

STUDIJSKI PROGRAM: *ENERGETIKA I AUTOMATIKA*

PREDMET: *ANALIZA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA I*

FOND ČASOVA: *2+2+0.5*

## LABORATORIJSKA VJEŽBA BROJ 1

NAZIV:	<i>MATEMATIČKO MODELOVANJE GENERATORA I TRANSFORMATORA</i>
--------	--

### CILJEVI VJEŽBE:

- Formiranje matematičkog modela generatora i transformatora,
- Upoređenje rezultata sa rezultatima koji su dobijeni računskim putem (auditorne vježbe iz Analize elektroenergetskih sistema I),
- Analiza matematičkog modela dvonamotajnog trofaznog transformatora,
- Analiza matematičkog modela tronamotajnog trofaznog transformatora.

### POTREBAN PRIBOR:

- kalkulator.

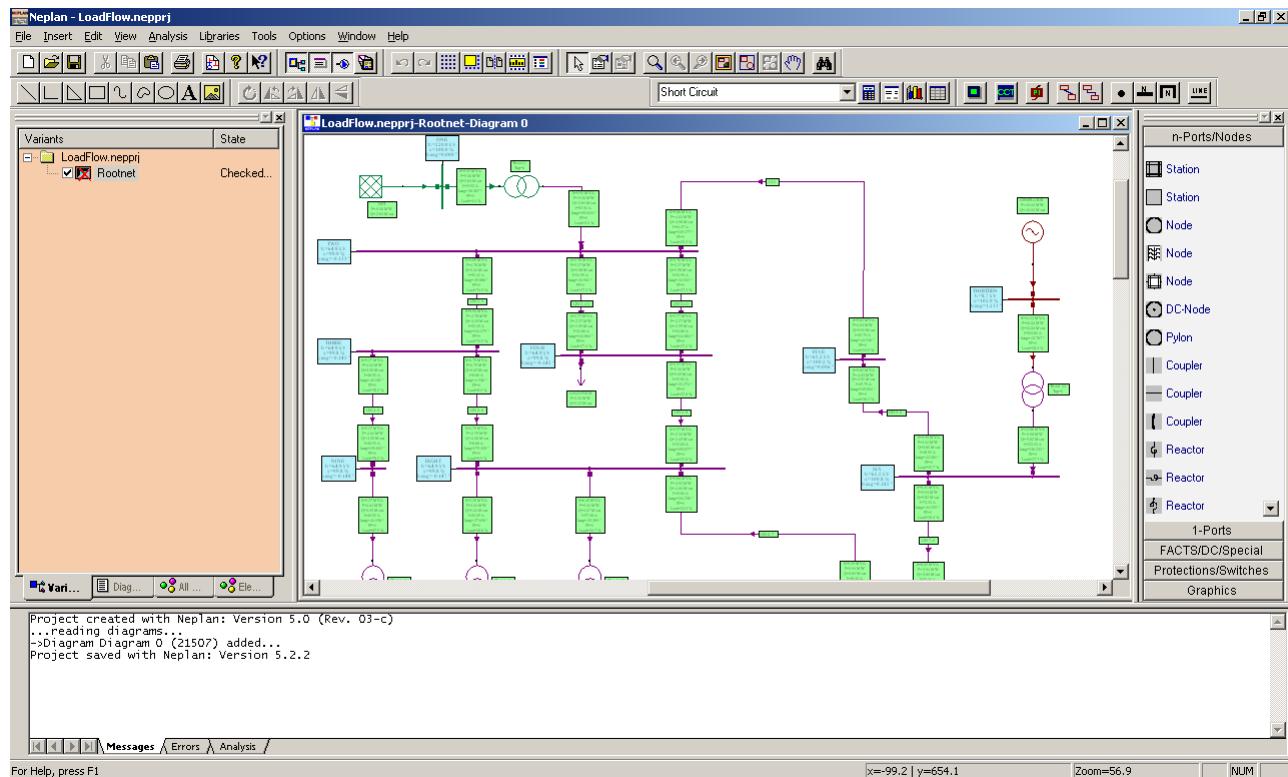
IME I PREZIME: \_\_\_\_\_.

BROJ INDEKSA: \_\_\_\_\_.

BROJ POENA:	
OVJERAVA:	
DATUM:	

## 1. APARATURA

Na raspolaganju je softver NEPLAN 5.2 u studentskoj verziji za simulaciju rada elektroenergetskih sistema (Slika 1.1).



Slika 1.1 Radni prozor softvera za simulaciju EES

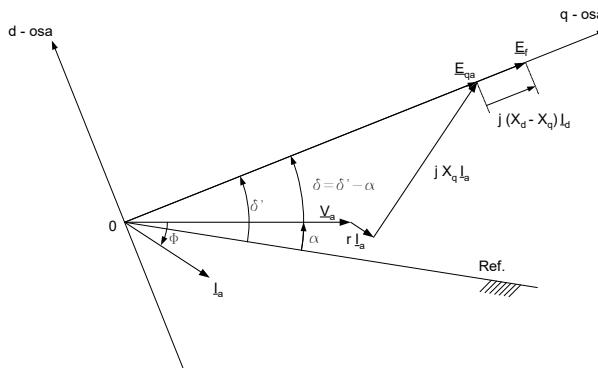
## 2. TEORIJSKA OSNOVA LABORATORIJSKE VJEŽBE

### 2.1 Matematički model generatora

Za potrebe analize generatora razvijeni su matematički modeli različite složenosti. Detaljan opis matematičkog modela dat je u okviru knjige prof. I. Vujoševića „Analiza elektroenergetskih sistema I“. Za potrebe analize statickih režima elektroenergetskog sistema, mogu se koristiti jednostavniji modeli.

Ako su dati granični uslovi na krajevima mašine, tj. poznate su vrijednosti  $V_a$ ,  $I_a$  i  $\Phi$ , ali položaj q-ose nije poznat, vektorski dijagram je predstavljen na

Slika 2.1.



**Slika 2.1** Fazorski dijagram sinhronog generatora za slučaj poznatih uslova na krajevima mašine

Fazor ems  $E_{qa}$ , lociran na q-osi dobija se iz jednačine

$$\underline{E}_{qa} = \underline{V}_a + r\underline{I}_a + jx_q \underline{I}_a \quad (2.1)$$

Uzimajući u obzir da važi (pogledati predavanja):

$$\underline{E} = \underline{E}_f = \underline{V}_a + r\underline{I}_a + jx_d \underline{I}_d + jx_q \underline{I}_a - jx_q \underline{I}_d = \underline{E}_{qa} + j(x_d - x_q) \underline{I}_d \quad (2.2)$$

Slijedi da se položaj q-ose određuje položajem fazora ems  $E_{qa}$ , a fazor ems  $E$  dodavanjem fazora  $j(x_d - x_q)$  na fazor  $E_{qa}$ . Veličina  $E = E_f$  naziva se *unutrašnja ems* sinhronog generatora u ustaljenom stanju. Često se naziva i naponom iza sinhrone reaktanse, ili pobudnim fazorom napona statora sinhronog generatora. Fazor napona  $E_{qa}$  u (2.1) i na Slika 2.1 je fiktivna veličina i služi za određivanje ugla  $\delta$ .

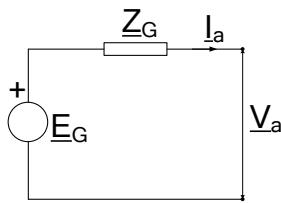
Ako je uzdužna reaktansa  $x_d$  jednaka poprečnoj  $x_q$  (tj.  $x_d = x_q$ ), što je praktično slučaj kod mašina sa cilindričnim rotorom, može se u vezi sa izrazom (2.1) i Slika 2.1 za fazu a uspostaviti relacija između napona  $V_a$ , struje opterećenja  $I_a$  i ems  $E_f$  (koja će se u zamjenskim šemama generatora obilježavati sa  $E_G$ ):

$$\underline{E}_f = \underline{E}_G = \underline{V}_a + r\underline{I}_a + jx_d \underline{I}_a = \underline{V}_a + \underline{Z}_G \underline{I}_a \quad (2.3)$$

gdje je

$$\underline{Z}_G = r + jx_d \quad (2.4)$$

Prema tome, generator sa cilindričnim rotorom u stacionarnom režimu (tj. kod proračuna naponskih prilika i tokova snaga) sasvim korektno opisuju prilike na spoju generatora i mreže. Jednačini (2.3) odgovara ekvivalentna šema naponskog (Thevenin-ovog) generatora sa unutrašnjom impedansom kao na Slika 2.2.



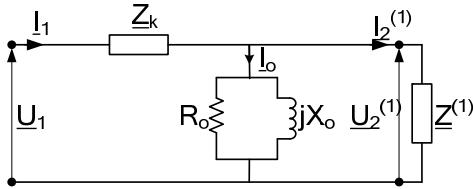
**Slika 2.2** Ekvivalentna monofazna šema trofaznog sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom u ustaljenom režimu

## 2.2 Matematički model transformatora

Energetski transformatori se u pogledu broja faza grade kao monofazne i trofazne jedinice, a u pogledu broja namotaja kao:

- dvonamotajni
- tronomotajni i
- autotransformatori.

Matematički model transformatora koji je najčešće u upotrebi je predstavljen približnom ekvivalentnom obrnutom  $\Gamma$  šemom transformatora (Slika 2.3)



**Slika 2.3** Približna ekvivalentna obrnuta  $\Gamma$  šema transformatora

Redna impedansa  $Z_T = Z_k$  dobija se iz ogleda kratkog spoja:

$$Z_k = Z_1 + Z_2^{(1)}. \quad (2.5)$$

Za potrebe određivanja  $Z_k$  uvodi se veličina napon kratkog spoja  $u_k$ :

$$u_k = \frac{U_{ce}}{U_{n1}} 100 \% \quad (2.6)$$

tada važi,

$$Z_k = \frac{u_k U_{n1}^2}{100 S_n}. \quad (2.7)$$

Otpornost u impedansi kratkog spoja određuje se iz gubitaka u bakru  $P_{cu}$

$$p_{cu} = \frac{P_{cu}}{S_n} 100 \% \quad (2.8)$$

slijedi

$$R_k = \frac{p_{cu} U_{n1}^2}{100 S_n} \quad (2.9)$$

Reaktansa kratkog spoja se sada dobija prema

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (2.10)$$

Otočna impedansa  $Z_{12}^{(1)}$ , odnosno njene paralelne komponente  $R_o$  i  $jX_o$ , dobija se iz ogleda praznog hoda transformatora i određuje se iz vrijednosti struje praznog hoda:

$$j_o = \frac{I_o}{I_n} 100 \text{ (%)} \quad (2.11)$$

slijedi

$$Z_o = \frac{100 U_1^2}{j_o S_n}. \quad (2.12)$$

Otpornost  $R_o$  dobija se na osnovu gubitaka praznog hoda

$$p_o = \frac{P_o}{S_n} 100 \text{ (%)} \quad (2.13)$$

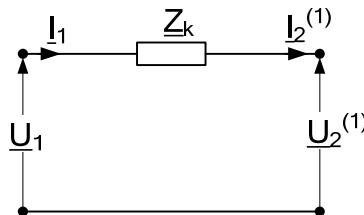
pa se za  $R_o$  dobija

$$R_o = \frac{100 U_1^2}{p_o S_n} \quad (2.14)$$

slijedi da je

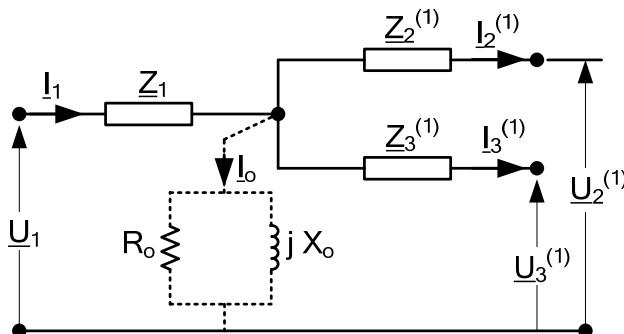
$$X_o = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{Z_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_o}\right)^2}} \quad (2.15)$$

Često se u praksi ekvivalentna šema jednofaznog transformatora prema Slika 2.3 dodatno uprošćava tako što se sa velikom tačnošću može usvojiti da  $Z_o \rightarrow \infty$ . Tada se dobija tzv. I šema dvonamotajnog transformatora kao na Slika 2.4 koja se često koristi u raznim približnim analizama EES, kada se, čak, zanemaruje i realni dio dio imedanse  $Z_k$ .



Slika 2.4 Uprošćena ekvivalentna I šema jednofaznog transformatora

Pored dvonamotajnog transformatora, u prenosnoj mreži se često pojavljuje i tronamotajni transformator (Slika 2.5). Parametri ekvivalentne šeme proračunavaju se prema relacijama (2.79) – (2.82) koje su izvedene u okviru predavanja.



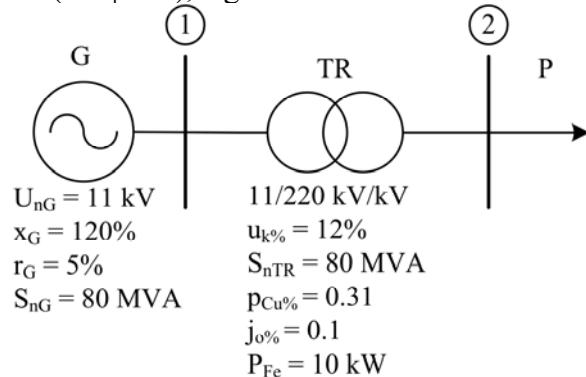
Slika 2.5 Ekvivalentna šema tronamotajnog transformatora

### 3. ZADATAK LABORATORIJSKE VJEŽBE

1) Odrediti snagu na sabirnicama generatora i napon na sabirnicama potrošača sa šeme (Slika 3.1) za sljedeće slučajeve:

- Transformator modelovati obrnutom  $\Gamma$  šemom.
- Zanemariti aktivnu otpornost generatora.
- Transformator modelovati I šemom i zanemariti aktivnu otpornost generatora.

Potrošač uzima snagu 60 MW ( $\cos\phi = 1$ ), a generator radi sa nominalnim naponom na sabirnicama.



**Slika 3.1** Dio EES-a

Izrada:

Izrada:

2) Koristeći softver Neplan 5.2 za simulaciju EES, formirati model iz prethodnog zadatka proračunati tokove snaga i fazore napone u čvorovima. Dobijene rezultate napisati u Tabela 3-I. Uporediti rezultate sa proračunom iz prethodnog zadatka. Poračunati procentualnu grešku u određivanju amplitude napona za sva tri slučaja. Koliki je gubitak snage u transformatoru?

**Tabela 3-I** Rezultati simulacije I

	Prvi čvor	Drugi čvor
Efektivna vrijednost napona U [kV]		
Fazni stav napona $\delta$ [°]		
Odstupanje od proračuna [ % ] – a)		
Odstupanje od proračuna [ % ] – b)		
Odstupanje od proračuna [ % ] – c)		

Snaga na sabirnicama generatora:

\_\_\_\_\_.

Gubici u transformatoru:

\_\_\_\_\_.

3) Ponoviti proračun iz prethodnog zadatka tako što se na potrošačke sabirnice doda još jedan potrošač sa snagom  $Q = 60 \text{ MVar}$ , a isključi prvobitno postavljeni potrošač. Koristeći softver proračunati tokove snaga i fazore napona u čvorovima. U Tabela 3-II upisati dobijene rezultate.

**Tabela 3-II** Rezultati simulacije II

	Prvi čvor	Drugi čvor
Efektivna vrijednost napona U [kV]		
Fazni stav napona $\delta$ [°]		

Snaga na sabirnicama generatora:

\_\_\_\_\_.

Gubici u transformatoru:

\_\_\_\_\_.

4) Za postojeću šemu aktivirati oba potrošača i proračunati fazore napona i snagu na sabirnicama generatora. Rezultate upisati u Tabela 3-III.

**Tabela 3-III** Rezultati simulacije III

	Prvi čvor	Drugi čvor
Efektivna vrijednost napona U [kV]		
Fazni stav napona $\delta$ [°]		

Snaga na sabirnicama generatora:

\_\_\_\_\_.

Gubici u transformatoru:

\_\_\_\_\_.

5.) Na osnovnom modelu (zadatak pod 1.)) zamjeniti dvonamotajni transformator sa tronamotajnim transformatorom sa istim karakteristikama primara i sekundara, dok je snaga tercijera upola manja, nominalni napon 6 kV, a  $u_{k\%} = 8 \%$ . Proračunati tokove snaga i fazore napona i rezultate upisati u Tabela 3-IV.

**Tabela 3-IV** Rezultati simulacije IV

	Prvi čvor	Drugi čvor
Efektivna vrijednost napona U [kV]		
Fazni stav napona $\delta [^\circ]$		

Snaga na sabirnicama generatora:

\_\_\_\_\_.

Gubici u transformatoru:

\_\_\_\_\_.

6.) Na tercijeru tronamotajnog transformatora iz prethodnog zadatka priključiti generator snage 30 MVA i podesiti da mreži predaje 25 MW aktivne snage i održava napon na svojim sabirnicama na vrijednosti 5 % iznad nominalne. Proračunati tokove snaga i fazore napona u čvorovima. Rezultate upisati u Tabela 3-V.

**Tabela 3-V** Rezultati simulacije V

	Prvi čvor	Drugi čvor
Efektivna vrijednost napona U [kV]		
Fazni stav napona $\delta [^\circ]$		

Snage na sabirnicama generatora:

\_\_\_\_\_.

Gubici u transformatoru:

\_\_\_\_\_.

## **4. ZAKLJUČAK**

Na osnovu urađenih zadataka, odgovoriti na sljedeća pitanja.

1. Kako zanemarivanje aktivnog otpora u modelu generatora utiče na proračun naponskih prilika?

---

---

---

---

---

2. Koliki i kakav je uticaj otočne grane transformatora na tokove snaga između generatora i potrošača?

---

---

---

---

---

3. Koliki je uticaj korišćenja zamjenske I šeme transformatora na naponske prilike.

---

---

---

---

---

4. Iskomentarisati uticaj prirode potrošača (snage potrošnje) na napon u potrošačkom čvoru.

---

---

---

---

---

5. Navesti i objasniti prirodu gubitaka u transformatoru.

---

---

---

---

---

6. Prokomentarisati ulogu tronamotajnog transformatora i njegove osnovne razlike u odnosu na dvonamotajni transformator.

---

---

---

---

---