



Laboratorij elektroenergetike 1

Tokovi snaga

Prof.dr.sc. Zdravko Hebel



2009/2010

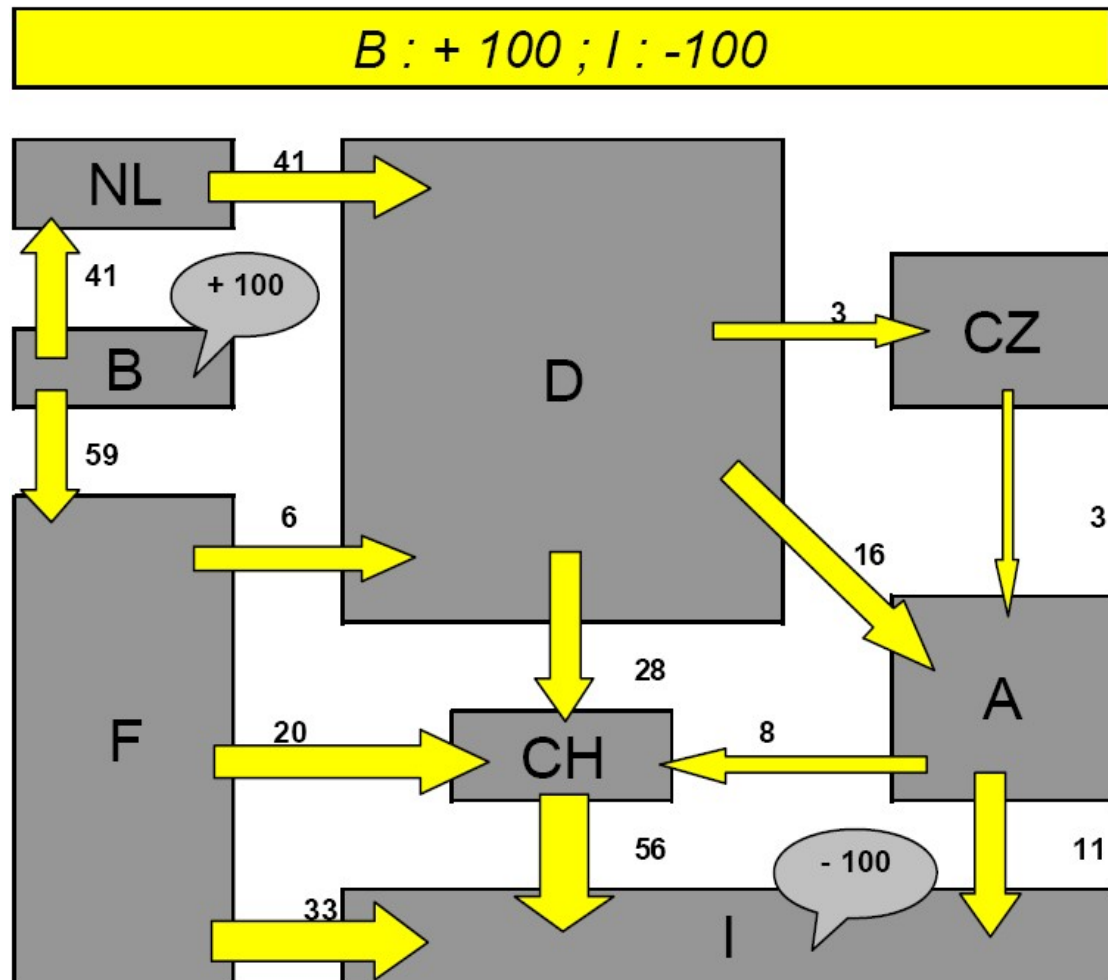
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
F A K U L T E T
ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA

Proračun tokova snaga

- Zbog čega je bitan?
 - Vođenje pogona EE sustava
 - Planiranje razvoja EE sustava
 - Projektiranje dijelova EE mreže
- Stvaranje jedinstvenog EU tržišta je omogućilo trgovanje električnom energijom preko granica država
- Problem:
 - Prijenosni kapaciteti između država ograničeni
 - Stvarni tokovi snaga se ne poklapaju sa ugovorenim smjerom transakcije (iz države A u državu B) – kružni tokovi snage
 - Kružni (nepredviđeni) tokovi snage mogu preopteretiti prekogranične vodove i ugroziti sigurnost cijelog sustava

Proračun tokova snaga

- Primjer: prijenos 100 MW snage iz Belgije u Italiju
- Rješenje:
 - Predviđanje stvarnih tokova snage na temelju ugovorenih transakcija pomoću proračuna tokova snaga
 - Ograničavanje dozvoljenog prekograničnog prijenosa snage



Proračun tokova snaga

- Provodi se u EE mrežama u stacionarnom pogonskom stanju
- Cilj proračuna je odrediti napone po iznosu i kutu u svim čvorištima mreže, odnosno vektor stanja iz kojega slijede preostale tražene vrijednosti
- Rezultati proračuna:
 - Vektor napona svih čvorišta po iznosu i kutu
 - Iznosi radne i jalove snage kroz grane mreže
 - Injekcije snage u čvorištima (raspodjela opterećenja izvora)
 - Gubici snage u mreži
- Proračun je temeljen na metodi čvorišta (moguća i metoda petlje)

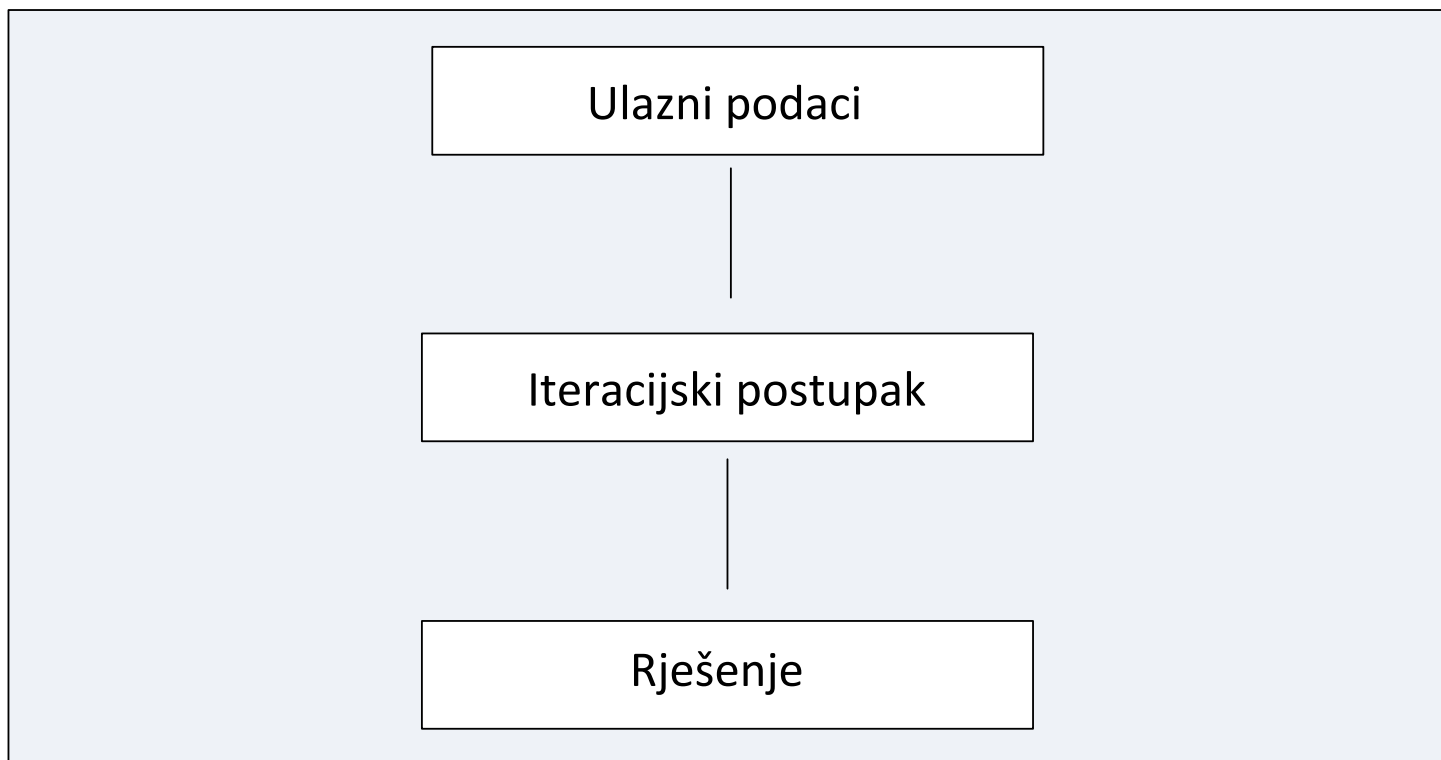
Klasifikacija čvorišta

- Svako čvorište mreže (sabitnica) je definirano sa četiri električne vrijednosti:
 - Djelatna snaga P_i (MW)
 - Jalova snaga Q_i (MVar)
 - Iznos napona V_i
 - Fazni kut napona δ_i
- U proračunu tokova snage za svako čvorište (sabitnicu) vrijedi:
 - Dvije električne veličine su zadane
 - Dvije električne veličine su nepoznanice

Klasifikacija čvorišta

- Na osnovu toga koje su dvije vrijednosti poznate a koje je potrebno izračunati čvorišta se dijele na:
 - Čvorište regulacijske elektrane (poznato $|V|$, $\angle \delta$)
 - Generatorska čvorišta (poznato $|V|$, P , Q_{\min} , Q_{\max})
 - Čvorišta tereta (poznato P , Q)

Struktura proračuna



Ulazni podaci

- Ulazni podaci koji moraju biti zadani (poznati):
 - Konfiguracija mreže
 - Parametri elemenata mreže (admitancije i impedancije vodova)
 - Djelatna i jalova snaga u potrošačkim čvorištima
 - Iznos (modul) napona i djelatne snage u generatorskim čvorištima
 - Napon po iznosu i kutu u čvorištu regulacijske elektrane (referentno čvorište)
- Kako bi iteracijski postupak mogao započeti potrebno je pretpostaviti početne vrijednosti napona čvorišta
- Standardno se za početne iznose napona uzimaju nazivne vrijednosti ($\vec{V}_i = V_n \angle 0^\circ$, $\vec{V}_i = 1.0 \angle 0^\circ$ p.u.)

Matematički model proračuna

- Proračun tokova snage se temelji na metodi čvorišta:
 - Admitancijski oblik: $[\vec{I}] = [\vec{Y}] \cdot [\vec{V}]$
 - Impedancijski oblik: $[\vec{V}] = [\vec{Z}] \cdot [\vec{I}]$
- Pri čemu je:
 - $[\vec{I}]$ vektor vanjskih struja narinutih u čvorišta mreže
 - $[\vec{V}]$ vektor napona čvorišta
 - $[\vec{Y}]$ matrica admitancija mreže
 - $[\vec{Z}]$ matrica impedancija mreže

Matematički model proračuna

- Umjesto narinutih struja u čvorištima su zadane snage (pogledati ulazne podatke). Navedene jednačbe je stoga potrebno pisati u sljedećem obliku:

- Admitancijski oblik:
$$\left[\begin{pmatrix} \vec{S} \\ \vec{V} \end{pmatrix}^* \right] = [\vec{Y}] \cdot [\vec{V}]$$

- Impedancijski oblik:
$$[\vec{V}] = [\vec{Z}] \cdot \left[\begin{pmatrix} \vec{S} \\ \vec{V} \end{pmatrix}^* \right]$$

- Zbog kvadratne ovisnosti napon-snaga jednačbe tokova snage se ubrajaju u nelinearne (kvadratne) algebarske jednačbe

Matematički model proračuna

- Rješavanje nelinearnih (kvadratnih) jednažbi zahtijeva primjenu iteracijskih postupaka
- Iteracijski proračun:
 - Odvija se kroz više iteracija (koraka)
 - U svakoj iteraciji se provjerava da li dobiveni rezultati zadovoljavaju postavljeni kriterij točnosti
 - Rezultati koji ne zadovoljavaju postavljeni kriterij točnosti služe kao ulazni podaci za sljedeću iteraciju
- Osnovne metode proračuna tokova snaga temeljene na iteracijskim numeričkim postupcima su :
 - Gauss-Seidel metoda pomoću Z-matrice
 - Gauss-Seidel metoda pomoću Y-matrice
 - Newton-Raphson metoda

Jednadžbe tokova snaga

- Kao rezultat iteracijskog proračuna se dobije vektor stanja: $\vec{V}_i = |\vec{V}_i| \angle \delta_i$ $i = 1, 2, \dots, n-1$ (za n čvorišta)
- Poznavajući vektor stanja moguće je odrediti injekcije snaga u čvorištima. Vrijedi da je:

$$\vec{S}_i = \vec{V}_i \cdot \vec{I}_i^*$$

$$\vec{I}_i = \vec{Y}_{i1} \vec{V}_1 + \vec{Y}_{i2} \vec{V}_2 + \dots + \vec{Y}_{ii} \vec{V}_i + \dots + \vec{Y}_{in} \vec{V}_n$$

$$\vec{I}_i = \sum_{j=1}^n \vec{Y}_{ij} \cdot \vec{V}_j$$

$$\vec{S}_i = \vec{V}_i \sum_{j=1}^n \vec{Y}_{ij}^* \cdot \vec{V}_j^*$$

Jednadžbe tokova snaga

- Kompleksne vrijednosti napona i snage je moguće zapisati kao:

$$\vec{V}_i = |\vec{V}_i| e^{j\delta_i}$$

$$\vec{V}_j = |\vec{V}_j| e^{j\delta_j}$$

$$\vec{Y}_{ij} = |\vec{Y}_{ij}| e^{j\theta_{ij}}$$

- Uvrštavanjem u izraz za snagu se dobije:

$$\vec{S}_i = |\vec{V}_i| e^{j\delta_i} \sum_{j=1}^n |\vec{V}_j| e^{-j\delta_j} \cdot |\vec{Y}_{ij}| e^{-j\theta_{ij}}$$

$$\vec{S}_i = |\vec{V}_i| \sum_{j=1}^n |\vec{V}_j| \cdot |\vec{Y}_{ij}| \cdot [\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + j\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})]$$

Jednadžbe tokova snaga

- Radne i jalove snage u i-tom čvorištu:

$$P_i = |\vec{V}_i| \sum_{j=1}^n |\vec{V}_j| \cdot |\vec{Y}_{ij}| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

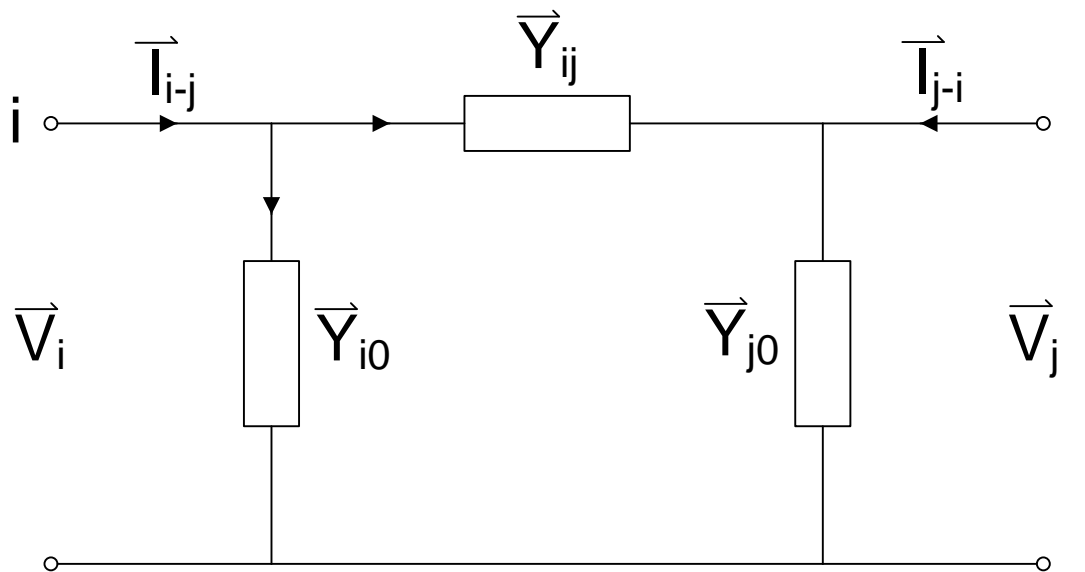
$$P_i = |\vec{V}_i|^2 \cdot |Y_{ii}| \cdot \cos(\theta_{ii}) + |\vec{V}_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\vec{V}_j| \cdot |\vec{Y}_{ij}| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_i = |\vec{V}_i| \sum_{j=1}^n |\vec{V}_j| \cdot |\vec{Y}_{ij}| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$Q_i = -|\vec{V}_i|^2 \cdot |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) + |\vec{V}_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\vec{V}_j| \cdot |\vec{Y}_{ij}| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Jednadžbe tokova snaga

- Pomoću vektora stanja je moguće odrediti i tokove snage kroz grane:



$$\vec{I}_{i-j} = (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \cdot \vec{Y}_{ij} + \vec{V}_i \cdot \vec{Y}_{i0}$$

$$\vec{S}_{i-j} = \vec{V}_i \cdot \vec{I}_{i-j}^* = \vec{V}_i \cdot \left[(\vec{V}_i^* - \vec{V}_j^*) \cdot \vec{Y}_{ij}^* + \vec{V}_i^* \cdot \vec{Y}_{i0}^* \right]$$

Jednadžbe tokova snaga

- Na isti način se dobije s druge strane:

$$\vec{I}_{j-i} = (\vec{V}_j - \vec{V}_i) \cdot \vec{Y}_{ij} + \vec{V}_j \cdot \vec{Y}_{j0}$$

$$\vec{S}_{j-i} = \vec{V}_j \cdot \vec{I}_{j-i}^* = \vec{V}_j \cdot \left[(\vec{V}_j^* - \vec{V}_i^*) \cdot \vec{Y}_{ij}^* + \vec{V}_j^* \cdot \vec{Y}_{j0}^* \right]$$

- Gubici u grani i-j su jednaki:

$$\Delta \vec{S} = \vec{S}_{i-j} + \vec{S}_{j-i}$$

$$\Delta \vec{S} = (\vec{V}_i^* - \vec{V}_j^*) \cdot \vec{Y}_{ij}^* \cdot (\vec{V}_i - \vec{V}_j) + |\vec{V}_i|^2 \cdot \vec{Y}_{i0}^* + |\vec{V}_j|^2 \cdot \vec{Y}_{j0}^*$$

- Detaljnije o svemu na predavanjima iz predmeta Analiza elektroenergetskog sustava!

Laboratorijske vježbe

- Vrijeme i mjesto održavanja – dvorana D 244 (Istočna Europa) prema objavljenom rasporedu
- Korišteni software: Siemens PSS/E (Power System Simulator for Engineering)
- PSS/E – profesionalni alat za analizu tokova snaga (više o programu: <https://www.energy.siemens.com>)