

Zlatko Hanić, dipl. ing.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Vražić

Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Uvod

Klasična teorija sinkronih strojeva razvijena je uz pretpostavku zanemarenja nelinearnosti zbog magnetskog zasićenja što rezultira konstantnim vrijednostima induktiviteta L_d , L_q i L_{df} . Zbog ekonomičnosti i osiguravanja konkurentnosti današnji se sinkroni strojevi projektiraju s određenom razinom magnetskog zasićenja zbog čega se induktiviteti mijenjaju ovisno o radnoj točci, a time i karakteristike i karakteristike stroja.

Cilj ove doktorske radnje je postaviti teorijske osnove i razviti model za opis rada u stacionarnom stanju sinkronih koji uzima u obzir magnetsko zasićenje i međuinduktivne spregu d i q osi.

Znanstveni doprinosi

- Model sinkronog stroja za proračun stacionarnih stanja pomoću strujno ovisnih funkcija ulančanih tokova u uzdužnoj i poprečnoj osi te primjena modela na proračun granica pogonske karte
- Model sinkronog stroja s istaknutim polovima za proračun stacionarnih stanja temeljen na reluktantnim mrežama i konformnim preslikavanjima
- Metodologija za iterativni proračun stacionarnih radnih točaka sinkronih strojeva pomoću tranzijentne metode konačnih elemenata

Model sinkronog stroja pomoću $\Psi(I)$

- Model sinkronog stroja za stacionarna stanja koji zasićenje i međuinduktivnu spregu opisuje preko strujno ovisnih induktiviteta

$$U_d = -RI_d + \omega [L_q (I_d, I_q, I_f) I_q + L_{qd} (I_d, I_q, I_f) I_d + L_{qf} (I_d, I_q, I_f) I_f]$$

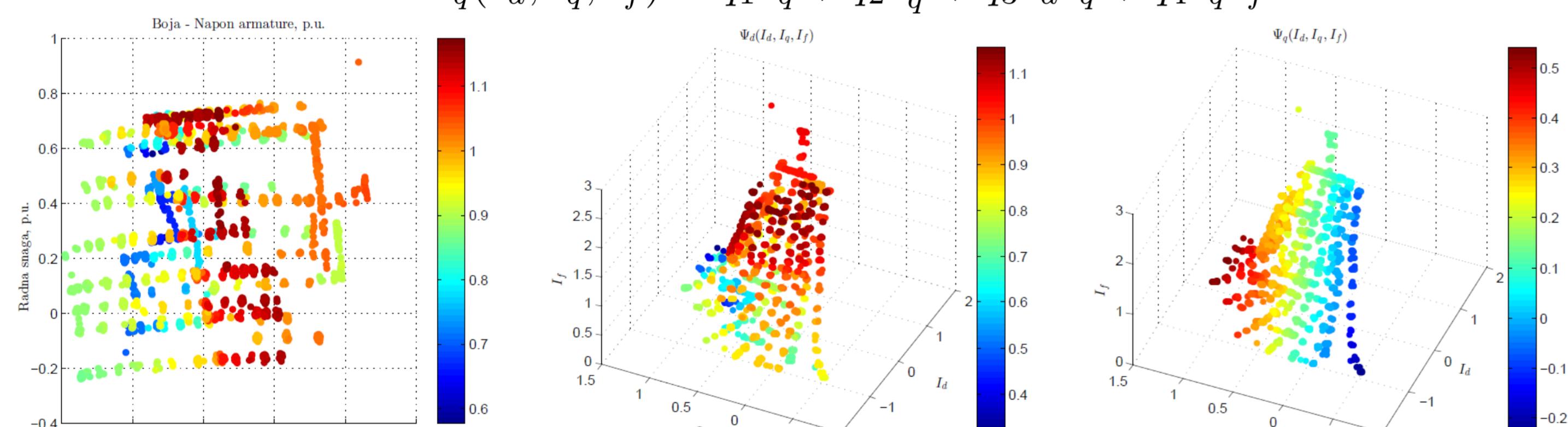
$$U_q = -RI_q + \omega [L_{df} (I_d, I_q, I_f) I_f - L_d (I_d, I_q, I_f) I_d + L_{dq} (I_d, I_q, I_f) I_q]$$

- Model sinkronog stroja za stacionarna stanja opisan preko strujno ovisnih ulančanih tokova

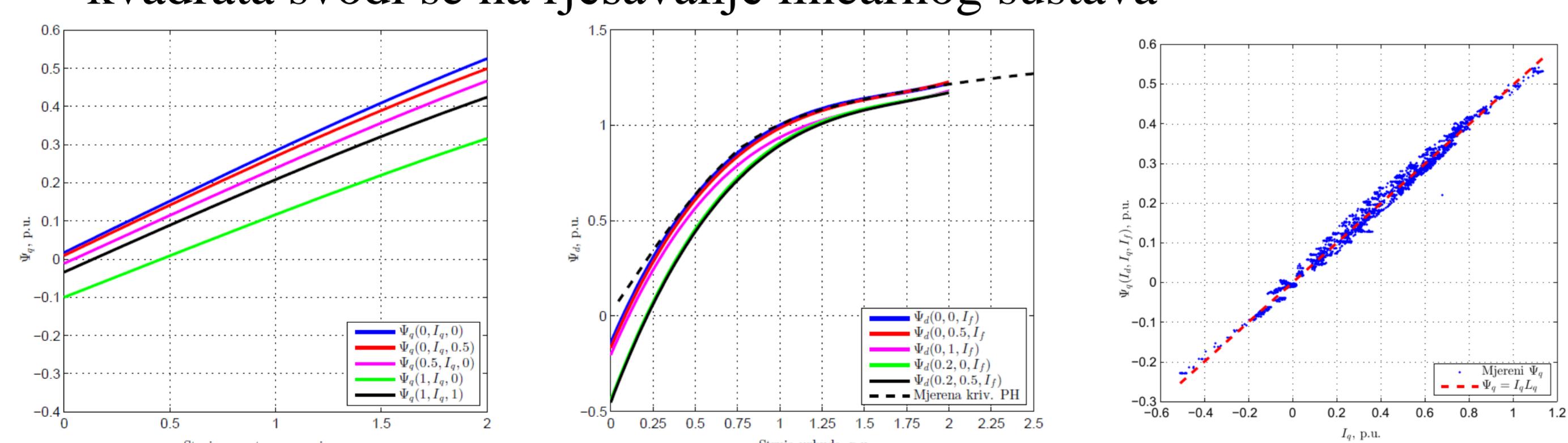
$$U_d = -I_d R + \omega \Psi_q (I_d, I_q, I_f) \quad U_q = -I_q R + \omega \Psi_d (I_d, I_q, I_f)$$

$$\Psi_d (I_d, I_q, I_f) = d_1 I_d + d_2 I_f + d_3 I_d^2 + d_4 I_f^2 + d_5 I_d I_q + d_6 I_d I_f + d_7 I_q I_f$$

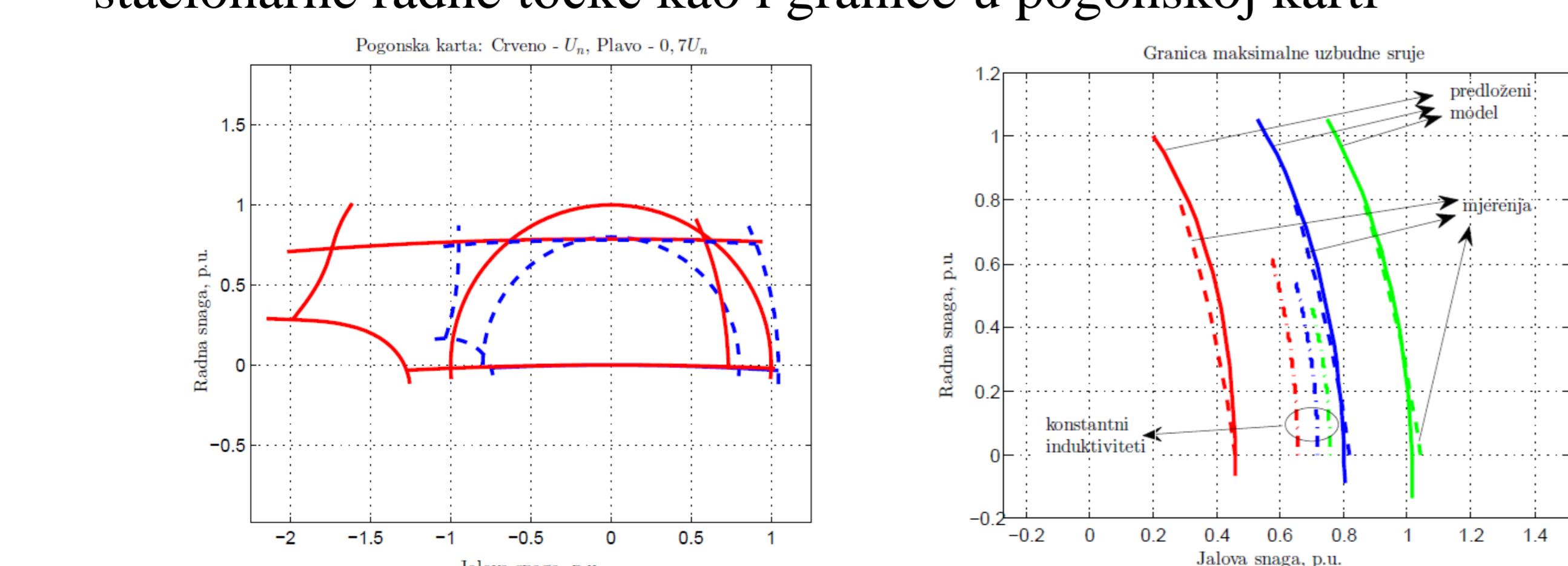
$$\Psi_q (I_d, I_q, I_f) = q_1 I_q + q_2 I_q^2 + q_3 I_d I_q + q_4 I_q I_f$$



- Ako se ovisnost ulančanih tokova o struci modelira pomoću polinoma, problem identifikacije koeficijenata metodom najmanjih kvadrata svodi se na rješavanje linearног sustava



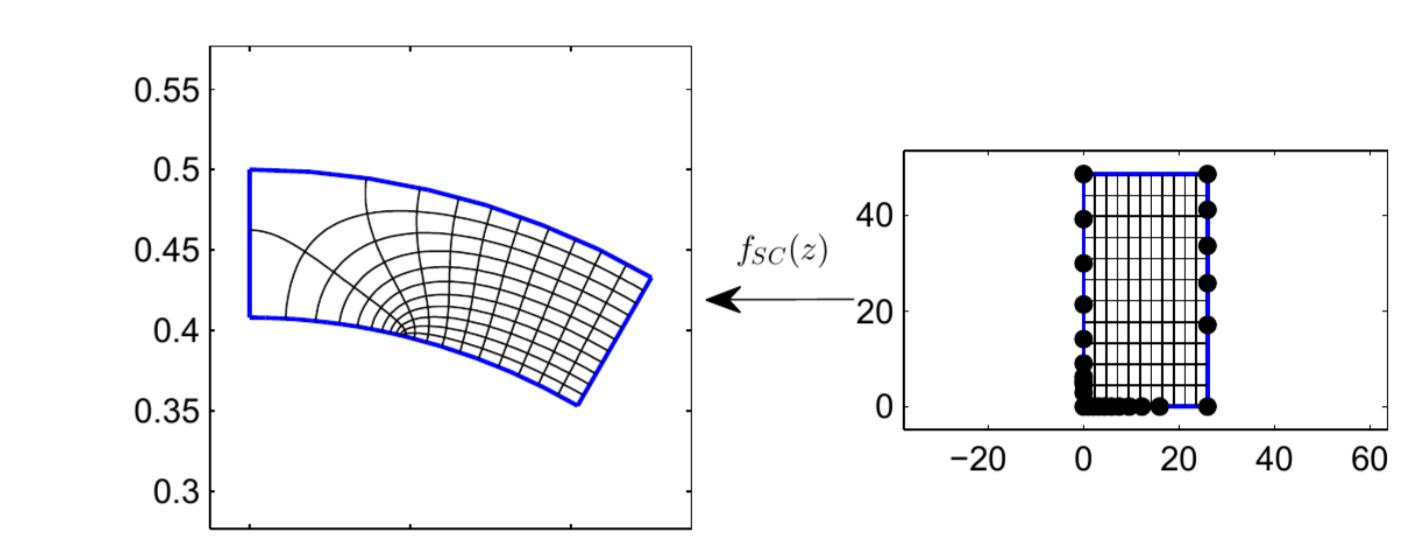
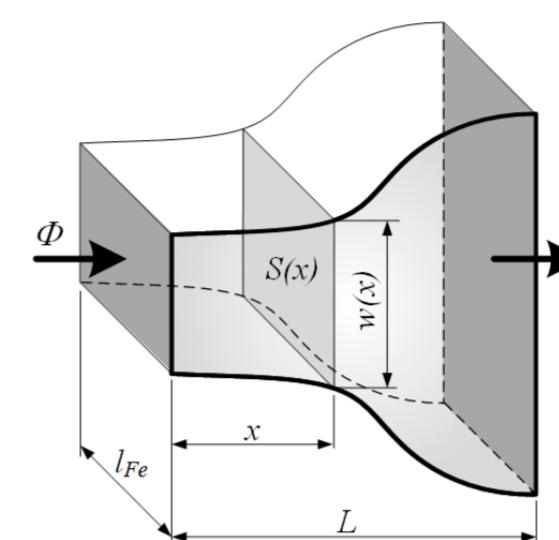
- Uz poznate funkcije ulančanih tokova mogu se proračunavati ostale stacionarne radne točke kao i granice u pogonskoj karti



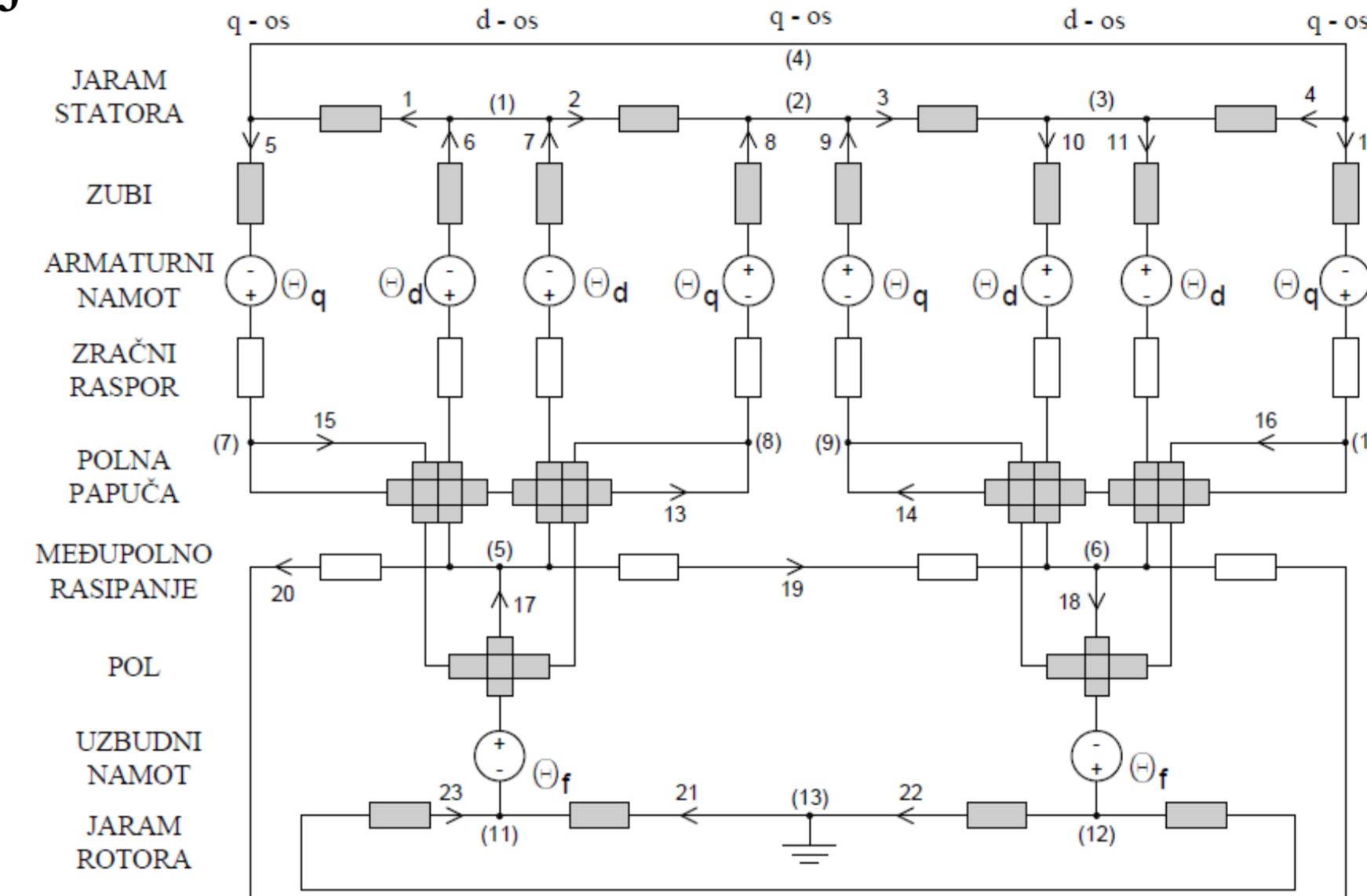
Proračun stacionarnih stanja pomoću reluktantnih mreža i konformnih preslikavanja

- Model omogućuje proračun Ψ_d i Ψ_q za zadane I_d , I_q i I_f
□ Proračun magnetskih otpora upotrebom konformnih preslikavanja

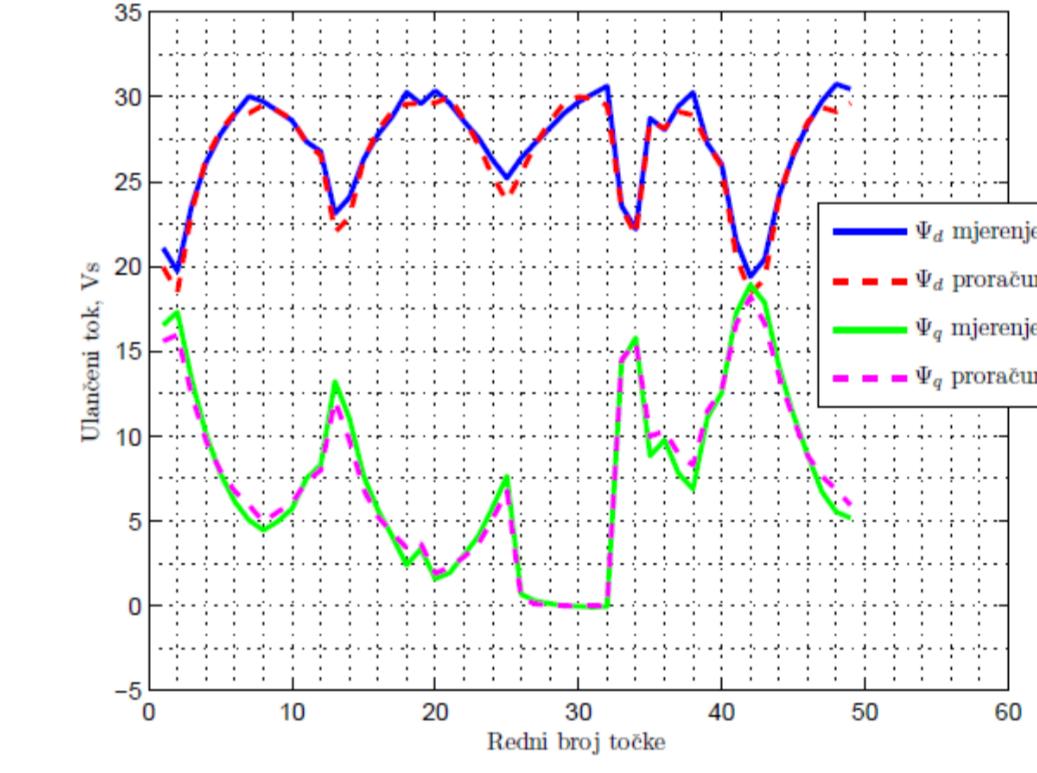
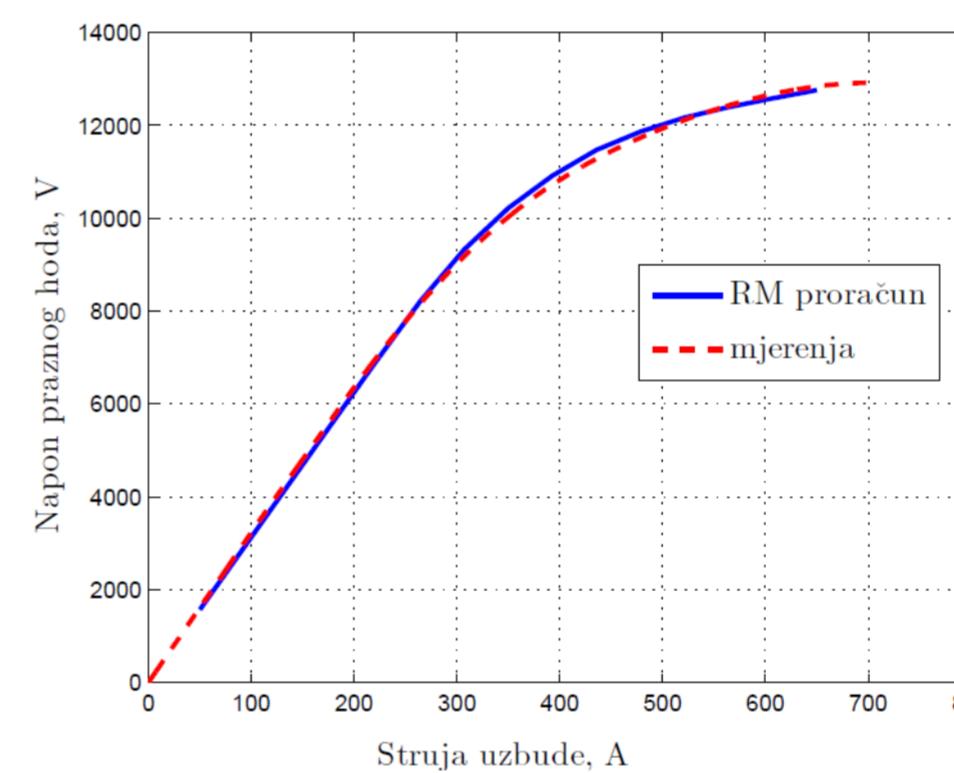
$$R_m(\Phi) = \int_0^L \frac{dx}{\mu \left(\frac{\Phi}{S(x)} \right) S(x)} \approx \frac{1}{\mu \left(\frac{\Phi}{S_{av}} \right) l_{Fe}} \int_0^L \frac{dx}{w(x)} = \frac{1}{\mu \left(\frac{\Phi}{S_{av}} \right) l_{Fe} \lambda} = \frac{k_g}{\mu \left(\frac{\Phi}{S_{av}} \right)}$$



- Formiranje reluktantne mreže



- Rezultati proračuna



Proračun stacionarnih radnih točaka pomoću metode konačnih elemenata

- Problem određivanja iznosa uzbudne struje i kuta vektora armaturne struje (ili kuta opterećenja) za zadano stacionarnu radnu točku je nelinearan. Moguće ga je riješiti iteracijskim metodama:

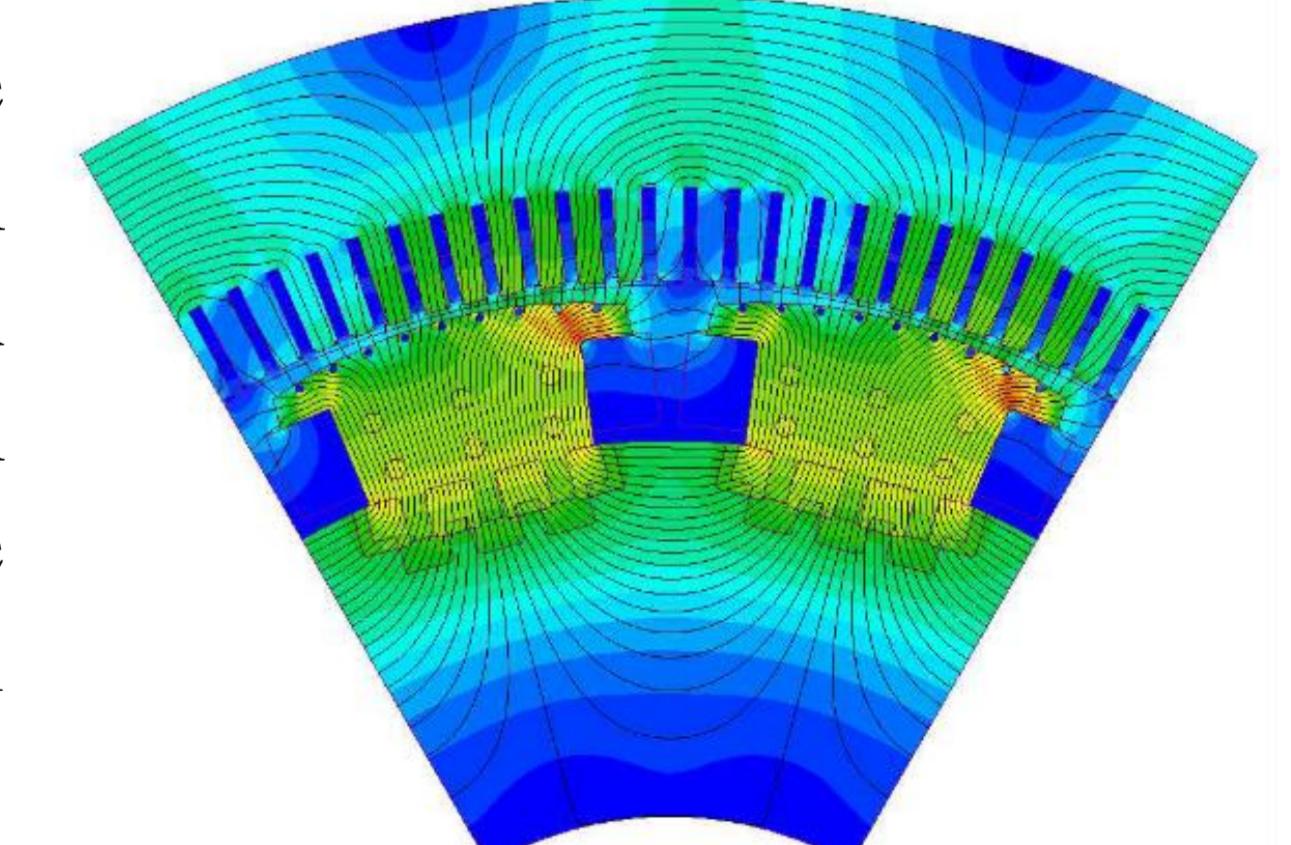
$$\text{Metoda relaksacijskih parametara} \quad I_{f(n+1)} = I_{f(n)} + k_f (U_t - U(I_{f(n)}, \psi_n))$$

$$\psi_{n+1} = \psi_n + k_\psi (\varphi_t - \varphi(I_{f(n)}, \psi_n))$$

Newtonova iteracijska metoda

$$\begin{bmatrix} I_{f(n+1)} \\ \psi_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{f(n)} \\ \psi_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{U(I_{f(n)} + \Delta I_f, \psi_n) - U(I_{f(n)}, \psi_n)}{\Delta I_f} & \frac{U(I_{f(n)}, \psi_n + \Delta \psi) - U(I_{f(n)}, \psi_n)}{\Delta \psi} \\ \frac{\varphi(I_{f(n)} + \Delta I_f, \psi_n) - \varphi(I_{f(n)}, \psi_n)}{\Delta I_f} & \frac{\varphi(I_{f(n)}, \psi_n + \Delta \psi) - \varphi(I_{f(n)}, \psi_n)}{\Delta \psi} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U(I_{f(n)}, \psi_n) - U_t \\ \varphi(I_{f(n)}, \psi_n) - \varphi_t \end{bmatrix}$$

- Predložene iteracijske metode implementirane su za proračun stacionarnih radnih točaka sinkronih strojeva pomoću metode konačnih elemenata. Proračuni i usporedbi provedeni su pomoću magnetostatičke i tranzijentne metode konačnih elemenata



Zaključak

Poboljšanja predloženog modela temeljenog na strujno ovisnim ulančanim tokovima u odnosu na klasičan model

- uzima u obzir magnetsko zasićenje i međuinduktivnu spregu d i q osi
- jednostavna identifikacija predloženog modela pomoću metode najmanjih kvadrata

Upotrebom predloženog modela proračunate su granice u pogonskoj karti. Razvijene su metode za proračun stacionarnih stanja sinkronih strojeva pomoću reluktantnih mreža i konformnih preslikavanja te pomoću metode konačnih elemenata.