d	1.4077
X_{dq}	0.08439
X_{df}	11.3249
X_q	1.3949
X_{qd}	0.08440
X_{qf}	0.8003

Tablica 4.3. Zasićene reaktancije kod nazivnog opterećenja

Trenutne vrijednosti struja se računaju prema izrazima (4.37), (4.38) i (4.39). Uz

$$I_m = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 10334 = 14614.5 \text{ A}$$

 $\psi = 68.253^0$

dobiva se

$$i_a = -13574 \text{ A}$$

 $i_b = 2097.7 \text{ A}$
 $i_c = -11476.3 \text{ A}$

Uvrštavanjem struja i_a , i_b i i_c u jednadžbe (4.18) i (4.20) dobivaju se direktna i poprečna komponenta struje

$$i_d = -13574 \text{ A}$$

 $i_q = 5414.7 \text{ A}$

Struje i_d i i_q zajedno s reaktancijama iz tablice 4.3. se uvrštavaju u naponske jednadžbe (4.35) i (4.36)

$$\begin{split} u_d &= 0.0015326 \cdot 13574 - 1.3949 \cdot 5414.7 - 0.0844 \cdot 13574 + 0.8003 \cdot 2521 = -6660.2 \, \mathrm{V} \\ u_q &= -0.0015326 \cdot 5414.7 - 1.4077 \cdot 13574 - 0.08439 \cdot 5414.7 + 11.3249 \cdot 2521 = 8976.7 \, \mathrm{V} \end{split}$$

Iz direktne i poprečne komponente napona dobiva se tjemena vrijednost faznog napona generatora

$$U_{fm} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = 11177.6\,\mathrm{V} \tag{4.56}$$

Rezultat dobiven jednadžbom (4.56) se može usporediti s naponom izračunatim iz nazivnih podataka stroja

$$U_{nfm} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 13800 = 11267.65 \,\mathrm{V}$$
(4.57)

Pogreška računanja iznosi

$$\Delta u = \frac{U_{nfm} - U_{fm}}{U_{nfm}} 100 = 0.8 \%$$
(4.58)

Opisani postupak se može primijeniti za bilo koju radnu točku generatora definiranu relativnom vrijednošću napona, struje i faktorom snage $(u, i, \cos \varphi)$. Za različita opterećenja generatora mogu se kreirati krivulje koje prikazuju ovisnost zasićenih reaktancija o naponu u, struji i ili faktoru snage $\cos \varphi$ pri čemu se za svaku krivulju jedan parametar mijenja, a druga dva su konstantni.



a) $X_d, X_q = f(i), u = 1.0$ p.u., $\cos \varphi = \cos \varphi_n = 0.85$



b) $X_{dq}, X_{qd} = f(i), u = 1.0$ p.u., $\cos \varphi = \cos \varphi_n = 0.85$



Sl. 4.10. Utjecaj zasićenja na iznose reaktancija prikazan kao funkcija struje armature

Iz rezultata prikazanih grafički na slici 4.10. može se zaključiti:

S povećanjem armaturne struje uz konstantan napon mreže nazivnog iznosa i konstantan nazivni faktor snage povećava se i pad napona na rasipnoj reaktanciji i otporu armaturnog namota, što rezultira povećanjem ukupnog magnetskog toka i induciranog napona. Stroj postaje zasićeniji, što uzrokuje smanjenje reaktancija X_d , X_q i X_{df} . Istovremeno s porastom zasićenja u stroju raste i utjecaj magnetske sprege između d i q osi, što se očituje u povećanju iznosa reaktanacija X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} .







b) $X_{dq}, X_{qd} = f(u), i = 1.0 \text{ p.u.}, \cos \varphi = \cos \varphi_n = 0.85$





d) $X_{af} = f(u), i = 1.0$ p.u., $\cos \varphi = \cos \varphi_n = 0.85$

Sl. 4.11. Utjecaj zasićenja na iznose reaktancija prikazan kao funkcija napona armature

Prema slici 4.11. je vidljivo da povećanjem napona uz konstantnu struju armature nazivnog iznosa i konstantan nazivni faktor snage stroj postaje sve zasićeniji zbog čega se smanjuju reaktancije X_d , X_q i X_{df} . Pri naponima većim od nazivnog uzbudna struja naglo raste, dok se kut opterećenja istovremeno smanjuje. Zasićenje će u tom slučaju više utjecati na prilike u direktnoj osi, tj. na reaktanciju X_d , što je vidljivo na slici 4.11.a. Reaktancije X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} u početku rastu, jer s povećanjem napona stroj postaje zasićeniji pa je utjecaj magnetske sprege sve izraženiji (sl. 4.11.b, d). To se događa do trenutka dok napon ne bude 3-4 % veći od nazivnog, nakon čega se reaktancije ponovno počinju smanjivati. Uzrok tome je lineariziranje magnetskih prilika u stroju koje nastupa u uvjetima ekstremnog zasićenja i istovremeno smanjenje kuta opterećenja zbog čega se smanjuje i nesimetrija u raspodjeli reluktancija u odnosu na direktnu os. Kada bi se napon nastavio povećavati to bi dovelo bi do toga da svi dijelovi stroja postanu toliko zasićeni da je permeabilnost u željezu statora i rotora konstatnog iznosa. Tada bi reaktancije X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} bile jednake nuli kao i u nezasićenom stanju, a reaktancije X_d , X_q i X_{df} bi dosegle svoj minimalne iznose.





Sl. 4.12. Utjecaj zasićenja na iznose reaktancija prikazan kao funkcija induktivnog faktora snage

Iz krivulja na slici 4.12. je vidljivo da je pri malom induktivnom faktoru snage uz nazivne vrijednosti napona i struje armature utjecaj zasićenja izraženiji u direktnoj osi. To rezultira nižim iznosima reaktancije X_d u odnosu na reaktanciju X_q (sl. 4.12.a). Razlog tome je što se pri malom induktivnom faktoru snage rezultantno protjecanje u stroju nalazi bliže d osi. Pri opterećenju nazivnom strujom uz $\cos \varphi = 0$, rezultantno protjecanje, a time i polje u stroju, se nalazi točno u direktnoj osi. Tada je raspodjela reluktancija po presjeku stroja simetrična s obzirom na d os pa su i reaktancije X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} jednake nuli. S povećanjem faktora snage raste i kut opterećenja, što rezultira sve većim pomakom osi rezultantnog protjecanja i sve većom nesimetrijom u raspodjeli reluktancija u odnosu na direktnu os. Reaktancija X_d tada počinje brže rasti i pri $\cos \varphi \approx 0.83$ postaje veća od reaktancije X_q . Utjecaj magnetske nesimetrije se odražava i na reaktancije X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} čije vrijednosti kontinuirano rastu od $\cos \varphi = 0$ do $\cos \varphi = 1$.

5. PRORAČUN PRIJELAZNE REAKTANCIJE

5.1 Nezasićena prijelazna reaktancija

Magnetski tok ulančen armaturnim namotom sinkronog turbogeneratora za vrijeme trajanja prijelazne pojave tropolnog udarnog kratkog spoja se uglavnom zatvara rasipnim putevima, tj. kroz zračni raspor i poprijeko kroz utore statora. Budući da je magnetski otpor rasipnih puteva znatno veći od magnetskog otpora željeza, bit će reaktancije armaturnog namota u kratkom spoju desetak puta manje od sinkronih reaktancija. U trenutku nakon što završi prijelazna pojava u prigušnom namotu nastupa prijelazno stanje u kojem tok koji ulančuje armaturni namot djelomično prodire u rotor, ali se još uvijek ne može preko njega u potpunosti zatvoriti zbog djelovanja kratkospojenog uzbudnog namota.

Prijelazna reaktancija u uzdužnoj osi X'_d određena je magnetskim otporom rasipnih puteva kojima se u prijelaznom stanju zatvara polje koje ulančuje armaturni namot.

U poprečnoj osi nema djelovanja uzbudnog namota, jer su d i q osi međusobno okomite pa u prijelaznom stanju teoretski vrijedi

$$X'_q = X_q \tag{5.1}$$

Za numerički proračun reaktancije X'_d potrebno je rješavati sinusno promjenjivo kvazistatičko polje. Na taj način uzimaju se u obzir struje inducirane u uzbudnom namotu. Vektorski magnetski potencijali zadovoljavaju difuzijsku jednadžbu [29]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_{iz}$$
(5.2)

gdje su

 A_z – komponenta vektorskog magnetskog potencijala u smjeru z osi

 J_z – komponenta vektora gustoće narinute struje u smjeru z osi

 J_{iz} – komponenta vektora gustoće inducirane struje u smjeru z osi

 μ – magnetska permeabilnost

Gustoća induciranih struja određuje se iz vremenske promjene vektorskog magnetskog potencijala

$$J_{iz} = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t}$$
(5.3)

Difuzijska jednadžba se rješava u fazorskoj domeni što je primjenjivo samo na linearne materijale. U tom slučaju sve veličine postaju fazori pa jednadžba poprima oblik

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \underline{A}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \underline{A}_z}{\partial y} \right) = -\underline{J}_z - j\omega\sigma\underline{A}_z$$
(5.4)

Proračun polja se vrši u kompleksnom području.

5.1.1 Model za numerički proračun nezasićene prijelazne reaktancije

Za proračun reaktancije X'_d koristi se ista mreža konačnih elemenata i isti raspored vodiča po utorima kao i za proračun reaktancije X_d . Da bi se pri rješavanju difuzijske jednadžbe izvršio proračun struje inducirane u uzbudnom namotu, diskretizirana područja koja predstavljaju vodiče uzbudnog namota definirana su kao kratkospojeni namot. Specifična električna vodljivost bakra uzbudnog namota uzeta je na temperaturi 75 $^{\circ}$ C i iznosi 48 Sm/mm². Željezo rotora je definirano kao otvoreni krug pa je gustoća induciranih struja u njemu jednaka nuli bez obzira na vremensku promjenu vektorskog magnetskog potencijala u električki vodljivom materijalu. Rezultirajući vektor armaturne struje je postavljen u direktnu os. Budući da su struje fazori, određene su tjemenom vrijednošću i faznim pomakom.

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi) \tag{5.5}$$

U pojedinim fazama se struje definiraju tako da za njihove trenutne vrijednosti u trenutku t=0 vrijedi $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$. Za fazu A se onda uzima $\varphi=0$, za fazu B je $\varphi=-120^0$, a za fazu C je $\varphi=-240^0$. Frekvencija struja je 50 Hz. Budući da je model linearan, iznos struje I_m se može proizvoljno odabrati.

5.1.2 Rezultat proračuna nezasićene prijelazne reaktancije

Izračunato magnetsko polje je prikazano na slici 5.1. pomoću linija konstantnog vektorskog magnetskog potencijala. Vidljivo je da polje koje ulančuje armaturni namot prodire u rotor u zoni širokog zuba, no struje inducirane u uzbudnom namotu ga prisiljavaju da se zatvori kroz zračni raspor i dijelom poprečno kroz utore i zube rotora.



Sl. 5.1. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije x'_{d} dinamičkom simulacijom na frekvenciji 50 Hz

Direktna komponenta armaturne struje i ulančenog toka te reaktancija X'_d računaju se prema jednadžbama (4.17), (4.18) i (4.22). Rezultat proračuna je prikazan u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Nezasićena prijelazna reaktancija izračunata linearnom dinamičkom simulacijom

i _a	i _b	ic	i _d	Ψa	ψ_{b}	Ψc	Ψ_d	x ['] _{ad2}	x' _d
[A]	[A]	[A]	[A]		[Vs	/m]		[p.u.]	[p.u.]
1000	-500	-500	1000	0.232	-0.135	-0.111	0.236	0.178	0.289

5.2 Zasićena prijelazna reaktancija

U prijelaznom stanju tropolnog udarnog kratkog spoja koji nastupa pri nazivnom naponu armaturnim namotom teče struja od pet do sedam puta veća od nazivne struje. Pri tolikoj struji dolazi do magnetskog zasićenja pojedinih dijelova stroja, što rezultira nižim vrijednostima prijelazne reaktancije nego u slučaju kada je stroj nezasićen. Smanjena prijelazna reaktancija će rezultirati većom vrijednošću prijelazne struje tropolnog udarnog kratkog spoja.

5.2.1 Model za numerički proračun zasićene prijelazne reaktancije

Za proračun zasićene prijelazne reaktancije nije pogodna dinamička simulacija jer je primjenjiva samo za linearne probleme. Zasićenje bi se moglo uzeti u obzir tako da se dio modela koji predstavlja željezo rotora i statora podijeli na nekoliko odvojenih područja i u svakom definira druga vrijednost permeabilnosti koja bi bila konstantna za svako pojedino područje. Permeabilnosti bi se određivale iz *B-H* krivulja materijala izračunavanjem prosječne magnetske indukcije u svakom području i korigiranjem iznosa permeabilnosti u iterativnom postupku dok se ne postigne odstupanje manje od traženog. Takav postupak je dugotrajan i ima ograničenu točnost.

Zbog navedenih razloga je pogodnije koristiti nelinearnu magnetostatičku simulaciju. Nepoznata struja inducirana u kratkospojenom uzbudnom namotu ne može se izračunati magnetostatičkom simulacijom, ali mora postojati da spriječi zatvaranje toka koji ulančuje armaturni namot preko jarma rotora. Taj utjecaj se može simulirati definiranjem Dirichletovih rubnih uvjeta na površini vodiča uzbudnog namota, što je prikazano na slici 5.2. Iznos vektorskih magnetskih potencijala u označenim čvorovima je jednak nuli čime se formira potencijalna barijera i onemogućuje prodor polja u vodiče uzbudnog namota [13]. Ovaj pristup proizlazi iz činjenice da je normalna komponenta vektorskog magnetskog potencijala na površini dobrog vodiča jednaka nuli, što površinu čini ekvipotencijalom. Na vanjskom obodu statora također su definirani Dirichletovi rubni uvjeti s nultim magnetskim potencijalom, a na linijama uzduž kojih je izvršen presjek stroja definirani su periodički uvjeti.



Sl. 5.2. Čvorovi s definiranim rubnim uvjetima u modelu za proračun zasićene X'_d

Budući da nema polja u vodičima uzbudnog namota, u tom dijelu modela ne treba kreirati mrežu konačnih elemenata. Mreža prikazana na slici 5.3. se sastoji od 9896 elemenata i 5120 čvorova od kojih 310 imaju definirane Dirichletove rubne uvjete, a 30 periodičke uvjete.



Sl. 5.3. Mreža konačnih elemenata za proračun zasićene prijelazne reaktancije

Struje u fazama armaturnog namota se definiraju kao i u slučaju nezasićene reaktancije X_d , tj. vrijedi $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$.

5.2.2 Rezultat proračuna zasićene prijelazne reaktancije

Nelinearnom magnetostatičkom simulacijom uz definiranje vodiča uzbudnog namota kao potencijalnom barijerom dobivena je raspodjela vektorskih magnetskih potencijala u prijelaznom stanju, prikazana na slici 5.4. Usporedi li se ovaj rezultat s rezultatom dobivenim

dinamičkom simulacijom na slici 5.1., vidljivo je da je pomoću Dirichletovih rubnih uvjeta ispravno simuliran utjecaj uzbudnog namota u prijelaznom stanju.



Sl. 5.4. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X'_d magnetostatičkom simulacijom

Iznosi zasićene prijelazne reaktancije izračunate za različite iznose armaturne struje dani su u tablici 5.2. Direktna komponenta struje je prikazana u jediničnim vrijednostima. Za baznu vrijednost struje je uzeta tjemena vrijednost nazivne fazne struje.

$$I_B = \sqrt{2}I_{nf} = 14631.5\,\mathrm{A}\tag{5.6}$$

Iznosi faznih struja i ulančenih tokova u tablici su dani za jednu paralelnu granu.

ia	i _b	i _c	i _d	ψ_a	ψ_b	Ψc	ψ_d	x' _{ad2}	x́d
[A]	[A]	[A]	[p.u.]		[Vs	/m]		[p.u.]	[p.u.]
3658	-1829	-1829	0.5	0.8331	-0.4394	-0.4394	0.8483	0.1748	0.2857
7316	-3658	-3658	1.0	1.6662	-0.8788	-0.8787	1.6966	0.1748	0.2857
14632	-7316	-7316	2.0	3.3226	-1.7505	-1.7440	3.3789	0.1741	0.2850
21947	-10974	-10974	3.0	4.8880	-2.5934	-2.5750	4.9814	0.1711	0.2820
29263	-14632	-14632	4.0	6.2557	-3.3816	-3.3617	6.4182	0.1653	0.2762
36579	-18290	-18290	5.0	7.4492	-4.1072	-4.0685	7.6913	0.1585	0.2694
43895	-21947	-21947	6.0	8.5378	-4.7832	-4.7084	8.8557	0.1521	0.2630
51210	-25605	-25605	7.0	9.5668	-5.3970	-5.2841	9.9383	0.1463	0.2572
58526	-29263	-29263	8.0	10.5603	-5.9556	-5.8171	10.9645	0.1412	0.2521

Tablica 5.2. Zasićena prijelazna reaktancija izračunata nelinearnom magnetostatičkom simulacijom

Ovisnost prijelazne reaktancije x'_d o armaturnoj struji je prikazana grafički na slici 5.5.



Sl. 5.5. Utjecaj zasićenja na iznos prijelazne reaktancije x'_d prikazan kao funkcija armaturne struje

6. PRORAČUN POČETNIH REAKTANCIJA

6.1 Nezasićene početne reaktancije

U početnom trenutku tropolnog udarnog kratkog spoja struje inducirane u vodičima prigušnog kaveza i kratkospojenog uzbudnog namota će izbaciti iz rotora magnetski tok koji ulančuje armaturni namot. Budući da je rotor turbogeneratora izrađen od masivnog čelika, on će djelovati kao dodatni prigušni namot zbog vrtložnih struja induciranih u njemu. Polje koje ulančuje armaturni namot se zatvara kroz zračni raspor i poprečno kroz utore statora. Zbog dodatnog povećanja magnetskog otpora rasipnih puteva kojima se zatvara tok, bit će početne reaktancije X'_d i X''_a manje od prijelazne reaktancije X'_d .

Pri numeričkom proračunu reaktancija X''_{d} i X''_{q} rješava se sinusno promjenjivo kvazistatičko polje čime se uzimaju u obzir struje inducirane u uzbudnom namotu, prigušnom kavezu i željezu rotora. Vektorski magnetski potencijali zadovoljavaju difuzijsku jednadžbu (5.2).

6.1.1 Model za numerički proračun nezasićenih početnih reaktancija

Za proračun reaktancija X''_{d} i X''_{q} se koristi ista mreža konačnih elemenata i isti raspored vodiča po utorima kao i za proračun nezasićenih reaktancija X_{d} i X'_{d} . Diskretizirana područja koja predstavljaju vodiče uzbudnog namota su definirana kao kratkospojeni namot. Specifična električna vodljivost bakra uzbudnog namota i prigušnog kaveza je uzeta na temperaturi 75 0 C i iznosi 48 Sm/mm². Prigušni efekt željeza rotora se uzima u obzir definiranjem električne vodljivosti željeza. Uzeta je vodljivost na 75 0 C koja iznosi 5.6 Sm/mm².

U slučaju reaktancije X''_{d} prostorni vektor struje se postavlja u direktnu os, što je zadovoljeno ako za trenutne vrijednosti struja u trenutku t=0 vrijedi $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$. Za fazu A uzima se fazni pomak $\varphi = 0$, za fazu B je $\varphi = -120^{\circ}$, a za fazu C je $\varphi = -240^{\circ}$.

Za reaktanciju $X_q^{"}$ se mora prostorni vektor struje postaviti poprečnu os, tj. u trenutku

t=0 mora biti $i_a = 0$, $i_b = -i_c$. Fazni pomak za fazu B je $\varphi = 180^0$, a za fazu C je $\varphi = 0$.

Frekvencija struja je 50 Hz, a tjemena vrijednost fazne struje je proizvoljna, jer je model linearan.

6.1.2 Rezultat proračuna nezasićenih početnih reaktancija

Rezultat proračuna polja za početni trenutak tropolnog udarnog kratkog spoja u slučaju reaktancije X''_{d} je prikazan na slici 6.1. Na slici je vidljivo da se polje koje ulančuje armaturni namot zatvara kroz zračni raspor zbog struja induciranih u uzbudnom namotu, prigušnom kavezu i masivnom rotoru.



Sl. 6.1. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X_d'' dinamičkom simulacijom na frekvenciji 50 Hz

Direktna komponenta armaturne struje i ulančenog toka te reaktancija X''_d se računaju prema jednadžbama (4.17), (4.18) i (4.22). Rezultat proračuna je prikazan u tablici 6.1. Magnetsko polje u slučaju reaktancije X''_q je prikazano na slici 6.2.



Sl. 6.2. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije $X_q^{"}$ dinamičkom simulacijom na frekvenciji 50 Hz

Početna reaktancija X''_q se računa prema jednadžbama (4.19), (4.20) i (4.23). Rezultat proračuna se nalazi u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Nezasićene početne reaktancije izračunate linearnom dinamičkom simulacijom

i _a	i _b	ic	i _d	Ψa	ψ_b	Ψc	ψ_d	x ["] _{ad2}	x″d
[A]	[A]	[A]	[A]		[Vs	/m]		[p.u.]	[p.u.]
1000	-500	-500	1000	0.191	-0.158	-0.041	0.194	0.146	0.257
ia	i _b	ic	iq	Ψa	Ψb	Ψc	Ψq	x ["] aq2	x″ _q
ia [A]	i _b [A]	i _c [A]	iq [A]	Ψa	ψ _b [Vs	ψ _c /m]	ψ_q	x ["] _{aq2} [p.u.]	x [″] q [p.u.]

U rješenju na slici 6.1. je očit pomak osi rezultantnog polja u odnosu na os protjecanja (d os), što je vidljivo i u značajnoj razlici između ulančenih tokova faza B i C u tablici 6.1. U slučaju reaktancije $X_q^{"}$ os polja se praktički podudara s osi protjecanja (q os). Takva razlika u raspodjeli polja posljedica je razlike u iznosima struja u pojedinim fazama. Iako su ti iznosi fizikalno korektni što se tiče definicije problema, nedostatak struje u fazi A u slučaju reaktancije $X_q^{"}$ utječe na konačnu raspodjelu polja, ali ne i na iznose reaktancija. Ispravnost navedenih tvrdnji se može potvrditi ako se proračun ponovi s modelom u kojem je rotor zakrenut za 90⁰, tako da se os faze A podudara s q osi. Tada će definicije struja za pojedine početne reaktancije vrijediti obrnuto. Na slikama 6.3. i 6.4. prikazano je polje dobiveno navedenim modelom.



Sl. 6.3. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije $X_d^{"}$ dinamičkom simulacijom na frekvenciji 50 Hz (os faze A se podudara s q osi)



Sl. 6.4. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X''_q dinamičkom simulacijom na frekvenciji 50 Hz (os faze A se podudara s q osi)

U ovom slučaju je pomak osi rezultantnog polja prisutan pri proračunu reaktancije X''_q , no iznosi reaktancija su, kao što se vidi iz tablice 6.2., ostali nepromijenjeni.

i _a	i _b	ic	iq	ψ_a	ψ_{b}	ψ_{c}	ψ_q	x ["] _{aq2}	x″ _q
[A]	[A]	[A]	[A]		[Vs	/m]		[p.u.]	[p.u.]
1000	-500	-500	1000	0.182	-0.112	-0.076	0.184	0.139	0.250
i _a	i _b	ic	i _d	Ψa	ψ_b	ψ_{c}	ψ_d	x″ _{ad2}	x″ _d
i _a [A]	i _b [A]	i _c [A]	i _d [A]	Ψa	ψ _b [Vs	ψ _c /m]	ψ_{d}	x ["] _{ad2} [p.u.]	x ["] _d [p.u.]

Tablica 6.2. Nezasićene početne reaktancije izračunate linearnom dinamičkom simulacijom (os faze A se podudara s q osi)

Iz ovog razmatranja slijedi da se proračun nezasićenih početnih reaktancija može vršiti bilo kojim od ova dva modela.

6.2 Zasićene početne reaktancije

U trenutku nastanka simetričnog tropolnog udarnog kratkog spoja koji nastupa pri nazivnom naponu armaturnim namotom može poteći struja i desetak puta veća od nazivne struje. To znači da razmatranje provedeno u uvodnom dijelu opisa proračuna zasićene prijelazne reaktancije vrijedi i ovdje.

6.2.1 Model za numerički proračun zasićenih početnih reaktancija

Problem proračuna zasićenih početnih reaktancija također zahtijeva primjenu magnetostatičke simulacije. Nepoznate struje inducirane u uzbudnom namotu, prigušnom kavezu i željezu rotora se mogu simulirati definiranjem Dirichletovih rubnih uvjeta na površini rotora, što je prikazano na slici 6.5. Površina rotora postaje na taj način potencijalna barijera.



Sl. 6.5. Čvorovi s definiranim rubnim uvjetima u modelu za proračun zasićenih X''_{d} i X''_{q}

Budući da zbog definiranih rubnih uvjeta nema polja u rotoru, u tom dijelu modela ne treba kreirati mrežu konačnih elemenata. Mreža prikazana na slici 6.6. sastoji se od 9942 elemenata i 5120 čvorova od kojih 254 imaju definirane Dirichletove rubne uvjete, a 21 periodičke uvjete.



Sl. 6.6. Mreža konačnih elemenata za proračun zasićenih početnih reaktancija

Struje u fazama armaturnog namota se definiraju kao i u slučaju nezasićenih reaktancija X_d i X_q .

6.2.2 Rezultat proračuna zasićenih početnih reaktancija

Nelinearnom magnetostatičkom simulacijom uz definiranje površine rotora kao potencijalnom barijerom dobivena je raspodjela vektorskih magnetskih potencijala u slučaju reaktancije X_d'' prikazana na slici 6.7.



Sl. 6.7. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X_d'' magnetostatičkom simulacijom

Iznosi zasićene početne reaktancije X''_{d} izračunate za različite iznose armaturne struje su dani u tablici 6.3. Svi komentari navedeni uz tablicu s rezultatima proračuna zasićene prijelazne reaktancije vrijede i u ovom slučaju.

Na slici 6.8. je prikazana raspodjela vektorskih magnetskih potencijala za slučaj zasićene reaktancije $X_q^{"}$.



Sl. 6.8. Linije konstantnog vektorskog magnetskog potencijala pri proračunu reaktancije X''_q magnetostatičkom simulacijom

Rezultati proračuna zasićene X''_q su dani u tablici 6.3.

i	j,	i	i.))(216))()) <i>(</i> ,	v″	v ″.
	[A]		-10 [m u]	Ψa	Ψυ	$\frac{\Psi_c}{m}$	Ψd	[nu]	[nu]
			[p.u.]	0.6004		/III] 	0.60.65	[p.u.]	[p.u.]
3658	-1829	-1829	0.5	0.6384	-0.3167	-0.3161	0.6365	0.1312	0.2421
7316	-3658	-3658	1.0	1.2769	-0.6334	-0.6321	1.2731	0.1312	0.2421
14632	-7316	-7316	2.0	2.5408	-1.2596	-1.2572	2.5328	0.1305	0.2414
21947	-10974	-10974	3.0	3.7521	-1.8613	-1.8580	3.7411	0.1285	0.2394
29263	-14632	-14632	4.0	4.8368	-2.4413	-2.4379	4.8509	0.1250	0.2359
36579	-18290	-18290	5.0	5.7909	-2.9921	-2.9836	5.8525	0.1206	0.2315
43895	-21947	-21947	6.0	6.6594	-3.5026	-3.4876	6.7696	0.1163	0.2272
51210	-25605	-25605	7.0	7.4794	-3.9798	-3.9577	7.6321	0.1123	0.2232
58526	-29263	-29263	8.0	8.2723	-4.4321	-4.4055	8.4607	0.1090	0.2199
65842	-32921	-32921	9.0	9.0480	-4.8635	-4.8349	9.2648	0.1061	0.2170
73158	-36579	-36579	10.0	9.8126	-5 2778	5 2487	-10.051	0.1036	0.2145
,5150	50517	30377	10.0	7.0120	-5.2770	-5.2407	-10.051	0.1050	0.2145
ia	i _b	i _c	i _q	Ψa	Ψ _b	-3.2487 Ψc	ψ _q	x ["] _{aq2}	x ["] q
i _a [A]	i _b [A]	i _c [A]	i _q [p.u.]	Ψ _a	<u>ψ_b</u> [Vs	$\frac{\psi_c}{m}$	Ψ _q	x ["] _{aq2} [p.u.]	$\frac{x''_{q}}{[p.u.]}$
i _a [A] 0	i _b [A] -3168	i _c [A] 3168	i _q [p.u.] 0.5	ψ _a 0	-5.2776 Ψ _b [Vs -0.5462	ψ _c /m] 0.5452	ψ _q 0.6301	x ["] _{aq2} [p.u.] 0.1299	x ["] q [p.u.] 0.2408
i _a [A] 0	i _b [A] -3168 -6336	ic [A] 3168 6336	iq [p.u.] 0.5 1.0	ψ_a 0 0	Ψ _b [Vs -0.5462 -1.0923	ψc /m] 0.5452 1.0904	$\frac{\psi_q}{0.6301}$	x ["] _{aq2} [p.u.] 0.1299 0.1298	x ["] _q [p.u.] 0.2408 0.2407
ia [A] 0 0 0	i _b [A] -3168 -6336 -12671	ic [A] 3168 6336 12671	iq [p.u.] 0.5 1.0 2.0	ψ _a 0 0 0	ψb [Vs] -0.5462 -1.0923 -2.1755	ψc /m] 0.5452 1.0904 2.1732	$\frac{\psi_q}{0.6301}$ 0.6301 1.2602 2.5107	x ["] _{aq2} [p.u.] 0.1299 0.1298 0.1294	x ["] _q [p.u.] 0.2408 0.2407 0.2403
$ \begin{array}{c} i_a \\ \hline [A] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} $	i _b [A] -3168 -6336 -12671 -19007	ic [A] 3168 6336 12671 19007	iq [p.u.] 0.5 1.0 2.0 3.0	Va 0 0 0 0 0 0 0	Ψb Ψb -0.5462 -1.0923 -2.1755 -3.2095	Ψc ψc /m] 0.5452 1.0904 2.1732 3.2100	Ψq 0.6301 1.2602 2.5107 3.7063	x"aq2 [p.u.] 0.1299 0.1298 0.1294 0.1273	x"q [p.u.] 0.2408 0.2407 0.2403
i _a [A] 0 0 0 0 0	$\begin{array}{r} i_{b} \\ \hline [A] \\ \hline -3168 \\ \hline -6336 \\ \hline -12671 \\ \hline -19007 \\ \hline -25343 \end{array}$	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343	$\begin{array}{c} i_{q} \\ \hline [p.u.] \\ 0.5 \\ \hline 1.0 \\ 2.0 \\ \hline 3.0 \\ 4.0 \end{array}$	Va 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Ψb Ψb -0.5462 -1.0923 -2.1755 -3.2095 -4.1548	Ψc /m] 0.5452 1.0904 2.1732 3.2100 4.1626	Ψq 0.6301 1.2602 2.5107 3.7063 4.8021	x"aq2 [p.u.] 0.1299 0.1298 0.1294 0.1273 0.1237	x ["] q [p.u.] 0.2408 0.2407 0.2403 0.2382 0.2346
$ \begin{array}{c} i_{a} \\ [A] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $	$\begin{array}{r} i_{b} \\ \hline [A] \\ -3168 \\ -6336 \\ -12671 \\ -19007 \\ -25343 \\ -31678 \end{array}$	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343 31678	$\begin{array}{c} i_{q} \\ \hline [p.u.] \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \\ 5.0 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi_a \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} $	$\begin{array}{r} -0.52178\\ \hline \Psi_b \\ \hline \hline Vs\\ -0.5462\\ -1.0923\\ -2.1755\\ -3.2095\\ -4.1548\\ -5.0101 \end{array}$	$\begin{array}{r} \hline \psi_c \\ \hline \psi_c \\ \hline m] \\ \hline 0.5452 \\ \hline 1.0904 \\ \hline 2.1732 \\ \hline 3.2100 \\ \hline 4.1626 \\ \hline 5.0145 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} & \psi_q \\ \hline 0.6301 \\ 1.2602 \\ 2.5107 \\ 3.7063 \\ 4.8021 \\ 5.7888 \end{array}$	x [°] _{aq2} [p.u.] 0.1299 0.1298 0.1294 0.1273 0.1237 0.1193	x"q [p.u.] 0.2408 0.2407 0.2403 0.2382 0.2346 0.2302
$\begin{array}{c} i_{a} \\ \hline [A] \\ \hline 0 \\ 0 \\$	i _b [A] -3168 -6336 -12671 -19007 -25343 -31678 -38014	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343 31678 38014	$\begin{array}{c} i_{q} \\ [p.u.] \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \\ 5.0 \\ 6.0 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi_a \\ \hline \psi_a \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} $	$\begin{array}{c} -0.52778\\ \hline \psi_b \\ \hline [Vs]\\ -0.5462\\ -1.0923\\ -2.1755\\ -3.2095\\ -4.1548\\ -5.0101\\ -5.8037\end{array}$	$\begin{array}{c} -5.2437\\ \hline \psi_{c}\\ \hline m]\\ \hline 0.5452\\ \hline 1.0904\\ \hline 2.1732\\ \hline 3.2100\\ \hline 4.1626\\ \hline 5.0145\\ \hline 5.8009\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -10.031\\ \hline \psi_{q}\\ \hline \\ 0.6301\\ 1.2602\\ 2.5107\\ 3.7063\\ 4.8021\\ 5.7888\\ 6.6999 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.1030\\ \hline x^{'}_{aq2}\\ \hline [p.u.]\\ 0.1299\\ 0.1298\\ 0.1294\\ 0.1273\\ 0.1237\\ 0.1237\\ 0.1193\\ 0.1151\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.2149\\ \hline x_{q}\\ \hline p.u.]\\ 0.2408\\ 0.2407\\ 0.2403\\ 0.2382\\ 0.2346\\ 0.2302\\ 0.2260\\ \end{array}$
$\begin{array}{c} i_{a} \\ \hline [A] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $	i _b [A] -3168 -6336 -12671 -19007 -25343 -31678 -38014 -44349	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343 31678 38014 44349	$\begin{array}{c} i_{q} \\ \hline [p.u.] \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \\ 5.0 \\ 6.0 \\ 7.0 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi_a \\ \hline \psi_a \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} $	$\begin{array}{c} -0.52778\\ \hline \psi_b \\ \hline [Vs]\\ -0.5462\\ -1.0923\\ -2.1755\\ -3.2095\\ -4.1548\\ -5.0101\\ -5.8037\\ -6.5326\end{array}$	$\begin{array}{c} -5.2487\\ \hline \psi_{c}\\ \hline m]\\ \hline 0.5452\\ \hline 1.0904\\ \hline 2.1732\\ \hline 3.2100\\ \hline 4.1626\\ \hline 5.0145\\ \hline 5.8009\\ \hline 6.5386\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -10.031\\ \hline \Psi_{q}\\ \hline \\ 0.6301\\ 1.2602\\ 2.5107\\ 3.7063\\ 4.8021\\ 5.7888\\ 6.6999\\ 7.5467\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.1030\\ \hline x^{'}_{aq2}\\ \hline [p.u.]\\ 0.1299\\ 0.1298\\ 0.1294\\ 0.1273\\ 0.1237\\ 0.1237\\ 0.1193\\ 0.1151\\ 0.1111\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.2149\\ \hline x_{q}\\ \hline p.u.]\\ 0.2408\\ 0.2407\\ 0.2403\\ 0.2382\\ 0.2346\\ 0.2302\\ 0.2260\\ 0.2220\\ \end{array}$
$\begin{array}{c} i_{a} \\ \hline [A] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $	ib [A] -3168 -6336 -12671 -19007 -25343 -31678 -38014 -44349 -50685	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343 31678 38014 44349 50685	$\begin{array}{c} i_{q} \\ \hline [p.u.] \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \\ 5.0 \\ 6.0 \\ 7.0 \\ 8.0 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi_a \\ \hline \psi_a \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\$	$\begin{array}{c} -0.52778\\ \hline \psi_b \\ \hline [Vs]\\ -0.5462\\ -1.0923\\ -2.1755\\ -3.2095\\ -4.1548\\ -5.0101\\ -5.8037\\ -6.5326\\ -7.2236\end{array}$	$\begin{array}{c} -5.2487\\ \hline \psi_{c}\\ \hline m]\\ \hline 0.5452\\ \hline 1.0904\\ \hline 2.1732\\ \hline 3.2100\\ \hline 4.1626\\ \hline 5.0145\\ \hline 5.8009\\ \hline 6.5386\\ \hline 7.2428\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -10.031\\ \hline \psi_{q}\\ \hline \\ 0.6301\\ 1.2602\\ 2.5107\\ 3.7063\\ 4.8021\\ 5.7888\\ 6.6999\\ 7.5467\\ 8.3522\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.1030\\ \hline x^{'}_{aq2}\\ \hline [p.u.]\\ 0.1299\\ 0.1298\\ 0.1294\\ 0.1273\\ 0.1237\\ 0.1237\\ 0.1193\\ 0.1151\\ 0.1111\\ 0.1076\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.2149\\ \hline x_{q}\\ \hline p.u.]\\ 0.2408\\ 0.2407\\ 0.2403\\ 0.2382\\ 0.2346\\ 0.2302\\ 0.2260\\ 0.2220\\ 0.2185\\ \end{array}$
$\begin{array}{c} i_{a} \\ \hline [A] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $	ib [A] -3168 -6336 -12671 -19007 -25343 -31678 -38014 -44349 -50685 -57021	ic [A] 3168 6336 12671 19007 25343 31678 38014 44349 50685 57021	$\begin{array}{c} i_{q} \\ \hline i_{q} \\ \hline [p.u.] \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \\ 5.0 \\ 6.0 \\ 7.0 \\ 8.0 \\ 9.0 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi_a \\ \hline \psi_a \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\$	$\begin{array}{c} -0.52778\\ \hline \psi_b \\ \hline [Vs]\\ -0.5462\\ -1.0923\\ -2.1755\\ -3.2095\\ -4.1548\\ -5.0101\\ -5.8037\\ -6.5326\\ -7.2236\\ -7.2236\\ -7.8950\end{array}$	$\begin{array}{r} -5.2487\\ \hline \psi_{c}\\ \hline /m]\\ \hline 0.5452\\ \hline 1.0904\\ \hline 2.1732\\ \hline 3.2100\\ \hline 4.1626\\ \hline 5.0145\\ \hline 5.8009\\ \hline 6.5386\\ \hline 7.2428\\ \hline 7.9275\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -10.031\\ \hline \psi_q \\ \hline \\ 0.6301\\ 1.2602\\ 2.5107\\ 3.7063\\ 4.8021\\ 5.7888\\ 6.6999\\ 7.5467\\ 8.3522\\ 9.1351 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.1030\\ \hline x^{'}_{aq2}\\ \hline [p.u.]\\ 0.1299\\ 0.1298\\ 0.1294\\ 0.1273\\ 0.1237\\ 0.1237\\ 0.1193\\ 0.1151\\ 0.1111\\ 0.1076\\ 0.1046\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.2149\\ \hline x_{q}\\ \hline p.u.]\\ 0.2408\\ 0.2407\\ 0.2403\\ 0.2382\\ 0.2346\\ 0.2302\\ 0.2260\\ 0.2220\\ 0.2185\\ 0.2155\\ \end{array}$

Tablica 6.3.	Zasićene početne i	reaktancije	izračunate	nelinearnom
	magnetostatičkom	simulacijon	п	

Iznosi početnih reaktancija izračunati magnetostatičkim simulacijama pri strujama $i_d=0.5$ i $i_q=0.5$ gdje je stroj još uvijek nezasićen su niži nego iznosi dobiveni dinamičkom simulacijom. Definiranjem rotora kao potencijalnom barijerom polje koje ulančuje armaturni namot je u potpunosti izbačeno iz rotora. U stvarnosti polje prodire u vodljivi materijal do dubine određene vodljivošću materijala, njegovom permeabilnošću i frekvencijom polja. Dubina prodiranja se računa prema izrazu [29]

$$d_k \approx \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\kappa}} \tag{6.1}$$

i predstavlja dubinu na kojoj se val priguši na 36.8 % početne vrijednosti. Na dubini $3d_k$ val se priguši na približno 5 % početnog iznosa. Dinamička simulacija je vršena na frekvenciji 50 Hz pa se uz poznate električne vodljivosti i permeabilnosti bakra i čelika mogu izračunati dubine prodiranja.

bakar (20^{0} C)	čelik (20 ⁰ C)
κ =57 Sm/mm ²	κ =7.7 Sm/mm ²
$\mu_r = 1$	μ _r =994
$d_k=9.4 \text{ mm}$	d _k =0.81 mm

Tablica 6.4. Dubine prodiranja sinusnog polja u bakar i čelik rotora pri frekvenciji 50 Hz

Magnetski otpor rasipnih puteva u magnetostatičkoj simulaciji je veći nego u dinamičkoj gdje se dio polja ipak zatvara kroz površinski sloj željeza i bakra rotora. Zbog toga su početne reaktancije u nezasićenom stanju izračunate magnetostatikom nešto manje.

Ovisnost početnih reaktancije x''_{d} i x''_{q} o armaturnoj struji je prikazana grafički na slici 6.9.



Sl. 6.9. Utjecaj zasićenja na iznos početnih reaktancija prikazan kao funkcija armaturne struje

7. USPOREDBE REZULTATA PRORAČUNA I REZULTATA MJERENJA

Mjerenje reaktancija je sastavni dio ispitivanja koja vrši prizvođač prije isporuke novog generatora. Mjerni su postupci koji se pri tome koriste propisani standardom IEC 34-4 [21].

Nažalost, tako izmjerene reaktancije redovito odgovaraju nezasićenom stanju stroja pa direktna usporedba s rezultatima numeričkog proračuna zasićenih reaktancija u ovom konkretnom slučaju nije moguća.

Sinkrone reaktancije x_d i x_q pod opterećenjem se određuju se iz pokusa u kojem se u odabranoj radnoj točki mjere radna snaga P, jalova snaga Q, napona na stezaljkama U, struja armature I, struja uzbude I_f i kut opterećenja δ . Uz izmjerene parametre unesene u jediničnim vrijednostima i zanemarenje pada napona na otporu armature, reaktancije se računaju pomoću izraza navedenih u [10]

$$x_d = x_\sigma + \frac{u_q + x_\sigma i_d}{i_f - i_d} \tag{7.1}$$

$$x_q = \frac{u_d}{i_q} \tag{7.2}$$

gdje je

$$u_d = u \sin \delta \tag{7.3}$$

$$u_q = u\cos\delta \tag{7.4}$$

$$i_d = -\frac{P}{u}\sin\delta + \frac{Q}{u}\cos\delta$$
(7.5)

$$i_q = \frac{P}{u}\cos\delta - \frac{Q}{u}\sin\delta$$
(7.6)

Od poznatih radova u kojima su vršene usporedbe rezultata mjerenja i proračuna zasićenih sinkronih reaktancija mogu se spomenuti [7,10,24].

U tablici 7.1. su dane usporedbe izračunatih i izmjerenih nezasićenih reaktancija za generator snage 247 MVA.

Tablica 7.1. Usporedbe rezultata numeričkog proračuna i izmjerenih vrijednosti

Darametar	Konačni	Mierono	
Falalliciai	(1)	(2)	Mjereno
x _d [p.u.]		2.262	2.126
x ['] _d [p.u.]	0.289	0.286	0.300
x ["] _d [p.u.]	0.257	0.242	0.232
x _q [p.u.]		2.198	
x ["] _q [p.u.]	0.250	0.241	0.231

(1) Dinamička simulacija (50 Hz)

(2) Magnetostatička simulacija

Izračunata nezasićena sinkrona reaktancija x_d je 6.4 % veća od izmjerene koja je određena iz nezasićenog kratkospojnog omjera.

Prijelazna reaktancija x'_d je 3.7 % manja od mjerene kada se računa dinamičkom simulacijom i 4.7 % manja kada se računa magnetostatički. Slična iskustva postoje s proračunom reaktancija turbogeneratora snage 194 MVA gdje je x'_d izračunata dinamički bila čak 16.8 % manja od mjerene [27]. Postaje očito da se ovom metodom proračuna dobiva reaktancija x'_d nešto nižeg iznosa od prijelazne reaktancije određene iz oscilograma armaturnih struja pri tropolnom udarnom kratkom spoju.

Početne reaktancije x_d'' i x_q'' su 10.8 % veće od mjerenih kada se računaju dinamičkom simulacijom, odnosno 4.3 % veće kada se računaju magnetostatički. Izmjerene početne reaktancije u tablici 7.1. su dobivene napajanjem parova faza uz kratkospojeni uzbudni namot.

Od izračunatih parametara koji su važni za proračun samih rektancija, a mogu se usporediti s rezultatima mjerenja su rasipna reaktancija x_{σ} i nazivna uzbudna struja I_{fn} . Nazivna struja uzbude se ne mjeri pri realnom nazivnom optrećenju generatora, nego se određuje iz Švedskog dijagrama na način kako je to propisano standardom [21].

	x _σ [p.u.]	I _{fn} [A]
izračunato	0.1906	2521
izmjereno	0.1730	2526.7

Tablica 7.2. Usporedbe izračunatih i izmjerenih vrijednosti rasipne reaktancije i nazivne uzbudne struje

8. ZAKLJUČAK

Metodom konačnih elemenata su izračunate nezasićene i zasićene sinkrone reaktancije dvopolnog sinkronog turbogeneratora snage 247 MVA. Numerički izračunate nezasićene reaktancije su uspoređene s mjerenim vrijednostima dobivenim standardnim ispitivanjima generatora u proizvodnji. Razlike između izračunatih i izmjerenih reaktancija se kreću od 3 % do 11 %.

Proračun reaktancija 2D metodom konačnih elemenata korištenom u ovom radu je ograničen samo na aktivni dio stroja. Budući da u čeonom prostoru stroja ne postoji ravnina na koju su svi vodiči istovremeno okomiti, kao što je to slučaj u aktivnom dijelu stroja, za proračun rasipne reaktancije glava namota je korištena analitička metoda. Metoda se temelji na podjeli trodimenzionalne konture koju opisuje vodič u glavi svitka na konačni broj ravnih segmenata. Za sve moguće kombinacije ravnih segmenata računaju se ulančeni tokovi, a odatle i međuinduktiviteti, tako da se vektorski magnetski potencijal svakog ravnog segmenta jedne glave integrira po površini svih segmenta u svim drugim glavama namota. Točnost analitičkog proračuna ovisi o točnosti definiranja geometrije svitka i uzimanju u obzir utjecaja željeznog paketa, osovine rotora i kućišta. Evolventni dio glave svitka je definiran matematičkom formulom u parametarskom obliku pa ga je moguće aproksimirati proizvoljnim brojem segmenata. Višestrukim proračunima se pokazalo da je dovoljno modelirati glavu svitka s ukupno 20 – 30 segmenata, jer dodatno povećanje ne rezultira značajnim promjenama u konačnom rezultatu. Metodom zrcalnog odslikavanja uz zadavanje konstantnog iznosa relativne permeabilnosti uzet je u obzir utjecaj željeza paketa, no razlike između tako izračunate i izmjerene ukupne rasipne reaktancije x_{σ} bile su veće nego kada je utjecaj željeza zanemaren. Izmjerenoj vrijednosti reaktancije x_{σ} najbliži je bio rezultat dobiven uz $\mu_r = 0$. Budući da je to imaginarni slučaj s obzirom na iznos permeabilnosti μ_r koji predstavlja donju granicu iznosa rasipne reaktancije glava namota x_{gl} , a time i reaktancije x_{σ} , koja se za ovaj konkretni stroj može izračunati opisanim modelom, pri proračunu svih ostalih reaktancija uzeta je rasipna reaktancija glava namota dobivena za $\mu_r = 1$.

Pri proračunu zasićenih reaktancija opterećenog generatora u stacionarnom stanju potrebno je uzeti u obzir magnetsku spregu između d i q osi koja se očituje u pojavi ulančenog toka u osi okomitoj na os protjecanja. Utjecaj tog toka je uzet u obzir uvođenjem reaktancija X_{dq} , X_{qd} i X_{qf} koje su u nezasićenom stanju jednake nuli. Proračun napona na stezaljkama generatora u nazivnoj radnoj točki pomoću proširenih naponski jednadžbi sa zasićenim reaktancijama pokazao je ispravnost opisanog dvoosnog modela opterećenog generatora u stacionarnom stanju. Glavni problem pri opterećenju je ovisnost zasićenih reaktancija o trenutnoj radnoj točki. Zbog toga je za svaku promjenu opterećenja potrebno ponovo izvršiti iterativni proračun polja u stroju, a zatim i svih reaktancija koje odatle slijede. Programski paket **Magnet 5.2**, kao i velika većina ostalih komercijalnih programskih paketa, nije pogodan za iterativne proračune zbog nemogućnosti potpune automatizacije unošenja podataka, analize dobivenih rezultata i ponovnog postavljanja modela za proračun u sljedećoj iteraciji. Zbog toga je cijeli postupak proračuna zasićenih reaktancija prilično dugotrajan i kao takav prikladan samo za principni prikaz funkcioniranja modela.

Ograničenost primjene difuzijske jednadžbe u kompleksnom području samo na linearne modele s konstantnom permeabilnošću može se riješiti formiranjem potencijalne barijere u dijelovima stroja u kojima u početnom i prijelaznom stanju teku inducirane struje. Takav pristup omogućuje proračun zasićenih početnih i prijelaznih reaktancija nelinearnom magnetostatičkom simulacijom. Pri struji armature 10 p.u. izračunato je da se početne reaktancije smanjuju za 11.5 %, dok je prijelazna reaktancija manja za 11.8 % pri struji 8 p.u. Udarna struja kratkog spoja izračunata uzimajući u obzir zasićenje će stoga biti veća nego struja dobivena uz nezasićene početne reaktancije.

Općenito se može zakljućiti da metoda konačnih elemenata, osim proračuna nezasićenih reaktancija, uz zadovoljavajuću točnost, omogućuje i analizu utjecaja zasićenja na iznose reaktancija u normalnom pogonu, kao i u početnom i prijelaznom stanju tropolnog udarnog kratkog spoja. Glavni nedostatak svakog klasičnog (analitičkog) proračuna reaktancija je njegova ograničenost na nezasićeno stanje. Tako dobiveni parametri ne mogu dovoljno točno opisati prilike u opterećenom sinkronom generatoru, što je pokazano na primjeru nazivne radne točke.

LITERATURA

- [1] G.A. Campbell, *Mutual Inductances of Circuits Composed of Straight Wires*, Physical review, sv. 5, str. 452-458, 1915.
- [2] L. A. Kilgore, Calculation of Synchronous Machine Constants Reactances & Time Constants Affecting Transient Characteristics, Trans. AIEE, str. 1201-1214, 1931.
- [3] C. Kingsley, *Saturated Synchronous Reactances*, Electrical Engineering, str. 300-305, 1935.
- [4] D. Hamdi-sepen, Saturation Effects in Synchronous Machine, Trans. AIEE, str. 1349-1353, 1954.
- [5] E.F. Fuchs, E.A. Erdelyi, *Determination of Waterwheel Alternator Steady-State Reactances From Flux Plots*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, sv. 6, str. 2510-2518, 1972.
- [6] I. Mandić, Proračun induktiviteta glava namota turbogeneratora, KONČAR Elektrotehnički institut, Zagreb 1978.
- [7] J.R. Smith et altri, *Determination of Saturated Reactances of Turbogenerators*, IEE Proceedings, sv. 127, str. 122-128, 1980.
- [8] M. Šantak, *Program za elektromagnetski proračun turbogeneratora*, KONČAR Elektrotehnički institut, Zagreb 1980.
- [9] S.M. Minnich et altri, *Load Characteristics of Synchronous Generators by the Finite Element Method*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, sv. 1, str. 1-13, 1981.
- [10] T. Sugiyama, T. Nishiwaki, S. Takeda, S. Abe, *Measurement of Synchronous Machine Parameters Under Operating Condition*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, sv. PAS-101, str. 895-903, 1982.
- [11] D. Vidović, I. Mandić, *Podloge i program za proračun reaktancije glava statorskog namota turbogeneratora*, KONČAR Elektrotehnički institut, Zagreb 1983.
- [12] C.N. Ashtiani, D. A. Lowther, Simulation of the Steady-State Reactances of a Large Water-Wheel Generator by Finite Elements, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, sv. 7, str. 1781-1787, 1984.
- [13] C.N. Ashtiani, D. A. Lowther, Simulation of the Transient and Subtransient Reactances of a Large Hydrogenerator Generator by Finite Elements
- [14] G. Dhatt, G. Touzot, *The Finite Element Method Displayed*, John Wiley & Sons, 1984.
- [15] J. Wang, Finite Element Analysis of Saturated Synchronous Reactances of Salient Pole Synchronous Machine, Electric Machines and Power Systems, sv. 11, str. 201-213, 1986.

- [16] Z. Dovedan, M. Smilevski, J.D. Zalokar, *FORTRAN 77 s tehnikama programiranja*, Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije, Ljubljana 1988.
- [17] M. Petrinić, D. Radonić, I, Mandić, *Primjena metode konačnih elemenata u elektromagnetskom proračunu velikih sinkronih generatora*, XIX savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled 1989.
- [18] I.N. Brojnštejn, K.A. Semendjajev, *Matematički priručnik za inženjere i studente*, Tehnička knjiga, Zagreb 1991.
- [19] MagNet 5 Reference Manual For TOOLBOX Users (2D), Infolytica Corporation, 1992.
- [20] D. Radonić, S. Črnko, Izračunavanje srednje duljine vodiča namota turbogeneratora, KONČAR – Elektrotehnički institut, Zagreb 1993.
- [21] Standard IEC 34-4, Rotating Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities From Tests, CEI 1995
- [22] F. Soen et altri, *Inside AutoCAD 13c4*, New Riders Publishing, Idianapolis, Indiana 1996.
- [23] Z. Sirotić, Z. Maljković, Sinkroni strojevi, skripta, Zagreb 1996.
- [24] Y. Koubaa, M.B.A. Kamoun, Setting the Obviousness With a Numerical Method of the Cross-Saturation Effect in Synchronous Machines, ELECTRIMACS '96, str. 1029-1034, Saint-Nazaire 1996.
- [25] J. Plançon, Finite Element Analysis for Determining the Operating Parameters of High-Power Generators, ELECTRIMACS '96, str. 427-433, Saint-Nazaire 1996.
- [26] Z. Haznadar, Ž. Štih, *Elektromagnetizam*, Školska knjiga, Zagreb 1997.
- [27] D. Ban, D. Žarko, K. Čelić-Baran, Proračun i analiza elektromagnetskih parametara turbogeneratora primjenom 2D metode konačnih elemenata, Treće savjetovanje hrvatskog komiteta CIGRÉ, Cavtat 1997.
- [28] M. Jadrić, B. Frančić, *Dinamika električnih strojeva*, GRAPHIS, Zagreb 1997.
- [29] Z. Haznadar, Ž. Štih, *Elektromagnetizam*, Školska knjiga, Zagreb 1997.
- [30] D. Ban, D. Žarko, Z. Maljković, *The Analysis of Saturated Reactances of the 247 MVA Turbogenerator by Using the Finite Element Method*, International Conference on Electrical Machines ICEM'98, str. 1424-1430, Istanbul 1998.

POPIS OZNAKA

Ā	_	vektorski magnetski potencijal
A_{71}	-	amplituda osnovnog harmonika vektorskog magnetskog potencijala u vodiču
2, 1		statora
A_{7}	-	komponenta vektorskog magnetskog potencijala u smjeru z osi
a	-	polumjer razvojnog kruga evolvente kružnice
a_n	-	broj paralelnih grana namota statora
b_s^{r}	-	širina štapa u glavi svitka
$\cos \varphi_n$	-	nazivni faktor snage
$\cos \varphi$	_	faktor snage
[C]	-	matrica transformacije iz $d.a.0$ koordinata u $a.b.c$ koordinate
$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1}$	-	matrica transformacije iz a,b,c koordinata u $d,q,0$ koordinate
d_k	-	dubina prodiranja sinusno promjenjivog magnetskog polja u električki vodljivi
		materijal
f	-	nazivna frekvencija
f _n	-	faktor namota
f_{n1}	-	faktor namota osnovnog harmonika
fnf	-	faktor uzbudnog namota
i	-	struja statorskog namota izražena u [p.u.]
i_a, i_b, i_c	-	trenutne vrijednosti struja u fazama A, B, C statora
i_d	-	direktna komponenta struje
i_q	-	poprečna komponenta struje
$\dot{i_0}$	-	nulta komponenta struje
i_f	-	trenutna vrijednost struje uzbudnog namota
<i>i</i> _D	-	trenutna vrijednost struje prigušnog namota u uzdužnoj osi
i_Q	-	trenutna vrijednost struje prigušnog namota u poprečnoj osi
I_n	-	nazivna linijska struja statorskog namota
I_{nf}	-	nazivna fazna struja statorskog namota
I_f	-	struja uzbude
Ifn	-	nazivna struja uzbude
I_a	-	struja armature
I'_a	-	struja armature preračunata na uzbudnu stranu
I_B	-	bazna vrijednost struje statorskog namota
I_m	-	maksimalna vrijednost struje faze statorskog namota
Í	-	struja u zrcalnoj slici modela svitka za proračun rasipne reaktancije glava
		namota
Ι	-	struja u modelu svitka za proračun rasipne reaktancije glava namota
[<i>i</i>]	-	vektor struja
J_z	-	komponenta vektora gustoće narinute struje u smjeru z osi
J_{iz}	-	komponenta vektora gustoće inducirane struje u smjeru z osi
L_a, L_b, L_c	-	induktiviteti faza A, B, C statora
L_d	-	induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota statora u uzdužnoj osi
L_q	-	induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota statora u poprečnoj osi
L_0	-	nulti induktivitet
L_f	-	induktivitet uzbudnog namota
L_D	-	induktivitet prigušnog namota u uzdužnoj osi

L_Q	-	induktivitet prigušnog namota u poprečnoj osi
$\tilde{L_{dq}}$	-	induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota statora u uzdužnoj osi proporcionalan
1		kvocijentu ulančenog toka ψ_{da} i struje i_a
L_{ad}	_	induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota statora u poprečnoj osi proporcionalan
		kvocijentu ulančenog toka ψ_{ad} i struje i_d
Lie	_	induktivitet koji se odnosi na tok u zračnom rasporu proporcionalan članu λ_{0}
-700		magnetske vodlijvosti zračnog rasnora
Ι	_	induktivitet koji se odnosi na tok u zračnom rasporu proporcionalan članu λ_{2}
$\mathbf{L}_{\lambda 2}$		magnetske vodlijvosti zračnog rasnora
I		racioni induktivitat namota statora
L_{σ}	-	unutarnii induktivitet vodiče ekruglog presieke u glavi nemote
L_u	-	uluunna duliina statorskog pakata
l 1	-	dulina vodiče u clavi nemote
l_g	-	duljina vodiča u glavi namota
l_{v1}	-	duijina vodica namola statora
$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix}$	-	matrica induktiviteta
$\begin{bmatrix} L_S \end{bmatrix}$	-	submatrica induktiviteta statora
$\begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix}$	-	submatrica induktiviteta fotora
$\begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix}$	-	
$[L_{sr}]$	-	transponirana submatrica meduinduktiviteta
$[L_{dq0fDQ}]$	-	matrica induktiviteta u $d,q,0$ koordinatama
$[L_{abcfDQ}]$	-	matrica induktiviteta u a,b,c koordinatama
m	-	broj faza
M	-	meduinduktivitet glava dvaju svitaka statorskog namota
M_{ab}	-	meduinduktivitet faze A i faze B statora
M_{ac}	-	meduinduktivitet faze A i faze C statora
M_{bc}	-	meduinduktivitet faze B i faze C statora
M_{af}	-	međuinduktivitet faze A statora i uzbudnog namota
M_{bf}	-	međuinduktivitet faze B statora i uzbudnog namota
M_{cf}	-	međuinduktivitet faze C statora i uzbudnog namota
M_{aD}	-	međuinduktivitet faze A statora i prigušnog namota u uzdužnoj osi
M_{bD}	-	međuinduktivitet faze B statora i prigušnog namota u uzdužnoj osi
M_{cD}	-	međuinduktivitet faze C statora i prigušnog namota u uzdužnoj osi
M_{aQ}	-	međuinduktivitet faze A statora i prigušnog namota u poprečnoj osi
M_{bQ}	-	međuinduktivitet faze B statora i prigušnog namota u poprečnoj osi
M_{cQ}	-	međuinduktivitet faze C statora i prigušnog namota u poprečnoj osi
M_{fD}	-	međuinduktivitet uzbudnog namota i prigušnog namota u uzdužnoj osi
M_s	-	međuinduktivitet faza statorskog namota od toka koji ne prolazi kroz zračni
		raspor
M_{1dm}	-	međuinduktivitet faze statorskog namota i uzbudnog namota kada im se osi
		poklapaju
M_{1Dm}	-	maksimalna vrijednost međuinduktiviteta statorskog namota i prigušnog namota
		kada se os statorskog namota prve faze poklapa s prigušnim namotom u
		uzdužnoj osi
M_{1Qm}	-	maksimalna vrijednost međuinduktiviteta statorskog namota i prigušnog namota
		kada se os statorskog namota prve faze poklapa s prigušnim namotom u
		poprečnoj osi
M_{df}	-	međuinduktivitet statorskog namota u uzdužnoj osi i uzbudnog namota
M_{qf}	-	međuinduktivitet statorskog namota u poprečnoj osi i uzbudnog namota
M_{dD}	-	međuinduktivitet statorskog namota u uzdužnoj osi i prigušnog namota u
		uzdužnoj osi

M_{qQ}	-	međuinduktivitet statorskog namota u poprečnoj osi i prigušnog namota u			
		poprečnoj osi			
n	-	nazivna brzina vrtnje			
Ν	-	Neumannov integral			
N_1	-	broj utora statora			
N_2	-	diobeni broj utora rotora			
N'_2	-	broj namotanih utora rotora			
Р	-	radna snaga			
р	-	broj pari polova			
Q	-	jalova snaga			
r	-	otpor namota statora po fazi izražen u [p.u.]			
R. W	_	polarne koordinate točaka na evolvetni kružnice			
<i>R</i> м. <i>W</i> м	-	polarne koordinate početne točke evolventnog dijela svitka u glavi namota			
Rs Ws	_	polarne koordinate krainie točke evolventnog dijela svitka u glavi namota			
$R_{1,00}$	_	othor faze namota statora na temeperaturi 20° C			
$R_{1,475}$	_	otpor faze namota statora na temeperaturi 75° C			
[<i>R</i>]	_	matrica otnora			
S _n	_	naziyna prividna snaga generatora			
$S_{\nu 1}$	_	površina presieka vodiča namota statora			
Sral	_	razmak štapova u glavama dvaju susjednih svitaka			
т _я t _м	_	parametar za proračun x i v koordinata početne točke evolventnog dijela svitka u			
- 101		glavi namota			
ts	-	parametar za proračun x i v koordinata krainie točke evolventnog dijela svitka u			
. 0		glavi namota			
U	-	liniiski napon na stezalikama generatora			
u	-	fazni napon izražen u [p.u.]			
U_n	_	nazivni liniiski napon			
U_{nf}	_	nazivni fazni napon			
U_{fm}	-	tiemena vrijednost faznog napona			
U_{nfm}	-	tiemena vrijednost nazivnog faznog napona			
U_{io}	-	vrijednost induciranog faznog napona tražena pri iterativnom proračunu			
10		metodom konačnih elemenata			
u_{io}	-	vrijednost induciranog faznog napona tražena pri iterativnom proračunu			
		metodom konačnih elemenata izražena u [p.u.]			
U_i	-	inducirani fazni napon			
U_B	-	bazna vrijednost napona			
U_c	-	napon induciran u mjernom svitku koji služi za mjerenje reaktancije X_b			
u_a, u_b, u_c	-	trenutne vrijednosti napona u fazama A, B, C statora			
u_d	-	direktna komponenta napona			
u_q	-	poprečna komponenta napona			
u_f	-	trenutna vrijednost napona uzbudnog namota			
[<i>u</i>]	-	vektor napona			
Wfgr	-	broj zavoja po fazi i paralelnoj grani statorskog namota			
Wa	-	broj u seriju spojenih zavoja jedne faze statorskog namota			
Wc	-	broj zavoja mjernog svitka koji služi za mjerenje reaktancije X_b			
W_f	-	broj zavoja uzbudnog namota			
X_d	-	sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi izražena u [Ω]			
x_d	-	sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi izražena u [p.u.]			
X_{ad2}	-	sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava namota			
		X_{gl} izražena u $[\Omega]$			
x_{ad2}	-	sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava namota			
-------------------------------	---	------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--
		x_{gl} izražena u [p.u.]			
X_a	_	sinkrona reaktancija u poprečnoj osi izražena u $[\Omega]$			
x_a	_	sinkrona reaktancija u poprečnoj osi izražena u [p.u.]			
X_{aa2}	_	sinkrona reaktancija u poprečnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava namota			
		$X_{a'}$ izražena u [Ω]			
χ_{aa}	_	sinkrona reaktancija u poprečnoj osi bez udiela rasipne reaktancija glava namota			
1142		$\mathbf{x}_{a'}$ izražena u [p.u.]			
X_{df}	_	reaktancija namota u uzdužnoj osi proporcinalna kvocijentu ulančenog toka $w_{\ell\ell}$			
uj		i struie <i>i</i>			
Xaf	_	reaktancija namota u poprečnoj osi proporcinalna kvocijentu ulančenog toka w_{ee}			
2 . qj		i struje i_{ℓ}			
X,	_	reaktancija namota u uzdužnoj osi proporcinalna kvocijentu ulančenog toka w			
11 aq		i struje <i>i</i>			
Y,	_	reaktancija namota u uzdužnoj osi proporcinalna kvocijentu ulančenog toka <i>u</i>			
2 1 qa	_	i struie i_{a}			
V.		nulta reaktancija izražena u $[\Omega]$			
\mathbf{X}_{0} \mathbf{V}	-	reginna realtancija glava statorskog namota izražana u [O]			
Λ_{gl}	-	rasipna reaktancija glava statorskog namota izražena u [su]			
λ_{gl} V	-	rasipna reaktancija glava statorskog namota izražena u [O]			
Λ_{σ}	-	rasipna reaktancija statorskog namota izražena u [52]			
x_{σ}	-	rasipna reaktancija statorskog namota izrazena u [p.u.]			
\mathbf{X}_a V	-	ukupna reaktancija jedne faze statorskog namota uz izvađeni rotor			
Λ_b	-	reaktancija jedne laže statorskog namota zbog dijela toka koji se zatvara u			
v′		prostoru u kojem se maće nalazi lotor			
\mathbf{X}_{d}	-	prijelazna reaktancija u uzdužnoj osl izrazena u [22]			
X_{q}	-	prijelazna reaktancija u poprečnoj osi izražena u $[\Omega]$			
x_{ad2}	-	prijelazna reaktancija u uzdužnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava			
,		namota x_{gl} izrazena u [p.u.]			
x_d	-	prijelazna reaktancija u uzdužnoj osi izražena u [p.u.]			
X_{d}	-	početna reaktancija u uzdužnoj osi izražena u $[\Omega]$			
X_{q}	-	početna reaktancija u poprečnoj osi izražena u $[\Omega]$			
x_{ad2}	-	početna reaktancija u uzdužnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava namota			
//		x_{gl} izražena u [p.u.]			
x_d	-	početna reaktancija u uzdužnoj osi izražena u [p.u.]			
x _{aq2}	-	početna reaktancija u poprečnoj osi bez udjela rasipne reaktancija glava namota			
<i>,,</i>		x_{gl} izražena u [p.u.]			
x_d	-	početna reaktancija u poprečnoj osi izražena u [p.u.]			
Z_{u1}	-	broj vodiča u utoru statora			
Y/Q	-	skraćenje namota			
<i>y</i> ₁	-	širina svitka izražena brojem utorskih koraka			
α	-	kut između izvodnice i visine stošca			
γ	-	kut između osi faze A statora i uzdužne osi rotora			
δ	-	kut opterećenja			
δ_i	-	fazni pomak osnovnog harmonika induciranog napona u odnosu na q os			
φ	-	fazni pomak između napona i struje armature			
К	-	specifična električna vodljivost materijala			
K ₂₀	-	specifična električna vodljivost bakra na 20 °C			
		• <i>J</i>			

$arphi_{io}$	-	fazni pomak između induciranog napona i struje armature koji se traži pri iterativnom proračunu metodom konačnih elemenata			
φ_i	-	fazni pomak između induciranog napona i struje armature			
λ	-	magnetska vodljivost zračnog raspora			
λ_o	-	prvi član razvoja funkcije magnetske vodljivosti zračnog raspora u beskonačan red kosinusnih funkcija			
λ_2	-	drugi član razvoja funkcije magnetske vodljivosti zračnog raspora u beskonačan red kosinusnih funkcija			
μ_r	-	relativna permeabilnost željeza			
μ	-	magnetska permeabilnost			
Θ_a	-	osnovni harmonik protjecanja armaturnog namota			
Θ_{f}	-	osnovni harmonik protjecanja uzbudnog namota			
Θ	-	osnovni harmonik rezultantnog protjecanja			
$artheta_a$	-	kut između osi namota faze A i realne osi referentnog koordinatnog sustava u kompleksnoj ravnini			
\mathcal{G}_b	-	kut između osi namota faze B i realne osi referentnog koordinatnog sustava u			
		kompleksnoj ravnini			
\mathcal{G}_c	-	kut između osi namota faze C i realne osi referentnog koordinatnog sustava u			
		kompleksnoj ravnini			
ρ, φ, z	-	prostorne cilindrične koordinate			
σ	-	specifična električna vodljivost materijala			
ω	-	električna kutna brzina			
ψ	-	kut između rezultirajućeg vektora armaturne struje i q osi			
$\underline{\psi}$	-	rezultirajući vektor ulančenog toka			
ψ_a, ψ_b, ψ_c	-	ulančeni tokovi faza A, B, C statora			
ψ_d	-	direktna komponenta ulančenog toka			
ψ_q	-	poprečna komponenta ulančenog toka			
ψ_0	-	nulta komponenta ulančenog toka			
ψ_{f}	-	ulančeni tok uzbudnog namota			
ψ_D	-	ulančeni tok prigušnog namota u uzdužnoj osi			
ψ_Q	-	ulančeni tok prigušnog namota u poprečnoj osi			
ψ_{df}	-	tok ulančen namotom statora u uzdužnoj osi od struje koja teče uzbudnim			
		namotom			
ψ_{qf}	-	tok ulančen namotom statora u poprečnoj osi od struje koja teče uzbudnim namotom			
ψ_{dq}	-	tok ulančen namotom statora u direktnoj osi od poprečne komponente struje koja teče namotom statora u poprečnoj osi			
ψ_{qd}	-	tok ulančen namotom statora u poprečnoj osi od direktne komponente struje koja teče namotom statora u direktnoj osi			

PRILOG A: Iznos Neumannovog integrala za dvije linije u proizvoljnom položaju u prostoru



Sl. A-1 Linije u prostoru koje leže na mimoilaznim pravcima

$$N = \cos\varphi \left[\overline{CB} \ln \frac{|\overline{aB}| + |\overline{bB}| + |\overline{ab}|}{|\overline{aB}| + |\overline{bB}| - |\overline{ab}|} - \overline{CA} \ln \frac{|\overline{aA}| + |\overline{bA}| + |\overline{ab}|}{|\overline{aA}| + |\overline{bA}| - |\overline{ab}|} + \overline{cb} \ln \frac{|\overline{bA}| + |\overline{bB}| + |\overline{AB}|}{|\overline{bA}| + |\overline{bB}| - |\overline{AB}|} - \frac{|\overline{Cc}| - |\overline{cc}| - |\overline$$

Udaljenosti između pojedinih točaka su u jednadžbi A-1 označene linijom iznad odgovarajućih slova. Udaljenosti pod znakom apsolutne vrijednosti se uzimaju uvijek s pozitivnim predznakom. Bilo koja od udaljenosti \overline{ca} , \overline{cb} , \overline{CA} ili \overline{CB} će biti pozitivna ako je kut između njoj pripadajućeg vektora i vektora smjera pravca na kojem ona leži jednak nuli, odnosno negativna ako je taj kut 180⁰.

POSEBNI SLUČAJEVI

a) Pravci su međusobno okomiti ($\varphi = 90^{\circ}$)

$$N = 0 \tag{A-2}$$

b) Pravci su međusobno paralelni ($\varphi = 0$ ili $\varphi = 180^{\circ}$)

$$N = \left|\overline{AB}\right| \ln \frac{\left|\overline{aB}\right| + \overline{a'B}}{\left|\overline{bB}\right| + \overline{b'B}} - \overline{b'A} \ln \frac{\left|\overline{bB}\right| + \overline{b'B}}{\left|\overline{bA}\right| + \overline{b'A}} + \overline{a'A} \ln \frac{\left|\overline{aB}\right| + \overline{a'B}}{\left|\overline{aA}\right| + \overline{a'A}} - \left(-\left|\overline{aA}\right| + \left|\overline{bA}\right| + \left|\overline{aB}\right| - \left|\overline{bB}\right|\right)$$
(A-3)

Točke a' i b' su projekcije točaka a i b na pravac p_1 (sl. A-I). Predznaci za udaljenosti $\overline{a'A}$, $\overline{a'B}$, $\overline{b'A}$ i $\overline{b'B}$ se određuju na isti način kao i za udaljenosti \overline{ca} , \overline{cb} , \overline{CA} i \overline{CB} u jednadžbi A-1.



Sl. A-2 Jedna konačna i dvije beskonačne linije u prostoru koje leže na mimoilaznim pravcima

Za slučaj jedne konačne i dvije antiparalelne beskonačne linije se Neumannov integral računa prema izrazu

$$\begin{split} N &= \cos\varphi \Bigg[-\overline{c_2b_2} \ln \frac{\overline{b_2A} + \overline{b_2B} + \overline{AB}}{\overline{b_2A} + \overline{b_2B} - \overline{AB}} - \overline{c_1a_1} \ln \frac{\overline{a_1A} + \overline{a_1B} + \overline{AB}}{\overline{a_1A} + \overline{a_1B} - \overline{AB}} + \\ &+ \overline{c_1B} \ln \frac{\overline{b_2B} - \overline{c_2B} \cos\varphi - \overline{c_2b_2}}{\overline{a_1B} - \overline{c_1B} \cos\varphi + \overline{c_1a_1}} + \overline{c_1A} \ln \frac{\overline{a_1A} - \overline{c_1A} \cos\varphi + \overline{c_1a_1}}{\overline{b_2A} - \overline{c_2A} \cos\varphi - \overline{c_2b_2}} + \\ &+ \overline{c_2c_1} \ln \frac{\overline{b_2B} - \overline{c_2B} \cos\varphi - \overline{c_2b_2}}{\overline{b_2A} - \overline{c_2A} \cos\varphi - \overline{c_2b_2}} - \overline{|\overline{C_1c_1}|} \operatorname{ctg}\varphi \Bigg[\operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{C_1B}}{\overline{|\overline{C_1c_1}|}} \sin\varphi \Bigg) - \\ &- \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{C_1A}}{\overline{|\overline{C_1c_1}|}} \sin\varphi \Bigg) - \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{|\overline{C_1c_1}|}}{\overline{|\overline{a_1B}|}} \operatorname{ctg}\varphi + \frac{\overline{c_1a_1}\overline{c_1B}}{\overline{|\overline{C_1c_1}|\overline{a_1B}|} \sin\varphi \Bigg) + \\ &+ \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{|\overline{C_1c_1}|}}{\overline{|\overline{C_2c_2}|}} \sin\varphi \Bigg) - \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{|\overline{C_2c_2}|}}{\overline{|\overline{b_2B}|}} \operatorname{ctg}\varphi - \frac{\overline{c_2b_2}\overline{c_2B}}{\overline{|\overline{C_2c_2}|\overline{b_2B}|} \sin\varphi \Bigg) + \\ &+ \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{|\overline{C_2c_2}|}}{\overline{|\overline{C_2c_2}|}} \sin\varphi \Bigg) - \operatorname{arctg} \Bigg(\frac{\overline{|\overline{C_2c_2}|}}{\overline{|\overline{C_2c_2}|\overline{b_2A}|} \sin\varphi \Bigg) \Bigg] + (\overline{A-4}) \end{aligned}$$

Udaljenosti koje se ne nalaze pod znakom apsolutne vrijednosti se uzimaju s predznakom.

POSEBNI SLUČAJEVI

a) Pravci su međusobno okomiti ($\varphi = 90^{\circ}$)

$$N = 0 \tag{A-5}$$

b) Pravci su međusobno paralelni ($\phi = 0$ ili $\phi = 180^{\circ}$)

$$N = \left|\overline{AB}\right| \ln \frac{\left|\overline{a_1B}\right| + \overline{a_1'B}}{\left|\overline{b_2B}\right| + \overline{b_2'B}} - \overline{b_2'A} \ln \frac{\left|\overline{b_2B}\right| + \overline{b_2'B}}{\left|\overline{b_2A}\right| + \overline{b_2'A}} + \overline{a_1'A} \ln \frac{\left|\overline{a_1B}\right| + \overline{a_1'B}}{\left|\overline{a_1A}\right| + \overline{a_1'A}} - \left(-\left|\overline{a_1A}\right| + \left|\overline{b_2A}\right| + \left|\overline{a_1B}\right| - \left|\overline{b_2B}\right|\right)$$
(A-6)

PRILOG B: Ispis programa xgl

```
PROGRAM ZA IZRACUNAVANJE RASIPNE REAKTANCIJE GLAVA STATORSKOG
С
С
     NAMOTA TURBOGENERATORA
PROGRAM XGL
С
     ******
С
     DEKLARIRANJE VARIJABLI
С
     CHARACTER IME*10
     REAL R(100), FI(100), Z(100), F(100), X(100), Y(100), SM(100), SN(100)
     PARAMETER (PI=3.141592653)
С
     UNOS PODATAKA
С
     * * * * * * * * * * * * *
     WRITE(6,5)
5
     FORMAT(//////////T5,'NAZIV DATOTEKE S PODACIMA : '\)
     READ(5,21) IME
21
     FORMAT(A10)
     OPEN(8, FILE=IME, STATUS='OLD', IOSTAT=IOS)
     REWIND(8)
     OPEN(9,FILE='X_GL')
     REWIND(9)
     READ(8,1)NU, P, AP, N, D, AMIR
     FORMAT(I3,F15.0,F15.0,I3,F15.9,F15.0)
1
     READ(8,2)ROMG, ALFAG, ALPG, ROMD, ALFAD, ALRD, Y1, SRGL, BU1, AIG
2
     FORMAT(10F15.9)
С
     ISPIS ULAZNIH PODATAKA
     *****
С
     WRITE(9,32)NU, P, AP, N, D, AMIR, ROMG, ALFAG, ALRG, ROMD, ALFAD, ALRD, Y1,
               SRGL, BU1, AIG
     FORMAT(//25X,'U L A Z N I P O D A C I'/25X,25('*')////2X,'BROJ U
32
    *TORA: NU =',I3/2X,'BROJ PARI POLOVA: P =',F5.2/2X,'BROJ PARALELNIH
     * GRANA: AP =',F5.2/2X,'BROJ TOCAKA NA SVITKU: N =',I3/2X,'PROMJER
    *VODICA: D (m) =',F9.6/2X,'RELATIVNA PERMEABILNOST ZELJEZA: MIR =',
    *F9.2/2X, POLUMJER POCETKA EVOLVENTE U GORNJEM SLOJU UTORA: ROMG (m
    *) =',F9.6/2X,'KUT NAGIBA GLAVE IZ GORNJEG SLOJA UTORA: ALFAG (ST.)
    * =',F6.2/2X,'DULJINA RAVNOG DIJELA VODICA NA IZLAZU IZ PAKETA U GO
    *RNJEM'/2X,'SLOJU UTORA: LRG (m) ='F9.6/2X,'POLUMJER POCETKA EVOLVE
    *NTE U DONJEM SLOJU UTORA: ROMD (m) =',F9.6/2X,'KUT NAGIBA GLAVE IZ
    * DONJEG SLOJA UTORA: ALFAD (ST.) =', F6.2/2X, 'DULJINA RAVNOG DIJELA
    * VODICA NA IZLAZU IZ PAKETA U DONJEM'/2X,'SLOJU UTORA: LRD (m) ='F
    *9.6/2X, 'KORAK SVITKA: Y1 =', F6.2/2X, 'RAZMAK MEDJU VODICIMA U GLAVI
     * NAMOTA: SRGL (m) =',F9.6/2X,'SIRINA UTORA STATORA: BU1 (m) =',F9.
    *6/2X, 'ISTAK GLAVE NAMOTA: IG (m) = ', F9.6)
С
     IZRACUNAVANJE KOORDINATA TOCAKA NA GORNJOJ POLOVICI SVITKA
С
     ALFAG=ALFAG*PI/180.
     R(1)=ROMG
     FI(1) = 0.
     Z(1) = 0.
     R(2)=ROMG
     FI(2) = 0.
     Z(2) = ALRG
     TMG=SQRT((2*PI*ROMG/NU/(BU1+SRGL))**2-1.)
     PSIMG=TMG-ATAN(TMG)
     AG=NU*(BU1+SRGL)/(2*PI*SIN(ALFAG))
```

```
RMG=SQRT((AG*TMG)**2+AG**2)
      Q1=NU/(2*P)
      GAMASR=PI*Y1/(2*P*Q1)
     PSISG=PSIMG+GAMASR*SIN(ALFAG)
С
     ODREDJIVANJE PARAMETRA TSG IZ FUNKCIJE (t-arctg(t)=PSISG)
     T=TMG
     EPS=1E-7
1000 CONTINUE
      TN=T-(T-ATAN(T)-PSISG)*(1+T**2)/(T**2)
     T=TN
     IF (ABS(T-ATAN(T)-PSISG).GT.EPS) GOTO 1000
     TSG=T
     PARAMETAR TSG JE IZRACUNAT
С
     PRINT*
     PRINT*, ' PARAMETAR TSG JE IZRACUNAT'
     RSG=SQRT((AG*TSG)**2+AG**2)
     NE = 2 + (N - 8) / 2
     DELTAT=(TSG-TMG)/(NE-1)
      T=TMG
     DO 1001 I=3,NE
        T=T+DELTAT
         PSI=T-ATAN(T)
        RE=SQRT((AG*T)**2+AG**2)
        R(I)=RE*SIN(ALFAG)
         FI(I)=(PSI-PSIMG)/SIN(ALFAG)
         Z(I)=ALRG+(RE-RMG)*COS(ALFAG)
1001 CONTINUE
     R(NE+1)=RSG*SIN(ALFAG)
     FI(NE+1)=(PSISG-PSIMG)/SIN(ALFAG)
      Z(NE+1)=ALRG+(RSG-RMG)*COS(ALFAG)
     R(NE+2) = R(NE+1)
     FI(NE+2) = FI(NE+1)
     Z(NE+2) = AIG
      IZRACUNAVANJE KOORDINATA TOCAKA NA DONJOJ POLOVICI SVITKA
С
С
      ALFAD=ALFAD*PI/180.
     R(N)=ROMD
     FI(N) = 2 * GAMASR
     Z(N) = 0.
     R(N-1) = ROMD
     FI(N-1) = 2 * GAMASR
      Z(N-1) = ALRD
     TMD=SQRT((2*PI*ROMD/NU/(BU1+SRGL))**2-1.)
     PSIMD=TMD-ATAN(TMD)
      AD=NU*(BU1+SRGL)/(2*PI*SIN(ALFAD))
      RMD=SQRT((AD*TMD)**2+AD**2)
     PSISD=PSIMD+GAMASR*SIN(ALFAD)
С
     ODREDJIVANJE PARAMETRA TSD IZ FUNKCIJE (t-arctg(t)=PSISD)
     T=TMD
      EPS=1E-7
1010 CONTINUE
     TN=T-(T-ATAN(T)-PSISD)*(1+T**2)/(T**2)
     T=TN
      IF (ABS(T-ATAN(T)-PSISD).GT.EPS) GOTO 1010
     TSD=T
С
      PARAMETAR TSD JE IZRACUNAT
     PRINT*,' PARAMETAR TSD JE IZRACUNAT'
     PRINT*
     RSD=SQRT((AD*TSD)**2+AD**2)
      DELTAT=(TSD-TMD)/(NE-1)
     T=TMD
      DO 1011 I=N-2, N-NE+1, -1
```

```
T=T+DELTAT
         PSI=T-ATAN(T)
         RE=SQRT((AD*T)**2+AD**2)
         R(I)=RE*SIN(ALFAD)
         FI(I)=FI(N)-(PSI-PSIMD)/SIN(ALFAD)
         Z(I)=ALRD+(RE-RMD)*COS(ALFAD)
1011 CONTINUE
      R(NE+4)=RSD*SIN(ALFAD)
      FI(NE+4)=FI(N)-(PSISD-PSIMD)/SIN(ALFAD)
      Z(NE+4)=ALRD+(RSD-RMD)*COS(ALFAD)
      R(NE+3) = R(NE+4)
      FI(NE+3) = FI(NE+4)
      Z(NE+3) = AIG
С
      UCITAVANJE I ISPIS TOCAKA GLAVA NAMOTA U CILINDRICNIM KOORDINATAMA
С
      (R,FI,Z) TE PRETVORBA U PRAVOKUTNE KOORDINATE (X,Y,Z)
      С
      DO 10 I=1,N
        WRITE(9,25)I
        FORMAT(//30X,'TOCKA ',I3,':')
25
        WRITE(9,4)
4
        FORMAT(/25X,'CILINDRICNE KOORDINATE')
        WRITE(9,3)R(I),FI(I)*180./PI,Z(I)
        FORMAT(26X, 'R(m) =', F13.8/26X, 'FI(st) =', F13.8/26X, 'Z(m) =',
3
               F13.8)
        F(I) = FI(I)
        X(I) = R(I) * COS(F(I))
        Y(I) = R(I) * SIN(F(I))
        WRITE(9,9)
9
        FORMAT(/25X,'PRAVOKUTNE KOORDINATE')
        WRITE(9,11)X(I),Y(I),Z(I)
11
        FORMAT(9X, 'X(m) =', F10.7, 3X, 'Y(m) =', F10.7, 3X, 'Z(m) =', F10.7)
10
      CONTINUE
      AK=2.0*PI/NU
      WRITE(9,26)
      FORMAT(///30X,'R E Z U L T A T I'/30X,17('*'))
26
      WRITE(9,12)
     FORMAT(//9X,'GLAVA 1 -',2(10X,'GLAVA 1 -')/5X,'REALNI DIO GLAVE',4
12
     *X, 'ZRCALNA SLIKA', 5X, 'ZRCALNA SLIKA BESK.', 2X, 'UKUPNI MEDJUIND.'/2
     *3X, 'KONACNIH DJ. GLAVE', 4X, 'ANTIPAR. DJ. GL. '/12X, '(H)', 15X, '(H)',
     *2(17X, '(H)'))
С
      IZRACUNAVANJE INDUKTIVITETA M1, M2 I M3 ZA SVE KOMBINACIJE SVITAKA
C
      DO 40 I=1,NU
     IF (I .EQ. NU/5) PRINT*, ' IZVRSENO JE 20% PRORACUNA MEDJUINDUKTIV
     *ITETA'
      IF (I .EQ. NU*2/5) PRINT*,' IZVRSENO JE 40% PRORACUNA MEDJUINDUKT
     *IVITETA'
     IF (I .EO. NU*3/5) PRINT*, ' IZVRSENO JE 60% PRORACUNA MEDJUINDUKT
     *IVITETA'
     IF (I .EQ. NU*4/5) PRINT*, ' IZVRSENO JE 80% PRORACUNA MEDJUINDUKT
     *TVTTETA'
     IF (I .EQ. NU) PRINT*, ' IZVRSENO JE 100% PRORACUNA MEDJUINDUKTIVI
     *TETA '
         AM=0.0
         AM1=0.0
         AM3=0.0
         DO 30 J=1,N-1
          DO 20 K=1,N-1
             Z000=Z(K)
             ZZ=Z(K+1)
             IF(K.EQ.1) Z000 = -Z(K+1)
             IF(K.EQ.(N-1)) ZZ=-Z(K)
             AKSI1=R(K)*COS(F(K)+(I-1)*AK)
             ETA1=R(K)*SIN(F(K)+(I-1)*AK)
```

```
AKSI2=R(K+1)*COS(F(K+1)+(I-1)*AK)
              ETA2=R(K+1)*SIN(F(K+1)+(I-1)*AK)
              IF(I.EQ.1) GOTO 15
              CALL FNN(X(J), Y(J), Z(J), X(J+1), Y(J+1), Z(J+1), AKSI1, ETA1,
                         Z000,AKSI2,ETA2,ZZ,FN)
              AM=AM+FN*1.0E-7
              IF (K.EQ.1.OR.K.EQ.N-1) GOTO 20
15
              Z1 = -Z(K)
              Z2 = -Z(K+1)
              CALL FNN(X(J), Y(J), Z(J), X(J+1), Y(J+1), Z(J+1), AKSI1, ETA1,
                         Z1,AKSI2,ETA2,Z2,FN)
              AM1=AM1+FN*1.0E-7
20
           CONTINUE
             Z3 = -Z(2)
             Z4 = -Z(N-1)
             AKSI11=R(2)*COS(F(2)+(I-1)*AK)
             ETA11=R(2)*SIN(F(2)+(I-1)*AK)
             AKSI22=R(N-1)*COS(F(N-1)+(I-1)*AK)
             ETA22=R(N-1)*SIN(F(N-1)+(I-1)*AK)
             CALL FPN(AKSI11,ETA11,Z3,AKSI22,ETA22,Z4,X(J),Y(J),Z(J),
                       X(J+1), Y(J+1), Z(J+1), FP)
             AM3=AM3+FP*1.0E-7
30
             CONTINUE
          SM(I)=AM-((1.0-AMIR)/(1.0+AMIR))*AM1+(2.0*AMIR/(1.0+AMIR))*AM3
          SN(I) = ABS(SM(I))
          IF(I.EQ.1) VM=SM(I)
          WRITE(9,39)I,AM,AM1,AM3,SM(I)
39
          FORMAT(/1X, I2, 3X, 2(E13.7, 6X), E13.7, 7X, E13.7)
40
      CONTINUE
      DPOL=D*0.5
      ALV1=0.
      DULL=0.
      DO 80 I=1,N-1
          UDT=SQRT((X(I+1)-X(I))*2+(Y(I+1)-Y(I))*2+(Z(I+1)-Z(I))*2)
          IF(I.EQ.1.OR.I.EQ.N-1) GOTO 60
          CALL FNN(0.,0.,0.,UDT,0.,0.,0.,DPOL,0.,UDT,DPOL,0.,FN)
          GOTO 70
60
          UDT0=-UDT
          CALL FNN(0.,0.,0.,UDT,0.,0.,UDT0,DPOL,0.,UDT,DPOL,0.,FN)
70
          ALV1=ALV1+FN*1.E-7
          DULL=DULL+UDT
80
      CONTINUE
      ALU=DULL*0.5*1.E-7
      WRITE(9,17) ALU
      WRITE(6,17) ALU
17
      FORMAT(///2X,'UNUTARNJI SAMOINDUKTIVITET: LU=',1E11.6,' (H)')
      WRITE(9,54) DULL
      WRITE(6,54) DULL
54
      FORMAT(2X, 'DULJINA GLAVE NAMOTA: DULL=',1E11.6,' (M)')
      U = 0.
      DO 100 NJ=1,N-2
          DO 90 M=NJ+1,N-1
            \texttt{CALL FNN}(\texttt{X}(\texttt{NJ}),\texttt{Y}(\texttt{NJ}),\texttt{Z}(\texttt{NJ}),\texttt{X}(\texttt{NJ+1}),\texttt{Y}(\texttt{NJ+1}),\texttt{Z}(\texttt{NJ+1}),\texttt{X}(\texttt{M}),\texttt{Y}(\texttt{M}),
                      Z(M), X(M+1), Y(M+1), Z(M+1), FN)
            U=U+FN
90
          CONTINUE
100
      CONTINUE
      ALV=2.*U*1.E-7
      ALVU=ALV1+ALV+VM
      Q=NU/(3.*2.*P)
      B=NU/(2.*P)
      IZRACUNAVANJE SAMOINDUKTIVITETA GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE:
С
      A = O + 1.
      C=B+1.
      D=2.*P-2.
      SF101=0.
      DO 150 E=0,D
```

	F0=E+1.
	G=C+E*B
	H=G+Q
	SF11=0.
	I1=G
	I2=G+(Q-1.)
	DO 110 I3=I1,I2
	SF12=(H-I3)*SN(I3)
	SF11=SF11+SF12
110	CONTINUE
	SF13=0
	$T_{1}=G_{-}(O_{-}1_{-})$
	12-C-1
	DO 120 J3-J1 J2
	DO = 120 = 05 = 02
	GP12-GP12-GP14
100	SF13=SF13+SF14
120	CONTINUE
	$SF102 = (2 \cdot P - F0) * (SF11 + SF13)$
	SF101=SF101+SF102
150	CONTINUE
	SF15=0.
	DO 160 K=2,Q
	SF16=(A-K)*SM(K)
	SF15=SF15+SF16
160	CONTINUE
	SF103=2.*P*SF15
	SF104=(SF101+SF103)*4.
	DSF=2.*NU/3.
	SF105=DSF*(ALU+ALVU)
	SF=SF104+SF105
	XFR=2.*PI*50.*SF
С	KRAJ IZRACUNAVANJA SAMOINDUKTIVITETA GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE
C	IZRACUNAVANJE MEDJUINDUKTIVITETA GLAVA NAMOTA DVIJE FAZE
-	V=2.*P-1
	AME101=0
	Q-P0+1
	AMF I I = 0.
	$K \perp = T$
	KZ = T + (Q - T)
	DO 170 K3=K1,K2
	AMF12 = (U - K3) * SN(K3)
	AMF11=AMF11+AMF12
170	CONTINUE
	AMF13=0.
	L1=T-(Q-1)
	L2=T-1
	DO 180 L3=L1,L2
	AMF14 = (L3 - (T - Q)) * SN(L3)
	AMF13=AMF13+AMF14
180	CONTINUE
	AMF102=4.*P*(AMF11+AMF13)
	AMF101 = AMF101 + AMF102
190	CONTINUE
100	
	XMP=2 *DT*50 *AMF
	$M_{M} = 2 \cdot 11 50 \cdot M_{M}$
	VIND = (DF + Z, AMF)/AF Z VIND = (DF + Z, AMF)/AF Z
a	AFA4-2, "P1" 30, "RIND KDAT TZDAGUNANANTA MEDILIINDIKETUITEENA GIAUA NAMORA DUITE EAZE
	KYAO IZKACONAVANOA MEDUUTNDUKIIVIIEIA GLAVA NAMOLA DVIJE FAZE
	ωτο τημείο 10 λιττ.
1.0	WKIIE(0,13) ALVU
ТЭ	$\Box \cap \Box \cap$
	FORMAT(2X,'VANJSKI SAMOINDUKTIVITET: LV=',1E11.6,' (H)')
	FORMAT(2X, 'VANJSKI SAMOINDUKTIVITET: LV=',1E11.6,' (H)')

	WRITE(6,41) SF
41	FORMAT(/2X,'SAMOINDUKTIVITET GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE: LFR=',1E11.6
	*,' (H)')
	WRITE(9,42) XFR
	WRITE(6,42) XFR
42	FORMAT(2X, 'RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE: XFR=',1E11
	*.6,' (OM)')
	WRITE(9,47) AMF
	WRITE(6,47) AMF
47	FORMAT(/2X,'MEDJUINDUKTIVITET GLAVA NAMOTA DVIJE FAZE: MFR=',1E11.
	*6,' (H)')
	WRITE(9,48) XMR
	WRITE(6,48) XMR
48	FORMAT(2X,'RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA DVIJE FAZE: XMFR=',1E1
	*1.6,' (OM)')
	WRITE(9,52) RIND
	WRITE(6,52) RIND
52	FORMAT(/2X,'UKUPNI INDUKTIVITET GLAVA NAMOTA PO FAZI: LFAZ=',1E11.
	*6,' (H)')
	WRITE(9,53) XFAZ
	WRITE(6,53) XFAZ
53	FORMAT(/2X,'RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA PO FAZI: XFAZ=',1E11.
	*6,' (OM)')
	END

```
ULAZNI PODACI
```

BROJ UTORA: NU = 60 BROJ PARI POLOVA: P = 1.00 BROJ PARALELNIH GRANA: AP = 2.00 BROJ TOCAKA NA SVITKU: N = 20 PROMJER VODICA: D(m) = .034533RELATIVNA PERMEABILNOST ZELJEZA: MIR = 1.00 POLUMJER POCETKA EVOLVENTE U GORNJEM SLOJU UTORA: ROMG (m) = .674600 KUT NAGIBA GLAVE IZ GORNJEG SLOJA UTORA: ALFAG (ST.) = 19.00 DULJINA RAVNOG DIJELA VODICA NA IZLAZU IZ PAKETA U GORNJEM SLOJU UTORA: LRG (m) = .204760POLUMJER POCETKA EVOLVENTE U DONJEM SLOJU UTORA: ROMD (m) = .767100 KUT NAGIBA GLAVE IZ DONJEG SLOJA UTORA: ALFAD (ST.) = 22.50 DULJINA RAVNOG DIJELA VODICA NA IZLAZU IZ PAKETA U DONJEM SLOJU UTORA: LRD (m) = .177730KORAK SVITKA: Y1 = 25.00 RAZMAK MEDJU VODICIMA U GLAVI NAMOTA: SRGL (m) = .008000 SIRINA UTORA STATORA: BU1 (m) = .029000 ISTAK GLAVE NAMOTA: IG (m) = .888540

TOCKA 1:

CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .67460000 FI(st) = .00000000 Z(m) = .00000000

PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .6746000 Y(m) = .0000000 Z(m) = .0000000

TOCKA 2:

CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .67460000 FI(st) = .00000000 Z(m) = .20476000

PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .6746000 Y(m) = .0000000 Z(m) = .2047600

TOCKA 3:

CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .69822760 FI(st) = 10.08922000 Z(m) = .27337950

PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .6874304 Y(m) = .1223166 Z(m) = .2733795

TOCKA 4:

CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .72213410 FI(st) = 20.41800000 Z(m) = .34280900 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .6767642 Y(m) = .2519284 Z(m) = .3428090

TOCKA 5: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .74629270FI(st) = 30.96571000 Z(m) = .41297050 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .6399276Y(m) = .3839862 Z(m) = .4129705TOCKA 6: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .77067950FI(st) = 41.71375000 Z(m) = .48379510 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .5752957 Y(m) = .5128176 Z(m) = .4837951 TOCKA 7: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .79527380FI(st) = 52.64534000 Z(m) = .55522220 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .4825300Y(m) = .6321592 Z(m) = .5552222TOCKA 8: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .82005690FI(st) = 63.74531000 .62719720 Z(m) = PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .3627620Y(m) = .7354570 Z(m) = .6271972TOCKA 9: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .84501200FI(st) = 74.99999000.69967220 Z(m) = PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .2187053Y(m) = .8162189 Z(m) = .6996722TOCKA 10: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .84501200 FI(st) = 74.99999000Z(m) = .88854000 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .2187053Y(m) = .8162189 Z(m) = .8885400

TOCKA 11: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .96130720 FI(st) = 74.99999000 Z(m) = .88854000 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .2488047Y(m) = .9285514 Z(m) = .8885400TOCKA 12: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .96130720FI(st) = 74.99999000.64658780 Z(m) = PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .2488047 Y(m) = .9285514 Z(m) = .6465878TOCKA 13: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .93305770FI(st) = 86.10650000Z(m) = .57838730 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = .0633566Y(m) = .9309042 Z(m) = .5783873TOCKA 14: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .90495060 FI(st) = 97.10122000 .51053070 Z(m) = PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.1118724Y(m) = .8980089 Z(m) = .5105307TOCKA 15: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .87699970 FI(st) = 107.97400000.44305140 Z(m) = PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.2706294Y(m) = .8341992 Z(m) = .4430514TOCKA 16: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .84922070FI(st) = 118.71360000Z(m) = .37598690 PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.4079924Y(m) = .7447939 Z(m) = .3759869

TOCKA 17: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .82163080FI(st) = 129.30740000Z(m) = .30937900PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.5204875 Y(m) = .6357436 Z(m) = .3093790 TOCKA 18: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .79424970FI(st) = 139.74140000Z(m) = .24327530PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.6061206 Y(m) = .5132743 Z(m) = .2432753 TOCKA 19: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .76710000FI(st) = 150.0000000Z(m) = .17773000PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.6643280 Y(m) = .3835500 Z(m) = .1777300 TOCKA 20: CILINDRICNE KOORDINATE R(m) = .76710000FI(st) = 150.0000000Z(m) = .00000000PRAVOKUTNE KOORDINATE X(m) = -.6643280 Y(m) = .3835500 Z(m) = .0000000 REZULTATI ****** GLAVA 1 -GLAVA 1 -GLAVA 1 -ZRCALNA SLIKA ZRCALNA SLIKA BESK. UKUPNI MEDJUIND. REALNI DIO GLAVE KONACNIH DJ. GLAVE ANTIPAR. DJ. GL. (H) (H) (H) (H) .000000E+00 .1959349E-06 .8003570E-07 .8003570E-07 1 2 .1670026E-05 .1866915E-06 .7839436E-07 .1748420E-05 .1265096E-05 .1843180E-06 .7495186E-07 3 .1340048E-05 .1039929E-05 .1805636E-06 .7026566E-07 .1110195E-05 4 5 .8850835E-06 .1754872E-06 .6479346E-07 .9498770E-06 6 .7673931E-06 .1692133E-06 .5882692E-07 .8262201E-06 7 .6724846E-06 .1618960E-06 .5254012E-07 .7250247E-06

8	.5928227E-06	.1536984E-06	.4603898E-07	.6388616E-06
9	.5240018E-06	.1447731E-06	.3939328E-07	.5633951E-06
10	.4632370E-06	.1352531E-06	.3265443E-07	.4958914E-06
11	.4086116E-06	.1252488E-06	.2586519E-07	.4344768E-06
12	.3587397E-06	.1148477E-06	.1906463E-07	.3778043E-06
13	.3126020E-06	.1041098E-06	.1229014E-07	.3248921E-06
14	.2694069E-06	.9307795E-07	.5578187E-08	.2749851E-06
15	.2284894E-06	.8177812E-07	1035991E-08	.2274534E-06
16	.1893262E-06	.7023158E-07	7518691E-08	.1818075E-06
17	.1515220E-06	.5846143E-07	1383800E-07	.1376840E-06
18	.1147393E-06	.4649912E-07	1996342E-07	.9477589E-07
19	.7869507E-07	.3439267E-07	2586492E-07	.5283015E-07
20	.4317651E-07	.2220759E-07	3151066E-07	.1166585E-07
21	.7997808E-08	.1002943E-07	3686326E-07	2886545E-07
22	2705936E-07	2035144E-08	4187319E-07	6893254E-07
23	6220431E-07	1385364E-07	4646877E-07	1086731E-06
24	9752242E-07	2526470E-07	5054365E-07	1480661E-06
25	1320322E-06	3605851E-07	5395412E-07	1859863E-06
26	1573327E-06	4595684E-07	5656061E-07	2138933E-06
27	1617618E-06	5460940E-07	5833110E-07	2200929E-06
28	1599690E-06	6166137E-07	5940369E-07	2193727E-06
29	1591730E-06	6683703E-07	6000398E-07	2191769E-06
30	1590875E-06	6996648E-07	6032796E-07	2194155E-06
31	1590758E-06	7096347E-07	6049321E-07	2195690E-06
32	1589209E-06	6979979E-07	6053445E-07	2194553E-06
33	1588338E-06	6649771E-07	6040279E-07	2192365E-06
34	1594469E-06	6113937E-07	5995471E-07	2194016E-06
35	1610491E-06	5389656E-07	5894319E-07	2199923E-06
36	1564394E-06	4506333E-07	5706988E-07	2135093E-06
37	1309961E-06	3502261E-07	5415549E-07	1851515E-06
38	9639202E-07	2413420E-07	5026952E-07	1466615E-06
39	6101355E-07	1266319E-07	4562222E-07	1066358E-06
40	2582477E-07	8003400E-09	4040854E-07	6623331E-07
41	.9272199E-08	.1130350E-07	3476314E-07	2549094E-07

42	.4449252E-07	.2352323E-07	2877394E-07	.1571858E-07
43	.8005578E-07	.3575344E-07	2250276E-07	.5755302E-07
44	.1161474E-06	.4790729E-07	1599867E-07	.1001487E-06
45	.1529769E-06	.5991612E-07	9306210E-08	.1436706E-06
46	.1908224E-06	.7172805E-07	2469409E-08	.1883530E-06
47	.2300147E-06	.8330344E-07	.4466524E-08	.2344812E-06
48	.2709436E-06	.9461469E-07	.1145500E-07	.2823986E-06
49	.3141278E-06	.1056356E-06	.1844889E-07	.3325767E-06
50	.3602313E-06	.1163390E-06	.2540158E-07	.3856329E-06
51	.4100485E-06	.1266864E-06	.3226792E-07	.4423164E-06
52	.4646057E-06	.1366220E-06	.3900411E-07	.5036098E-06
53	.5252965E-06	.1460675E-06	.4556640E-07	.5708629E-06
54	.5940449E-06	.1549204E-06	.5190781E-07	.6459528E-06
55	.6736398E-06	.1630508E-06	.5797252E-07	.7316123E-06
56	.7684868E-06	.1703060E-06	.6368563E-07	.8321724E-06
57	.8861102E-06	.1765127E-06	.6893617E-07	.9550463E-06
58	.1040857E-05	.1814888E-06	.7354822E-07	.1114405E-05
59	.1265847E-05	.1850671E-06	.7723720E-07	.1343084E-05
60	.1670467E-05	.1871232E-06	.7956970E-07	.1750036E-05

UNUTARNJI SAMOINDUKTIVITET: LU=.164669E-06 (H) DULJINA GLAVE NAMOTA: DULL=.329337E+01 (M) VANJSKI SAMOINDUKTIVITET: LV=.240699E-05 (H)

SAMOINDUKTIVITET GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE: LFR=.588590E-03 (H) RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA JEDNE FAZE: XFR=.184911E+00 (OM)

MEDJUINDUKTIVITET GLAVA NAMOTA DVIJE FAZE: MFR=.250169E-03 (H) RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA DVIJE FAZE: XMFR=.785928E-01 (OM)

UKUPNI INDUKTIVITET GLAVA NAMOTA PO FAZI: LFAZ=.272232E-03 (H)

RASIPNA REAKTANCIJA GLAVA NAMOTA PO FAZI: XFAZ=.855241E-01 (OM)

PRILOG C: Ispis programa fourier

```
PROGRAM ZA FOURIREROVU ANALIZU RASPODJELE VEKT. MAGN. POTENCIJALA
С
С
     U VODICIMA DVOPOLNOG TURBOGENERATORA
PROGRAM FOURIER
     ****
С
С
     M - BROJ F. KOEFICIJENATA, N - BROJ INTERVALA U INTEGRACIJI
     PARAMETER (PI=3.141592654, M=10, N=60)
     CHARACTER IME*10
     REAL FUN(0:N), AK(0:M), BK(0:M)
С
     UNOS PODATAKA
     WRITE(6,10)
10
     FORMAT(//////////T5,'NAZIV DATOTEKE S PODACIMA : '\)
     READ(5,20) IME
20
     FORMAT(A10)
     OPEN(8,FILE=IME)
     REWIND(8)
     READ(8, 30)(FUN(I), I=0, N/2)
30
     FORMAT(8X,F15.9)
     POSTAVLJANJE FUNKCIJSKIH VRIJEDNOSTI ZA DRUGU POLOVICU STROJA
С
     DO 35 I=1, N/2
        FUN(I+N/2) = -FUN(I)
35
     CONTINUE
     PRORACUN FOURIEROVIH KOEFICIJENATA
С
     H=2*PT/N
     H2=2*H
     DO 55 K=0,M
       X = 0
        AK(K)=0.
        BK(K)=0.
        DO 45 I=2,N,2
             AK(K) = AK(K) + FUN(I-2) * COS(K*X) + 4 * FUN(I-1) * COS(K*(X+H)) + 
                  FUN(I)*COS(K*(X+H2))
             BK(K) = BK(K) + FUN(I-2) * SIN(K*X) + 4 * FUN(I-1) * SIN(K*(X+H)) +
    *
                  FUN(I)*SIN(K*(X+H2))
             X=X+H2
45
        CONTINUE
        AK(K) = AK(K) * H/3./PI
        BK(K) = BK(K) * H/3./PI
55
     CONTINUE
С
     ISPIS REZULTATA
     WRITE(6,40)
     FORMAT(/T5, 'FOURIEROVI KOEFICIJENTI ZA RASP. POTENCIJALA PO OBODU
40
    * STROJA'//T7,'K',10X,'AK',13X,'BK')
     WRITE(6,50)(K,AK(K),BK(K),K=0,M)
50
     FORMAT(T5, I3, 3X, E15.9, 3X, E15.9)
     WRITE(6,60)SQRT(AK(1)**2+BK(1)**2),90+180./PI*ATAN(AK(1)/BK(1))
60
     FORMAT(/T5,'OSNOVNI HARMONIK:',E15.9
    *
           /T5, 'FAZNI POMAK PREMA Q-OSI: ', F15.9)
     END
```

SAŽETAK

U magistarskom radu je opisan postupak i izvršen proračun nezasićenih i zasićenih sinkronih, prijelaznih i početnih reaktancija dvopolnog sinkronog turbogeneratora snage 247 MVA korištenjem 2D metode konačnih elemenata.

Analiziran je utjecaj zasićenja na iznose sinkronih reaktancija opterećenog generatora u stacionarnom stanju. Naponske jednadžbe za zasićeno stanje su definirane u rotirajućem d,q,0 koordinatnom sustavu i na primjeru iterativnog proračuna polja u nazivnoj radnoj točki opisan je postupak izračunavanja zasićenih sinkronih reaktancija. Pri tome je uzeta u obzir magnetska sprega između d i q osi koja se očituje u pojavi ulančenog magnetskog toka u osi okomitoj na os protjecanja. To je učinjeno uvođenjem dodatnih reaktancija u naponske jednadžbe.

Zasićene prijelazne i početne reaktancije su izračunate magnetostatičkim simulacijama u kojima je utjecaj struja induciranih u uzbudnom namotu, prigušnom namotu i željezu masivnog rotora nadomješten definiranjem odgovarajućih rubnih uvjeta. Zbog ujecaja zasićenja iznosi prijelaznih i početnih reaktancija su manji za cca 11 % u odnosu na nezasićeno stanje.

Rasipna reaktancija glava namota koja je sastavni dio sinkronih, prijelaznih i početnih reaktancija je izračunata analitički. Korištenom analitičkom metodom se pri proračunu međuinduktiviteta svitaka uzima u obzir utjecaj željeza i prostorna geometrija konture koju opisuje vodič u glavi svitka.

Rezultati dobiveni numeričkim i analitičkim proračunima su uspoređeni s vrijednostima dobivenim mjerenjima koje je izvršio proizvođač generatora. Razlike između izmjerenih i izračunatih reaktancija se kreću od 3 % do 11 %.

Ključne riječi: turbogenerator, reaktancije, zasićenje, metoda konačnih elemenata

ABSTRACT

The master's thesis introduces a method of computation of unsaturated and saturated synchronous, transient and subtransient reactances of the 247 MVA two pole synchronous turbogenerator by using the finite element method.

The influence of saturation on the values of synchronous reactances of the generator under various steady-state operating conditions is analyzed. The voltage equations for saturated state are defined in the rotating d,q,0 coordinate system and computation of saturated synchronous reactances from the field solution under rated load was used to describe the method. The magnetic coupling between d and q axis, which manifests as a magnetic flux in the axis perpendicular to the magnetomotive force axis is also considered. It is done by adding the additional reactances to the voltage equations.

Saturated transient and subtransient reactances are calculated by using the magnetostatic simulation where the influence of the currents induced in the excitation winding, damping winding and massive rotor iron is considered by defining the appropriate boundary conditions. Due to saturation the transient and subtransient reactances are approximately 11 % lower than in the unsaturated state.

End-winding leakage reactance which is an integral part of synchronous, transient and subtransient reactances is calculated analytically. When mutual inductances are calculated, the used analytical method takes into consideration the influence of iron and the solid geometry of the contour that the end coil describes.

The results obtained by numerical and analytical computations are compared to the values obtained by measurements carried out by the manufacturer of the generator. The differences between measured and calculated reactances range from 3 % to 11 %.

Key words: turbogenerator, reactances, saturation, finite element method

ŽIVOTOPIS

Damir Žarko je rođen 28.09.1972. u Zagrebu. Matematičko-informatički obrazovni centar u Zagrebu je završio 1991. godine, a Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, smjer Elektrostrojarstvo i automatizacija, 1995. godine. Nakon završetka studija zaposlio se na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Elektrotehničkog fakulteta gdje i danas radi kao mlađi asistent na grupi predmeta "Električni strojevi".

Poslijediplomski magistarski studij na sadašnjem Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektrostrojarstvo i automatizacija, upisao je 1996. godine. U znanstvenoistraživačkom radu bavi se numeričkom analizom i proračunom parametara električnih strojeva. Koautor je više radova publiciranih u zbornicima znanstvenih i stručnih konferencija u zemlji i inozemstvu. Član je Hrvatskog nacionalnog komiteta CIGRÉ.

Govori i piše engleski, služi se i njemačkim jezikom. Nije oženjen. Živi u Zagrebu.