

# Korekcijski faktori impedancija prilikom izračuna struja kratkih spojeva

---

Smaić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:682742>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**Korekcijski faktori impedancija prilikom izračuna struja  
kratkih spojeva**

**Diplomski rad**

**Ivan Smaić**

**Osijek, 2019.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 22.09.2019.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Ime i prezime studenta:	Ivan Smaić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 892, 25.09.2018.
OIB studenta:	02053395343
Mentor:	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva:	Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Korekcijski faktori impedancija prilikom izračuna struja kratkih spojeva
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno obraditi teoriju proračuna struja kratkih spojeva prema metodi koju propisuje norma IEC 60909. Poseban naglasak je potrebno staviti na korekcijske faktore impedancija te je potrebno dati nekoliko primjera proračuna u kojima se ti korekcijski faktori koriste.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	22.09.2019.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTIRADA**

Osijek, 27.09.2019.

**Ime i prezime studenta:**

Ivan Smaić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D 892, 25.09.2018.

**Ephorus podudaranje [%]:**

5 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Korekcijski faktori impedancija prilikom izračuna struja kratkih spojeva**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Krešimir Fekete

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KRATKI SPOJ.....	2
2.1 Općenito o kratkom spoju.....	2
2.2 Proračun struje kratkog spoja.....	5
3. KOREKCIJSKI FAKTORI .....	7
3.1 Korekcijski faktori za dvonamotne i tronamotne transformatore .....	7
3.1.1 Impedancije dvonamotnih transformatora.....	8
3.1.2 Impedancijski korekcijski faktor za dvonamotne i tronamotne mrežne transformatore....	9
3.2 Impedancijski korekcijski faktori.....	11
3.2.2 Korekcijski faktor <b>KG</b> .....	12
3.2.3.1 Impedancijski korekcijski faktor <b>KS</b> .....	15
3.2.3.2 Korekcijski faktori <b>KG, S</b> i <b>KT, S</b> .....	22
3.2.4 Korekcijski faktor elektrana bez regulacijske preklopke pod opterećenjem .....	28
3.2.4.1 Korekcijski faktor <b>KSO</b> .....	28
4. ZADATAK .....	47
4.1 Usporedba rezultata jednofaznog i trofaznog kratkog spoja .....	70
5. ZAKLJUČAK .....	72
POPIS LITERATURE.....	73
SAŽETAK .....	74
ABSTRACT .....	75
ŽIVOTOPIS .....	76

## **1. UVOD**

Tema ovog diplomskog rada je analiza korekcijskih faktora impedancija prilikom izračuna struja kratkih spojeva. Kroz prvi dio diplomskog rada ukratko se govori o kratkom spoju. Sve najvažnije značajke kao što su vrste kratkih spojeva koje se mogu dogoditi u mreži, te proračun struja kratkih spojeva. Proračuna struja kratkih spojeva obrađen je teorijski, prema metodi koju propisuje norma IEC 60909. Drugi dio se bazira na teorijskom dijelu korekcijskih faktora prema IEC 60909 normi. Detaljno su opisani korekcijski faktori za dvonamotne transformatore, i korekcijski faktori impedancija. Poseban osvrt je stavljen na korekcijski faktor impedancija. S ciljem pojašnjenja teorije napravljen je matematički proračun. Prvi dio proračuna rađen je uz upotrebu korekcijskog faktora impedancije, a drugi dio bez upotrebe korekcijskog faktora. Nakon matematičkog dijela odrađena je i simulacija u EasyPoweru nakon čega su svi dobiveni rezultati uspoređeni.

### **Zadatak diplomskog rada**

U radu je teorijski obrađen proračuna struja kratkih spojeva prema metodi koju propisuje norma IEC 60909. Poseban osvrt je stavljen na korekcijski faktor impedancija, čija je važnost upotrebe prikazana kroz primjer matematičkim proračunom u kojem se ti korekcijski faktori koriste. Uz matematički proračun napravljena je i programska simulacija primjera.

## 2. KRATKI SPOJ

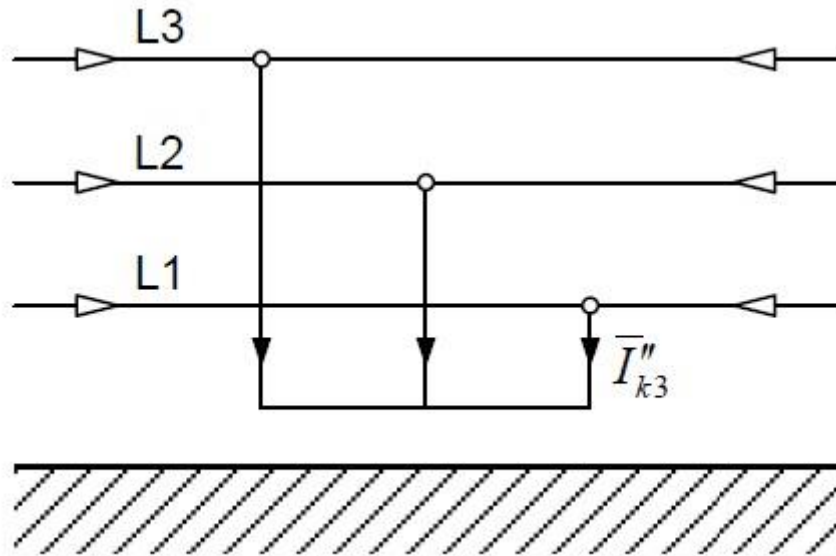
### 2.1 Općenito o kratkom spoju

Do kratkog spoja dolazi vodljivim premoštenjem izolacije između dijelova električnog postrojenja koji se nalazi na različitim potencijalima [5]. Uzroci pojave kratkog spoja mogu se podijeliti na:

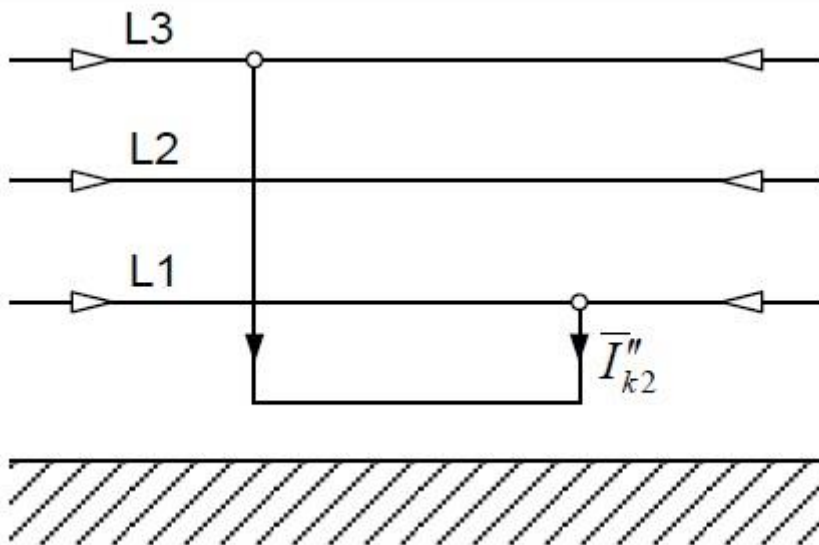
- mehaničke (oštećenje vodiča, direktan spoj dva vodiča vodljivim stranim tijelom)
- sklopni ili atmosferski prenaponi
- oštećenje izolacije uzrokovano vlagom, korozijom i toplinom

Kratki spoj ima vrlo veliku važnost pri dimenzioniranju i izboru električnih uređaja, jer se uz naprezanja pogonske struje i napona uzima u obzir i naprezanje kratkog spoja. Iznosi te struje mogu doseći višestruku vrijednost nazivne pogonske struje. Maksimalne struje kratkog spoja su zbog toga bitne kod projektiranja postrojenja. Svi elementi postrojenja moraju biti tako dimenzionirani da bih do trenutka, u kojem se isključi struja kratkog spoja, izdržali termička i dinamička naprezanja, bez oštećenja. Postoje različite vrste kratkih spojeva koji se mogu pojaviti u trofaznoj mreži, sheme istih su prikazane u daljnjem tekstu rada na slikama 2.1, 2.2, 2.3, 2.4:

- trofazni kratki spoj
- dvofazni kratki spoj
- dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom
- jednofazni kratki spoj

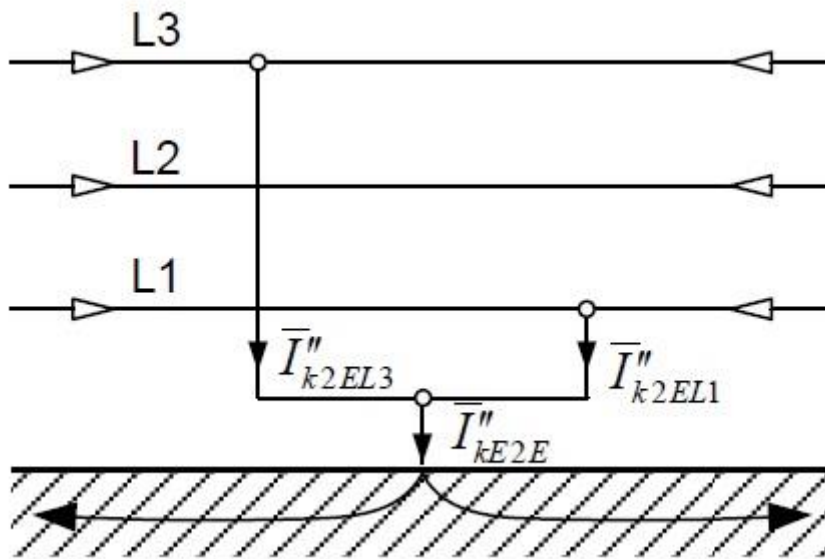


Slika 2.1 Slika trofaznog kratkog spoja [2]

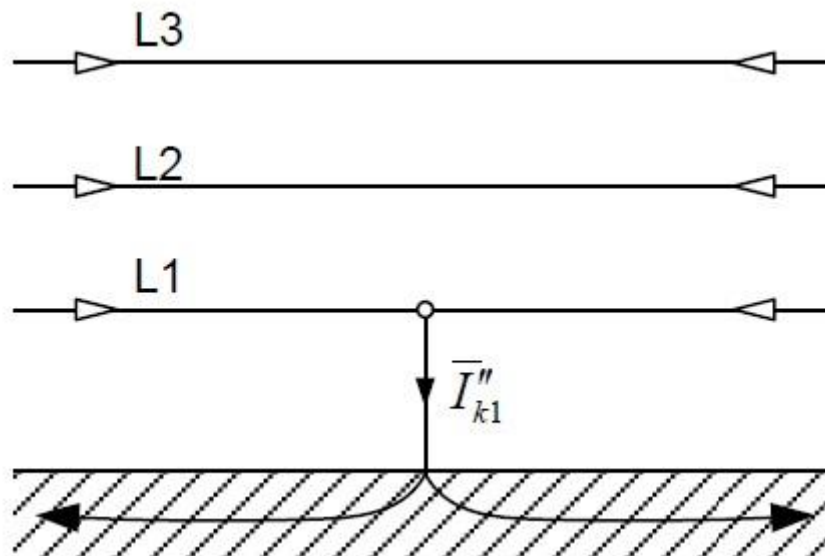


Slika 2.2 Slika dvofaznog kratkog spoja [2]





Slika 2.3 Slika dvofaznog kratkog spoja uz dodir sa zemljom [2]

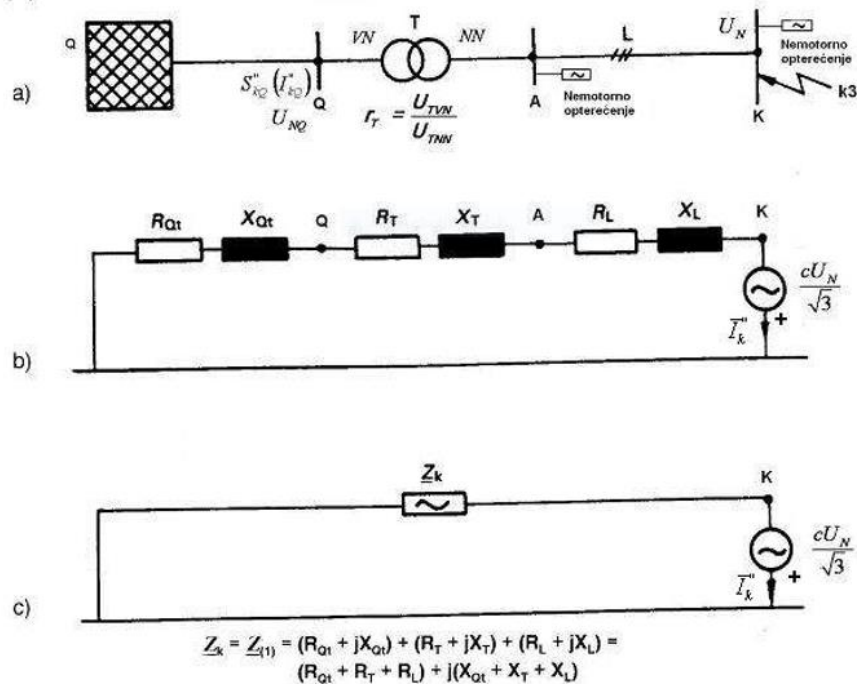


Slika 2.4 Slika jednofaznog kratkog spoja [2]

## 2.2 Proračun struje kratkog spoja

Prilikom proračuna kratkog spoja od najveće su važnosti maksimalna i minimalna struja kratkog spoja [5]. Maksimalna struja kratkog spoja služi za određivanje prekidne i uklopne moći prekidača te elektrodinamičkih naprezanja vodiča i sklopnih aparata [5]. Maksimalna struja kratkog spoja odgovara struji kratkog spoja u neposrednoj blizini izlaznih stezaljki zaštitnog uređaja, pri čemu uz maksimalni doprinos elektrana ili transformatora (u slučaju niskonaponske mreže), treba odabrati takvu konfiguraciju sustava koja na mjestu kvara daje najveću struju kratkog spoja [5]. Minimalnom strujom kratkog spoja se podešavanja zaštita u visokonaponskoj mreži te se po njoj određuje krivulja „vrijeme – struja” prekidača i topljivih osigurača u niskonaponskoj mreži, posebice kod dugačkih kabela i razmjerno velikih impedancija izvora i u slučaju da zaštita od dodira ovisi o funkcioniranju prekidača ili topljivih osigurača (kod TN i IT mreža) [5]. Minimalna struja kratkog spoja u nisko naponskoj mreži odgovara struji jednofaznog kratkog spoja, odnosno u visokonaponskoj mreži struji dvofaznog kratkog spoja na kraju štice vodova [5]. Pri tome uz minimalni doprinos elektrana (u slučaju visokonaponske mreže) ili transformatora (u slučaju niskonaponske mreže), treba odabrati takvu konfiguraciju sustava, koja na mjestu kvara daje najmanju struju kratkog spoja [5].

Tok proračuna struje kratkog spoja određen je standardom IEC 60909 (EN 60909). On se može primijeniti u zrakastim, zamkastim, visokonaponskim i niskonaponskim mrežama frekvencije 50 ili 60 Hz [6]. Metoda opisana u standardu zanemaruje poprečne impedancije u direktnom i inverznom sustavu i što se na mjestu kratkog spoja pretpostavlja nadomjesni izvor, tj. pojednostavljena je [6]. Nadomjesnim izvorom određuje se početna struja kratkog spoja i zamjenjuju se svi realni izvori mreže [6]. Taj je nadomjesni izvor jedini napon koji u kratkospojenoj mreži djeluje, jer se sva mrežna napajanja, svi sinkroni i asinkroni strojevi zamjenjuju svojim unutarnjim impedancijama [5].



**Slika 2.5:** Nadomjesni izvor napona na mjestu kratkog spoja [5]

- a) Jednopolna shema mreže
- b) Nadomjesna shema direktnog sustava
- c) Nadomjesna shema direktnog sustava s rezultantnom impedancijom  $\bar{Z}_k$

Slika 2.5 prikazuje primjer gdje visokonaponska mreža Q kao izvor u obliku mrežnog napajanja, preko transformatora T i voda L, napaja mjesto kvara K, gdje je došlo do trolpnog kratkog spoja (k3) [5]. U nadomjesnoj shemi direktnog sustava prema slici 2.5, koja je crtana u svrhu određivanja početne struje kratkog spoja  $I_k$ , na mjestu kvara nalazi se nadomjesni izvor čiji je fazni napon u početnom periodu kratkog spoja (prema IEC 60909) jednak nazivnom faznom naponu mreže  $U_N/\sqrt{3}$ , pomnoženom s naponskim faktorom  $c$  prema Tablici 3.1 [5]. Svi se ostali naponi izvora u mreži postavljaju na vrijednost nula [5]. Mrežno napajanje predstavljeno je na nadomjesnoj shemi svojom unutarnjom impedancijom  $\underline{Z}_{QT}$ , preračunatom na stranu nižeg napona transformatora (oznaka  $t$  u indeksu ukazuje na to), a transformator svojom impedancijom  $\underline{Z}_T$ , izračunatom ta-kođer na stranu nižeg napona [5]. Prijenosni odnos transformatora  $rT$  predstavlja omjer višeg napona ( $UTVN$ ) i nižeg napona ( $UTNN$ ) transformatora u praznom hodu [5]. Vod je u nadomjesnoj shemi prikazan impedancijom  $\underline{Z}_L$  [5]. Poprečne admitancije (npr. kapaciteti vodova i pasivni tereti) pri proračunu početne struje kratkog spoja neće se uzimati u obzir [5].

### 3. KOREKCIJSKI FAKTORI

#### 3.1 Korekcijski faktori za dvonamotne i tronamotne transformatore

Napomena: “Ovo poglavlje nastalo je prijevodnom poglavlja 3.3.1 i 3.3.2 norme IEC 60909-0 Struje kratkog spoja u trofaznim ac sustavima“ [2].

Pri proračunu maksimalne struje uz uvažavanje subtranzijentnog ponašanja (kratki spoj blizu generatoru) generatora i blok spoja generatora i transformatora u elektranama s velikim vrijednostima za  $x''d$  i  $uk$  mogu se pojaviti specijalne okolnosti pod kojima je pad napona na subtranzijentnoj reaktanciji veći od 10 % [5]. Iz tog razloga, a i u svrhu kompenziranja primijenjenih pojednostavljajućih pretpostavki metodologije za određivanje subtranzijentne struje kratkog spoja pri kvaru blizu generatoru, standard IEC 60909 uvodi korekcijske faktore za određivanje impedancija sinkronih generatora (*KG*) koji se na mrežu priključuju direktno bez transformatora, zatim mrežnih transformatora (*KT*), blok spoja generatora i transformatora u elektrani sa (*KBS*) i bez mogućnosti promjene broja zavoja pod opterećenjem (*KBSO*), te generatora i transformatora u elektranama (*KGE* i *KTE*) koji se moraju tretirati kao zasebni elementi (a ne kao blok spoj) [5]. S korekcijskim faktorima se množe respektivne impedancije u svim formulama za određivanje struje kratkog spoja [5]. Korekcijski su faktori izvedeni na temelju usporednih proračuna izvedenih metodom nadomjesnog izvora na mjestu kvara koju koristi standard IEC 60909 i točnijom metodom superpozicije [5]. Navedeni korekcijski faktori su detaljnije objašnjeni u daljnjem tekstu diplomskog rada.

**Tablica 3.1** Tablica faktora napona [2]

Nazivni napon $U_N$	Naponski faktor $c$ za računanje	
	maksimalne struje kratkog spoja $c_{max}^{1)}$	minimalne struje kratkog spoja $c_{min}$
Niski napon od 100V do 1000V (IEC Publikacija 38, Tablica I)	1,05 <sup>3)</sup> 1,10 <sup>4)</sup>	0,95
Srednji napon >1 kV (IEC Publikacija 38, Tablica III)	1,10	1,00
Visoki napon <sup>2)</sup> >35 kV (IEC Publikacija 38, Tablica IV)		
1) $c_{max} U_N$ ne smije nadmašiti najviši napon $U_m$ elemenata mreže 2) Ako nije definiran nazivni napon treba primijeniti $c_{max} U_N = U_m$ ili $c_{max} U_N = 0,9 \cdot U_m$ 3) Za niskonaponske mreže s tolerancijom od +6% 4) Za niskonaponske mreže s tolerancijom +10%		

### 3.1.1 Impedancije dvonamotnih transformatora

Direktna impedancija kratkog spoja dvonamotnog transformatora  $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$  sa i bez regulacijske preklopke pod opterećenjem može se izračunati iz nazivnih vrijednosti transformatora:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (7)$$

$$R_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (8)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (9)$$

$U_{rT}$ - nazivni napon na visoko ili niskonaponskoj strani transformatora;

$I_{rT}$ - nazivna struja na visoko ili niskonaponskoj strani transformatora;

$S_{rT}$ - nazivna prividna snaga transformatora;

$P_{krT}$ - gubici u namotima pri nazivnoj struji;

$u_{kr}$  - napon kratkog spoja u postocima pri nazivnoj struji;

$u_{Rr}$  - nazivna otporna komponenta napona kratkog spoja u postocima;

Otporna komponenta  $u_{Rr}$  može se izračunati iz ukupnih gubitaka  $P_{krT}$  u namotima, pri nazivnoj struji  $I_{rT}$ , oboje na istoj strani transformatora (vidjeti jednadžbu 8).

Omjer  $R_T/X_T$  se smanjuje s veličinom transformatora. Kod velikih transformatora otpor je toliko malen da možemo pretpostaviti da se impedancija sastoji samo od reaktancije, kada računamo struje kratkog spoja. Otpor se uzima u obzir ako računamo udarnu struju kratkog spoja  $i_p$  ili istosmjernu komponentu  $i_{dc}$ .

Potrebni podaci za proračun  $Z_T = R_T + jX_T = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$  mogu se uzeti sa nazivne pločice. Nulta impedancija kratkog spoja  $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$  može se pročitati sa nazivne pločice ili dobiti od proizvođača.

**BILJEŠKA** Stvarne vrijednosti dvonamotnih transformatora korištenih kao mrežni transformatori ili u elektranama dane su u IEC 60909-2. Nulta impedancija za proračun nesimetričnih struja kratkog spoja dana je u IEC 60909-4 [3] [4]

### 3.1.2 Impedancijski korekcijski faktor za dvonamotne i tronamotne mrežne transformatore

Mrežni transformator je transformator koji povezuje dvije ili više mreža različitih naponskih razina. Za dvonamotne transformatore sa i bez regulacijske preklopke pod opterećenjem, uvodi se impedancijski korekcijski faktor  $K_T$  uz impedanciju procjenjenu prema jednadžbama (7) do (9):  $\underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$  gdje je  $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ .

$$K_T = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_T} \quad (12a)$$

gdje je  $x_T$  relativna reaktancija transformatora  $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$ , a  $c_{max}$  iz tablice 1 povezan je s nominalnim naponom mreže na niskonaponskoj strani mrežnog transformatora. Ovaj korekcijski faktor neće biti uveden za blok transformatore u elektranama (vidjeti 3.7).

Ako su poznati pogonski uvjeti mrežnog transformatora prije nastanka kratkog spoja, tada se koristi jednačba (12b) umjesto (12a).

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_T(I_T^b/I_{rT}) \sin \varphi_T^b} \quad (12b)$$

gdje je

$c_{max}$ - naponski faktor iz tablice 3.1, povezan s nominalnim naponom mreže na niskonaponskoj strani mrežnog transformatora;

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT});$$

$U^b$ - najviši pogonski napon prije nastanka kratkog spoja;

$I_T^b$ - najveća pogonska struja prije nastanka kratkog spoja (ovisi o konfiguraciji mreže i pouzdanosti);

$\varphi_Z^b$ - kut faktora snage prije nastanka kratkog spoja.

Impedancijski korekcijski faktor primjenjuje se i u inverznom i nultom sustavu impedancije transformatora pri proračunu nesimetričnih struja kratkog spoja. Impedancije  $\underline{Z}_n$  između zvjezdišta transformatora i zemlje prikazuju se kao  $3\underline{Z}_n$  u nultom sustavu bez korekcijskog faktora.

Kod tronamotnih transformatora sa i bez regulacijske preklopke pod opterećenjem, mogu se izvesti tri korekcijska faktora koristeći relativnu vrijednost reaktancija transformatora (vidjeti 3.1.2):

$$K_{TAB} = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_{TAB}} \quad (13a)$$

$$K_{TAC} = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_{TAC}} \quad (13b)$$

$$K_{TBC} = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_{TBC}} \quad (13c)$$

Zajedno sa impedancijama  $\underline{Z}_{AB}$ ,  $\underline{Z}_{AC}$  i  $\underline{Z}_{BC}$  prema jednadžbi (10), mogu se dobiti ispravljene vrijednosti  $\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB}\underline{Z}_{AB}$ ,  $\underline{Z}_{ACK} = K_{TAC}\underline{Z}_{AC}$  i  $\underline{Z}_{BCK} = K_{TBC}\underline{Z}_{BC}$ . Pomoću tih impedancija izračunat će se nadomjesne ispravljene impedancije  $\underline{Z}_{AK}$ ,  $\underline{Z}_{BK}$  i  $\underline{Z}_{CK}$  prema jednadžbi (11).

Tri impedancijska korekcijska faktora dani jednadžbom (13) uvode se također i u inverzni i nulti sustav tronamotnog transformatora.

Impedancije između zvjezdišta i zemlje uvode se bez korekcijskog faktora.

**BILJEŠKA** Nadomjesni spojevi direktnog i nultog sustava prikazani su u IEC 60909-4, tablica 1, stavka 4 do 7 za različita uzemljenja zvjezdišta. Impedancije  $\underline{Z}_{(0)A}$ ,  $\underline{Z}_{(0)B}$  ili  $\underline{Z}_{(0)C}$  su slične  $\underline{Z}_{(1)A}$ ,  $\underline{Z}_{(1)B}$  ili  $\underline{Z}_{(1)C}$ . Primjer uvođenja korekcijskog faktora iz jednadžbe (13) u nadomjesni direktni i nulti sustav impedancija prikazan je u 2.2 IEC 60909-4.

Ako u posebni slučajevima, na primjer u slučaju autotransformatora sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem, oba napona kratkog spoja transformatora  $u_{k+}$ , na poziciji  $+p_T$  i  $u_k$  na poziciji  $-p_T$  (vidjeti IEC 60909-2) su značajno viša nego  $u_{kr}$  i potrebno je uvesti impedancijske korekcijske faktore  $K_T$ .

## 3.2 Impedancijski korekcijski faktori

Napomena: “Ovo poglavlje je također nastalo prijevodom poglavlja 2.2 i dijela 2.3 norme IEC 60909-0 Struje kratkog spoja u trofaznim ac sustavima.”

### 3.2.1 Općenito

Jedan od glavnih kriterija za dimenzioniranje električne opreme je maksimalna struja kratkog spoja. Potrebno je uvesti impedancijske korekcijske faktore  $K_G$  za generatore i impedancijske korekcijske faktore  $K_S$  za elektrane sa, i  $K_{SO}$ , bez regulacijske preklopke transformatora pod opterećenjem, uz naponski faktor  $c_{max}$ , posebno ako su subtanžijentne rektancije generatora  $x_d''$



velike, a prijenosni omjer transformatora (sa i bez regulacijske preklopke) je drugačiji od omjera napona sustava s obje strane transformatora. Korekcijski faktori za generatore i elektrane dani su u IEC 60909-0, 3.6 i 3.7.

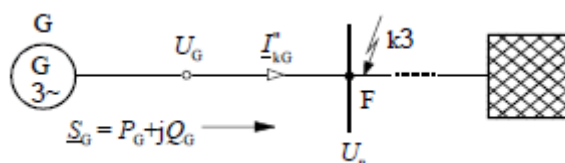
Za proračun parcijalnih struja kratkog spoja potrebna su posebna razmatranja i impedancijski korekcijski faktori u slučaju kratkog spoja između generatora i blok transformatora ili pomoćnog transformatora elektrane (vidi IEC 60909-0, 4.2.1.3 i 4.2.1.4). Ti proračuni se obično izvode jednom tijekom izgradnje elektrane.

Impedancijski korekcijski faktori određeni iz IEC 60909-0, 3.6 i 3.7 izvedeni su za maksimalne parcijalne struje kratkog spoja ( $c = c_{max}$ ). Faktor  $c_{max}$  uzet je iz IEC 60909-0, tablica 1 u skladu s naponom  $U_{IG}$ , jednadžbe (18), (22) i (24). Dodatna istraživanja mreža pokazala su da su korekcijski faktori prkladni pri proračunu struja kratkog spoja na različitim mjestima u mreži.

Za proračun minimalnih struja kratkog spoja potrebna su posebna razmatranja za korekcijske faktore jer moraju biti poznati posebni granični uvjeti za različite elektrane. Ti uvjeti su zadani prema maksimalnom opsegu poduzbuđenog pogona, minimalnoj radnoj snazi termo elektrana tijekom dugotrajnog pogona ili maksimalnoj reaktivnoj snazi (naduzbuda ili poduzbuda) u pumpnim hidroelektranama kao i specijalni uređaji za ograničenje zakretnog momenta. Osim toga, obratit će se pozornost na činjenicu da za vrijeme niskog opterećenja u mreži, broj elektrana u pogonu s djelomičnim opterećenjem u poduzbuđenom dijelu je najčešće sveden na minimum. Stoga, do grube procjene minimalnih struja kratkog spoja može se doći instrukcijama danim u IEC 60909-0, 2.5 i zadanim impedancijskim korekcijskim faktorima, iako su bazirani na operacijama s određenim uvjetima prije kratkog spoja (IEC 60909-0, 3.7.1).

### 3.2.2 Korekcijski faktor $K_G$

Impedancijski korekcijski faktor  $K_G$  primjenjuje se za impedanciju generatora  $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$  direktno spojenog na nisko ili srednje naponske mreže (bez blok transformatora) kao što je prikazano na slici 3 (IEC 60909-0, slika 11b).

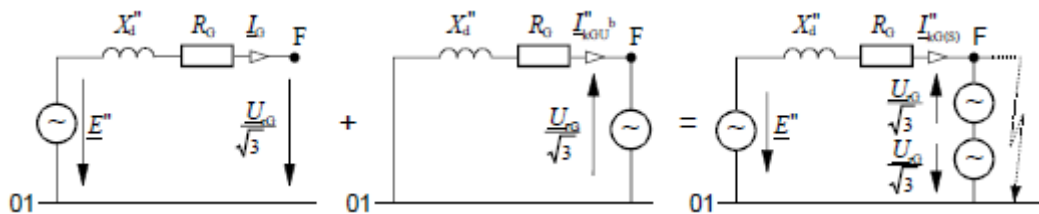


Slika 3.1 – Parcijalne struje kratkog spoja generatora  $I_{kG(S)}''$  direktno spojenog na mrežu [2]

Impedancijski korekcijski faktor  $K_G$  izveden je iz fazorskog dijagrama za normalan naduzbuđeni pogon generatora, uzevši u obzir subtranzijentnu reaktanciju  $X_d''$  i subtranzijentni unutarnji napon  $E''$ .

Na slici 3.2 a prikazana je nadomjesna shema generatora (direktni sustav). Napon na terminalima generatora  $U_G$  je kontroliran i stoga konstantan tijekom pogona, prije kratkog spoja. Vrijedi  $U_G = U_{rG} = 1.05 U_n$ . U posebnim slučajevima zadana vrijednost može odstupati:  $U_G = U_{rG}(1 \pm p_G)$ .

Slika 3.2 opisuje proceduru izračuna parcijalnih struja kratkog spoja  $I_{kG(S)}''$  metodom superpozicije.



**Slika 3.2 a –**

Uvjeti normalnog pogona uz kontrolu napona  $U_G = U_{rG}$  na mjestu kratkog spoja

**Slika 3.2 b –**

Uvođenje napona prije kratkog spoja suprotnog smjera

**Slika 3.2 c -**

Superpozicija shema 3.2 a i 3.2 b za određivanje  $I_{kG(S)}'' = I_G + I_{kGU^b}''$

**Slika 3.2 –** Izračun  $I_{kG(S)}''$  metodom superpozicije [2]

Struje  $I_G$  i  $I_{kGU^b}''$  su izvedene iz 3.2 a i 3.2 b pri  $U_G = U_{rG}$  na način:

$$I_G = \frac{E'' - U_{rG}/\sqrt{3}}{R_G + jX_d''} \quad (16)$$

$$I_{kGU^b}'' = \frac{U_{rG}/\sqrt{3}}{R_G + jX_d''} \quad (17)$$

Oznaka  $U^b$  ukazuje da se struja  $I_{kGU^b}''$  dobije kada je napon  $U_{rG}/\sqrt{3}$ , prije nego je kratki spoj prikazan u suprotnom smjeru (slika 3.2 b).

Prema slici 3.2 c, superpozicija daje parcijalnu struju kratkog spoja  $I_{kG(S)}''$  :

$$I_{kG(S)}'' = I_G + I_{kGU^b}'' = \frac{E'' - U_{rG}/\sqrt{3}}{R_G + jX_d''} + \frac{U_{rG}/\sqrt{3}}{R_G + jX_d''} = \frac{E''}{R_G + jX_d''} \quad (18)$$

S druge strane, kada se primjeni metoda sa ekvivalentnim naponski izvorom  $cU_n/\sqrt{3}$  na mjesto kratkog spoja, dobije se sljedeća jednačba za izračun struje kratkog spoja  $I_{kG}''$  :

$$I_{kG}'' = \frac{E''}{R_G + jX_d''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(R_G + jX_d'')K_G} \quad (19)$$

Ako je  $E'' = U_{rG}/\sqrt{3} + I_G Z_G = U_{rG}/\sqrt{3} + I_G(\cos \varphi_G - j \sin \varphi_G)(R_G + jX_d'')$  , impedancijski korekcijski faktor  $K_G$  se dobije:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + \frac{\sqrt{3}I_G}{U_{rG}}(R_G \cos \varphi_G + X_d'' \sin \varphi_G) + j \frac{\sqrt{3}I_G}{U_{rG}}(X_d'' \cos \varphi_G - R_G \sin \varphi_G)} \quad (20)$$

Ako je  $R_G$  puno manje u odnosu na  $X_d''$  ( $R_G \ll X_d''$ ), može se primjeniti sljedeća aproksimacija:

$$K_G \approx \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + (I_G/I_{rG})x_d'' \sin \varphi_G} \quad (21)$$

Vrijednost  $X_d''$  predstavljena je u per unit (p. u.) pomoću  $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$  i  $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$  (IEC 60909-0, 3.6.1).

Maksimalna struja kratkog spoja  $I_{kG}''$  dobije se ako nazivnik drugog dijela desne strane jednačbe (21) dosegne maksimum. To bi bilo u točki normalnog pogona ( $S_{rG}, U_{rG}, \cos \varphi_{rG}$ ) ili njezinoj blizini ako se izuzme pogon ekstremne naduzbude  $Q > Q_r$ . Tada je prihvatljivo izabrati  $I_G = I_{rG}$  i  $\sin \varphi_G = \sin \varphi_{rG}$ .

Uvođenjem  $c = c_{max}$  aproksimacija jednačbe (21) poprima sljedeći oblik:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (22)$$

Primjer: [2]

$$S_{rG} = 10 \text{ MVA}$$

$$U_{rG} = 10.5 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi_{rG} = 0.8$$

$$x_d'' = 0.12$$

Generator napaja mrežu nominalnim naponom  $U_n = 10 \text{ kV}$  (vidi sliku 3).

Proračun maksimalne parcijalne struje kratkog spoja prema desnoj strani jednadžbe (19) uz  $K_G = 0.977$ , dobiveno iz jednadžbe (22) uz  $c_{max} = 1.1$  (IEC 60909-0, tablica 3.1), daje  $I_{kG}'' = 4.9 \text{ kA}$ .

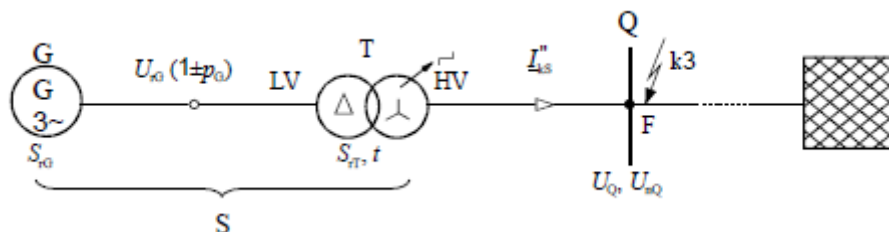
Pomoću metode superpozicije (indeks (S)) prema jednadžbi (18), dobije se struja kratkog spoja  $I_{kG(S)}'' = (0.759 - j4.889) \text{ kA}$ ;  $I_{kG(S)}'' = 4.948 \text{ kA}$ . Približna vrijednost  $I_{kG}''$  je oko 1% manja od vrijednosti  $I_{kG(S)}''$ .

Ako je napon na priključnicama generatora drugačiji od  $U_{rG}$ , potrebno je uvesti  $U_G = U_{rG}(1 \pm pG)$  umjesto  $U_{rG}$  u jednadžbe (20), (21) i (22). Tada se maksimalna struja kratkog spoja dobije uz gornju granicu napona  $U_G = U_{rG}(1 \pm pG)$  [17].

### 3.2.3 Korekcijski faktor za elektrane sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem

#### 3.2.3.1 Impedancijski korekcijski faktor $K_S$

Određivanje impedancijskog korekcijskog faktora  $K_S$  (IEC 60909-0, jednadžba (22)) za elektrane sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem, prema slici 5, bazirano je prikazu danom na slici 3.4 a uz prijenosni omjer  $t$  blok transformatora  $t \neq t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$ .



**Slika 3.3** – Parcijalna simetrična struja kratkog spoja  $I''_{kS}$  elektrane S, na visokonaponskoj strani transformatora sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem [2]

Nazivni prijenosni omjer blok transformatora može biti veći od kvocijenta  $t_r \geq U_{nQ}/U_{rG}$ .

Koristeći metodu superpozicije (slično kao na slici 3.2 ), obje struje  $I_S$  (slika 3.4 a) i  $I_{kSU^b}''$  su izvedene na sljedeći način:

$$I_S = \frac{1}{t} \cdot I_G = \frac{1}{t} \cdot \frac{E'' - U_{Ti}/\sqrt{3}}{\underline{Z}_G + \underline{Z}_{TLV}} \quad (23)$$

Struja  $I_{kSU^b}''$  se dobije uvođenjem  $\underline{U}_Q/\sqrt{3}$  suprotnog smjera na mjestu kratkog spoja F uz  $E'' = 0$ .

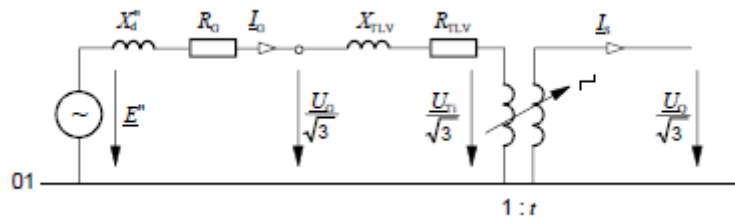
$$I_{kSU^b}'' = \frac{\underline{U}_Q/\sqrt{3}}{t^2(\underline{Z}_G + \underline{Z}_{TLV})} \quad (24)$$

Uz prijenosni omjer  $t = \underline{U}_Q/\underline{U}_{Ti} = U_Q/U_{Ti}$  (slika 3.4 a) i impedanciju  $\underline{Z}_{TLV}$  ovisnu o prijenosnom omjeru  $t$ .

Parcijalna struja kratkog spoja  $I_{kS(S)}''$  na visokonaponskoj strani blok transformatora dobije se metodom superpozicije na sljedeći način:

$$I_{kS(S)}'' = I_S + I_{kSU^b}'' = \frac{t(E'' - U_{Ti}/\sqrt{3})}{t^2(\underline{Z}_G + \underline{Z}_{TLV})} + \frac{tU_{Ti}/\sqrt{3}}{t^2(\underline{Z}_G + \underline{Z}_{TLV})} = \frac{1}{t} \cdot \frac{t^2 E''}{t^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}} \quad (25)$$

uz  $\underline{Z}_{THV} = t^2 \underline{Z}_{TLV}$ .

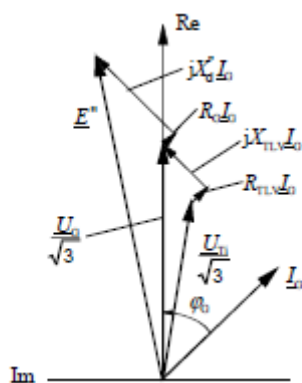


**Slika 3.4 a** – Nadomjesna shema direktnog sustava uz  $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$  i  $\underline{Z}_{TLV} = R_{TLV} + jX_{TLV}$

$$t \neq t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$$

$$\underline{U}_Q = t \underline{U}_{Ti}$$

$$I_S = (1/t) I_G$$



**Slika 3.4 b** – Fazorski dijagram za naduzbuđeni pogon sa  $U_G, I_G, \varphi_G$  [2]

**Slika 3.4** – Simulacija elektrane sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem

Bez poznavanja tokova snage u mreži, niti napon  $U_Q$  niti prijenosni omjer  $t = U_Q/U_{Ti}$  blok transformatora ( $t \neq t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$ ) ne mogu se odrediti.

Unutarnji napon  $\underline{E}''$  generatora dobije se iz fazorskog dijagrama sa slike 3.2.3.1.2 b, ovisno o  $\underline{U}_G/\sqrt{3} = U_G/\sqrt{3}$  i  $\underline{I}_G = I_G(\cos \varphi_G - j \sin \varphi_G)$  prije nastanka kratkog spoja na visokonaponskoj strani blok transformatora (slika 5):

$$\underline{E}'' = \frac{U_G}{\sqrt{3}} + \underline{I}_G \underline{Z}_G = \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{\sqrt{3} I_G}{U_G} (R_G \cos \varphi_G + X_d'' \sin \varphi_G) + j \frac{\sqrt{3} I_G}{U_G} (X_d'' \cos \varphi_G - R_G \sin \varphi_G) \right] \quad (26)$$

Prijenosni omjer supstituira se sa  $t = \underline{U}_Q/\underline{U}_{Ti}$  uz  $\underline{U}_{Ti}/\sqrt{3}$  izvedeno iz fazorskog dijagrama na slici 3.4b.

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_{Ti}}{\sqrt{3}} &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} - \underline{I}_G \underline{Z}_{TLV} \\ &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left[ 1 - \frac{\sqrt{3} I_G}{U_G} (R_{TLV} \cos \varphi_G + X_{TLV} \sin \varphi_G) - j \frac{\sqrt{3} I_G}{U_G} (X_{TLV} \cos \varphi_G - R_{TLV} \sin \varphi_G) \right] \quad (27) \end{aligned}$$

Uvođenjem  $\underline{E}''$  iz jednačbe (26),  $\underline{U}_{Ti}/\sqrt{3}$  iz jednačbe (27) i nadomjesnog naponskog izvora  $cU_{nQ}/\sqrt{3}$  na mjestu kratkog spoja F (istovjetna s mjestom spoja Q na slici 3.3 , može se izvesti sljedeća jednačba:

$$\underline{I}_{kS(S)}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}(t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \underline{K}_S} \quad (28)$$

$$\text{uz } t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$$

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$$

$$\underline{Z}_{THV} = t_r^2 \underline{Z}_{TLV}$$

(bez impedancijskog korekcijskog faktora  $K_T$ ) i

$$\underline{K}_S = \frac{U_{nQ} U_Q}{U_G^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c}{1 + \frac{\sqrt{3}I_G}{U_G} (R_G \cos \varphi_G + X_d'' \sin \varphi_G) + j \frac{\sqrt{3}I_G}{U_G} (X_d'' \cos \varphi_G - R_G \sin \varphi_G)}{1 - \frac{\sqrt{3}I_G}{U_G} (R_{TLV} \cos \varphi_G + X_{TLV} \sin \varphi_G) - j \frac{\sqrt{3}I_G}{U_G} (X_{TLV} \cos \varphi_G - R_{TLV} \sin \varphi_G)} \quad (29)$$

Može se pretpostaviti da je  $R_G \ll X_d''$  i  $R_{TLV} \ll X_{TLV}$ . Tada jednadžba (29) dovodi do sljedeće aproksimacije, ako je uvjet  $U_G = U_{rG}$  zadovoljen:

$$K_S \approx \frac{U_{nQ} U_Q}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{\sqrt{1 + 2x_d'' \left(\frac{I_G}{I_{rG}}\right) \sin \varphi_G + x_d''^2 \left(\frac{I_G}{I_{rG}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 2x_T \left(\frac{I_G}{I_{rG}}\right) \sin \varphi_G + x_T^2 \left(\frac{I_G}{I_{rG}}\right)^2}} \quad (30)$$

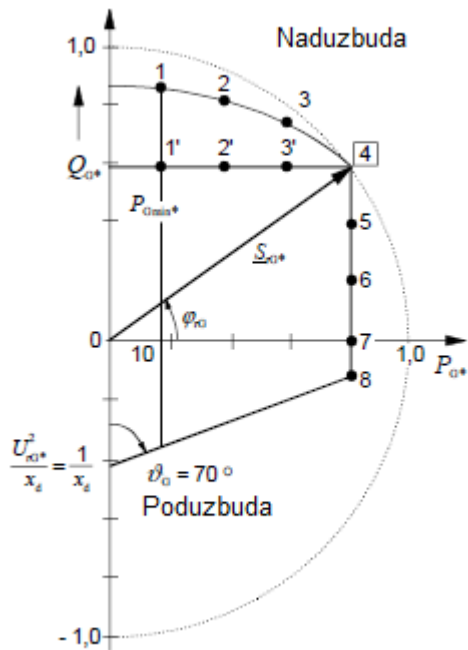
$$\text{uz } x_d'' = X_d''/Z_{rG}$$

$$x_T = X_T/Z_{rT} \text{ i}$$

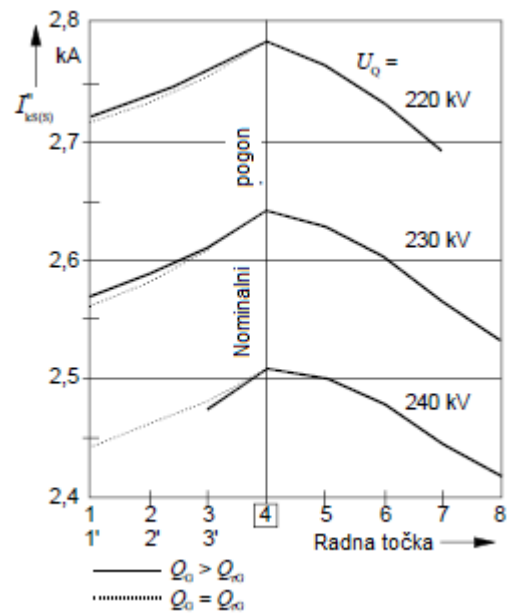
$$Z_{rG} = Z_{rT} = U_{rG}^2/S_{rG} \text{ pri } U_{rG} = U_{rTLV} \text{ i } S_{rG} = S_{rT}.$$

Ispitivanja na velikom broju elektrana sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem, slično kao i u slučaju generatora direktno spojenog na mrežu, pokazala su da struja kratkog spoja  $\underline{I}_{kS(S)}''$  doseže svoj maksimum u više slučajeva ako je pogon elektrane u nazivnoj radnoj točki prije nastanka kratkog spoja. Dvadeset četiri elektrane od četrdeset sedam uzetih u razmatranje, u rasponu  $S_{rG} = 32 \text{ MVA} \dots 1640 \text{ MVA}$ , imaju maksimalne parcijalne struje kratkog spoja ako su u pogonu u nazivnoj radnoj točki  $\underline{S}_{rG}$  prije nastanka kratkog spoja. Nadalje, šesnaest elektrana ako im je rad u naduzbuđenom pogonu  $Q > Q_{rG}$ . Samo se u preostalim sedam slučajeva očekuje da maksimalna struja kratkog spoja bude u poduzbuđenom pogonu. U šest od tih sedam slučajeva vrijedi  $x_T > x_d''$  ( $S_{rG} = 32 \text{ MVA} \dots 147 \text{ MVA}$ ).

Na slici 3.5 prikazan je jedan primjer iz tih ispitivanja sa maksimalnom strujom kratkog spoja od generatora. nakon pogona u nominalnim uvjetima, prije kratkog spoja. Za najniže vrijednosti  $U_Q$  na visokonaponskoj strani blok transformatora sa regulacijskom preklompkom pod opterećenjem dosegne se maksimalna struja kratkog spoja  $I''_{kS(S)}$ . Pretpostavljeno je da je dovoljno uzeti najnižu vrijednost  $U_{nQ}$  tijekom normalnog pogona.



**Slika 3.5 a** – Dijagram snage generatorске turbine sa granicama nad i poduzbudnog pogona[2]



**Slika 3.5 b** – Parcijalne struje kratkog spoja dobivene metodom superpozicije (S) iz jednadžbe (28) zajedno sa  $K_S$  iz jednadžbe (30) [2]

**Slika 3.5** –Parcijalna struja kratkog spoja dobivena metodom superpozicije [2]

Primjer:

$$S_{rG} = S_{rT} = 395 \text{ MVA}$$

$$U_{rG} = 21 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi_{rG} = 0.8$$

$$x_d'' = 0.25$$

$$x_d = 2.38$$

$$P_{Gmin} = 0.2P_{rG}$$

$$U_{rTHV} = 245 \text{ kV}$$

$$U_{rTLV} = 21 \text{ kV}$$

$$t = U_{rTHV}(1 \pm 0.112)/U_{rTLV}$$

$$u_{kr} = 15\%; u_{k+} = 15.8\%; u_{k-} = 14.5\%; U_{nQ} = 220 \text{ kV}$$



Daljnje pojednostavljenje jednadžbe (30) dovodi do sljedećeg:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}} \quad (31)$$

zato što se može pretpostaviti da  $U_Q = U_{nQ}$  može dati najvišu parcijalnu struju kratkog spoja  $I_{kS(S)}''$  (vidjeti sliku 3.5).

Zbog toga što napon prije kratkog spoja  $U_Q$  i stvarni položaj regulacijske preklopke transformatora nisu poznati, IEC 60909-0 predlaže uporabu sljedeće jednadžbe za proračun parcijalne struje kratkog spoja:

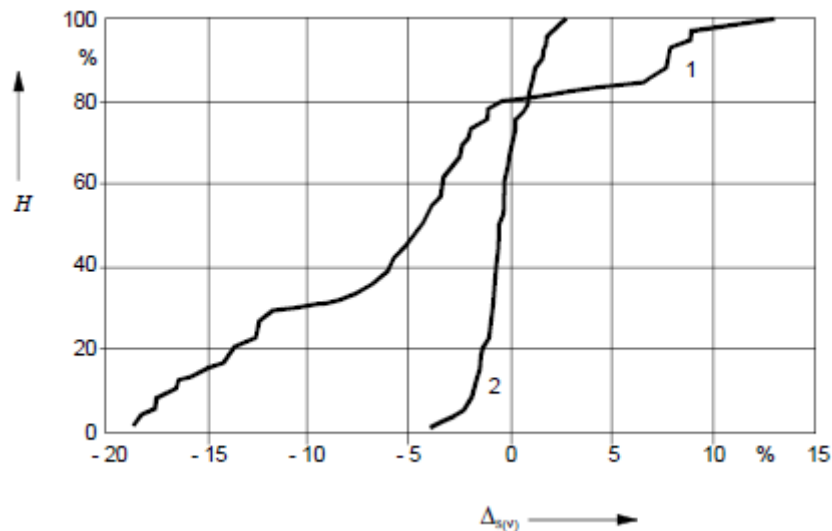
$$I_{kS}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}(t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})K_S} \quad (32)$$

uz  $K_S$  iz jednadžbe (31) i  $\underline{Z}_{THV}$  u jednadžbi (32) kao impedancija blok transformatora, izračunata iz  $u_{kr}$ , pogledati IEC 609909-0, 3.3.1. Samo kada je minimalni pogonski napon  $U_{Qmin} > U_{nQ}$  na visokonaponskoj strani transformatora poznat iz iskustva u dugotrajnom pogonu, tada je dopušteno koristiti umnožak  $U_{nQ}U_{Qmin}$  umjesto  $U_{nQ}^2$  u jednadžbi (31), pogledati IEC 60909-0, 3.7.1.

Pretpostavlja se da je pogonski napon na priključnicama generatora jednak  $U_{rG}$ . Ako je napon  $U_G$  trajno viši od  $U_{rG}$ , tada se izraz  $U_{Gmax} = U_{rG}(1 + p_G)$  uvodi umjesto  $U_{rG}$ , uz  $p_G = 0.05$ , na primjer.

Kako bi se demonstrirala efikasnost izvedenog korekcijskog faktora  $K_S$  u jednadžbi (31), slika 8 daje kumulativnu frekvenciju  $H$  od devijacija  $\Delta_S$ , dobiven iz pojednostavljenih proračuna prema IEC 609909-0 u usporedbi s vrijednostima dobivenim metodom superpozicije, za 47 elektrana sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem.

$$\Delta_{S(v)} = \frac{I_{kS(v)}'' - I_{kS(S)}''}{I_{kS(S)}''} \cdot 100\% \quad (33)$$



**Slika 3.6** – Kumulativne frekvencije  $H$  devijacija izračunate jednađbom (33) [2]

$v - 1: I''_{kS}(K_S = 1)$ , jednađba (32) uz  $K_S - 1$

$v - 2: I''_{kS,IEC}$ , jednađbe (31) i (32); (IEC 60909-0, jednađbe (21) i (22))

Krivulja 1 sa slike 3.6 prikazuje neophodnost uvođenja impedancijskog korekcijskog faktora za impedanciju elektrane zajedno sa nadomjesnim naponskim izvorom, u suprotnom, oko 50 % slučajeva vodilo bi prema nekonzervativnoj (nesigurnoj) strani (devijacije veće od -5 %).

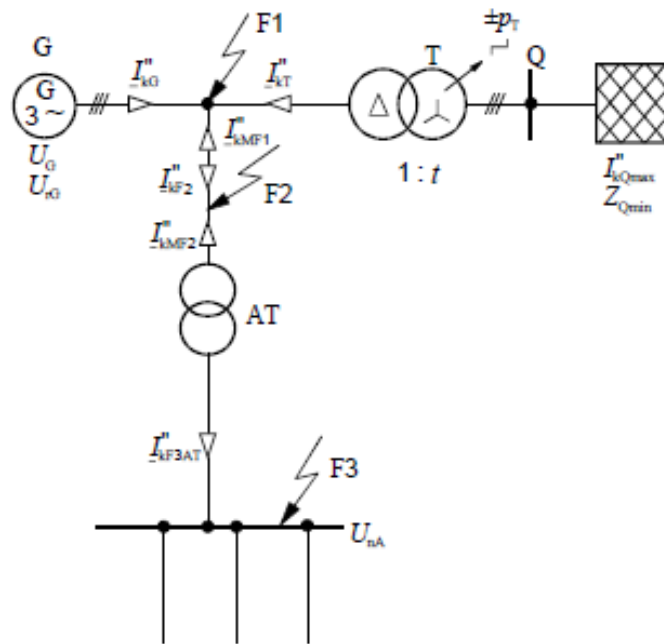
Pojednostavljeni impedancijski korekcijski faktor u jednađbi (31) dovodi do aproksimacije maksimalne parcijalne struje kratkog spoja  $I''_{kS,IEC}$  (krivulja 2 na slici 3.6). Svi su rezultati unutar granica  $\Delta_S = \pm 5\%$ . Sigurnosni i ekonomski aspekti su zadovoljeni ako se koristi  $K_S$ .

Uzevši u obzir da pomoćni transformator AT na slici 3.7 ima prividnu snagu približno  $S_{rAT} \approx 0.1S_{rG}$  u elektranama sa parnim turbinama (rezervna snaga u hidroelektranama je puno manja nego u elektranama sa parnim turbinama), opterećenje motora tijekom kontinuiranog pogona doseže vrijednost od oko  $0.6 S_{rAT}$  i da je  $U_Q$  nominalno viši od  $U_{nQ}$  tijekom naduzbudnog pogona u nazivnoj radnoj točki transformatora ili u njezinoj blizini, tada je jasno da nije nužno obraćati pozornost na utjecaj pomoćnih motora na parcijalnu struju kratkog spoja  $I''_{kS}$  ili  $I''_{kSO}$  (vidjeti IEC 60909-0, jednađbe (21) i (23)) na visokonaponskoj strani blok transformatora. U IEC 60909-4, 5.3.1, pokazano je da srednje i niskonaponski motori ne pridonose više od 5 % parcijalnim strujama kratkog spoja  $I''_{kS}$ .

Situacija se može promijeniti u posebnim slučajevima, na primjer, kada se plinske turbine dodatno spoje na pomoćnu sabirnicu u drugom slučaju osim u izvanrednom slučaju.

### 3.2.3.2 Korekcijski faktori $K_{G,S}$ i $K_{T,S}$

Na slici 3.7 prikazan je princip dizajniranja elektrane sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem i pomoćnim transformatorom (AT). Napon na priključnicama transformatora  $U_G$  biti će jednak naponu  $U_{rG}$  ( $= konstanta$ ) u ovom slučaju. Prijnosni omjer za vrijeme pogona  $t = U_{rTHV}(1 \pm p_T)/U_{rTLV}$  često nije jednak  $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$  na glavnom položaju regulacijske preklopke. Impedancija sabirnica između generatora, blok transformatora i pomoćnog transformatora je zanemariva.



**Slika 3.7** – Elektrana sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem i pomoćnim transformatorom

F1, F2, F3: lokacije kvara ( $I_{kMF1}'' = I_{kMF2}''$ ) [2]

Parcijalne struje kratkog spoja  $I_{kG}''$  i  $I_{kT}''$  kao i parcijalna struja kratkog spoja  $I_{kF2}''$  mogu se izračunati metodom superpozicije (S) na sljedeći način:

$$\underline{I}_{kG(S)}'' = \underline{I}_G + \underline{I}_{kGU^b}'' \quad (34a)$$

$$\underline{I}_{kT(S)}'' = -\underline{I}_G + \underline{I}_{kTU^b}'' \quad (35a)$$

$$\underline{I}_{kF2(S)}'' = \underline{I}_{kG(S)}'' + \underline{I}_{kT(S)}'' = \underline{I}_{kGU^b}'' + \underline{I}_{kTU^b}'' \quad (36a)$$

Ako se uvedu izrazi  $U_G/\sqrt{3}$  i  $\underline{I}_G = I_G(\cos \varphi_G - j \sin \varphi_G)$ , dobiju se sljedeće parcijalne struje kratkog spoja kada se uzmu samo reaktancije umjesto impedancija ( $R_G \ll X_d''$ ;  $R_T \ll X_T$ ).

$$\underline{I}_{kG(S)}'' = I_G \cos \varphi_G - j \left( I_G \sin \varphi_G + \frac{U_G}{\sqrt{3}X_d''} \right) \quad (34b)$$

$$\underline{I}_{kT(S)}'' = -I_G \cos \varphi_G + j \left( I_G \sin \varphi_G + \frac{U_G}{\sqrt{3} \left( X_{TLV} + \frac{1}{t^2} X_Q \right)} \right) \quad (35b)$$

$$\underline{I}_{kF2(S)}'' = \underline{I}_{kG(S)}'' + \underline{I}_{kT(S)}'' = -j \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_{TLV} + \frac{1}{t^2} X_Q} \right) \quad (36b)$$

U slučaju sa blok transformatorom sa regulacijskom preklopkom po opterećenjem, vrijednosti  $X_{TLV}$ ,  $t$ ,  $I_G$  i  $\cos \varphi_G$  mogu se promijeniti. Pretpostavljeno je da je napon  $U_G$  jednak  $U_{rG}$ . Pod tim uvjetima, iz jednadžbe (34b) slijedi:

$$\underline{I}_{kG(S)}'' = \frac{E''}{X_d''} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}X_d''} \sqrt{1 + 2x_d'' \frac{I_G}{I_{rG}} \sin \varphi_G + \left( x_d'' \frac{I_G}{I_{rG}} \right)^2} \quad (34c)$$

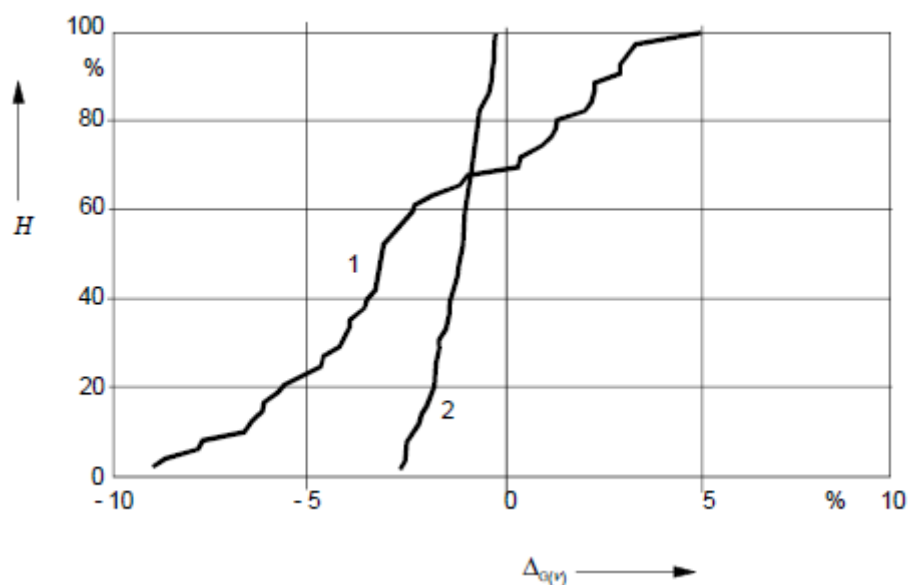
Proračun prema IEC 60909-0, 4.2.1.3, uvodi impedancijski korekcijski faktor  $K_{G,S}$ :

$$\underline{I}_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,S}Z_G} [\text{IEC 60909} - 0, \text{jednadžba (35)}] \quad (37)$$

uz 
$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} [\text{IEC 60909} - 0, \text{jednadžba (36)}] \quad (38)$$

Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{G(v)}$  prikazana je na slici 3.8

$$\Delta_{G(v)} = \frac{I_{kG(v)}'' - I_{kG(S)}''}{I_{kG(S)}''} \cdot 100 \% \quad (39)$$



**Slika 3.8** – Kumulativne frekvencije  $H$  devijacija  $\Delta_{G(v)}$  prema jednadžbi (39) za parcijalne struje kratkog spoja generatora u 47 elektrana sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem . Mjesto kratkog spoja F1 na slici 3.8 [2]

$v = 1$ :  $I_{kG}''(K_{G,S} = 1)$ , jednadžba (37) uz  $K_{G,S} = 1$

$v = 2$ :  $I_{kG}'' = I_{kG,IEC}''$ , jednadžbe (37) i (38), (IEC 60909-0, jednadžbe (35) i (36))

Iz jednadžbe (35b), samo sa reaktancijama, može se izvesti sljedeći izraz za parcijalne struje kratkog spoja  $I_{kT(S)}''$ :

$$I_{kT(S)}'' = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} \left( X_{TLV} + \frac{1}{r^2} X_Q \right)} \sqrt{1 - 2 \left( X_{TLV} + \frac{1}{r^2} X_Q \right) \frac{I_G}{I_{rG}} \sin \varphi_{rG} + \left[ \left( X_{TLV} + \frac{1}{r^2} X_Q \right) \frac{I_G}{I_{rG}} \right]^2} \quad (40)$$

Pri čemu je  $X_T = x_T U_{rG} / (\sqrt{3} I_{rG})$  i  $X_G = x_Q U_{rG} / (\sqrt{3} I_{rG})$ .

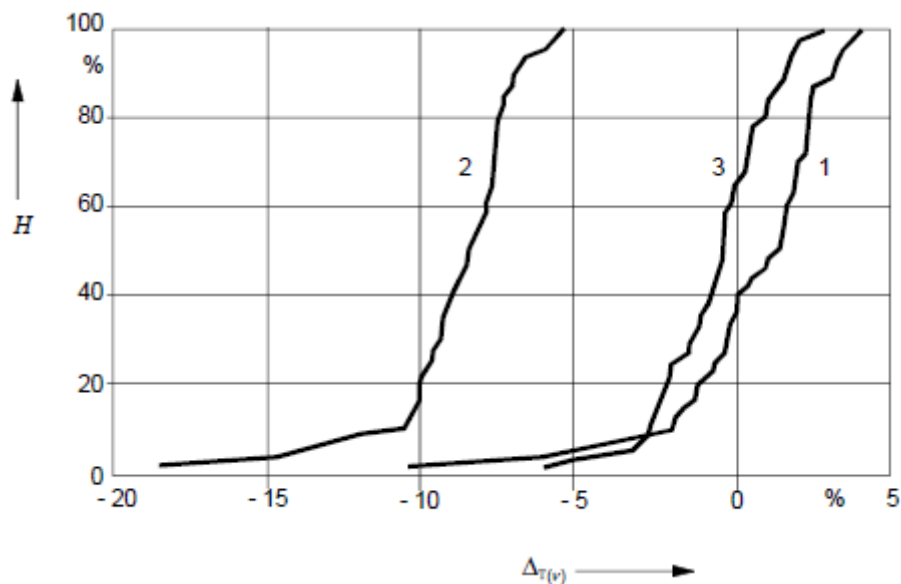
Proračun prema IEC 60909-0, 4.2.1.3. jednađba (37), ne uvodi impedancijski korekcijski faktor u ovom slućaju ( $K_{T,S} = 1$ ):

$$I_{kT(v)}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| \underline{Z}_{TLV} K_{T,S} + \frac{1}{t^2} \underline{Z}_Q \right|} \quad (41)$$

BILJEŠKA U IEC 60909: 1988 impedancijski korekcijski faktor  $K_{T,S} = 1.1$  i fiktivni prijenosni omjer  $t_f = U_{nQ}/U_{rG} \neq t_r$  nisu uvedeni, vidjeti sliku 11, krivulja 2.

Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{T(v)}$  prikazana je na slici 3.9 za tri slućaja.

$$\Delta_{T(v)} = \frac{I_{kT(v)}'' - I_{kT(S)}''}{I_{kT(S)}''} \cdot 100 \% \quad (42)$$



**Slika 3.9** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{T(v)}$  prema jednađbi sa reprezentativnim opsegom parcijalnih struja kratkog spoja blok transformatora u 47 elektrana sa transformatorom sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem – Mjesto kratkog spoja F1 na slici 3.8 [2]

$v = 1: K_{T,S} = 1; t = t_r$  (IEC 60909-0, jednađba (37))

$v = 2: K_{T,S} = 1; t = t_f$  (pogledati bilješku ispod tablice 1 od IEC 60909: 1988 )

$v = 3: * K_{T,S}$  iz jednađbe (43),  $t = t_r$

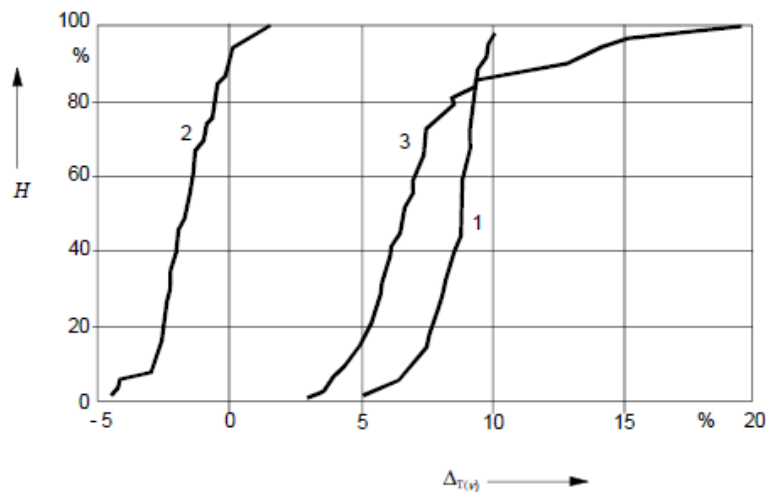
Krivulja 3 sa slike 3.9 zasnovana je na proračunima za 47 transformatora od elektrana sa reprezentativnim opsegom struja kratkog spoja  $I_{kQmax}''$  koristeći sljedeći impedancijski faktor [23] :

$$* K_{T,S} = \frac{c_{max}}{1 + x_T/x_d} \quad (43)$$

izveden iz jednadžbe (40) pod posebnim uvjetima uz  $x_T$  kao nazivna reaktancija blok transformatora sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem vezano s  $Z_{rT} = U_{rTLV}/(\sqrt{3}I_{rTLV})$ .

Rezultati sa slike 3.9 su valjani bez obzira je li pogon prije kratkog spoja u naduzbuđenom ili poduzbuđenom režimu.

U posebnim slučajevima, moguće je da generator elektrane radi samo u naduzbuđenom području tijekom svog radnog vijeka. Tada su rezultati iz slike 3.10 dobiveni koristeći iste granične uvjete kao i na slici 3.9.



**Slika 3.10** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{T(v)}$  prema jednadžbi (42), vidjeti sliku 3.9, za proračun  $I_{kT(S)}''$  ako samo naduzbuđen pogon očekivan [2]

$$v = 1: K_{T,S} = 1; t = t_r \text{ (IEC 60909-0, jednadžba (37))}$$

$$v = 2: K_{T,S} = 1; t = t_f \text{ (pogledati bilješku ispod tablice 1 od IEC 60909: 1988 [28])}$$

$$v = 3: * K_{T,S} \text{ iz jednadžbe (43), } t = t_r$$

Parcijalna struja kratkog spoja  $I''_{kF2}$  koja protječe kroz sabirnicu pomoćnog transformatora na slici 3.7, ako se kratki spoj pojavi u točki F2, izračunat će se iz IEC 60909-0, jednačba (38) :

$$I''_{kF2} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{K_{G,S}Z_G} + \frac{1}{K_{T,S}Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2}Z_{Qmin}} \right) = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{rsl}} \quad (44)$$

pri čemu je

$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x''_d \sin \varphi_{rG}} \quad (45a)$$

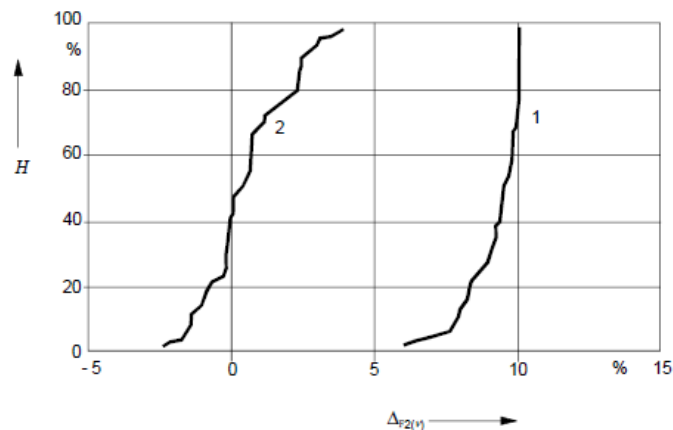
i

$$K_{T,S} = \frac{c_{max}}{1 - x_T \sin \varphi_{rG}} \quad (45b)$$

Na slici 3.11 prikazana je kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{F2(v)}$  rezultata dobivenih iz jednačbe (44) u usporedbi sa rezultatima dobivenim metodom superpozicije prema jednačbi (36b):

$$\Delta_{F2(v)} = \frac{I''_{kF2(v)} - I''_{kF2(S)}}{I''_{kF2(S)}} \cdot 100 \% \quad (46)$$

Aproksimacije krivulja  $v = 1$  i  $v = 2$  na slici 13 također vrijede ako je generator naduzbuđen prije kratkog spoja.



**Slika 3.11** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{F2(v)}$  prema jednačbi (46) za parcijalne struje kratkog spoja  $I''_{kF2(S)}$  (slika 3.7) u slučaju nad i poduzbuđenog pogona prije nastanka kratkog spoja [2]

$$v = 1: K_{O,S} = K_{T,E} = 1$$

$$v = 2: K_{O,S} \text{ i } K_{T,S} \text{ prema jednačbi (45a) i (45b), (IEC 60909-0, jednačbe (36) i (39))}$$



Izračun parcijalnih struja kratkog spoja  $I_{kF3AT}''$  na slici 3.7, provodi se pomoću  $Z_{rsl}$  iz jednadžbe (44) i imedancije pomoćnog transformatora AT ispravljenog impedancijskim korekcijskim faktorom  $K_T$  (IEC 60909-0, 3.3.3).

### 3.2.4 Korekcijski faktor elektrana bez regulacijske preklapke pod opterećenjem

#### 3.2.4.1 Korekcijski faktor $K_{SO}$

Određivanje impedancijskog korekcijskog faktora  $K_{SO}$  (IEC 60909-0, jednadžba (24)) za elektrane bez regulacijske preklapke pod opterećenjem (dodatni indeks O) slično kao na slici 3.3, drugačije je od određivanja  $K_S$  zato što je  $t$  konstantan tijekom pogona. Maksimalna vrijednost parcijalne struje kratkog spoja može se dobiti ako pogonski napon  $U_Q$  dosegne maksimum prije nastanka kratkog spoja. U tim slučajevima,  $U_{rTHV}$  je viši od  $U_{nQ}$ ; u nekim slučajevima čak i viši od  $U_{mQ}$ .

$$I_{kSO(S)}'' = \frac{E''}{t_r(X_d'' + X_{TLV})} = \frac{U_G}{\sqrt{3}t_r(X_d'' + X_{TLV})} \sqrt{1 + 2x_d'' \left(\frac{U_{rG}}{U_G} \frac{I_G}{I_{rG}}\right) \sin \varphi_{rG} + x_d''^2 \left(\frac{U_{rG}}{U_G} \frac{I_G}{I_{rG}}\right)^2} \quad (47)$$

gdje su  $U_G = U_{rG}(1 \pm p_G)$ ,  $I_G$  i  $\varphi_G$  varijable i ako transformator ima regulacijsku preklapku koja ne može raditi pod opterećenjem  $\pm p_T$  tada se uvodi  $t = t_r(1 \pm p_T)$  umjesto  $t_r$ .

Proračun sa nadomjesnim naponskim izvorima na mjestu nastanka kratkog spoja uz  $Z_{SO}$  iz IEC 60909-0, jednadžba (23)

$$I_{kSO}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}(t_r^2 Z_G + Z_{THV})K_{SO}} \quad (48)$$

uz

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (49a)$$

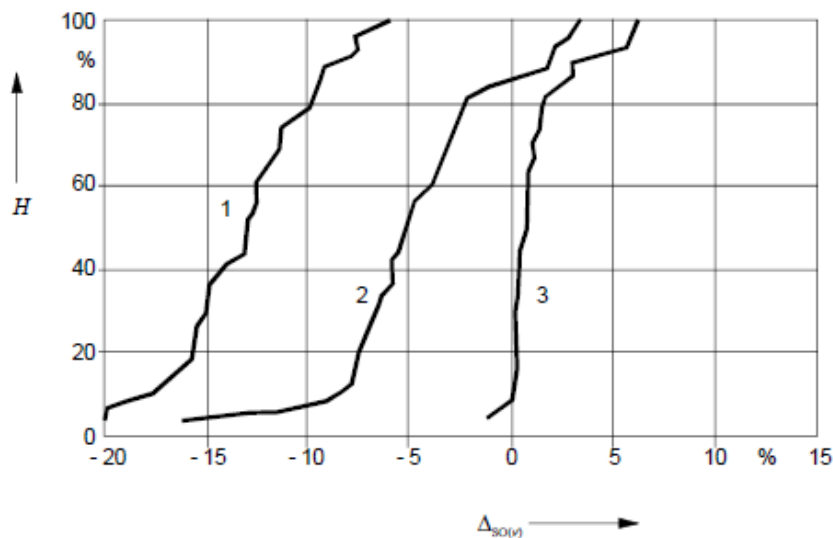
i ako transformator ima regulacijsku preklapku koja ne može raditi pod opterećenjem  $\pm p_T$ , daje korekcijski faktor prema IEC 60909-0, jednadžba (24):

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} (1 \pm p_G) \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (49b)$$

Ako se traži najveća parcijalna struja kratkog spoja, tada se koristi  $(1 - p_T)$  u jednadžbi (49b) prema IEC 60909-0, 3.7.2.

Na slici 3.12 prikazana je kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{SO}$  dobivena pojednostavljenjem jednadžbe (48) u usporedbi s rezultatima dobivenim metodom superpozicije (jednadžba (47)) za 27 elektrana bez regulacijske preklopke ili ako je preklopka već podešena

$$\Delta_{SO} = \frac{I''_{kSO(v)} - I''_{kSO(S)}}{I''_{kSO(S)}} \cdot 100 \% \quad (50)$$



**Slika 3.12** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija izračunatih iz jednadžbe (50) [2]

$v = 1$ :  $K_{SO} = 1$  (bez korekcije)

$v = 2$ :  $K_{SO} = K_S = K_{PSU}$  iz IEC 60909: 1988, jednadžba (44).

$v = 3$ :  $K_{SO}$  iz jednadžbe (49a), (IEC 60909-0, jednadžba (24) za  $t = t_r$ )

### 3.2.4.2 Korekcijski faktori $K_{G,SO}$ i $K_{T,SO}$

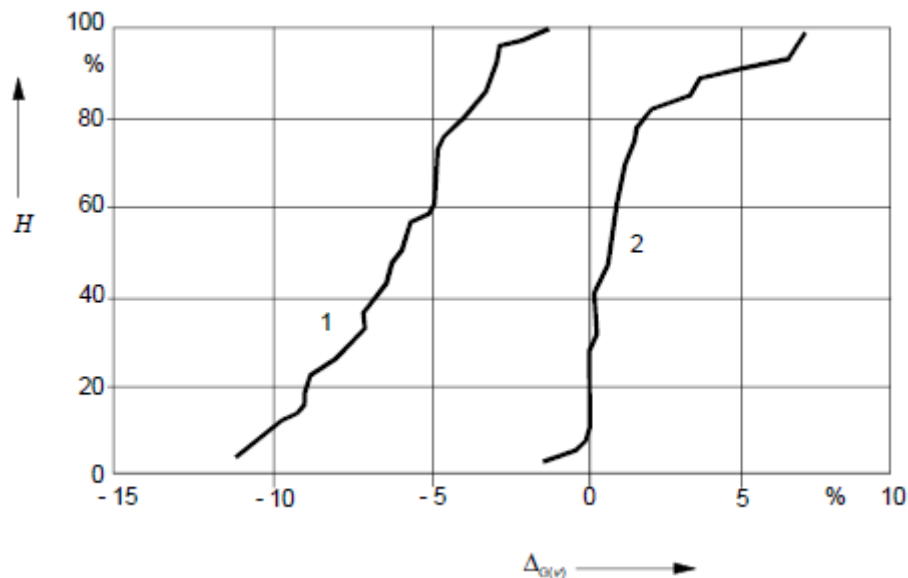
Jednadžba za izračun parcijalne struje kratkog spoja generatora elektrane bez regulacijske preklopke pod opterećenjem slijedi iz jednadžbe (34c) uzevši u obzir  $U_G = U_{rG}(1 \pm p_G)$  i  $X_d'' = x_d'' U_{rG} / (\sqrt{3} I_{rG})$ :

$$I_{kG(S)}'' = \frac{E''}{X_d''} = \frac{U_{rG}(1 \pm p_G)}{\sqrt{3}X_d''} \sqrt{1 + 2 \frac{x_d''}{1 \pm p_G} \frac{I_G}{I_{rG}} \sin \varphi_{rG} + \left( \frac{x_d''}{1 \pm p_G} \frac{I_G}{I_{rG}} \right)^2} \quad (51)$$

Proračun prema IEC 60909-0 koristi jednadžbu (40) sa  $K_{G,SO}$  uzevši u obzir promjenjivi napon na priključnicama generatora :

$$K_{G,SO} = \frac{1}{1 + p_G} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (52)$$

Slika 3.13 prikazuje kumulativnu frakvenciju  $H$  devijacija  $\Delta_{G(v)}$  izračunate jednadžbom (39) za 27 generatora od elektrana bez regulacijske preklopke pod opterećenjem.



**Slika 3.13**– Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija izračunata jednadžbom (39) za 27 generatora od elektrana bez regulacijske preklopke pod opterećenjem [2]

$v = 1$ :  $K_{G,SO} = 1$  (bez korekcije)

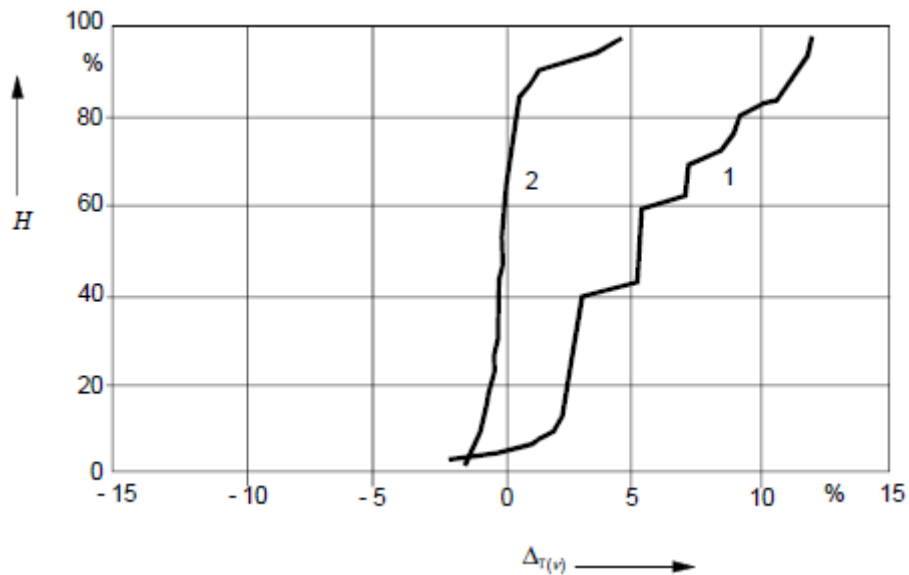
$v = 2$ :  $K_{G,SO}$  iz jednadžbe (52), (IEC 60909-0, jednadžba (41))

Jednadžba za izračun parcijalne struje kratkog spoja blok transformatora bez regulacijske preklopke pod opterećenjem slijedi iz jednadžbe (35b) uzevši u obzir  $U_G = U_{rG}(1 \pm p_G)$ ,  $X_T = x_T U_{rG} / (\sqrt{3} I_{rG})$ , gdje je  $X_T$  nazivna reaktancija transformatora na niskonaponskoj strani.

$$I_{kT(S)}'' = \frac{U_G}{\sqrt{3} \left( X_T + \frac{1}{t_r^2} X_Q \right)} \sqrt{1 - 2 \left( x_T + \frac{1}{t_r^2} x_Q \right) \frac{I_G}{(1 \pm p_G) I_{rG}} \sin \varphi_G + \left[ \left( x_T + \frac{1}{t_r^2} x_Q \right) \frac{I_G}{(1 \pm p_G) I_{rG}} \right]^2} \quad (53)$$

Ako se traži maksimalna vrijednost, potrebno je uvesti minimalnu vrijednost impedancije u točki Q. Ako transformator ima regulacijsku preklopku koja ne radi pod opterećenjem  $\pm p_T$ , tada u jednadžbu (53) treba uvesti  $t = t_r(1 \pm p_T)$  umjesto  $t_r$ . Osnovna istraživanja dana su u [17].

Proračun prema IEC 60909-0 koristi jednadžbu (41) uz  $K_{T,SO} = 1$ . Na slici 3.14 prikazana je kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{T(v)}$  (jednadžba (42)) za 27 transformatora bez regulacijske preklopke pod opterećenjem ili ako je preklopka podešena na glavnu poziciju [23].



**Slika 3.14** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija izračunatih jednadžbom (42) za 27 transformatora bez regulacijske preklopke pod opterećenjem [3]

$v = 1$ :  $K_{T,SO} = 1$  (bez korekcije), (IEC 60909-0, 4.2.1.4)

$V = 2$ : \*  $K_{T,SO}$  iz jednadžbe (54),  $t = t_r$

$$* K_{T,SO} = \frac{c_{max} U_{rTHV}}{U_{mQ}} \quad (54)$$

Uvođenjem impedancijskog korekcijskog faktora jednadžbom (54) dovest će do malo bolje aproksimacije rezultata dobivenih metodom superpozicije (vidjeti sliku 3.14, krivulja 2, uz pretpostavku  $t = t_r$ ).

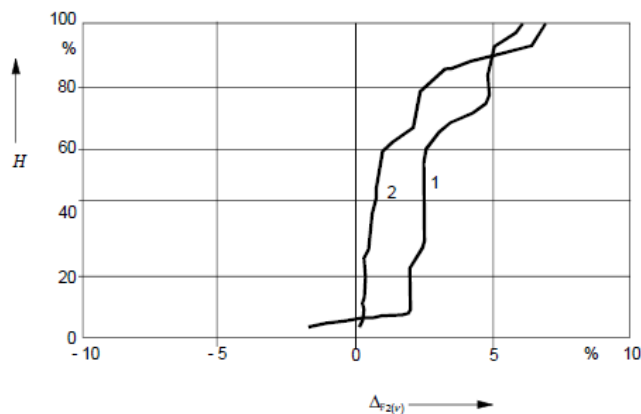
Parcijalna struj kratkog spoja  $I_{kF2}''$  koja teče kroz sabirnicu pomoćnog transformatora na slici 3.7, u slučaju nastanka kratkog spoja u točki F2, računa se pomoću IEC 60909-0, jednadžba (43) :

$$\underline{I}_{kF2(v)}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \frac{1}{K_{G,SO} Z_G} + \frac{1}{K_{T,SO} Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin}} \quad (55)$$

uz 
$$K_{G,SO} = \frac{1}{1 + p_G} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (56a)$$

i 
$$K_{T,SO} = \frac{1}{1 + p_G} \frac{c_{max}}{1 + x_T \sin \varphi_{rG}} \quad (56b)$$

Na slici 3.15 prikazana je kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{F2(v)}$  (jednadžba (46)) rezultata dobivenih jednadžbom (55) u usporedbi s rezultatima dobivenih metodom superpozicije prema jednadžbi (36b) sa  $t = t_r$ .



**Slika 3.15** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija izračunatih jednadžbom (46) za parcijalnu struju kratkog spoja  $I_{kF2}''$  (slika 3.7) elektrana bez regulacijske preklopke pod opterećenjem [4]

$v = 1$ :  $K_{G,SO} = 1$ ;  $K_{T,SO} = 1$  (bez korekcije)

$v = 2$ :  $K_{G,SO}$  i  $K_{T,SO}$  iz jednadžbe (56) (IEC 60909-0, 4.2.1.4)

### 3.2.5 Utjecaj impedancijskog korekcijskog faktora za elektrane pri proračunu struja kratkog spoja u mrežama i maksimalne struje kratkog spoja za najgori slučaj toka snage

Cilj norme IEC 60909-0 je pronaći dobru aproksimaciju za parcijalne struje kratkog spoja generatora i elektrana kao i za struje kratkog spoja na različitim mjestima u mreži.

Kao što je već pokazano na slikama 3.6 i 3.12, primjena korekcijskog faktora  $K_S$  ili  $K_{SO}$  navodi na dobru aproksimaciju parcijalnih struja kratkog spoja elektrana sa ili bez regulacijske preklopke pod opterećenjem.

Postavlja se pitanje vodi li metoda aproksimacije nadomjesnim naponskim izvorom  $cU_n/\sqrt{3}$  uz  $c = c_{max}$  (IEC 60909-0, tablica 1) i impedancijskim korekcijskim faktorom, prema 2.2.3.1 i 2.2.4.1, također do rezultata određene točnosti za struje kratkog spoja u mreži u usporedbi s rezultatima dobivenim metodom superpozicije. Kako bi dobili odgovor na to pitanje, visokonaponske mreže  $U_n \geq 100 \text{ kV}$  su uzete u razmatranje. Struje kratkog spoja izračunate su za 260 čvorova koristeći metodu superpozicije i aproksimacijsku metodu danu u IEC 60909:1988 uz impedancijski korekcijski faktor  $K_{PSU}$  prema jednadžbi (44) u IEC 60909: 1988. Taj impedancijski korekcijski faktor  $K_{PSU}$  je skoro identičan impedancijskom korekcijskom faktoru  $K_S$  danom u IEC 60909-0, jednadžba (22), ako su ispunjene sljedeće pretpostavke  $U_Q = U_{nQ}$  i  $U_G = U_{rG}$ .

Jedina je razlika u tome što se izraz  $x_d'' - x_T$  sada uzima u apsolutnoj vrijednosti kako bi se uzeli u obzir slučajevi kada je  $x_T$  znatno veći od  $x_d''$ . Mreže napona  $U_n = 380 \text{ kV}$  ( $U_m = 420 \text{ kV}$ ) su uključene u istraživanja iako ta naponska razina nije bila obuhvaćena IEC 60909:1988, zato što pripadajući nominalni naponi sustava  $U_m$  još nisu bili standardizirani (IEC 60038). Uključivanje se čini opravdanim jer u svim slučajevima vrijedi omjer  $U_m/U_n \approx 1.1$  ( $U_m/U_n = 123 \text{ kV} / 110 \text{ kV} \approx 1.12$ ;  $U_m/U_n = 245 \text{ kV} / 220 \text{ kV} \approx 1.11$ ;

$U_m/U_n = 420 \text{ kV} / 380 \text{ kV} \approx 1.05$ ) (vidjeti IEC 60909-0, fusnote u tablici 1).

Razmatrane su visokonaponske mreže napona  $U_n \geq 110 \text{ kV}$  sa 260 čvorova kako bi se pronašle egzaktna vrijednosti  $I_{k(S)}''$  metodom superpozicije i nakon toga pronašle približne vrijednosti  $I_{kIEC}''$  koristeći nadomjesni naponski izvor uz  $c = c_{max} = 1.1$  (IEC 60909-0, tablica 1) i impedancijski korekcijski faktori  $K_{PSU}$  prema jednadžbi (44) IEC 60909: 1988. Rezultati

suprikazani krivuljom 1 na slici 3.16 kao kumulativna frekvencija devijacija  $\Delta$  uz vrijednost medijana oko +4 % na konzervativnoj strani. Odstupanja između  $H = 10\%$  i  $H = 90\%$  su relativno mala (slika 3.16, lijeva strana).

Tok snage korišten za pronalazak  $I''_{k(s)}$  metodom superpozicije je specifičan tok snage za mrežu, teško opterećenu tijekom zime. Kao što je već navedeno u 2.1.2, ovaj poseban tok snage ne može dovesti do maksimalnih mogućih struja kratkog spoja u svakome čvoru mreže. Kako bi pronašli u kojem opsegu maksimalne moguće struje kratkog spoja  $I''_{kMAX}$ , izračunate za najgori slučaj toka snage, mogu premašiti struje kratkog spoja prikazane na krivulji 1, slika 3.16 (lijeva strana), razvijena je posebna metoda optimizacije uz pomoć linearnog programiranja. Rezultati su prikazani kao  $I''_{kMAX}$ . Varijable, ili granični uvjeti, u ovoj proceduri optimizacije su dopušteni naponi (naponi između  $U_n$  i  $1.1U_n \approx U_m$ ), varijacije prijenosnog omjera transformatora sa regulacijskim preklopkama pod opterećenjem, ovisnost napona kratkog spoja ili reaktancija transformatora od pozicije regulacijske preklopke  $x_T = f(s)$ , poduzbuđen režim generatora i mogući opseg snage na mjestima spoja generatora ili elektrana i opterećenja.

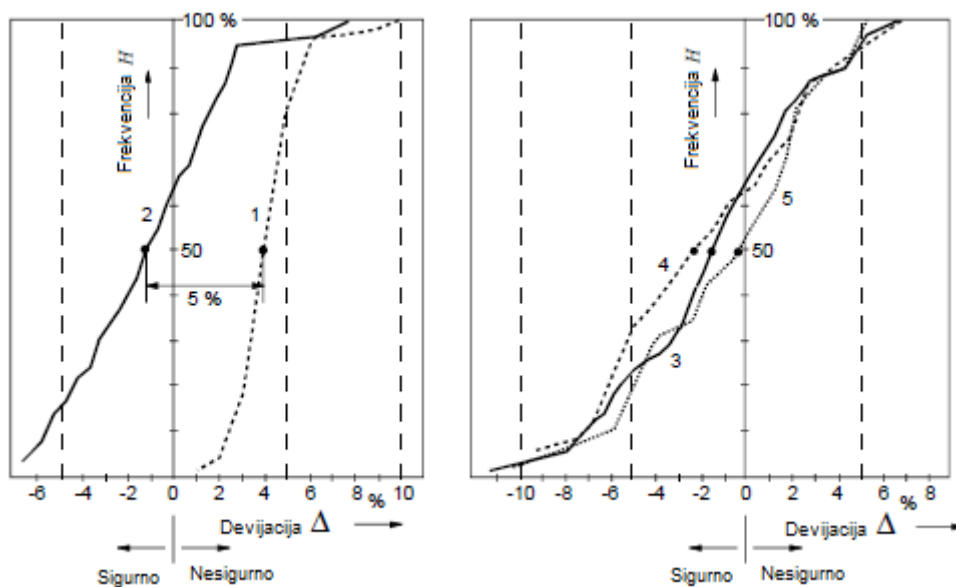
Rezultati su dani na slici 3.16 kao kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta$ , povezani sa maksimalnom mogućom strujom kratkog spoja  $I''_{kMAX}$  u najgorem slučaju toka snage za svaki čvor u mreži.

Iz slike 3.16 moguće je izvesti sljedeće zaključke.

- Vrijednost medijana (50 % vrijednosti) krivulje kumulativnih frekvencija devijacija početnih struja kratkog spoja  $I''_{kIEC}$  u vezi sa  $I''_{kMAX}$ , prikazano krivuljom 2 na slici 3.16, je oko 5 % viša nego u rezultata dobivenim metodom superpozicije (krivulja 1 na slici 3.16) koristeći konstantne reaktancije transformatora:  $u_k = u_{kr} = \text{konstantno}$ , neovisno o položaju regulacijske preklopke.
- Postoje samo male razlike između vrijednosti medijana krivulja 2 i 3 na slici 3.16. Krivulja 3 uzima u obzir promjenu napona kratkog spoja transformatora sa regulacijskom preklopkom ovisno o položaju regulacijske preklopke.
- Ograničenje područja poduzbudnog pogona generatora smanjuje najviše moguće struje kratkog spoja, što se može vidjeti pomicanjem od krivulje 4 do 5 na slici 3.16.

Istraživanja provedena u 2.2.2 sve do 2.2.4 i rezultati sa slike 3.16 pokazuju da uvođenje impedancijskog korekcijskog faktora za generatore i elektrane pri proračunu struja kratkog spoja uz nadomjesni naponski izvor daju zadovoljavajuće rezultate. Nezadovoljavaju jedino negativne devijacije sa slike 3.16.

U 3.3 biti će prikazano da je za reviziju IEC 60909 (IEC 60909-0) neophodno uvesti impedancijski korekcijski faktor za mrežne transformatore. Visoke negativne devijacije s desne strane na slici 3.16 povezane su s rezultatima na mjestima nastanka kratkog spoja na niskonaponskoj strani transformatora ako je kratki spoj napajan samo preko transformatora (vidjeti sliku 3.17).



**Slika 3.16** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta$ [4]

Krivulja 1: 
$$\Delta = \frac{I_{kIEC(v)}'' - I_{k(S)}''}{I_{k(S)}''} \cdot 100 \%$$

Krivulja 2 ...5 
$$\Delta = \frac{I_{kIEC(v)}'' - I_{k(S)}''}{I_{k(S)}''} \cdot 100 \%$$

$I_{kIEC}''$  Početna simetrična struja kratkog spoja uz  $c_{max} = 1.1$  i  $K_{PSU}$  iz jednadžbe (44) IEC 60609: 1988



$I''_{k(s)}$  Početna struja kratkog spoja dobivena metodom superpozicije za uvjet jednog velikog opterećenja prije nastanka kratkog spoja (vidjeti tekst)

$I''_{kMAX}$  Početna simetrična struja kratkog spoja za najgori slučaj toka snage, prije kratkog spoja za sve točke mreže

Krivulja 2: Proračun  $I''_{kMAX}$  uz  $u_k = u_{kr} = \text{konstantno}$

Krivulja 3: Proračun  $I''_{kMAX}$  uz  $u_k = f(s)$

Krivulja 4: Proračun  $I''_{kMAX}$  za specijalnu malu grupu čvorova uz  $u_k = f(s)$

Krivulja 5: Proračun  $I''_{kMAX}$  na isti način kao i za krivulju 4, ali uz ograničena područja poduzbudnog pogona

### **3.3 Impedancijski korekcijski faktor $K_T$ pri proračunu impedancija kratkog spoja mrežnih transformatora**

#### **3.3.1 Općenito**

IEC 60909:1988 daje općenite informacije u 8.3.2.2, ali samo kao bilješku, o obradi mrežnih transformatora koji su često opremljeni regulacijskim preklopkama pod opterećenjem.

U toj bilješci stoji da je dovoljno za mrežne transformatore sa regulacijskom preklopkom odrediti  $Z_T$  u suglasnosti sa formulom (6) [IEC 60909-0, jednažba (7)] za glavni položaj i pretvoriti impedancije, struje i napone prema točkama u 8.4 koristeći nazivni prijenosni omjer transformatora  $t_r$  tako da odgovara glavnom položaju regulacijske preklopke.

Također specificira da su posebna razmatranja potrebna samo u sljedećim slučajevima:

- Struja kratkog spoja ima isti smjer kao i pogonska struja prije nastanka kratkog spoja (kratki spoj na niskonaponskoj strani transformatora ili paralelan rad transformatora sa regulacijskom preklopkom prema slici 3.1, ili slici 3.4 b);

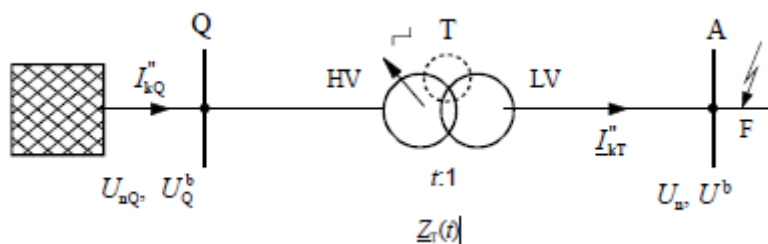
- Ako je moguće u velikom opsegu promijeniti prijenosni omjer transformatora sa regulacijskom preklopkom,  $U_{THV} = U_{rTHV}(1 \pm p_T)$  uz  $p_T > 0.05$ ;
- Ako je minimalan napon kratkog spoja  $u_{k\ min}$  značajno niži od nazivnog napona kratkog spoja u glavnoj poziciji ( $u_{k\ min} < u_{kr}$ );
- Ako je napon tijekom normalnog pogona znatno viši od nominalnog sistemskog napona ( $U \geq 1.05 U_n$ ).

Ova bilješka nije relevantna ni za standardiziranu proceduru danu u IEC 60909:1988, niti je pripomogla korisniku standarda zato što je najmanje jedan od uvjeta danih u bilješci često zadovoljen. Kako bi se poboljšala nezadovoljavajuća situacija, provedeno je statističko istraživanje na osnovi podataka prikupljenih od približno 150 mrežnih transformatora sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem.

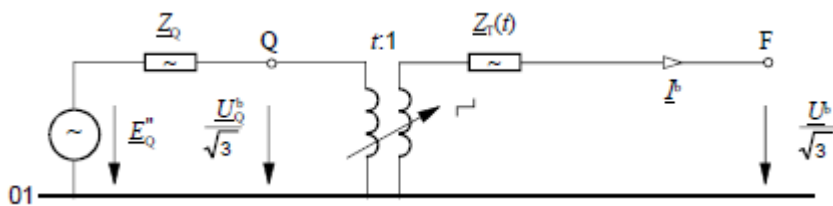
To istraživanje imalo je kao cilj poboljšati standardnu proceduru sa nadomjesnim naponskim izvorom na mjestu nastanka kratkog spoja uvođenjem impedancijskog korekcijskog faktora za mrežne transformatore, uzimajući u obzir sigurnost i ekonomičnost .

Na slici 3.17 opisana je konfiguracij proračuna početne simetrične struje kratkog spoja  $I''_{kT(S)}$  metodom superpozicije (S).

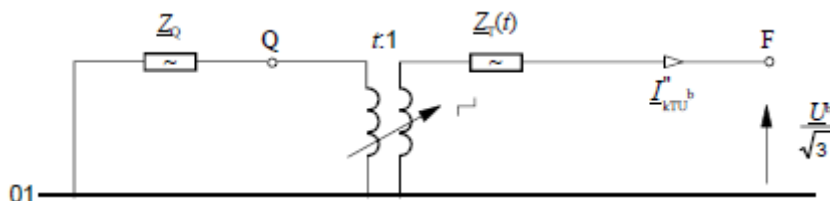
Kako bi se objasnio modeliranje mrežnih transformatora i ovisnost veličine struje kratkog spoja i napona, toka snage prije kratkog spoja, napon kratkog spoja  $u_k(t)$  i prividna snaga u kratkom spoju  $S''_{kQ} = \sqrt{3}U_{nQ}I''_{kQ}$  ili struja kratkog spoja nadomjesne mreže  $I''_{kQ}$ , primjer je dan u 2.3.2 za 300 MVA transformator sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem na visokonaponskoj strani transformatora.



**Slika 3.17 a** – Shema sustava, jednostrano napajani kratki spoj [4]



Slika 3.17 b - Struja  $\underline{I}^b$  i napon  $\underline{U}^b/\sqrt{3}$  prije nastanka kratkog spoja [4]



Slika 3.17 c – Uvođenje napona prije kratkog spoja  $\underline{U}^b/\sqrt{3}$  suprotnog smjera na mjestu nastanka kvara [4]

Slika 3.17 – Proračun  $\underline{I}_{kT(S)}'' = \underline{I}^b + \underline{I}_{kTU^b}''$  metodom superpozicije

Statistička procjena za 150 mrežnih transformatora dana je u 2.3.3 za konfiguraciju jednostrano napajanog kratkog spoja na niskonaponskoj strani (slika 3.17). Ta konfiguracija je korištena za razvoj impedancijskog korekcijskog faktora  $K_T$ .

### 3.3.2 Primjer za mrežni transformator $S_{rT} = 300MVA$

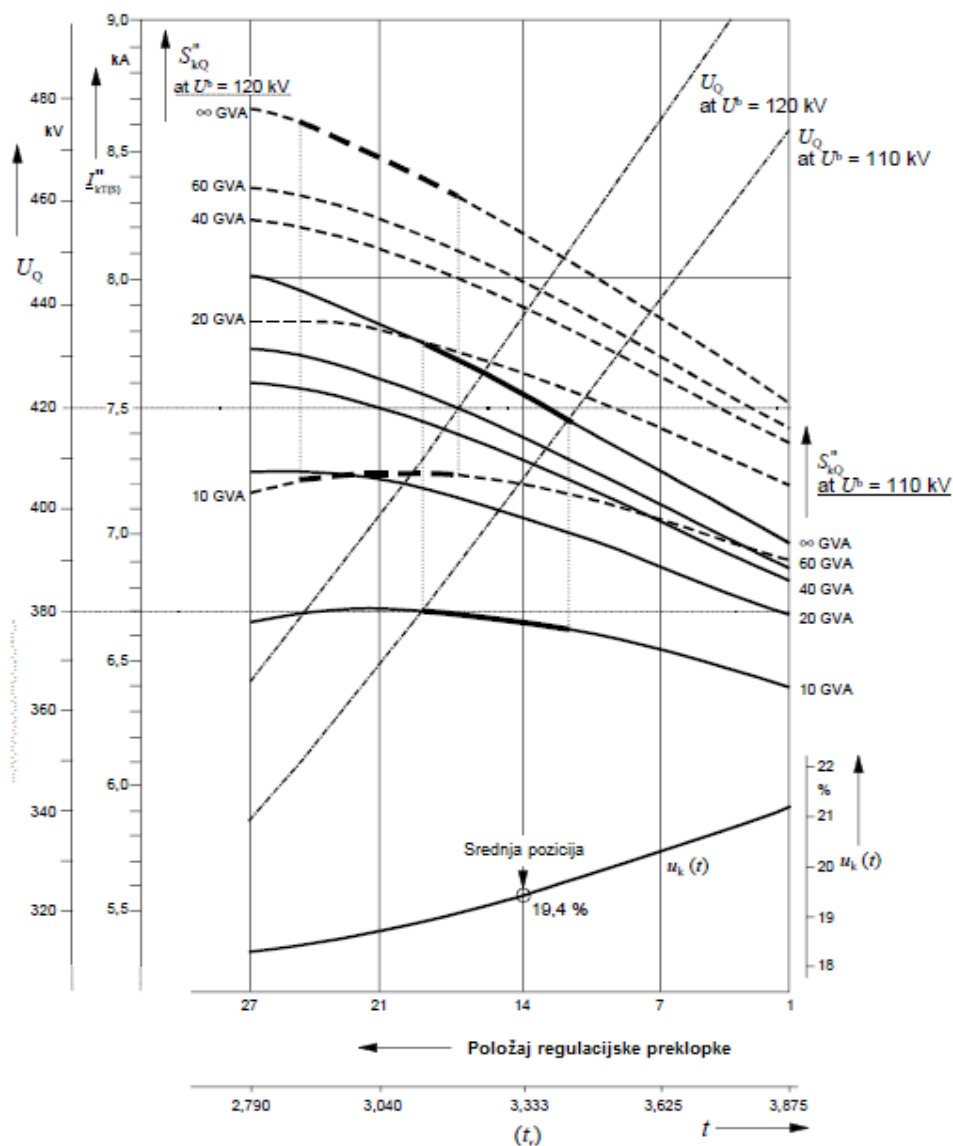
Za ovaj primjer zadani su sljedeći uvjeti:

$S_{rT} = 300 MVA$ ;  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 400 kV/120 kV$ ;  $p_T = \pm 16.25 \%$  uz 13 preklopnih pozicija (27 preklopnih pozicija);  $u_{kr} = 19.4 \%$ ;  $u_{k+} = 21.1 \%$  (preklopna pozicija 1);  $u_{k-} = 18.2 \%$  (preklopna pozicija 27).

Iz slike 3.17, za proračun struje  $\underline{I}_{kT(S)}''$  metodom superpozicije, može se izvesti sljedeća jednadžba:

$$\underline{I}_{kT(S)}'' = \underline{I}^b + \underline{I}_{kTU^b}'' = I^b \cos \varphi^b - j \left( I^b \sin \varphi^b + \frac{U^b}{\sqrt{3}(X_{T(t)} + X_{Qt})} \right) \quad (57)$$

Otpori  $R_T$  i  $R_{Qt}$  su mali u usporedbi s reaktancijama pa mogu biti zanemareni.



Slika 3.18 – Struje kratkog spoja  $I''_{kT(S)}$  ovisno o  $t$ ,  $U^b$  i  $S''_{kQ}$  za mrežni transformator  $S_{rT} = 300$  MVA (vidjeti tekst za podatke)[4]

Bilješka (podebljane crte za dopuštene granice  $U_Q = 380$  kV ... 420 kV izračunate su pomoću jednadžbe (58)).

$$U_Q^b = tU^b \sqrt{1 + 2x_{T(t)} \frac{U_{rTLV}}{U^b} \frac{I^b}{I_{rTLV}} \sin \varphi^b + \left( x_{T(t)} \frac{U_{rTLV}}{U^b} \frac{I^b}{I_{rTLV}} \right)^2} \quad (58)$$

$t$  je prijenosni omjer ( $t \neq t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$ ), a  $x_{T(t)}$  je relativna vrijednost reaktancije kratkog spoja uz  $x_{T(t)} = X_{T(t)}/Z_{rT}$  i  $Z_{rT} = U_{rTLV}/(\sqrt{3}I_{rTLV})$ , ovisno o prijenosnom omjeru  $t$ .

Na slici 3.18 prikazane su struje kratkog spoja dobivene jednadžbom (57). Snaga kratkog spoja na mjestu spoja Q mijenja se između 10 GVA i  $\infty$  GVA za napone  $U^b = 110 \text{ kV}$  i  $U^b = 120 \text{ kV}$  ( $U_{max}^b \leq U_m = 123 \text{ kV}$ , IEC 60038). Rezultati sa slike 20 dobiveni su pod uvjetima  $I^b = I_{rTLV}$  i  $\cos \varphi^b = 0.9$ . Opseg struja kratkog spoja 6.7 kA i 8.6 kA, koje se mogu pojaviti na slici 20, ovisi o graničnim uvjetima.

Koristeći metodu s nadomjesnim naponskim izvorom na mjestu kratkog spoja i uvođenjem impedancijskog korekcijskog faktora  $K_T$  vodi do jednadžbe (59):

$$I_{kT}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_T K_T + Z_{Qr}|} \approx \frac{cU_n}{\sqrt{3}|X_T K_T + X_{Qt}|} \quad (59)$$

uz

$$X_T = X_{TLV} = \frac{u_{Xr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} \quad (60)$$

i

$$X_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \quad (61)$$

Kako bi se pronašao prikladan izraz za  $K_T$ , od pomoći je usporediti imaginarni dio  $\underline{I}_{kT(S)}''$  sa  $I_{kT}''$  iz jednadžbe (59). Uz  $c = c_{max}$  za maksimalnu struju kratkog spoja, dobije se sljedeći izraz za konzervativnu stranu [19]:

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{X_{T(t)}}{X_T} \cdot \frac{c_{max}}{1 + \frac{I^b}{U^b/\sqrt{3}} X_{T(t)} \sin \varphi^b} \quad (62)$$

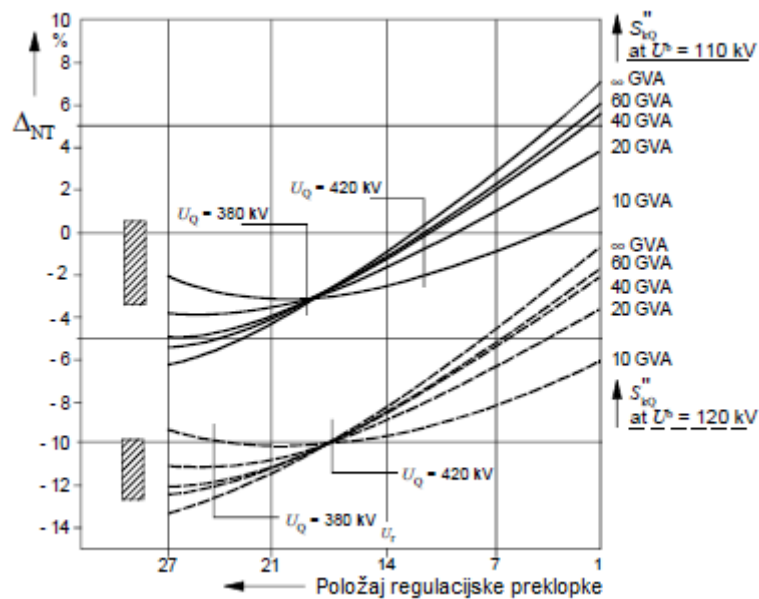
Iz podataka prikupljenih od 150 mrežnih transformatora [19] kvocijent  $X_T(t)/X_T \approx 0.92 \dots 1.12$  i kvocijent  $U_{rTLV}/U_n = 1.0 \dots 1.125$  dobije se prosječna vrijednost 1.075. Ta istraživanja dovela su do sljedećih pojednostavljenja jednadžbe (62), napisana u obliku danom u IEC 60909-0, jednadžba (12b):

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_T(I_T^b/I_{rT}) \sin \phi_T^b} \quad (63)$$

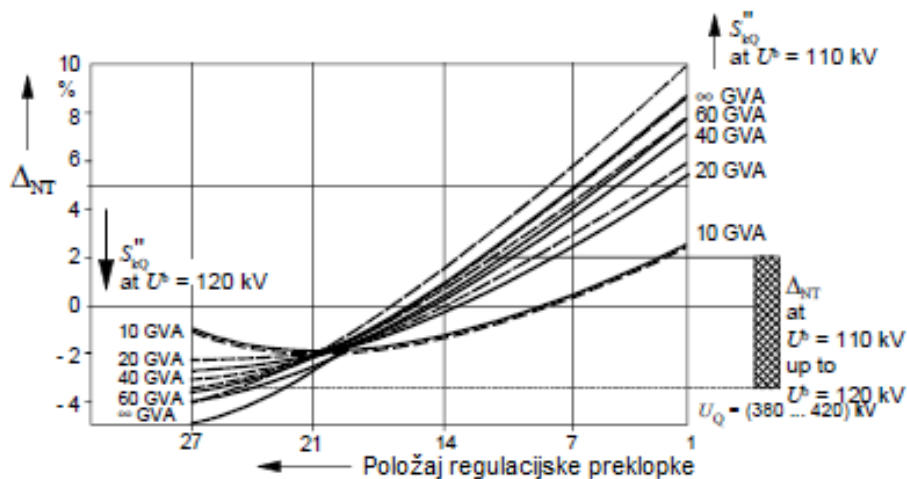
uz  $x_T = X_T/Z_{rT}$  pri čemu je  $Z_{rT} = U_{rTLV}/(\sqrt{3}I_{rTLV})$  i  $U^b$  kao najviši pogonski napon prije kratkog spoja i  $I_T^b$  kao najveća struja transformatora prije kratkog spoja ovisno o konfiguraciji mreže i relevantnoj pouzdanosti. Jednadžba (63) je identična IEC 60909-0 jednadžbi (12b). Faktor  $c_{max}$  je povezan s nominalnom vrijednosti napona mreže spojene na niskonaponsku stranu mrežnog transformatora.

Na slici 3.19 a prikazane su devijacije  $\Delta_{NT}$  dobivene pomoću  $I_{kT}''$  iz jednadžbe (59) i  $K_T = 1$  i pomoću  $I_{kT(S)}''$  iz jednadžbe (57).

$$\Delta_{NT} = \frac{I_{kT}'' - I_{kT(S)}''}{I_{kT(S)}''} 100 \% \quad (64)$$



Slika 3.19 a – Korekcijski faktor  $K_T = 1$  [4]



Slika 3.19 b – Korekcijski faktor iz jednađbe (63) uz  $I_T^b/I_{rT} = 1$  i  $\cos \varphi^b = 0.8$  [4]

Slika 3.19 – Devijacije  $\Delta_{NT}$  izrađunate jednađbom (64) za transformator  $S_{rT} = 300$  MVA

Na slici 3.19 a, pri čemu je  $K_T = 1$ , vidljivo je da napon  $U^b$  ima bitan utjecaj i može dovesti do rezultata nekonzervativne strane izvan donje granice od  $-5\%$ , ako je napon  $U^b$  viši od napona  $U_n = 110$  kV.

Na slici 21b prikazane su devijacije nakon uvođenja  $K_T$  pomoću jednađbe (63). Devijacije nisu male ako je napon na visokonaponskoj strani transformatora u opsegu od 380 kV ... 420 kV.

### 3.3.3 Statističko ispitivanje 150 mrežnih transformatora

Statističko ispitivanje je provedeno za 150 mrežnih transformatora sa regulacijskom prelopkom pod opterećenjem. Podaci su prikupljeni od javnih službi i industrijskih postrojenja. Nominalni naponi na visokonaponskoj strani transformatora su između 20 kV i 380 kV, nazivna prividna snaga između 10 MVA i 600 MVA. Dobiveni su sljedeći podaci i omjeri:

$$U_{rTHV}/U_{nQ} = 0.91 \dots 0.987 \dots 1.105$$

$$U_{rTLV}/U_n = 1.0 \dots 1.075 \dots 1.125$$

$$u_{kr} = 7.2 \dots 19.0 \% \text{ [IEC 60909-2: } u_{kr} = 7 \% \dots 12 \% \dots 15 \% \text{]}$$

u slučaju  $S_{rT} = 10$  MVA ... 40 MVA]

Mrežni transformatori u UK imaju ekstremno visoke vrijednosti  $u_{kr}$ , do 32 %; u takvim slučajevima drugi dio jednadžbe (63) je od posebnog interesa.

U tablici 3.2 prikazani su granični uvjeti I i II za statističku procjenu.

**Tablica 3.2** – Naponi i struje prije nastanka kratkog spoja na niskonaponskoj strani mrežnog transformatora

Granični uvjeti	$\frac{U^b}{U_n}$	$\frac{U_Q^b}{U_{sQ}}$	$\frac{I_T^b}{I_{rT}}$	$\cos \varphi^b$
I	0,95 ... 1,05	0,95 ... 1,05	0 ... 0,6	1 ... 0,8
II	0,95 ... 1,1	1,0 ... 1,1	(1,0) <sup>a</sup>	1 ... 0,8
<sup>a</sup> Slučaj s jednim transformatorom: $I_T^b / I_{rT} = 0 \dots 1,0$ Slučaj s dva paralelna transformatora: $I_T^b / I_{rT} = 0 \dots 0,6$				

$S_{kQ}'' = \sqrt{3}U_{nQ}I_{kQ}''$ , u točki Q, varira u sljedećem opsegu:

**Tablica 3.3** - Snaga kratkog spoja

$U_{sQ}$	kV	20	110	220	380
$S_{kQ}''$	GVA	0,25 ... 1,25	1,0 ... 7,5	4,0 ... 30	7,0 ... 50

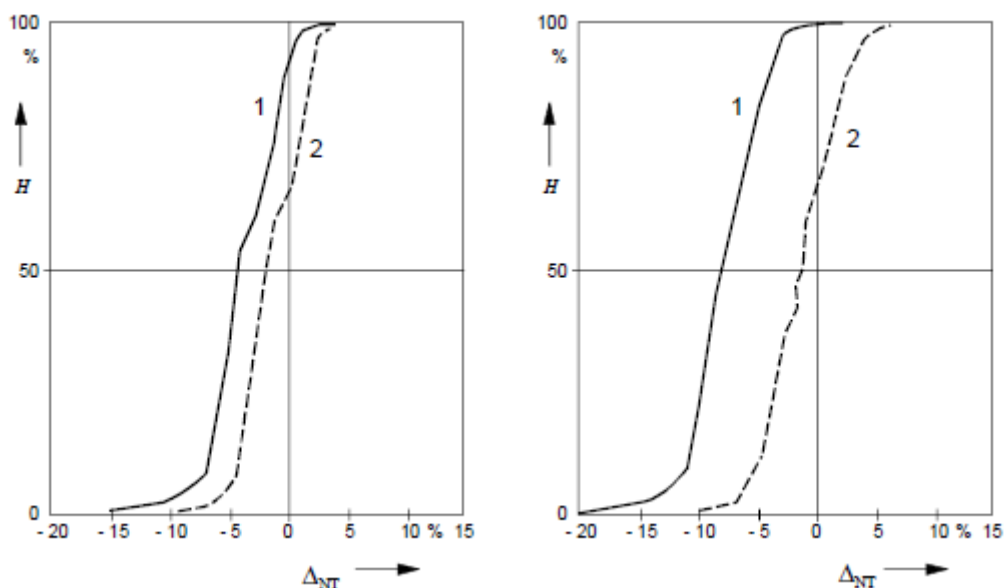
Rezultati su dani kao krivulje kumulativnih frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{NT}$  izračunatih jednadžbom (64) i koristeći maksimalne vrijednosti  $I_{kT(S)}''$  dobivene metodom superpozicije i  $I_{kT}''$  dobivene jednadžbom (59) uz  $K_T = 1$  ili  $K_T$  iz jednadžbe (63) uz  $I_T^b / I_{rT} = 1$ .

Razlika između slika 3.19 a i 3.19 b je uglavnom povezana s većim omjerom  $U^b / U_{rTLV}$  na niskonaponskoj strani transformatora prije nastanka kratkog spoja. Zbog toga što su pogonski uvjeti I u tablici 1 istiniti za većinu praktičnih slučajeva, korekcijski faktor  $K_T$  iz jednažbe (63), jednak IEC 60909-0, jednadžba (12b), trebao bi dati zadovoljavajuće rezultate.

Ako su pogonski uvjeti  $U^b, I^b, i \cos \varphi^b$  nepoznati, u fazi planiranja na primjer, sljedeći izraz za  $K_T$  može dati zadovoljavajuće rezultate :



$$K_T = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_T} \quad (65)$$



**Slika 3.20 a** – Pogonski uvjeti I (tablica 3.2)      **Slika 3.20 b** – Pogonski uvjeti II (tablica 3.2)

**Slika 3.20** – Kumulativna frekvencija  $H$  devijacija  $\Delta_{NT}$  izračunatih jednadžbom (64)

1:  $K_T = 1.0$ ; 2:  $K_T$  prema jednadžbi (63) uz  $I_T^b/I_{rT} = 1$  [4]

Korekcijski faktor iz jednadžbe (65), dan u IEC 60909-0, jednadžba (12a), koristit će se za mrežne transformatore sa regulacijskom preklopkom pod opterećenjem kao i mrežni transformatori sa konstantnim prijenosnim omjerom, primjer za slučaj niskonaponskih transformatora  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 20 \text{ kV}/0.41 \text{ kV}$  ili  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 20 \text{ kV}/0.42 \text{ kV}$  koji napajaju niskonaponske mreže  $U_n = 400 \text{ V}$ . Faktor  $c_{max}$  je u svakom slučaju povezan s nominalnim naponom mreže spojene na niskonaponsku stranu mrežnog transformatora.

### 3.3.4 Impedancijski korekcijski faktor za mrežne transformatore u mreži

Impedancijski korekcijski faktor za mrežne transformatore, pri proračunu struja kratkog spoja sa nadomjesnim naponskim izvorom na mjestu kratkog spoja, omogućiti će reduciranje negativnih devijacija izračunatih u usporedbi sa  $I''_{kMAX}$ , bez porasta struje kratkog spoja u cijeloj mreži .

Statistička procjena ispituje samo mrežne transformatore . Blok transformatori obrađeni su zajedno sa elektranama (vidjeti 2.2). Statistički proračun utjecaja  $K_T$  u mrežama, izveden je s impedancijskim korekcijskim faktorima  $K_T$ , koji se već pokazao zadovoljavajućim tijekom proračuna za jednostrano napajan kratki spoj na niskonaponskoj strani mrežnih transformatora [19]. Rezultati dobiveni koristeći  $K_T$ , prema jednadžbi (63) uz  $\cos \varphi^b = 0.8$  ( $\sin \varphi^b = 0.6$ ),  $I_T^b/I_{rT} = 1$  i  $U_n/U^b = 0.95$  (pogonski uvjeti I u tablici 1:  $U_n/U^b = 0.95 \dots 1.05$ ) pripojeni su rezultatima na slici 3.20 a (vidjeti jednadžbu (65)).

Za statističku procjenu utjecaja  $K_T$  u mrežama, koristi se istih šest visokonaponskih mreža napona  $U_n = 110 \text{ kV}, 220 \text{ kV}$  i  $380 \text{ kV}$  koje su se koristile za procjenu impedancijskih korekcijskih faktora elektrana (vidjeti 2.2.5).

U tablici 3.4 prikazane su karakteristične vrijednosti kumulativne frekvencije  $H$  devijacija  $\Delta$  prema jednadžbi (66) :

$$\Delta = \frac{I_{kIEC}'' - I_{kMAX}''}{I_{kMAX}''} \cdot 100 \% \quad (66)$$

pri čemu je  $I_{kIEC}''$  izračunat sa  $c = c_{max}$  i  $K_S$  (jednadžba (31)) ili  $K_{SO}$  (jednadžba (49)) za elektrane i  $K_T$  iz jednadžbe (65) ili jednadžbe (63) uz  $U_n/U^b = 0.95$  i  $(I_T^b/I_{rT}) \cdot \sin \varphi^b = 0.6$ . Struja  $I_{kMAX}''$  određena je procesom optimizacije kao maksimalna struja kratkog spoja slijedeći najgori slučaj toka snage u svakom čvorištu mreže.

U usporedbi s rezultatima danim u 2.2.5, posebno na desnoj strani na slici 3.16, rezultati dani u tablici 3.4 dovode do sličnih krivulja kumulativnih frekvencija  $H = f(\Delta)$ . Smanjena je samo donja granica devijacije. To rezultira time da impedancijski korekcijski faktor  $K_T$  dan u jednadžbi (65) ne pomiče struje kratkog spoja u cijelosti na konzervativnu stranu, ali djeluje u onim slučajevima gdje je kratki spoj napajan samo kroz transformatore, to znači u slučajevima obrađenim u 2.5.3.

Mora se uzeti u obzir da su nepovoljni slučajevi određeni zadanim graničnim uvjetima i da će se ti nepovoljni uvjeti rijetko dogoditi. Rezultati u 2.2.5, posebice na lijevoj strani slike 3.16, pokazali su da rezultati devijacija  $\Delta$ , izračunatih sa  $I_{kMAX}''$ , pomaknuti za približno 5 % u lijevo

u usporedbi s rezultatima dobivenim metodom superpozicije u slučaju teško opterećene mreže tijekom zime. Uzevši u obzir rezultate iz 2.2.5, približno 5 % bi se trebalo dodati vrijednostima danima u stupcima 3, 4 i 5 u tablici 3.2. Vrijednosti medijana u tablici 3.4 (stupac 5) tada su između + 0.7 % i + 4.3 %.

S gledišta sigurnosti i ekonomičnosti ova razmatranja dovela su do uvođenja korekcijskog faktora  $K_T$  za mrežne transformatore prema jednadžbi (65) ili jednadžbi (63) ako su pogonski uvjeti iskustveno poznati.

**Tablica 3.4** – Rezultati proračuna u visokonaponskim mrežama uz impedancijske korekcijske faktore za elektrane i uz  $K_T$  prema jednadžbi (65) za devijacije  $\Delta$  iz jednadžbe (66) [4]

1	2	3	4	5	6	7
Grupa čvorišta	Broj čvorova	Donja granica devijacije $\Delta$ %	Gornja granica devijacije $\Delta$ %	Vrijednost medijana $\Delta_{50}$ %	Dio sa $\Delta < -5\%$ %	Dio sa $ \Delta  < 5\%$ %
I	63	-9,5	+7,0	-1,3	20,6	73,0
II	146	-9,5	+7,0	-1,0	17,1	76,7
III	36	-9,5	+5,0	-4,3	52,8	47,2
IV	21	-9,5	+4,0	-3,7	47,6	52,4
V	21	-8,0	+7,0	-0,7	19,0	61,9
I Osnovna verzija visokonaponskih mreža II Sve verzije visokonaponskih mreža III Čvorišta kod priključnica transformatora IV Opseg napona u čvorištima +10 % V Manji opseg napona kao u slučaju IV						

## 4. ZADATAK

### Primjer proračuna početne struje trofaznog i jednofaznog kratkog spoja na mjestu priključenja elektrane na mrežu

Prema zadanoj shemi i podacima elemenata sustava potrebno je izračunati početnu struju za jednofazni i trofazni kratki spoj na mjestu kvara na tri načina :

- Ručno uz upotrebu korekcijskih faktora
- Ručno bez upotrebe korekcijskih faktora
- Simulacijski u EasyPoweru koristeći metodu IEC



**Slika 4.1:** Nadomjesna shema zadatka

Podaci elemenata sustava :

- Generator G :  
 $S_{rG} = 200 \text{ MVA}$  ;  $U_{rG} = 13.8 \text{ kV}$  ;  $x''_d = 14 \%$  ;  $x_d = 160 \%$  ;  $x_i = 10 \%$  ;  $\cos\varphi_{nG} = 0.85$  ;  
 $R_G = 0.015 \Omega$
- Transformator T :  
 $S_{rT} = 100 \text{ MVA}$  ;  $t_r = U_{NNrT} / U_{VNrT} = 13.8 \text{ kV} / 115 \text{ kV}$  ; Ynd 5 ;  $u_{Rr} = 0,5 \%$  ;  
 $X_{T(0)} / X_{T(1)} = 0,85$  ;  $R_{T(0)} / R_{T(1)} = 1$  ;  $u_{Kr} = 10 \%$
- Mrežno napajanje Q :  
 $U_{nQ} = 110 \text{ kV}$  ;  $c_{Qmax} = 1.1$  ;  $S''_{k3Q} = 2000 \text{ MVA}$  ;  $R_{Q(1)} / X_{Q(1)} = 0,25$  ;  $X_{Q(0)} / X_{Q(1)} = 3$  ;  
 $R_{Q(0)} / R_{Q(1)} = 3$

- Dalekovodi  $L1 = L2$  :

$$U_{nL} = 110 \text{ kV} ; l = 45 \text{ km} ; R_1 = 0.12 \text{ } \Omega / \text{ km} ; L_1 = 1,2 \text{ mH} / \text{ km} ; R_{01} / R_1 = 1,3 ; X_{01} / X_1 = 2,8$$

### a) Ručno uz upotrebu korekcijskih faktora

#### Izračun impedancija elemenata sustava:

S obzirom da se radi o simetričnom i nesimetričnom kratkom spoju, potrebno je izračunati direktnu, inverznu i nultu impedanciju svih elemenata. Kako u danom zadatku generator nije uzemljen, u nultom sustavu nema njegovog doprinosa. Radi se o turbogeneratoru za koji vrijedi da su mu direktna i inverzna reaktancija jednake ( $X''_1 = X''_2$ ) ukoliko nije drugačije zadano. Kod dvonamotnog transformatora direktna i inverzna impedancija su jednake ( $\bar{Z}_{T(1)} = \bar{Z}_{T(2)}$ ). U daljnjem postupku proračuna impedancije generatora i blok-transformatora moramo uzeti u obzir napon mjesta kvara, te ih korigirati. Za određivanje korigirane direktne (inverzne) impedancije blok-spoja  $\bar{Z}_{SK(1)}$  prvo je potrebno izračunati komponente impedancija generatora  $\bar{Z}_{g(1)}$  i transformatora  $\bar{Z}_{TVN(1)}$  prema izrazima teorijskog dijela (7)(8)(9).

#### Generator:

$$\bar{Z}_{g(1)} = R_d + jX_d = R_g + j \frac{X_d}{100} \cdot \frac{U^2_{rG}}{S_{rG}} = 0,0015 + j \frac{14 \cdot 13800^2}{100 \cdot 200 \cdot 10^6} = 0,015 + j0,1333 \text{ } \Omega$$

$$\bar{Z}_{g(2)} = R_d + jX_d = R_g + j \frac{X_i}{100} \cdot \frac{U^2_{rG}}{S_{rG}} = 0,0015 + j \frac{10 \cdot 13800^2}{100 \cdot 200 \cdot 10^6} = 0,015 + j0,0952 \text{ } \Omega$$

#### Transformator:

$$U_{xr} = \sqrt{(u^2_{kr} - u^2_{Rr})} = \sqrt{(10^2 - 0,5^2)} = 9,987\%$$

$$\cos \varphi = 0,85 \rightarrow \varphi = 31,79^\circ$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{TV(1)} &= R_{TVN} + jX_{TVN} = \left( \frac{U_{Rr}}{100} \cdot j \frac{U_{xr}}{100} \right) \cdot \frac{U^2_{VNrT}}{S_{rT}} = \left( \frac{0,5}{100} \cdot j \frac{9,987}{100} \right) \cdot \frac{115000^2}{100 \cdot 10^6} = 0,661 + j13,20 \text{ } \Omega \\ &= \bar{Z}_{TV(2)} \end{aligned}$$

#### Mreža:

Direktna i inverzna impedancija mrežnog napajanja uz faktor napona  $c = 1,1$  prema tablici 3.1

$$\bar{Z}_{Q(1)} = \frac{c \cdot U^2_{nQ}}{S''_{k3Q}} = \frac{110000^2}{2000 \cdot 10^6} = 6,655 = \bar{Z}_{Q(2)}$$

Direktna i inverzna reaktancija mrežnog napajanja računa se iz omjera  $R_{Q(1)}/X_{Q(1)}$  i direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{Q(1)}$

$$X_{Q(1)} = \frac{\bar{Z}_{Q(1)}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{Q(1)}}{X_{Q(1)}}\right)^2}} = \frac{6,655}{\sqrt{1 + 0,25^2}} = 6,456 = X_{Q(2)}$$

$$R_{Q(1)} = \sqrt{(\bar{Z}_{Q(1)}^2 - X_{Q(1)}^2)} = \sqrt{(6,655^2 - 6,456^2)} = 1,615 \Omega = R_{Q(2)}$$

Nulta impedancija mrežnog napajanja dobiva se umnoškom prijenosnih omjera ;  $X_{Q(0)}/X_{Q(1)} = 3$ ;  $R_{Q(0)}/R_{Q(1)} = 3$  i kompleksne direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{Q(1)}$

$$\bar{Z}_{Q(0)} = R_{Q(0)} + jX_{Q(0)} = 3 \cdot R_{Q(1)} + 3 \cdot X_{Q(1)} = 3 \cdot 1,615 + j3 \cdot 6,456 = 4,845 + j19,368 \Omega$$

Vod:

$$R_{V(1)} = 1 \cdot R_1 = 45 \cdot 0,12 = 5,4 \Omega$$

$$X_{V(1)} = WL1 = 2\pi f l L = 2\pi \cdot 50 \cdot 45 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 16,965 \Omega$$

Ukupna direktna i inverzna impedancija dalekovoda jednaka je polovici direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{V(1)}$  s obzirom da su dalekovodi jednaki u paralelnom spoju.

$$\bar{Z}_{V(1)} = R_V + jX_V = 5,4 + j16,965 \Omega = \bar{Z}_{V(2)}$$

$$\bar{Z}_{Vuk} = \frac{\bar{Z}_{V(1)}}{2} = 2,71 + j8,48 \Omega$$

$$\bar{Z}_{uk(0)} = \frac{R_{0(1)}}{R_1} \cdot R_1 + \frac{X_{0(1)}}{X_1} \cdot jX_1 = 1,3 \cdot 2,71 + j2,8 \cdot 8,48 = 3,523 + j23,74 \Omega$$

Korekcijski faktor  $K_S$  se računa prema izrazu[31]:

$$K_S = \frac{U^2_{nQ}}{U^2_{rG}} \cdot \frac{U^2_{TNN}}{U^2_{TVN}} \cdot \frac{CQ_{max}}{1 + |X''_d - X_{T(1)}| \cdot \sin\varphi_{rG}}$$

Rezultate impedancija, dobivenih iz prethodnog djela proračuna , koristimo za računanje korigirane direktne (inverzne) impedancije blok spoja  $\bar{Z}_{SK(1)}$ :

$$\bar{Z}_{SK} = K_S \cdot Z_S = K_S \cdot (t^2_r \bar{Z}_{G(1)} + \bar{Z}_{TVN(1)})$$

$$\bar{Z}_{SK(1)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_d) + \bar{Z}_{TVN(1)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_{(2)}) + \bar{Z}_{TVN(1)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(0)} = K_S \cdot \bar{Z}_{TVN(0)}$$

$$K_S = \frac{U^2_{nQ}}{U^2_{rG}} \cdot \frac{U^2_{TNN}}{U^2_{TVN}} \cdot \frac{CQ_{max}}{1 + |X''_d - X_{T(1)}| \cdot \sin\varphi_{rG}} = \frac{110 \cdot 10^6}{13,8 \cdot 10^6} \cdot \frac{13,8 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} \cdot \frac{1,1}{1 + |0,14 - 0,0998| \cdot \sin 31,79} = 0,9855$$

$$\bar{Z}_{SK(1)} = K_S \cdot Z_S = K_S \cdot (t^2_r \bar{Z}_{G(1)} + \bar{Z}_{TVN(1)}) = K_S \cdot [t^2_r \cdot (R_g + jX''_d) + \bar{Z}_{TVN(1)}] =$$

$$= 0,9855 \cdot \left[ \left( \frac{13,8 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot (R_g + jX''_d) + R_{TVN} + jX_{TVN} \right]$$

$$= 0,9855 \cdot [69,44 \cdot (0,015 + j0,1333) + 0,0661 + j13,21]$$

$$= 0,9855 \cdot [1,0417 + j9,256 + 0,661 + j13,21]$$

$$= 0,9855 \cdot [1,7027 + j22,47]$$

$$= 1,678 + j22,14 \Omega$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_{(2)}) + \bar{Z}_{TVN(1)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = K_S \cdot Z_S = K_S \cdot (t^2_r \bar{Z}_{G(2)} + \bar{Z}_{TVN(2)}) = K_S \cdot [t^2_r \cdot (R_g + jX''_i) + \bar{Z}_{TVN(2)}] =$$

$$= 0,9855 \cdot \left[ \left( \frac{13,8 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot (R_g + jX''_i) + R_{TVN} + jX_{TVN} \right]$$

$$= 0,9855 \cdot [69,44 \cdot (0,015 + j0,0952) + 0,0661 + j13,21]$$

$$= 0,9855 \cdot [1,0417 + j6,611 + 0,661 + j13,21]$$

$$= 0,9855 \cdot [1,7027 + j19,821]$$

$$= 1,678 + j19,53 \Omega$$

Iz nekorigirane nulte impedancije blok spoja  $\bar{Z}_{TV(0)}$  se računa korigirana nulta impedancija blok-spoja  $\bar{Z}_{SK(0)}$  koja ovisi samo o nultoj impedanciji transformatora. Generator nije uzemljen te je njegova nulta impedancija beskonačna.

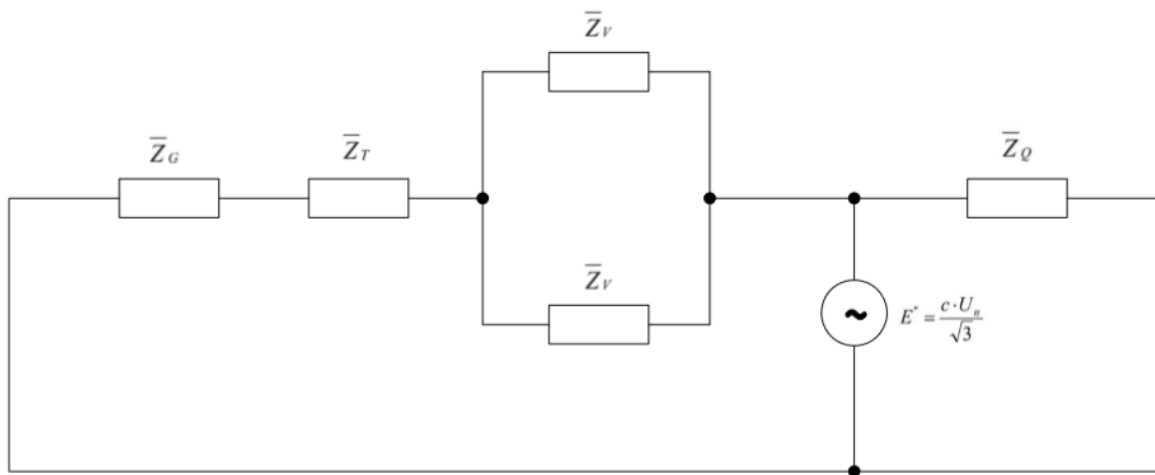
$$\bar{Z}_{TV(0)} = R_{TVN(0)} + jX_{TVN(0)}$$

$$R_{TVN(0)} = R_{TVN} = 0,661 \, \Omega$$

$$X_{TVN(0)} = 0,85 \cdot X_{TVN(1)} = 0,85 \cdot 13,20 = 11,23 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{SK(0)} = K_S \cdot \bar{Z}_{TV(0)} = 0,9855 \cdot (0,661 + j11,23) = 0,6514 + j11,067 \, \Omega$$

Za proračun struje trofaznog kratkog spoja potrebna je rezultantna impedancija direktnih sustava prema shemi.



**Slika 4.2:** Direktna shema s nadomjesnim izvorom namjestu kvara

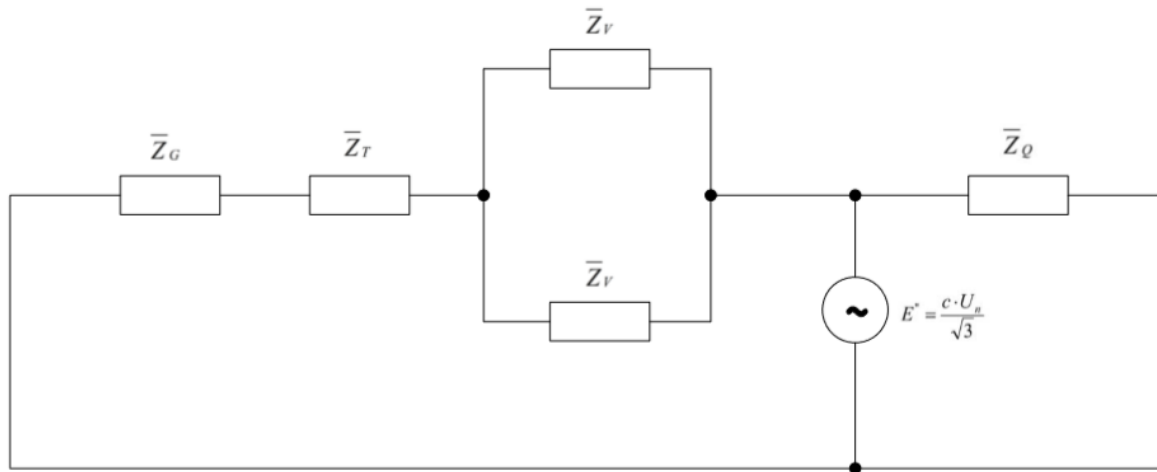
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{UK(1)} &= (\bar{Z}_{SK(1)} + \bar{Z}_{Vuk}) \parallel \bar{Z}_{Q(1)} = \\ &= (1,678 + j22,14 + 2,71 + j8,48) \parallel (1,615 + j6,465) \\ &= (4,388 + j30,62) \parallel (1,615 + j6,456) \\ &= 1,23 + j5,339 \, \Omega \\ &= 5,48 \angle 76,99^\circ \end{aligned}$$

Proračun početne struje trofaznog kratkog spoja

$$\bar{I}''_{k3(1)} = \frac{c \cdot U_n Q}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{UK(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,48 \angle 76,99} = 12,75 \angle -76,99^\circ \, kA$$



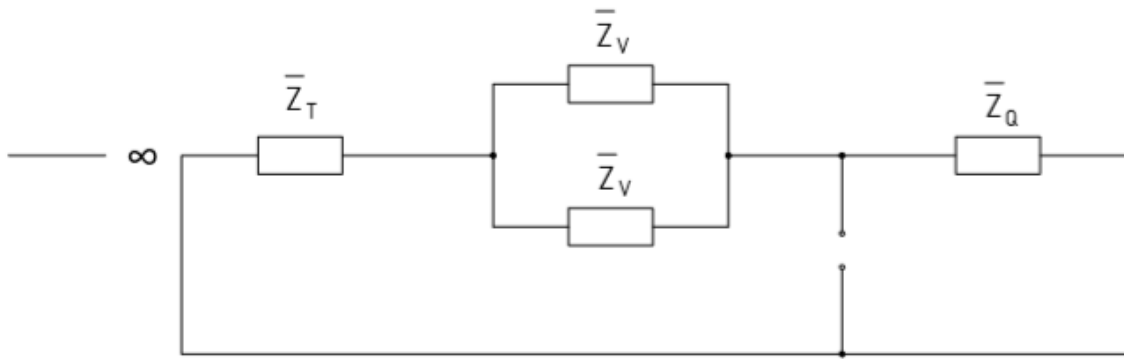
Kod proračuna početne struje jednofaznog kratkog spoja potrebne su direktna, inverzna i nulta rezultatna impedancija. Direktna rezultatna impedancija  $\bar{Z}_{UK(1)}$  je već izračunata u predhodnim koracima zadatka.



**Slika 4.3:** Inverzna shema s nadomjesnim izvorom namjestu kvara

Inverzna rezultatna impedancija:

$$\begin{aligned}
 \bar{Z}_{UK(2)} &= (\bar{Z}_{SK(2)} + \bar{Z}_{Vuk(2)}) \parallel \bar{Z}_{Q(2)} = \\
 &= (1,678 + j19,53 + 2,71 + j8,48) \parallel (1,615 + j6,465) \\
 &= (4,388 + j28,01) \parallel (1,615 + j6,456) \\
 &= 1,219 + j5,25 \Omega \\
 &= 5,39 \angle 76,93^\circ \Omega
 \end{aligned}$$



**Slika 4.4:** Nulta shema

Nulta rezultatna impedancija:

$$\begin{aligned}
 \bar{Z}_{UK(0)} &= (\bar{Z}_{SK(0)} + \bar{Z}_{Vuk(0)}) \parallel \bar{Z}_{Q(0)} = \\
 &= (0,6514 + j11,067 + 3,523 + j23,74) \parallel (4,845 + j19,368) \\
 &= (4,17 + j34,807) \parallel (4,845 + j19,368) \\
 &= 2,525 + j12,487 \Omega \\
 &= 12,74 \angle 78,57^\circ \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{I}''_{k1(0)} &= \frac{3 \cdot C \cdot U_n Q}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{UK(1)} + \bar{Z}_{UK(2)} + \bar{Z}_{UK(0)})} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (1,23 + j5,339 + 1,219 + j5,25 + 2,525 + j12,487)} = \\
 &= 8,877 \angle -77,8^\circ \text{ kA}
 \end{aligned}$$

**b) Ručno bez upotrebe korekcijskih faktora**

Kod proračuna bez upotrebe korekcijskog faktora se također mora izračunati direktan, inverzna i nulta impedancija svih elemenata. Cijeli prvi dio proračuna sa upotrebom korekcijskog faktora jednak je proračunu bez upotrebe korekcijskog faktora.

Generator:

$$\bar{Z}_{g(1)} = R_d + jX_d = R_g + j\frac{X_d}{100} \cdot \frac{U^2_{rG}}{S_{rG}} = 0,0015 + j\frac{14 \cdot 13800^2}{100 \cdot 200 \cdot 10^6} = 0,015 + j0,1333 \Omega$$

$$\bar{Z}_{g(2)} = R_d + jX_d = R_g + j\frac{X_i}{100} \cdot \frac{U^2_{rG}}{S_{rG}} = 0,0015 + j\frac{10 \cdot 13800^2}{100 \cdot 200 \cdot 10^6} = 0,015 + j0,0952 \Omega$$

Transformator:

$$U_{xr} = \sqrt{(u^2_{kr} - u^2_{Rr})} = \sqrt{(10^2 - 0,5^2)} = 9,987$$

$$\cos\varphi = 0,85 \rightarrow \varphi = 31,79^\circ$$

$$\bar{Z}_{TV(1)} = R_{TVN} + jX_{TVN} = \left(\frac{U_{Rr}}{100} \cdot j\frac{U_{xr}}{100}\right) \cdot \frac{U^2_{VNrT}}{S_{rT}} = \left(\frac{0,5}{100} \cdot j\frac{9,987}{100}\right) \cdot \frac{115000^2}{100 \cdot 10^6} = 0,661 + j13,20 = \bar{Z}_{TV(2)}$$

Mreža:

Direktna i inverzna impedancija mrežnog napajanja uz faktor napona  $c = 1,1$  prema tablici 3.1

$$\bar{Z}_{Q(1)} = \frac{c \cdot U^2_{nQ}}{S''_{k3Q}} = \frac{110000^2}{2000 \cdot 10^6} = 6,655 = \bar{Z}_{Q(2)}$$

Direktna i inverzna reaktancija mrežnog napajanja računa se iz omjera  $R_{Q(1)}/X_{Q(1)}$  i direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{Q(1)}$

$$X_{Q(1)} = \frac{\bar{Z}_{Q(1)}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{Q(1)}}{X_{Q(1)}}\right)^2}} = \frac{6,655}{\sqrt{1 + 0,25^2}} = 6,456 = X_{Q(2)}$$

$$R_{Q(1)} = \sqrt{(\bar{Z}_{Q(1)}^2 - X_{Q(1)}^2)} = \sqrt{(6,655^2 - 6,456^2)} = 1,615 \Omega = R_{Q(2)}$$

Nulta impedancija režnog napajanja dobiva se umnoškom prijenosnih omjera ;  $X_{Q(0)}/X_{Q(1)} = 3$ ;

$R_{Q(0)}/R_{Q(1)} = 3$  i kompleksne direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{Q(1)}$

$$\bar{Z}_{Q(0)} = R_{Q(0)} + jX_{Q(0)} = 3 \cdot R_{Q(1)} + 3 \cdot X_{Q(1)} = 3 \cdot 1,615 + j3 \cdot 6,456 = 4,845 + j19,368 \Omega$$

Vod:

$$R_{V(1)} = 1 \cdot R_1 = 45 \cdot 0,12 = 5,4 \Omega$$

$$X_{V(1)} = \text{WL1} = 2\pi f l L = 2\pi \cdot 50 \cdot 45 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 16,965 \Omega$$

Ukupna direktna i inverzna impedacija dalekovoda jednaka je polovici direktne i inverzne impedancije  $\bar{Z}_{V(1)}$  s obzirom da su dalekovodi jednaki u paralelnom spoju.

$$\bar{Z}_{V(1)} = R_V + jX_V = 5,4 + j16,965 \Omega = \bar{Z}_{V(2)}$$

$$\bar{Z}_{Vuk} = \frac{\bar{Z}_{V(1)}}{2} = 2,71 + j8,48 \Omega$$

$$\bar{Z}_{uk(0)} = \frac{R_{0(1)}}{R_1} \cdot R_1 + \frac{X_{0(1)}}{X_1} \cdot jX_1 = 1,3 \cdot 2,71 + j2,8 \cdot 8,48 = 3,523 + j23,74 \Omega$$

Za razliku od proračuna u a) dijelu zadatka, gdje se uzima u obzir utjecaj korekcijskog faktora, u proračunu bez korekcijskog faktora se kod računanja korigirane direktne(inverzene) impedancije blok spoja  $\bar{Z}_{SK(1)}$  ne množi sa korekcijskim faktorom  $K_S$

$$\bar{Z}_{SK(1)} = K_S \cdot Z_S = K_S \cdot (t^2_r \bar{Z}_{G(1)} + \bar{Z}_{TVN(1)})$$

$$\bar{Z}_{SK(1)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_d) + \bar{Z}_{TVN(1)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_{(2)}) + \bar{Z}_{TVN(1)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(1)} = Z_S = (t^2_r \bar{Z}_{G(1)} + \bar{Z}_{TVN(1)}) = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_d) + \bar{Z}_{TVN(1)}] =$$

$$= \left[ \left( \frac{13,8 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot (R_g + jX''_d) + R_{TVN} + jX_{TVN} \right]$$

$$= [69,44 \cdot (0,015 + j0,1333) + 0,0661 + j13,21]$$

$$= [1,0417 + j9,256 + 0,661 + j13,21]$$

$$= [1,7027 + j22,47] \Omega$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = [t^2_r \cdot (R_g + jX''_{(2)}) + \bar{Z}_{TVN(2)}]$$

$$\bar{Z}_{SK(2)} = K_S \cdot Z_S = K_S \cdot (t^2_r \bar{Z}_{G(2)} + \bar{Z}_{TVN(2)}) = K_S \cdot [t^2_r \cdot (R_g + jX''_i) + \bar{Z}_{TVN(2)}] =$$

$$= \left[ \left( \frac{13,8 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot (R_g + jX''_i) + R_{TVN} + jX_{TVN} \right]$$

$$= [69,44 \cdot (0,015 + j0,0952) + 0,0661 + j13,21]$$

$$= [1,0417 + j6,611 + 0,661 + j13,21]$$

$$= [1,7027 + j19,821]\Omega$$

Nekorigirana nulta impedancije blok spoja  $\bar{Z}_{TV(0)}$  jednaka je nultoj impedanciji blok-spoja  $\bar{Z}_{SK(0)}$  koja ovisi samo o nultoj impedanciji transformatora. Generator nije uzemljen te je njegova nulta impedancija beskonačna.

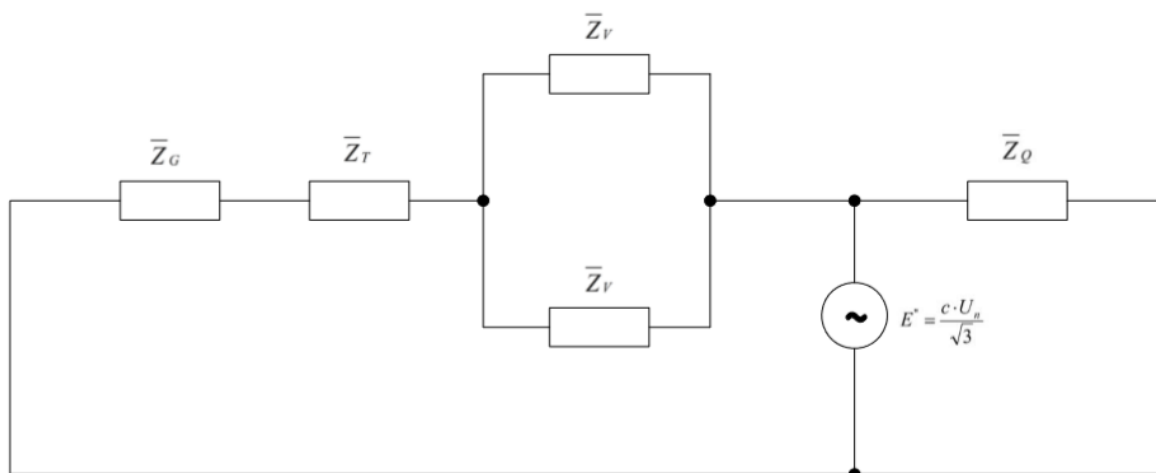
$$\bar{Z}_{TV(0)} = R_{TVN(0)} + jX_{TVN(0)}$$

$$R_{TVN(0)} = R_{TVN} = 0,661\Omega$$

$$X_{TVN(0)} = 0,85 \cdot X_{TVN(1)} = 0,85 \cdot 13,20 = 11,23 \Omega$$

$$\bar{Z}_{SK(0)} = \bar{Z}_{TV(0)} = 0,661 + j11,23 \Omega$$

Za proračun struje trofaznog kratkog spoja potrebna je resultantna impedancija direktnih sustava prema shemi.



**Slika 4.5:** Direktna shema s nadomjesnim izvorom namjestu kvara

$$\bar{Z}_{UK(1)} = (\bar{Z}_{SK(1)} + \bar{Z}_{Vuk}) \parallel \bar{Z}_{Q(1)} =$$

$$= (1,7027 + j22,47 + 2,71 + j8,48) \parallel (1,615 + j6,465)$$

$$= (4,4127 + j30,95) \parallel (1,615 + j6,456)$$

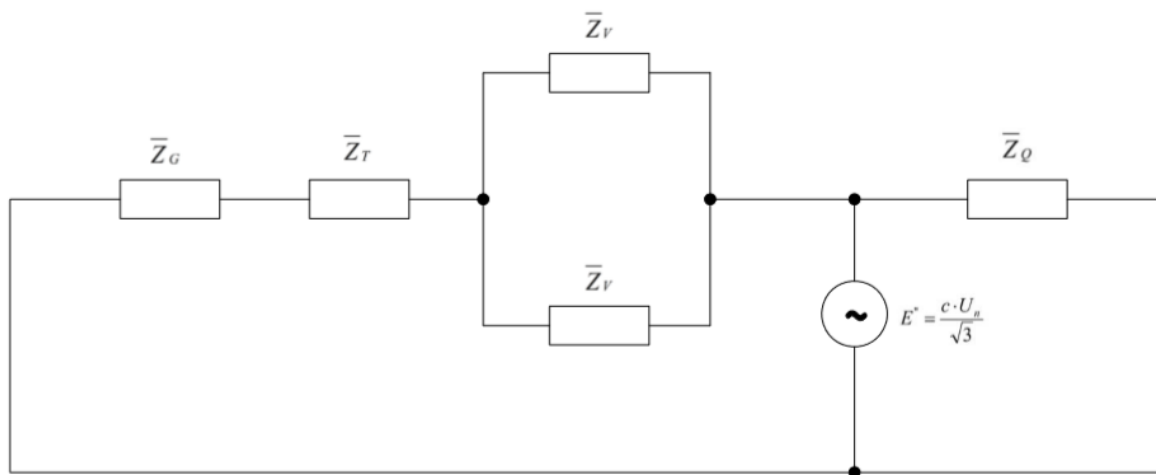
$$= 1,236 + j5,35 \Omega$$

$$= 5,49 \angle 76,99^\circ \Omega$$

Proračun početne struje trofaznog kratkog spoja

$$\bar{I}''_{k3(1)} = \frac{c \cdot U_n Q}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{UK(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,49 \angle 76,99^\circ} = 12,72 \angle -76,99^\circ \text{ kA}$$

Kod proračuna početne struje jednofaznog kratkog spoja potrebne su direktna, inverzna i nulta rezultatna impedancija. Direktna rezultatna impedancija  $\bar{Z}_{UK(1)}$  je već izračunata u predhodnim koracima zadatka.



**Slika 4.6:** Inverzna shema s nadomjesnim izvorom namjestu kvara

Inverzna rezultatna impedancija

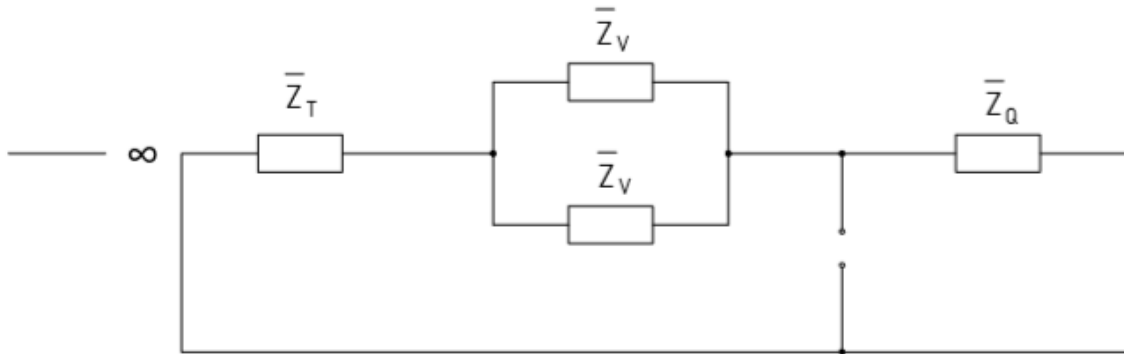
$$\bar{Z}_{UK(2)} = (\bar{Z}_{SK(2)} + \bar{Z}_{Vuk(2)}) \parallel \bar{Z}_{Q(2)} =$$

$$= (1,7206 + j19,821 + 2,71 + j8,48) \parallel (1,615 + j6,465)$$

$$= (4,4127 + j28,301) \parallel (1,615 + j6,456)$$

$$= 1,222 + j5,264 \Omega$$

$$= 5,404 \angle 76,93^\circ \Omega$$



**Slika 4.7:** Nulta shema

Nulta rezultatna impedancija

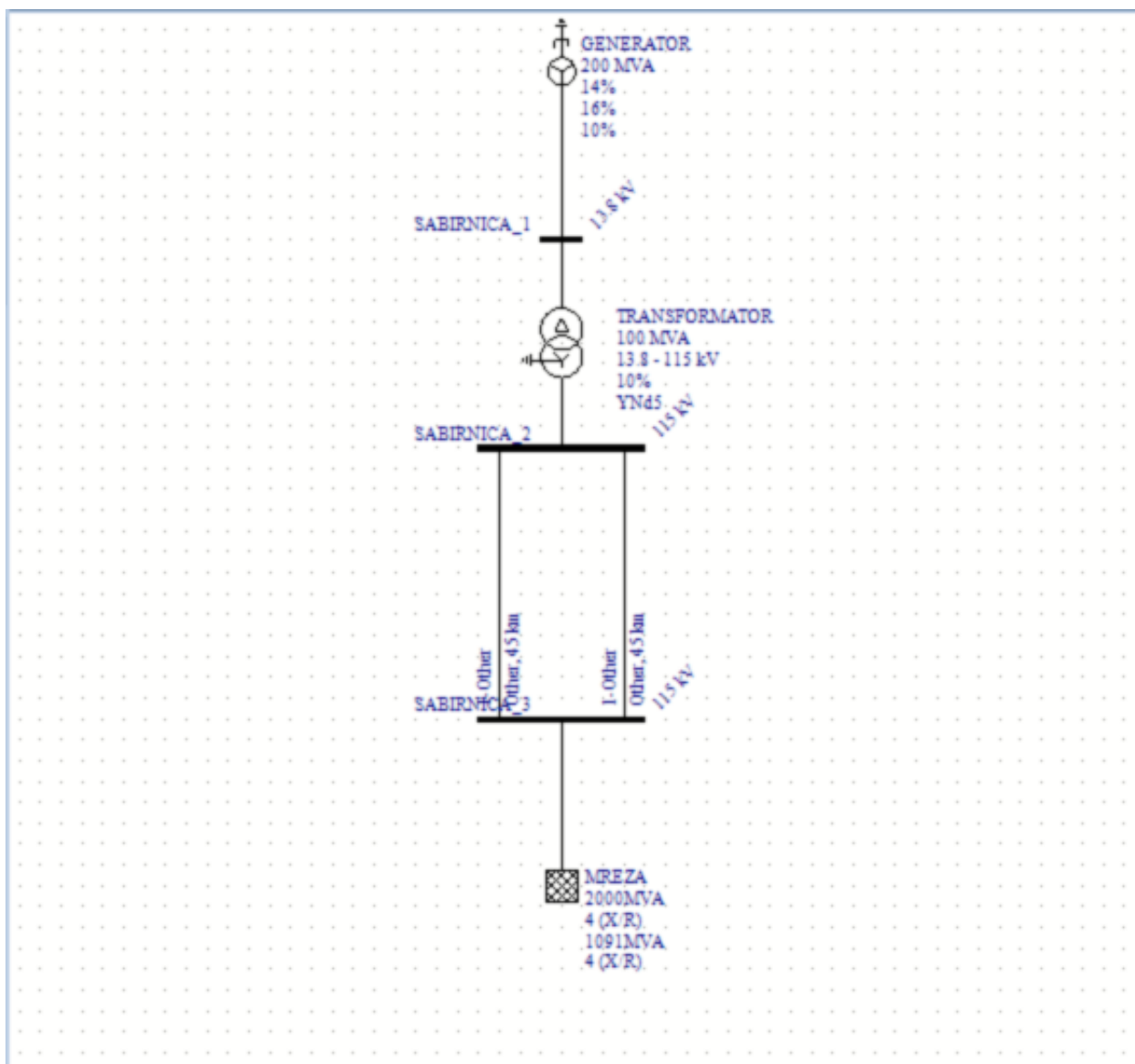
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{UK(0)} &= (\bar{Z}_{SK(0)} + \bar{Z}_{Vuk(0)}) \parallel \bar{Z}_{Q(0)} \\ &= (0,661 + j11,23 + 3,523 + j23,74) \parallel (4,845 + j19,368) \\ &= (4,184 + j34,97) \parallel (4,845 + j19,368) \\ &= 2,53 + j12,51 \Omega \\ &= 12,765 \angle 78,57^\circ \Omega \end{aligned}$$

Početna struja jednofaznog kratkog spoja

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{k1(0)} &= \frac{3 \cdot C \cdot U_n Q}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{UK(1)} + \bar{Z}_{UK(2)} + \bar{Z}_{UK(0)})} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (1,236 + j5,35 + 1,22 + j5,26 + 2,53 + j12,51)} = \\ &= 8,859 \angle -77,83^\circ \text{ kA} \end{aligned}$$

### c) Simulacijski u EasyPoweru koristeći metodu IEC

Nadomjesnu shemu sustava, danog u zadatku, potrebno je nacrtati u EasyPower-u kako bi se mogla provesti potrebna simulacija. Slika 4.8 prikazuje sustav se sastoji od generatora, transformatora, dva paralelna dalekovoda i mrežno napajanje. Elektrana sadrži blok-spoj generatora i transformatora koji su međusobno spojeni preko sabirnice 1. Na sabirnicu 2 je spojen transformator sa dva jednaka paralelna dalekovoda . Mrežno napajanje i dalekovodi su spojeni sabirnicom 3. Sabirnica 3 je ujedno i mjesto na kojem će se simulirati trofazni i jednofazni kratki spoj sustava.



**Slika 4.8:** Nadomjesna shema zadatka u EasyPower-



Na slici 4.9 su prikazani parametri generatora.

Generator Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: GENERATOR Conn:  D  Y  YG

To Bus: SABIRNICA\_1 Base kV = 13.8

Specifications Power Flow Impedance TCC Harmonics Stability 1 Stability 2 Location Comments Hyperlinks

Rated kV: 13.8 Rating: 200 MVA Type: SYN-SPA

Power Factor: 0.85 Efficiency: 0.95 RPM: 3000

GSU Transformer

<None>

OK Cancel Help

Base MVA: 10 Default Sys Freq: 50 Hz

**Slika 4.9:** Parametri generatora

Slika 4.10 prikazuje postavljanje vrijednosti direktne, inverzne i nulte impedancije generatora.

Generator Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: GENERATOR Conn:  D  Y  YG

To Bus: SABIRNICA\_1 Base kV = 13.8

Specifications Power Flow Impedance TCC Harmonics Stability 1 Stability 2 Location Comments Hyperlinks

Synchronous

X'dv: 14 % X'dv: 16 % X0v: 10 %

Grounding (Ohms)

R: 0 + j 0 Calculate >> Amp Class:

IEC

RG (Ohms): pG: 0 % RGf / X'd:

X/R: 8.9 Calculate

OK Cancel Help

Slika 4.10: Impedancije generatora

Za sabirnice je potrebno podesiti naponsku razinu što se vidi na slici 4.11. Za sabirnicu 1 je to 13,8 kV

Bus Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: SABIRNICA 1

Base kV: 13.8  Lock Auto-Sizing

Specifications Switchgear Equipment Elevation Arc Flash Hazard Accessories Location Comments Hyperlinks

Bus Type: Other AC

Bus Rating

Mfr: Rating (A):

Type: Bracing (kA): kA Asymmetrical

Material

Material: Other Mounting: Surface

Area: 1 Device Code:

Zone: 1

One-line Graphics

Line Style: None  Show Pad Symbol

OK Cancel Help

Slika 4.11: Sabirnica 1

Postavljanje ulaznih i izlaznih parametara transformatora na slici 4.12.

Two Winding Transformer Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name:   Lock Auto-Sizing

From Bus:  Base kV = 13.8 Conn:  D  Y  YN Phase Shift: Ref: HV Side

To Bus:  Base kV = 115 Conn:  D  Y  YN

Specifications Impedance TCC LTC Harmonics Stability Location Comments Hyperlinks

Standard:  Type:  Class:  Temp:  Form  Core  Shell

Winding Information

	Rated kV:	Tap kV:
From:	<input type="text" value="13.8"/>	<input type="text" value="13.8"/>
To:	<input type="text" value="115"/>	<input type="text" value="115"/>

MVA Rating:

MVA O/L:

Slika 4.12: Parametri transformatora

Slika 4.13 prikazuje promijenu omjera elemenata direktne i nulte impedancije, te grupu spoja transformatora i satni broj.

**Two Winding Transformer Data** Collected Data >

**Connection Information**

ID Name:   Lock Auto-Sizing

From Bus:  Base kV = 13.8 Conn:  D  Y  YN Phase Shift: Ref: HV Side

To Bus:  Base kV = 115 Conn:  D  Y  YN

**Specifications** | Impedance | TCC | LTC | Harmonics | Stability | Location | Comments | Hyperlinks

**Impedance**

Z%:  @MVA Base:  Loss (kW):

X/R Ratio:

Z0%:

X0/R0 Ratio:

**Grounding**

From Side: R:  + jX:  Ohms Amp Class:

To Side: R:  + jX:  Ohms  Amp Class:

**IEC**

pT:  %

Slika 4.13: Impedancija transformatora

Sa slike 4.14 vidimo razliku od sabirnice 1, naponska razina sabirnice 2 je 115kV zbog visokonaponske strane transformatora.

Bus Data

Connection Information

ID Name: SABIRNICA\_2

Base kV: 115

Lock Auto-Sizing

Specifications | Switchgear | Equipment Elevation | Arc Flash Hazard | Accessories | Location | Comments | Hyperlinks

Bus Type: Other AC

Bus Rating

Mfr: Rating (A):

Type: Bracing (kA): kA Asymmetrical

Material

Material: Other Mounting: Surface

Area: 1 Device Code:

Zone: 1

One-line Graphics

Line Style: None Show Pad Symbol

OK Cancel Help

Slika 4.14: Sabirnica 2

Na slici 4.15 su prikazane postavke parametara dalekovoda 1, koji su jednaki dalekovodu 2.

Transmission Line Data

Connection Information

ID Name: DALEKOVOD\_1

From Bus: SABIRNICA\_2 Base kV = 115

To Bus: SABIRNICA\_3 Base kV = 115

One-line Graphics

Show Entire Line

Style: Weight:

Specifications | Harmonics | Comments | Hyperlinks

Unit: Metric No/Ph: 1 Material: <None> Size: <None>

Length (km): 45 Op Temp (C): 25 Earth Res: 100 GMD (m): 3.4 Avg Height (m): 45

Impedances (Ohm/km)

R1: 0.12 X1: 0.3768 Xc: 0 (MOhm-km) Rating (A): 1000

R0: 0.156 X0: 1.055 Xc0: 0 (MOhm-km) Calculate

OK Cancel Help

### Slika 4.15: Parametri dalekovoda

Po slici 4.16 se vidi da je sabirnica 3 na istoj naponskoj razini kao i sabirnica 2.

Bus Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: SABIRNICA 3

Base kV: 115

Lock Auto-Sizing

Specifications Switchgear Equipment Elevation Arc Flash Hazard Accessories Location Comments Hyperlinks

Bus Type: Other AC

Bus Rating

Mfr: Rating (A):

Type: Bracing (kA): kA Asymmetrical

Material

Material: Other Mounting: Surface

Area: 1 Device Code:

Zone: 1

One-line Graphics

Line Style: None  Show Pad Symbol

OK Cancel Help

Slika 4.16: Sabirnica 3

Parametri mreže uvelike utječu na iznose trofaznog i jednofaznog kratkog spoja. Njihovo podešavanje u softveru prikazano je na slici 4.17.

Utility Data

Connection Information

ID Name: MREŽA

To Bus: SABIRNICA\_3 Base kV = 115

Specifications Power Flow Harmonics Location Comments Hyperlinks

Utility kV: 110

Fault Duty Unit: MVA

3 Phase Short Circuit

MVA: 2000 X/R: 4

SLG Short Circuit

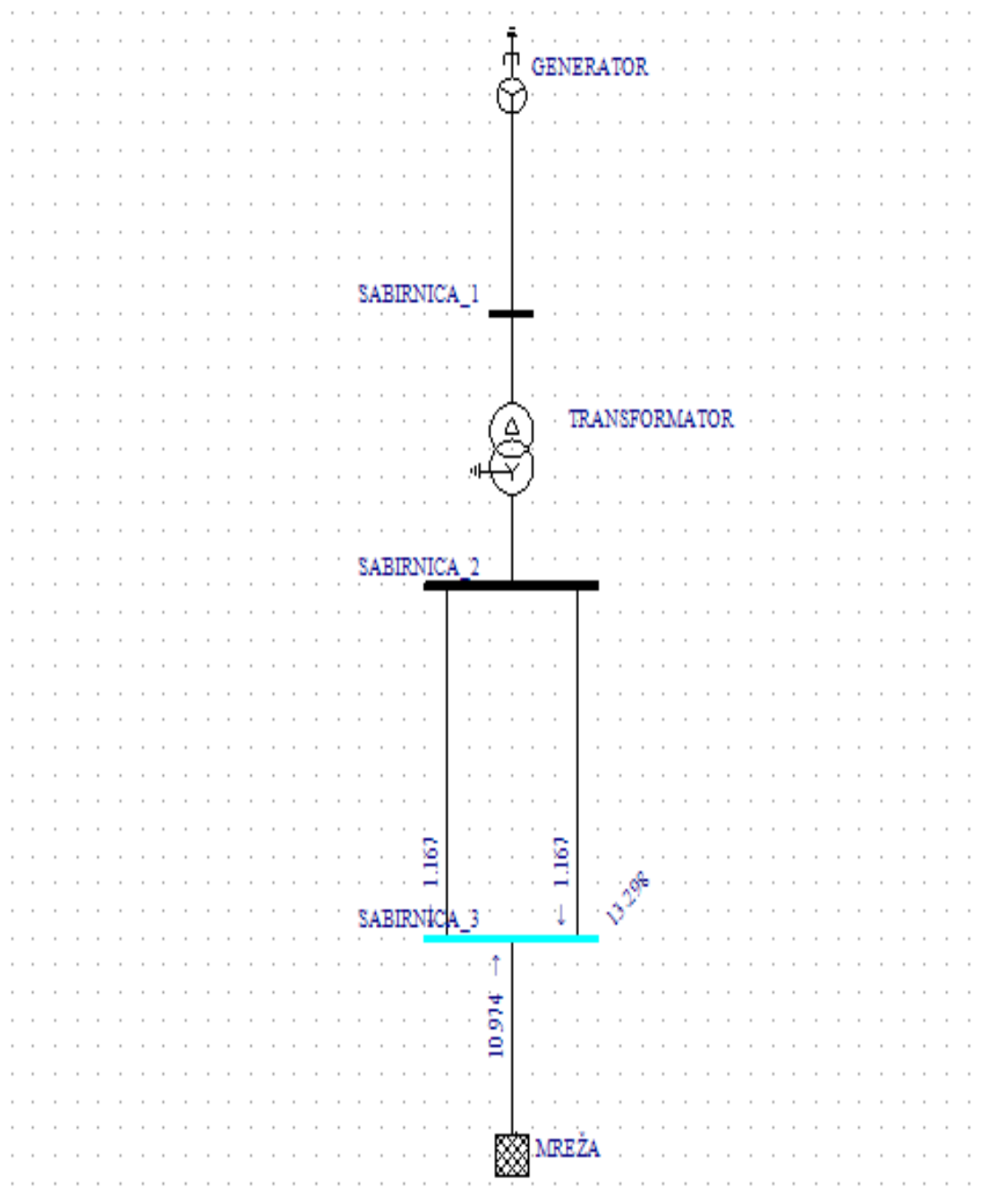
MVA: 1091 X0/R0: 4

OK Cancel Help

Slika 4.17: Parametri mreže

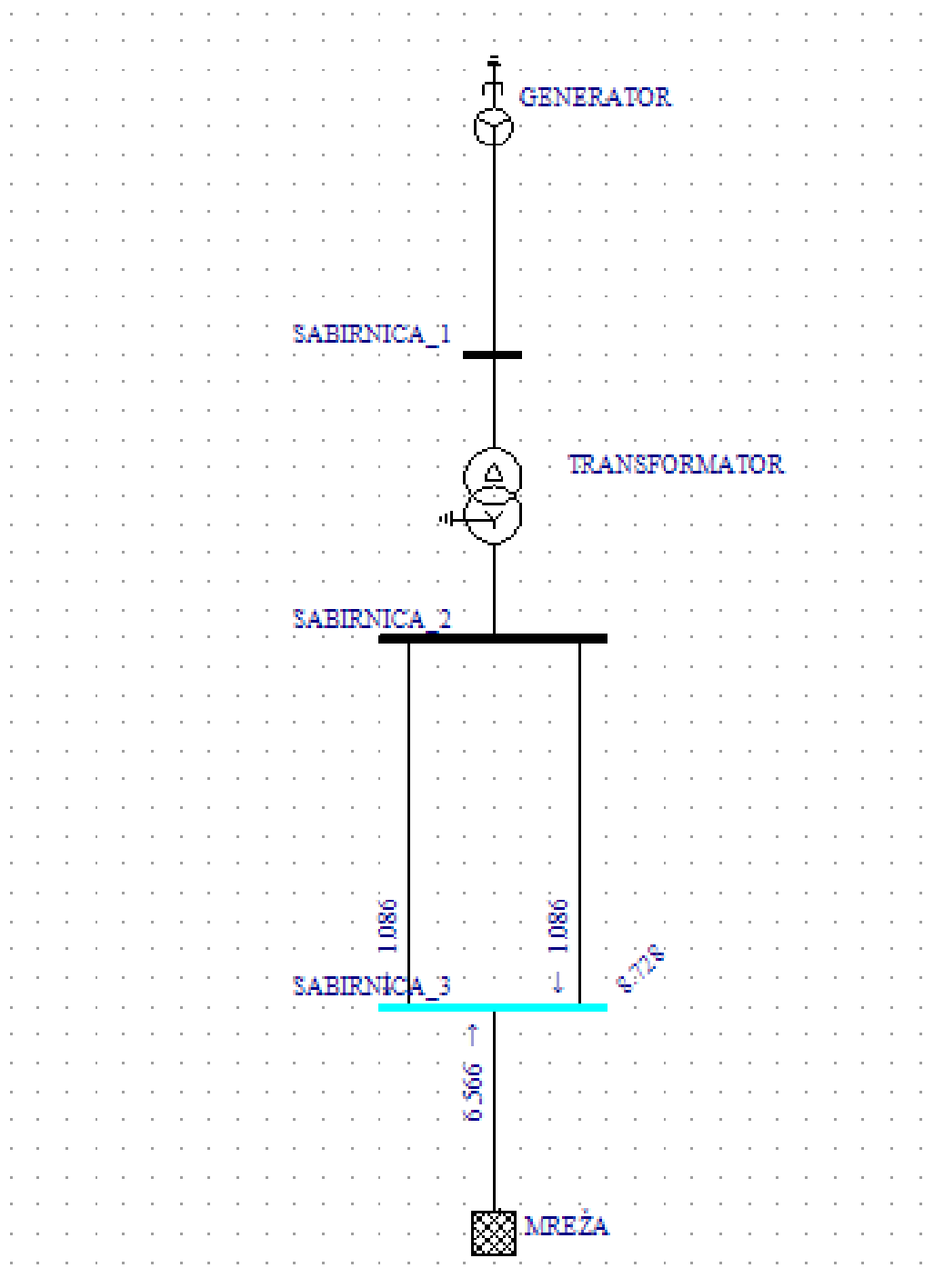


Nakon cijelog postupka crtanja sustava, unosa parametara i postavljanja elemenata sustava, u sustavu je izvršena simulacija jednofaznog i trofaznog kratkog spoja na Sabirnici 3. Slika 4.18 prikazuje iznos struje trofaznog kratkog spoja.



**Slika 4.18:** Trofazni kratki spoj

Vrijednost struje jednofaznog kratkog spoja je očekivano manja od vrijednosti trofaznog kratkog spoja, a to si i vidi na slici 4.19.



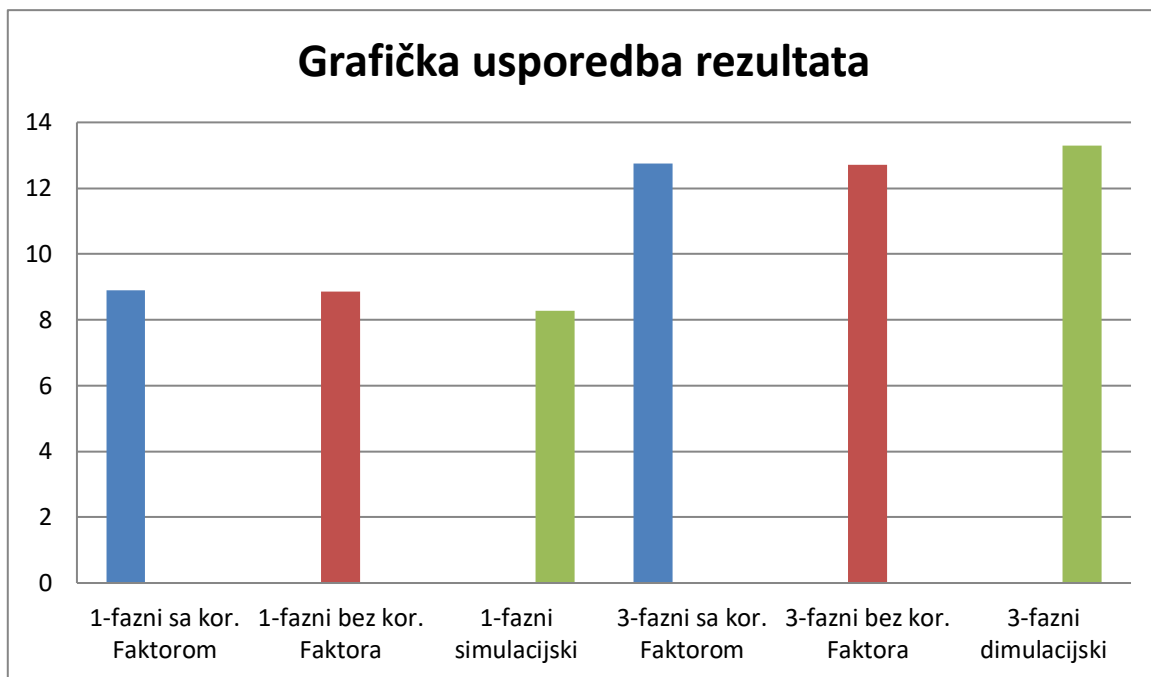
**Slika 4.19:** Jednofazni kratki spoj

## 4.1 Usporedba rezultata jednofaznog i trofaznog kratkog spoja

**Tablica 4.1** Usporedba rezultata jednofaznog i trofaznog kratkog spoja

Rezultati proračuna		
	Sabirnica 3 jednofazni kratki spoj	Sabirnica 3 trofazni kratki spoj
$I_k$ računski sa kor. faktorom [kA]	8,887	12,75
$I_k$ računski bez kor. faktora [kA]	8,859	12,72
$I_k$ simulacijski [kA]	8,728	13,3

Rezultati proračuna pokazuju da su razlike između jednofaznog i trofaznog kratkog spoja uz upotrebu korekcijskih faktora jako male u odnosu na proračun bez upotrebe korekcijskih faktora. Za jednofazni kratki spoj ta razlika je 0,31 %, dok je za trofazni kratki spoj razlika još manja i iznosi 0,23 %. Struja jednofaznog kratkog spoja dobivena simulacijski razlikuje se za 1,79 % iste struje dobivene matematičkim proračunom sa slučaj sa korekcijskim faktorom, a razlika između struje trofaznog kratkog spoja dobivene simulacijski i struje dobivene proračunom je 4,14 %. Proračunom bez upotrebe korekcijskih faktora dao je vrlo slične rezultate onim uz upotrebu korekcijskih faktora. U odnosu na rezultat simulacije, jednofazna struja kratkog spoja razlikuje se 1,48 %, a trofazna struja kratkog spoja 4,36 %.



**Slika 4.20:** Usporedba rezultata tablice 4.1

## 5. ZAKLJUČAK

Poslije uvodnog teorijskog djela o kratkom spoju, vrstama kratkog spoja, proračunu kratkog spoja u kojem se osnova diplomskog rada temelji na korekcijske faktore impedancija; napravljen je numerički proračun početne struje jednofaznog i trofaznog kratkog spoja rađen je prema IEC 60909 normi. Kroz zadatak su prikazani svi koraci potrebni za proračun struja kratkog spoja uz upotrebu korekcijskih faktora, a tako isto i bez u potrebe istih. Kao provjera točnosti proračuna, uz određena softverska odstupanja, napravljena je i simulacija u EasyPower-u. Po usporedbi dobivenih rezultata može se zaključiti da se u danom primjeru zadatka može zanemariti proračun sa upotrebom korekcijskih faktora. Razlika u proračunu za početnu struju jednofaznog kratkog spoja je 0,31 % ,a za trofazni krakti spoj je 0,23 %.

## POPIS LITERATURE

- [1] Ožegović, M. i Ožegović, K.: Električne energetske mreže III, Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Splitu, FESB, 1997
- [2] IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Calculation of currents, Second edition 2002-07
- [3] IEC 60909-2 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations , Second edition 2002-07
- [4] IEC 60909-4 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents, Second edition 2002-07
- [5] L. Jozsa, Skripta za predavanja - Analiza elektroenergetskog sustava, ETF Osijek
- [6] Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva.Zavod za visoki napon i energetiku: Proračun struja kratkog spoja u izmjeničnim trofaznim sustavima prema standardu IEC 60909-0, studeni 2007. Nastavnici: prof. dr. sc. Slavko Krajcar dr. sc. Marko Delimar. <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/IEC60909-0-v0.pdf>

## SAŽETAK

Na samom početku ovog rada općenito je opisana teorija kratkog spoja; što on zapravo jest, koji su njegovi uzroci, vrste kratkih spojeva koje se mogu pojaviti u trofaznoj mreži i sam proračun kratkog spoja. Glavnina rada se odnosi na proračun struja kratkih spojeva prema IEC 60909 normi, s tim da se bazira na korekcijske faktore impedancija. Kao dokaz teorije, napravljen je ručni numerički proračun uz upotrebu korekcijskih faktora i bez korekcijskih faktora. Iz danih podataka elemenata sustava i dobivenih rezultata proračuna provedena je i simulacija u EasyPower-u.

## **ABSTRACT**

If the very beginning of this paper, short circuit theory is generally described; what is really is, what are its causes, the thypes of circuit that can occur in a three-phase network, and the short circuit calculation itself. Most work is realted to the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909 norm, based on the impedance correction factors, As a proof of theory, a manual numerical calculation was made with the use of correction factors and no correction factors. From the given data of the system elements and the calculation given results, a simulation in EasyPower was preformed.



## **ŽIVOTOPIS**

Ivan Smaić rođen je 21. Svibnja 1992. godine u Našicama. Osnovnu školu „Matija Gubec“ završava u Magadenovcu. 2007. godine upisuje Opću gimnaziju, a nakon završetka iste svoje obrazovanje nastavlja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer elektrotehnika. Početkom 2018. godine se zapošljava u Tvornici elektro opreme Belišće kao inženjer elektro montaže , te paralelno završava Diplomski studij smjer DEA-elektroenergetski sustavi.