

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ZKRATOVÉ POMĚRY V ROZVODNĚ 110kV
SOKOLNICE PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ
TRANSFORMACE 400/110 kV**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

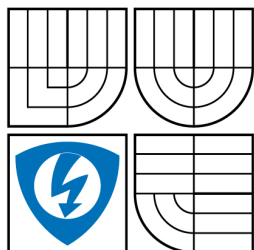
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ HAJDŮ

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Lukáš Hajdú

ID: 78454

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

**Zkratové poměry v rozvodně 110 kV Sokolnice
po zavedení přímé transformace 400/110 kV**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. V rozvodně 110 kV vypočítejte poměry při jednofázovém a třífázovém zkratu:

- před instalací transformátoru 400/110 kV
- po instalaci transformátoru 400/110 kV

2. Na základě zjištěných výsledků posuďte jmenovitou zkratovou odolnost rozvodny 110 kV v nových provozních podmínkách

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Lukáš Hajdú

Bytem: Šámalova 108, Brno 61500

Narozen/a (datum a místo): 12.9.1985 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá
elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Zkratové poměry v rozvodně 110kV Sokolnice po zavedení přímé transformace 400/110kV
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 1
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

HAJDŮ, L. *Zkratové poměry v rozvodně 110 kV Sokolnice po zavedení přímé transformace 400/110 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 82 stran. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Děkuji vedoucímu své práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za pomoc při vypracování této práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky



Bakalářská práce

Zkratové poměry v rozvodně 110kV Sokolnice po zavedení přímé transformace 400/110 kV

Lukáš Hajdú

**vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009**

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Short - circuit conditions at Sokolnice 110kV switching station following a 400/110kV transformation

By

Lukáš Hajdú

**Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
Brno University of Technology, 2009**

Brno

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vyšetřit zkratové poměry v rozvodně Sokolnice 110kV před a po instalaci transformátoru T402 – před a po zavedení přímé transformace 400/110kV. Určením těchto poměrů zjistit, jestli vyhoví původní instalované ochranné prvky (výkonové vypínače) v rozvodně.

Práce je rozdělena na dvě části: v první je uvedena teorie potřebná pro výpočet zkratových poměrů v rozvodně a v druhé části je proveden konkrétní výpočet zkratových proudů a výkonů v rozvodně.

Výpočet je proveden metodou postupného zjednodušování a metodou souměrných složek.

KLÍČOVÁ SLOVA:

zkrat; rozvodna; Sokolnice; 110kV; T402; přímá transformace; třífázový zkrat; jednofázový zkrat; souměrné složky; ČSN 333020; ČSN EN 60909

ABSTRACT

The goal of this bachelor's thesis is to evaluate short-circuit conditions at the Sokolnice 110kV switching station before and after installation of a T402 transformer – before and after application of a direct 400/110kV transformation.

By evaluating these conditions determine whether the originally installed protective elements (power circuit-breakers) are capable of fulfilling the new short-circuit requirements at the switching station.

The thesis consists of two parts: the first part introduces the theory required to evaluate the short-circuit conditions at the switching station, while the second part calculates the actual short-circuit currents and power outputs.

The methods used for calculation are sequential simplification and symmetrical components.

KEY WORDS:

short-circuit; switching station; Sokolnice; 110kV; T402; direct transformation; three-phase short-circuit; one-phase short-circuit; symmetrical components; ČSN 333020; ČSN EN 60909

OBSAH

1. ÚVOD.....	16
2. CÍLE PRÁCE	17
3. PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH.....	18
3.1 PŘECHODNÉ JEVY	18
3.2 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	19
3.3 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	20
3.4 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU	22
4. VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....	24
4.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PODMÍNKY VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	24
4.2 OBECNÁ METODA VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	24
4.3 EKVIVALENTNÍ NAPĚŤOVÝ ZDROJ V MÍSTĚ ZKRATU.....	25
4.4 POUŽITÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	26
4.5 VÝPOČET VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH.....	27
5. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	28
5.1 VŠEOBECNĚ	28
5.2 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE	28
5.3 TRANSFORMÁTORY	30
5.3.1 DVOUVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	30
5.3.2 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	30
5.3.3 KOREKČNÍ ČINITELÉ IMPEDANCÍ 2 A 3 VINUŤOVÝCH TRAF.....	31
5.4 UVEDENÍ IMPEDANCÍ ZAŘÍZENÍ NA VZTAŽNOU HLADINU NAPĚTÍ.....	32
5.5 VÝPOČET DLE NORMY ČSN 33 30 20.....	32
6. VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET ZKRATU V ROZVODNĚ 110kV SOKOLNICE V UZLU S04	33
7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV SOKOLNICE DLE ČSN 33 30 20.....	35
7.1 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ZAŘÍZENÍ ROZVODNY	35
7.1.1. SOUSTAVA 400kV	35
7.1.2 SOUSTAVA 220kV	35
7.1.3 SOUSTAVA 110kV	36
7.1.4 TRANSFORMÁTOR T401	36
7.1.5 TRANSFORMÁTOR T402.....	37
7.1.6 TRANSFORMÁTOR T201, T202	38
7.2 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE	39
7.3 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE.....	41
7.4 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE	47
7.5 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE.....	50

7.6 ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON DLE ČSN 33 30 20	55
7.6.1 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE..	55
7.6.2 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE.....	55
7.6.3 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE...	55
7.6.4 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE	55
8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV SOKOLNICE DLE ČSN EN 60909	56
8.1 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ZAŘÍZENÍ ROZVODNY	56
8.1.1. SOUSTAVA 400kV	56
8.1.2 SOUSTAVA 220kV	56
8.1.3 SOUSTAVA 110kV	57
8.1.4 TRANSFORMÁTOR T401	57
8.1.5 TRANSFORMÁTOR T402.....	59
8.1.6 TRANSFORMÁTOR T201, T202	60
8.2 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE	63
8.3 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE.....	65
8.4 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE	71
8.5 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE	74
8.6 ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON DLE ČSN EN 60909.....	79
8.6.1 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE..	79
8.6.2 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE.....	79
8.6.3 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE...	79
8.6.4 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE	79
9. ZÁVĚR.....	80
10. POUŽITÁ LITERATURA:	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Druhy souměrných zkratů	19
Obrázek 2: Druhy nesouměrných zkratů	20
Obrázek 3: Průběh nesouměrného zkratového proudu (elektricky blízký zkrat)	21
Obrázek 4: Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$ v místě zkratu F	26
Obrázek 5: Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$ v místě zkratu F	26
Obrázek 6: Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$ v místě zkratu F	27
Obrázek 7: Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma síťových napáječů	29
Obrázek 8: Trojvinutový transformátor – označení zapojení vinutí a náhradní schéma	31
Obrázek 9: Zapojení rozvodny před zavedením přímé transformace	33
Obrázek 10: Zapojení rozvodny po zavedení přímé transformace	33
Obrázek 11: Zapojení rozvodny před přímou transformací	39
Obrázek 12: Překreslené schéma sousledné složky	39
Obrázek 13: Zjednodušování obvodu 1	40
Obrázek 14: Zjednodušování obvodu 2	40
Obrázek 15: Zjednodušování obvodu 3	40
Obrázek 16: Výsledná sousledná 3f impedance před zavedením přímé transformace	40
Obrázek 17: Zapojení netočivé složky v rozvodně před přímou transformací	41
Obrázek 18: Překreslené schéma netočivé složky	41
Obrázek 19: Zjednodušování obvodu 1	41
Obrázek 20: Zjednodušování obvodu 2	42
Obrázek 21: Zjednodušování obvodu 3	42
Obrázek 22: Zjednodušování obvodu 4	42
Obrázek 23: Zjednodušování obvodu 4 – Transfigurace $Z_{T3A(0)}, Z_{4(0)}, Z_{T3C(0)}$	43
Obrázek 24: Zjednodušování obvodu 5	43
Obrázek 25: Zjednodušování obvodu 6 – Transfigurace $Z_{6(0)}, Z_{C(0)}, Z_{S3(0)}$	44
Obrázek 26: Zjednodušování obvodu 7	44
Obrázek 27: Zjednodušování obvodu 8 – Transfigurace $Z_{7(0)}, Z_{T4C(0)}, Z_{F(0)}$	45
Obrázek 28: Zjednodušování obvodu 9	45
Obrázek 29: Zjednodušování obvodu 10	46
Obrázek 30: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu před zavedením přímé transformace ...	46
Obrázek 31: Zapojení rozvodny po přímé transformací	47
Obrázek 32: Překreslené schéma impedancí	47
Obrázek 33: Zjednodušování obvodu 1 – Transfigurace	48
Obrázek 34: Zjednodušování obvodu 2	48
Obrázek 35: Zjednodušování obvodu 3	48
Obrázek 36: Zjednodušování obvodu 4	49
Obrázek 37: Výsledná sousledná 3f zkratová impedance po zavedení přímé transformace ...	49
Obrázek 38: Zapojení netočivé složky v rozvodně po přímé transformací	50
Obrázek 39: Překreslené schéma impedancí	50
Obrázek 40: Zjednodušování obvodu 1	51
Obrázek 41: Zjednodušování obvodu 2	52
Obrázek 42: Zjednodušování obvodu 3 - Transfigurace $Z_{1(0)}, Z_{C(0)}, Z_{T1C(0)}$	52
Obrázek 43: Zjednodušování obvodu 4	53
Obrázek 44: Zjednodušování obvodu 5 - Transfigurace $Z_{4(0)}, Z_{5(0)}, Z_{6(0)}$	53
Obrázek 45: Zjednodušování obvodu 6	54

Obrázek 46: Zjednodušení obvodu 7	54
Obrázek 47: Zjednodušení obvodu 8	54
Obrázek 48: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu po zavedení přímé transformace	54
Obrázek 49: Zapojení rozvodny před přímou transformací	63
Obrázek 50: Překreslené schéma sousledné složky	63
Obrázek 51: Zjednodušení obvodu 1	64
Obrázek 52: Zjednodušení obvodu 2	64
Obrázek 53: Zjednodušení obvodu 3	64
Obrázek 54: Výsledná sousledná 3f impedance před zavedením přímé transformace	64
Obrázek 55: Zapojení netočivé složky v rozvodně před přímou transformací	65
Obrázek 56: Překreslené schéma netočivé složky	65
Obrázek 57: Zjednodušení obvodu 1	65
Obrázek 58: Zjednodušení obvodu 2	66
Obrázek 59: Zjednodušení obvodu 3	66
Obrázek 60: Zjednodušení obvodu 4	66
Obrázek 61: Zjednodušení obvodu 4 – Transfigurace $Z_{T3A(0)}, Z_{4(0)}, Z_{T3C(0)}$	67
Obrázek 62: Zjednodušení obvodu 5	67
Obrázek 63: Zjednodušení obvodu 6 – Transfigurace $Z_{6(0)}, Z_{C(0)}, Z_{S3(0)}$	68
Obrázek 64: Zjednodušení obvodu 7	68
Obrázek 65: Zjednodušení obvodu 8 – Transfigurace $Z_{7(0)}, Z_{T4C(0)}, Z_{F(0)}$	69
Obrázek 66: Zjednodušení obvodu 9	69
Obrázek 67: Zjednodušení obvodu 10	70
Obrázek 68: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu před zavedením přímé transformace ...	70
Obrázek 69: Zapojení rozvodny po přímé transformací	71
Obrázek 70: Překreslené schéma impedancí	71
Obrázek 71: Zjednodušení obvodu 1 – Transfigurace $Z_{A(1)}, Z_{T1(1)}, Z_{T2(1)}$	72
Obrázek 72: Zjednodušení obvodu 2	72
Obrázek 73: Zjednodušení obvodu 3	72
Obrázek 74: Zjednodušení obvodu 4	73
Obrázek 75: Výsledná sousledná 3f zkratová impedance po zavedení přímé transformace ...	73
Obrázek 76: Zapojení netočivé složky v rozvodně po přímé transformací	74
Obrázek 77: Překreslené schéma impedancí	74
Obrázek 78: Zjednodušení obvodu 1	75
Obrázek 79: Zjednodušení obvodu 2	76
Obrázek 80: Zjednodušení obvodu 3 - Transfigurace $Z_{1(0)}, Z_{C(0)}, Z_{T1C(0)}$	76
Obrázek 81: Zjednodušení obvodu 4	77
Obrázek 82: Zjednodušení obvodu 5 - Transfigurace $Z_{4(0)}, Z_{5(0)}, Z_{6(0)}$	77
Obrázek 83: Zjednodušení obvodu 6	78
Obrázek 84: Zjednodušení obvodu 7	78
Obrázek 85: Zjednodušení obvodu 8	78
Obrázek 86: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu po zavedení přímé transformace	78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Napěťový součinitel c podle IEC 60909	23
Tabulka 2: Zadané rázové zkratové výkony nadřazených sítí	34
Tabulka 3: Zadané parametry transformátorů v uzlu S04	34
Tabulka 4: Jmenovitá zkratová odolnost rozvodny	34
Tabulka 5: Zkratový proud a výkon v rozvodně 110kV podle ČSN 33 30 20	80
Tabulka 6: Zkratový proud a výkon v rozvodně 110kV podle ČSN EN 60909	80
Tabulka 7: Zhodnocení rozdílu mezi ČSN 33 30 20 a ČSN EN 60909	80

SEZNAM ZKRATEK

$\mathbf{Z}, \bar{\mathbf{Z}}, \underline{\mathbf{Z}}$	komplexní veličina
U_{nQ}, U_n	jmenovité sdružené efektivní napětí soustavy / zařízení
U_{vz}	vztažné napětí
I	proud
I_k''	počáteční souměrný rázový zkratový proud
S_r	jmenovitý zdánlivý výkon zařízení
S_{kS}''	počáteční souměrný zkratový výkon
R	rezistence
X	reaktance
X_T	synchronní rázová zkratová reaktance
c	napěťový součinitel
u_{kr}	procentní napětí nakrátko transformátoru
u_{krAB}	procentní napětí nakrátko transformátoru mezi stranami A a B
u_{krAC}	procentní napětí nakrátko transformátoru mezi stranami A a C
u_{krBC}	procentní napětí nakrátko transformátoru mezi stranami B a C
t_r	jmenovitý převod transformátoru
f	frekvence
k_T	korekční činitel impedance transformátoru
Z	impedance
Z_K	zkratová impedance zařízení
$\mathbf{Z}_{(1)}$	sousledná impedance zkratového obvodu
$\mathbf{Z}_{(2)}$	zpětná impedance zkratového obvodu
$\mathbf{Z}_{(0)}$	netočivá impedance zkratového obvodu
φ	fázový úhel
i_k	okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu
α	počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy
I_k''	počáteční rázový zkratový proud (efektivní hodnota subtranzitního proudu)
I_k'	počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu
I_k	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu
τ_d''	subtranzitní časová konstanta zkratového proudu
τ_d'	tranzitní časová konstanta zkratového proudu
τ_s	časová konstanta stejnosměrné (aperiodické) složky proudu
i_{ks}	okamžitá hodnota souměrného (střídavého) zkratového proudu
i_{ka}	okamžitá hodnota aperiodického (stejnosměrného) zkratového proudu
i_k	okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu
t	čas
I_{km}	nárazový zkratový proud
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud

1. ÚVOD

V každém elektrickém zařízení je zapotřebí počítat kromě stavů normálních také se stavy poruchovými. Nejvážnější z těchto poruchových stavů je zkrat, jež může především v sítích VVN vést k velkému poškození částí elektrizačních soustav a strojů do nich zapojených.

Zkratem rozumíme chybné vodivé spojení fázových vodičů mezi sebou, mezi fázovými vodiči a středním vodičem nebo se zemí.

Zkrat se projeví náhlým nárůstem proudu nad jmenovitou hodnotu proudu a to proto, že zkrat vyřadí z elektrického obvodu spotřebiče za zkratem, přičemž tyto spotřebiče tvořily většinu odporu původního obvodu.

Zkratové proudy mají dynamické účinky, jež mechanicky namáhají především silové vodiče, přípojnice a podpěrné izolátory, a dále tepelné účinky, jež namáhají izolace vodičů.

Rozeznáváme více druhů zkratů dle vzniku a také několik možných průběhů zkratu.

Je tedy důležité znát poměry v obvodu při zkratu, abychom mohli navrhnout vyhovující jistící prvky soustavy. Zkratům můžeme omezeně předcházet, především však můžeme jejich účinky omezit vhodně dimenzovanými jistícími prvky.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je vyšetřit poměry při třífázovém a jednofázovém zkratu v uzlu S04 v rozvodně Sokolnice 110kV před a po instalaci přímé transformace 400/110kV. Porovnáním těchto poměrů určit, zda vyhoví původní jistící zařízení (výkonové vypínače) i při nových podmínkách. Pokud ne, navrhnout odpovídající postup řešení.

Zároveň je cílem zhodnotit rozdíl mezi původní českou normou ČSN 33 30 20 a normou novou evropskou ČSN EN 60909.

3. PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH

3.1 PŘECHODNÉ JEVY [1]

Příčinou přechodného stavu soustavy jsou nenormální jevy vznikající za provozu přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace (vlivem stárnutí, cizího zavinění, úderem blesku apod.) nebo v ovládní soustavy (chybná ruční nebo automatická manipulace s vypínacími prvky atd.). Důsledkem je přechodný stav soustavy, ve kterém přechodné složky veličin chodu elektrizační soustavy zanikají nejčastěji formou tlumených vlastních oscilací a soustava tak přechází do nového ustáleného stavu. Z hlediska rozdělení přechodných dějů v elektrizační soustavě a volby zjednodušujících předpokladů při jejich řešení je důležité srovnání doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody s periodou proudu se jmenovitým kmitočtem.

Přechodné děje dělíme na:

Pomalé (elektromechanické) – perioda přechodných složek je tak velká, že se v přechodném ději uplatňují i setrvačné hmoty velkých rotačních strojů v soustavě. V elektrické části soustavy je vzhledem k délce periody použito náhrady pomocí soustředných parametrů.

Středně rychlé (elektromagnetické) – perioda přechodných složek je srovnatelná s periodou proudu se jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů se zanedbává a elektrická část se řeší za pomoci soustředných parametrů.

Rychlé – perioda přechodných složek je podstatně menší než u proudu se jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot je také zanedbatelný a elektrická část se řeší pomocí náhradních obvodů s homogenně rozloženými parametry.

Do první skupiny patří přechodné děje související s náhlou změnou zatížení zdrojů, při kterém vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů, která ohrožuje synchronní chod. Příčinou těchto přechodných jevů mohou být změny ve spojení sítě uskutečňované obsluhou nebo automatikami podle provozních požadavků (velikost zatížení, odstavování pro kontrolu a údržbu apod.), porušení izolace v důsledku jejího stárnutí, vzniku nepředpokládaného přepětí (úder blesku), méně často také náhlou změnou výkonů odběrů.

Příčinou elektromagnetických přechodných dějů je zkratová porucha, tj. náhlá změna izolačního odporu mezi fázovými vodiči, nebo mezi fází a středním vodičem či zemí v uzemněné soustavě.

Nejrychlejší přechodné děje vznikají při úderu blesku do některého z prvků elektrizační soustavy nebo do jejich těsné blízkosti, nebo jsou vyvolány spínacími pochody.

Toto rozdělení přechodných jevů podle doby periody přechodných složek veličin chodu má význam pouze z hlediska způsobu řešení – možnosti zjednodušení matematického modelu děje. Dělení nemá smysl z hlediska příčin přechodného děje, protože jedna příčina může způsobit všechny ostatní děje – úder blesku vyvolá nebezpečné přepětí, následnou zkratovou poruchu a elektromechanický přechodný děj.

3.2 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ [1]

Zkratem (zkratovou poruchou) v elektrizační soustavě rozumíme elektromagnetický přechodný děj, který je časově omezen okamžikem náhlého zmenšení impedance mezi fázovými vodiči, případně mezi fází a středním vodičem nebo zemí v některé části elektrizační soustavy (v místě poruchy) a okamžikem odpojení zdrojů od místa poruchy.

Příčinou chybného vodivého spojení vodičů může být:

- chybná manipulace
- mechanické poškození izolace, např. přetržení vodiče venkovního vedení, poškození kabelu při zemních pracích
- přirozené znehodnocování izolace
- poškození izolace v důsledku zvýšeného elektrického namáhání při úderu blesku nebo při spínacích pochodech (přepětím)

Zmenšení impedance má za následek zvýšení proudu, který protéká mezi zdrojem a místem poruchy. Tento proud ohrožuje zařízení elektrizační soustavy svými dynamickými a tepelnými účinky.

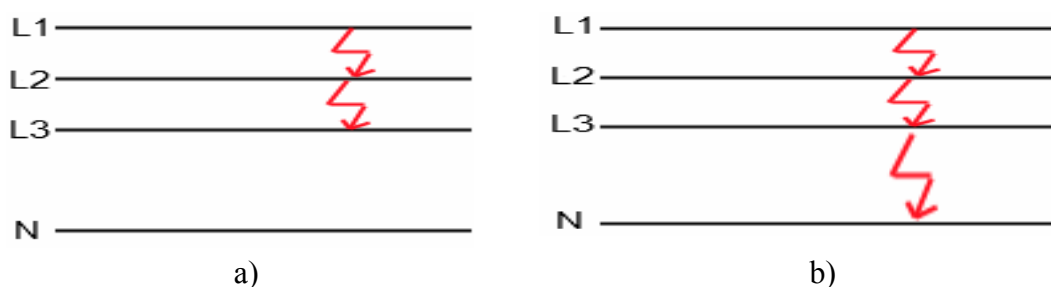
Podle přechodového odporu v místě poruchy mezi fázovými vodiči, středním vodičem nebo zemí rozeznáváme:

- **zkraty dokonalé** (kovové), se zanedbatelným přechodovým odporem (dokonalý styk kovových vodičů)
- **zkraty nedokonalé** s hořícím obloukem nebo jinak nedokonalým stykem vodičů, které ohrožují místo poruchy a jejího okolí požárem

Dokonalé zkraty způsobují největší silové a tepelné namáhání prvků elektrizační soustavy a protože je nelze vyloučit, jsou rozhodující pro dimenzování.

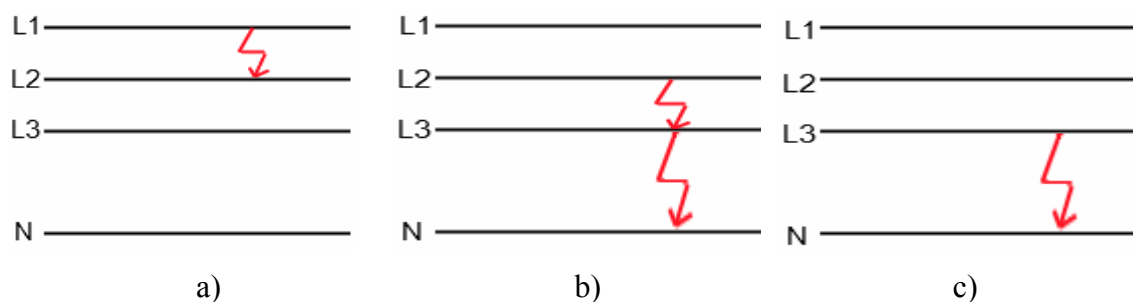
Podle způsobu zatěžování třífázových zdrojů při zkratech rozeznáváme:

- **zkraty souměrné**
 - o třífázové L1-L2-L3 (Obr. 1 a)
 - o třífázové zemní L1-L2-L3-N (Obr. 1 b)
- **zkraty nesouměrné**
 - o dvoufázové L1-L2 (Obr. 2 a)
 - o dvoufázové zemní L1-L2-N (Obr. 2 b)
 - o jednofázové L1-N (Obr. 2 c)



Obrázek 1: Druhy souměrných zkratů [2]

3. PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH



Obrázek 2: Druhy nesouměrných zkratů [2]

Doba trvání zkratové poruchy závisí na druhu vypínacího zařízení nebo automatiky určené pro přerušení zkratového proudu. Nejkratší je, pokud užijeme pojistku nebo jistič s magnetickým zhášením oblouku. V těchto případech bývá menší než 0,1s a závisí na velikosti zkratového proudu. U ostatních vypínacích zařízení a automatik je obvykle delší než 0,2s a může být i několik sekund. Vypínací automatiky mohou mít dobu vypnutí nezávislou na velikosti proudu (libovolně volitelnou). Těto možnosti se využívá k odpojení co možná nejmenší části elektrizační soustavy při poruše (selektivita).

3.3 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU [1]

Náhlá změna impedance na svorkách zdrojů při zkratu má za následek přechodný děj ve všech prvcích elektrizační soustavy. Velkým zkratovým proudem se poruší rovnováha mezi elektrickým a magnetickým polem v prostoru elektrizační soustavy a do rovnovážného stavu přechází soustava pomocí přechodných (zanikajících) složek proudu a napětí s vlastní periodou. Pro stanovení časového průběhu napětí a proudu při zkratu se užívá několik zjednodušení – zanedbáme příčné admitance prvků elektrizační soustavy včetně odběrů. Vyloučí se tak vliv elektrického pole a přechodné složky proudu a napětí mají frekvenci zdrojů nebo jsou aperiodické. Rozložení magnetického pole v náhradním obvodu bez příčných admitancí a odběrů se proti stavu před zkratem změní. Tato změna je po dobu zkratu spojitá. Při stálém buzení synchronních zdrojů zkratového proudu se vlivem reakce kotvy zmenšuje energie magnetického pole v nich.

Energie v ostatních pasivních prvcích elektrizační soustavy se zvětšuje v důsledku zvětšujícího se proudu. V náhradním obvodu se pomocí přechodných složek proudu transformuje přebytek energie magnetických polí ve zdrojích do ostatních prvků náhradního obvodu. Kdyby nedošlo k přerušení zkratového proudu, trval by přechodný děj až do zániku přechodných složek a vzniku nového rovnovážného stavu se stejnou celkovou hodnotou energie magnetického pole v prvcích náhradního obvodu, avšak s rozložením, které odpovídá ustálenému zkratovému proudu.

Pokud uvažujeme jako zjednodušující předpoklady stálé buzení generátorů a prvky elektrizační soustavy nahradíme pouze podélnou impedancí induktivního charakteru, bude okamžitá hodnota zkratového proudu neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které zanikají exponenciálně.

3. PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH

Zkratový proud poté určíme podle vztahu: [1]

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} = i_{ks} + i_{ka} \quad (1)$$

kde α počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy ($t=0$), který je mírou okamžité hodnoty napětí u_0 na začátku poruchy:

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha), t = 0 : u_0 = \sqrt{2}U \sin \alpha$$

φ_k je úhel impedance obvodu zkratového proudu

I_k'' počáteční rázový zkratový proud (efektivní hodnota subtranzitního proudu)

I_k' počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu

I_k efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu

τ_d'' subtranzitní časová konstanta zkratového proudu

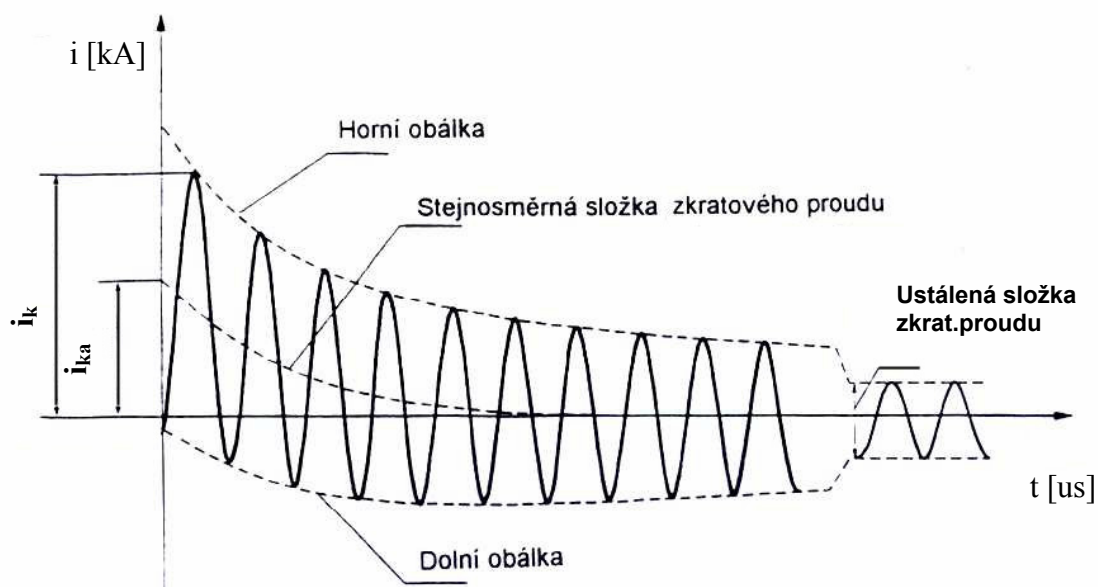
τ_d' tranzitní časová konstanta zkratového proudu

τ_s časová konstanta stejnosměrné (aperiodické) složky proudu

i_{ks} okamžitá hodnota souměrného (střídavého) zkratového proudu

i_{ka} okamžitá hodnota aperiodického (stejnosměrného) zkratového proudu

i_k okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu



Obrázek 3: Průběh nesouměrného zkratového proudu (elektricky blízký zkrat) [3]

Dále hovoříme o elektricky blízkém a vzdáleném zkratu (vzhledem ke generátoru), kdy při vzdáleném zkratu je velikost souměrné složky zkratu konstantní, zatímco u blízkého je souměrná složka tlumena dle obrázku 3. Elektricky blízký zkrat je pro obvod horší.

Pro naše výpočty není třeba se tímto rozdělením dále zabývat.

3.4 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU [1], [3]

Pro dimenzování zařízení elektrizačních soustav a nastavení jejich ochran nepotřebujeme znát celý časový průběh zkratového proudu $i_k(t)$, ale pouze jeho tzv. charakteristické hodnoty [1]:

- počáteční rázový zkratový proud I_k''
- nárazový zkratový proud I_{km}
- vypínací zkratový proud I_{vyp} a jeho stejnosměrnou složku I_{avyp}
- ekvivalentní oteplovací proud I_{ke}
- ustálený zkratový proud I_{ku}
- doba trvání zkratu t_k

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, určí se podle vztahu (třífázový a jednofázový):

$${}^{(3)}I_k'' = k_1 \frac{c \cdot U_{vz}}{\sqrt{3} Z_k} \quad (2)$$

$${}^{(1)}I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_{vz}}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} \quad (3)$$

kde k_1 součinitel uvedený pro různé druhy zkratů dle normy (pro 3-fázový zkrat $k=1$)
 U_{vz} sdružené vztahné napětí místa zkratu. Na toto napětí je přepočten celý obvod.
 Z_k celková vypočtená impedance (sousedná, zpětná a netočivá složka), jejíž výpočet je proveden postupným zjednodušováním dle normy
 c napěťový součinitel zahrnující vnitřní napětí zdrojů podle normy, viz Tab. 1
 $Z_{(1),(2),(0)}$ impedance prvků souměrné složkové soustavy

Nárazový zkratový proud I_{km} je největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t=0,01s$ po vzniku zkratu. Používá se pro kontrolu silových účinků zkratového proudu, protože tyto účinky jsou největší právě v okamžiku, kdy dosáhne zkratový proud své první amplitudy.

Při praktických výpočtech se nárazový proud určuje z počátečního rázového proudu I_k'' podle vztahu:

$$I_{km} = K \sqrt{2} I_k'' \quad (4)$$

kde K součinitel nárazového zkratového proudu udaný normou

3. PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu t_k vyvine při průchodu odporem R stejné množství tepla Q jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou.

$$Q = R \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = R I_{ke}^2 \cdot t^2, \quad (5)$$

potom

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (6)$$

Ekvivalentní oteplovací proud se používá pro kontrolu tepelných účinků zkratového proudu. Při praktických výpočtech se stanoví z počátečního rázového proudu I_k'' pomocí koeficientu k_e , který je tabelován v normě pro různá místa a doby trvání zkratu.

$$I_{ke} = k_e I_k'' \quad (7)$$

Ustálený zkratový proud I_k je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který obvodem teče po odeznění přechodných jevů.

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V (IEC 60038, tabulka I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

1) $c_{max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.
2) Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max} U_n = U_m$ nebo $c_{min} U_n = 0,90 \times U_m$.
3) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.
4) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

Tabulka 1: Napěťový součinitel c podle IEC 60909

4. VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ

4.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PODMÍNKY VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ [1]

Pro jednodušší výpočet zkratů v rozsáhlých sítích je třeba zavést následující zjednodušující podmínky:

- za zdroje zkratového proudu uvažujeme pouze generátory o výkonu vyšším než 0,5MVA
- zkrat uvažujeme během jmenovitého zatížení generátorů
- impedance odběrů zanedbáme
- příčné admitance všech prvků soustavy zanedbáme (téměř všechny zkratový proud se uzavírá přes podélnou impedanci)
- uvažujeme lineární charakteristiku podélných impedancí
- neměnnost parametrů prvků během zkratu
- charakteristické hodnoty zkratového proudu uvažujeme při nejhorších možných podmínkách (nejvyšší stejnosměrná složka)
- uvažujeme dokonale kovový zkrat
- během zkratu se nemění jeho druh (jednofázový zůstává jednofázovým, třífázový třífázovým)

Takto zjednodušené výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků i přesto, že pro reálné soustavy neodpovídají plně skutečnosti.

Pro výpočet nesouměrných i souměrných zkratů je vhodné použít metodu souměrných složek.

Pro výpočet v různých napěťových hladinách je třeba pro zjištění skutečných zkratových proudů přepočíst velikost zkratu na referenční (vztažné) napětí U_{vz} , obvykle v místě zkratu.

4.2 OBECNÁ METODA VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ [1]

Celkovou impedanci obvodu Z_k můžeme určit postupným zjednodušováním obvodu. Pokud však počítáme složité sítě, nemůžeme dostatečně zobecnit postup, výpočet by tedy byl velmi pracný. Nabízí se nám možnost výpočtu založená na Théveninově větě a metodě uzlových napětí. Metodu lze aplikovat jak ve skutečných tak i poměrných hodnotách.

Uvážíme dokonalé zkratové spojení k-tého uzlu se zemí. V jednofázovém náhradním schématu tuto větev reprezentujeme nulovou impedancí. Zjišťujeme pouze proud touto větví – zkratový proud. Aplikujeme Théveninovu větu, obvod nahradíme jedním napěťovým zdrojem o napětí U_0 a k němu do série zapojíme náhradní impedanci Z_k a impedanci zkratové spojky Z_{zkr} . Pro případ dokonalého zkratu je $Z_{zkr} = 0$, můžeme tedy přímo z Ohmova zákona určit proud tekoucí zkratovým obvodem. Napětí U_0 v k-tém uzlu před zkratem se vypočte jako $U_0 \cong c \cdot U_\nu / \sqrt{3}$. Impedanci Z_k vypočteme z hodnot impedancí před zkratem mezi k-tým

4. VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ

uzlem a zemí při zkratovaných napěťových zdrojích. Výsledný obvod popíšeme metodou uzlových napětí:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \mathbf{Y}_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{Y}_{k1} & \cdot & \mathbf{Y}_{kk} & \cdot & \mathbf{Y}_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{Y}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \mathbf{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \cdot \\ \mathbf{U}_k \\ \cdot \\ \mathbf{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \mathbf{I}_k \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Inverzí admitanční matice (8) získáme matici impedanční (9), v níž vektor neznámých určíme jako:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \cdot \\ \mathbf{U}_k \\ \cdot \\ \mathbf{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \mathbf{Z}_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{Z}_{k1} & \cdot & \mathbf{Z}_{kk} & \cdot & \mathbf{Z}_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{Z}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \mathbf{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \mathbf{I}_k \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Odtud plyne, že

$$\underline{\mathbf{Z}}_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (10)$$

Nyní již můžeme určit hodnotu počátečních rázových proudů ve všech uzlech sítě. Musíme ovšem uvážit, že hodnoty \mathbf{Z}_k jsou přepočteny na vztažné napětí U_{vz} , proto pro získání skutečných hodnot zkratových proudů musíme provést zpětný přepočet na danou napěťovou hladinu.

4.3 EKVIVALENTNÍ NAPĚŤOVÝ ZDROJ V MÍSTĚ ZKRATU [3]

Tato metoda výpočtu je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Tento zdroj je jediným zdrojem napětí v soustavě. Všechny síťové napáječe, synchronní i asynchronní stroje jsou nahrazovány svými vnitřními impedancemi.

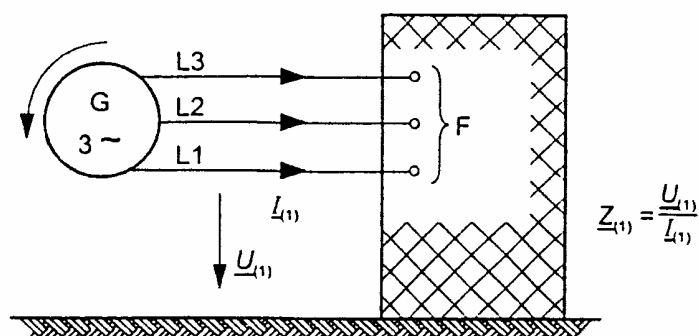
Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj.

4.4 POUŽITÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK [3]

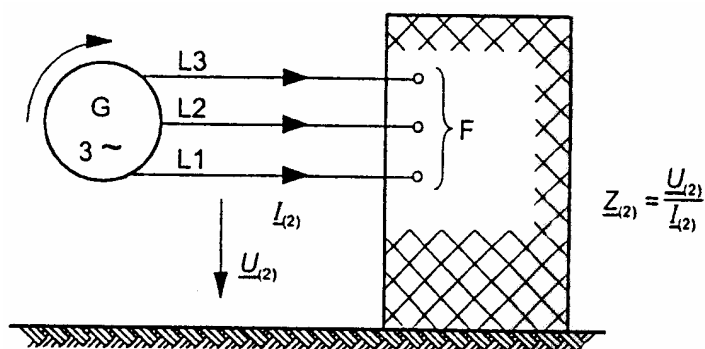
Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných i nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládáme, že elektrická zařízení mají symetrickou strukturu (např. transpozice venkovních vedení).

Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy $\underline{Z}_{(1)}$ (Obr. 4)
- proud zpětné složkové soustavy $\underline{Z}_{(2)}$ (Obr. 5)
- proud netočivé složkové soustavy $\underline{Z}_{(0)}$ (Obr. 6)

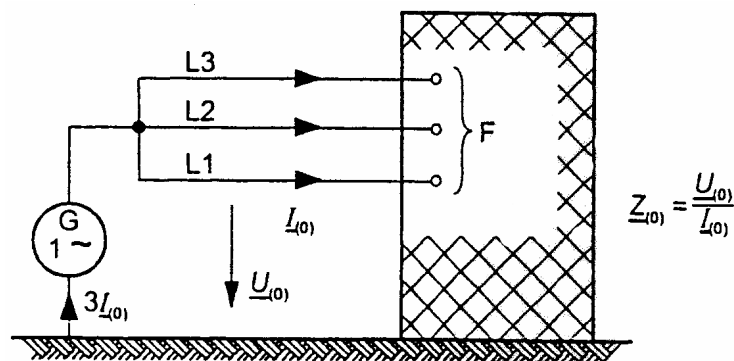


Obrázek 4: Sousledná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$ v místě zkratu F



Obrázek 5: Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$ v místě zkratu F

4. VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ



Obrázek 6: Netočivá složka zkratové impedance $Z_{(0)}$ v místě zkratu F

Každá z těchto souměrných složek má svoji vlastní impedanci. Musíme rozlišovat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancemi každého elektrického zařízení.

Souslednou zkratovou impedanci $Z_{(1)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku 4 a to tak, že souměrnou soustavu napětí sousledné složky v odpovídajícím pořadí fází (kladném) přiložíme do místa zkratu F, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

Zpětnou zkratovou impedanci $Z_{(2)}$ v místě zkratu F určíme dle obrázku 5 a to tak, že souměrnou soustavu napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí fází (záporném) přiložíme do místa zkratu F.

Netočivou zkratovou impedanci $Z_{(0)}$ v místě zkratu F určíme dle obrázku 6 a to tak, že přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením (například zemnicí soustavou, středním vodičem, stíněním kabelu atp.).

Hodnoty sousledné a zpětné impedance se mohou lišit pouze v případě točivých strojů. **Pro výpočet elektricky vzdálených zkratů uvažujeme $Z_{(1)} = Z_{(2)}$.**

4.5 VÝPOČET VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH [1]

Obvod zkratového proud obsahuje téměř vždy transformátory a tedy i více napěťových hladin. Podélné impedance prvků zkratového obvodu (generátorů, transformátorů, sítí a vedení) je nutné přepočítat na zvolenou vztažnou napěťovou hladinu se vztažným napětím U_{vz} . Za vztažnou napěťovou hladinu se obvykle volí ta část elektrizační soustavy, ve které je uvažovaná porucha. Přepočet se pak provede pomocí převodů transformátorů mezi místem poruchy a místem s přepočítávanou impedancí. Převod transformátorů se vyjadřuje přibližně pomocí jmenovitých napětí sítí. Podélné impedance prvků zkratového obvodu se v tomto případě přepočítávají do náhradního zkratového obvodu pomocí druhé mocniny převodu mezi základním obvodem s napětím U_{vz} a obvodem s napětím U_n , ve kterém se nachází přepočítávaná impedance (transformačním převodem t_r , kterým jsou tyto napěťové hladiny vázány).

5. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

5.1 VŠEOBECNĚ [3]

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních a kabelových vedení, reaktorů a podobného zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance rovny $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a jedním zpětným vedením (zemí, středním vodičem, stíněním). Zpětným vedením tak protéká trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů, transformátorů, a elektrárenských bloků se musí přepočíst impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_S , pokud se zkratové proudy počítají metodou ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu.

5.2 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE [3]

Často se stává, že při výpočtech zkratových poměrů neznáme detailní konfiguraci sítě, a proto příspěvek takovéto sítě modelujeme pomocí náhradní impedance vypočtené ze jmenovitého napětí dané sítě U_{nQ} a počátečního rázového zkratového proudu I_k'' nebo výkonu S_{ks}'' dané sítě.

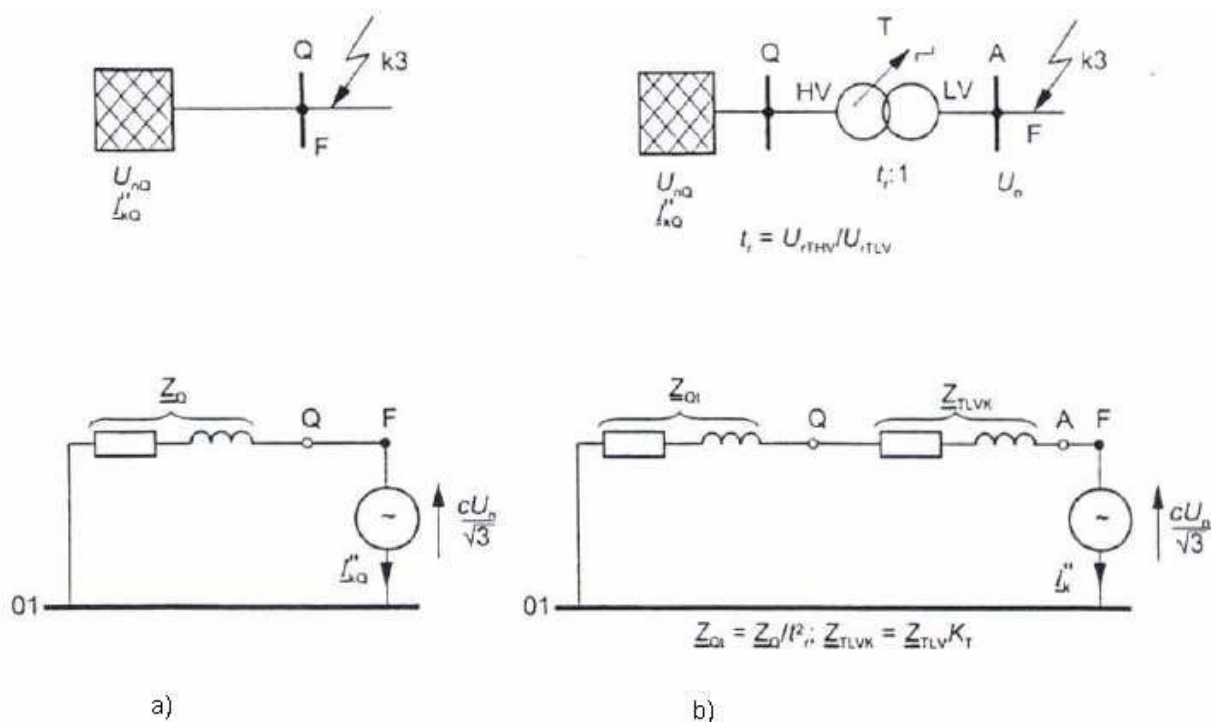
Je-li trojfázový zkrat napájen ze sítě (Obr.7a), u které známe pouze počáteční rázový zkratový proud I_k'' nebo počáteční rázový zkratový výkon S_{ks}'' v bodě napáječe Q, pak ekvivalentní impedance Z_Q (sousledná zkratová impedance) sítě v bodě připojení napáječe Q se určí:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_k''} \quad \text{nebo} \quad Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{ks}''} \quad (11)$$

Netočivá impedance sítě se určí ze vzorce [7]:

$$Z_{S(0)} = c \cdot U_{nQ}^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{k1}''} - \frac{2}{S_{k3}''} \right) \quad (12)$$

5. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ



Obrázek 7: Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma síťových napáječů

- a) Bez transformátoru
- b) S transformátorem

Je-li zkrat napájen transformátorem (Obr. 7b) ze sítě VN nebo VVN/ZVN, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' nebo počáteční rázový zkratový výkon S_{ks}'' v bodě připojení Q, pak lze souslednou ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou na stranu transformátoru s nižším napětím určit jako: [3]

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_k''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad \text{nebo} \quad Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{ks}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (13)$$

kde U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v bodě připojení Q
 S_{ks}'' počáteční souměrný rázový zkratový výkon v bodě připojení napáječe Q
 I_k'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q
 c napětíový součinitel zahrnující vnitřní napětí zdrojů podle normy
 t_r jmenovitý převod transformátoru

V případě napáječů se jmenovitým napětím nad 35kV napájených z venkovních vedení je možné ekvivalentní impedanci Z_Q považovat za reaktanci, tj. $Z_Q = 0 + jX_Q$. V jiných případech, jestli není pro rezistance R_Q síťových napáječů známa žádná přesná hodnota, je možné dosadit $R_Q = 0,1X_Q$, kde $X_Q = 0,995Z_Q$.

5.3 TRANSFORMÁTORY [3]

5.3.1 DVOUVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY

Sousledné zkratové impedance dvouvinuťových transformátorů $Z_T = R_T + jX_T$ s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich je možné vypočítat ze jmenovitých údajů transformátorů tímto způsobem:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (14)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (15)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (16)$$

kde	U_{rT}	jmenovité napětí transformátoru na straně VN nebo NN
	I_{rT}	jmenovitý proud transformátoru na straně VN nebo NN
	S_{rT}	jmenovitý výkon transformátoru
	P_{krT}	jmenovité ztráty transformátoru nakrátko
	u_{kr}	jmenovité napětí nakrátko v procentech
	u_{Rr}	činná složka jmenovitého napětí transformátoru nakrátko v procentech

Činnou složku obvykle počítáme ze ztrát nakrátko (viz rovnice 15). U velkých transformátorů můžeme ohmický odpor zanedbat a za jejich impedanci považovat pouze jejich indukční reaktanci X_T . Zanedbat jej nesmíme pouze pokud počítáme nárazový zkratový proud I_{km} .

5.3.2 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY

V případě trojvinuťových transformátorů lze sousledné zkratové impedance Z_A , Z_B , Z_C dle obrázku 8 vypočítat pomocí tří zkratových impedancí vztažených na stranu A transformátoru:

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTAB}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (17)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTAC}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (18)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTBC}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (19)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (20)$$

5. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

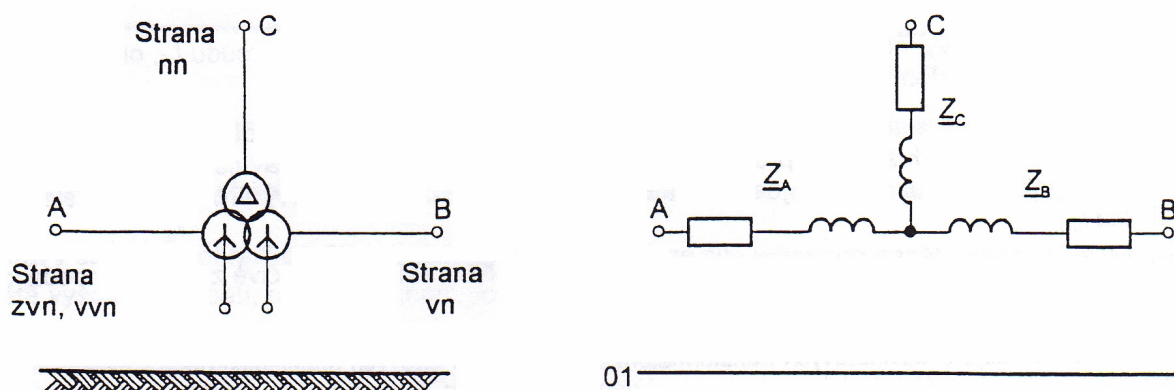
pomocí vzorců

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (21)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (22)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (23)$$

kde	U_{rTA}	jmenovité napětí strany A
	S_{rTAB}	jmenovitý výkon mezi stranami A a B
	S_{rTAC}	jmenovitý výkon mezi stranami A a C
	S_{rTBC}	jmenovitý výkon mezi stranami B a C
	u_{RrAB}, u_{XrAB}	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami A a B uvedené v procentech
	u_{RrAC}, u_{XrAC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami A a C uvedené v procentech
	u_{RrBC}, u_{XrBC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami B a C uvedené v procentech



Obrázek 8: Trojvinut'ový transformátor – označení zapojení vinutí a náhradní schéma

5.3.3 KOREKČNÍ ČINITELÉ IMPEDANCÍ 2 A 3 VINUŤOVÝCH TRAF [3]

S ohledem na normu EN60909 je třeba pro dvou i trojvinut'ové transformátory zavést korekční činitel K_T pro impedance transformátoru:

$$K_{Tx} = 0,95 \frac{c_{MAX}}{1 + 0,6x_{Tx}} \quad (24)$$

kde c napěťový součinitel s ohledem na vnitřní napětí zdroje
 x_{Tx} indukční reaktance strany transformátoru, vypočte se z rovnice:

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) \quad (25)$$

5.4 UVEDENÍ IMPEDANCÍ ZAŘÍZENÍ NA VZTAŽNOU HLADINU NAPĚTÍ

Pro korektní výpočet zkratů musí všechny impedance obvodu být přepočteny na společnou napěťovou hladinu, nazývanou vztažná hladina (vztažné napětí). Tuto hladinu obvykle volíme tak, že místo zkratu označíme jako hladinu referenční. Potom tedy vztažné napětí se rovná napětí v místě zkratu.

Přepočet impedancí všech prvků soustavy provádíme stejně, a to dle vzorce:

$$Z_{vz} = Z \cdot \left(\frac{U_{vz}}{U_{nQ}} \right)^2 \quad (26)$$

kde Z_{vz} impedance zařízení přepočtená na vztažné napětí
 Z původní vypočtená impedance zařízení
 U_{vz} vztažné napětí
 U_{nQ} jmenovité napětí zařízení

5.5 VÝPOČET DLE NORMY ČSN 33 30 20

Původní česká norma ČSN 33 30 20, jež platila do roku 2002, uvažuje výpočet impedancí zařízení stejně jako norma nová ČSN EN60909 s tím rozdílem, že v původní normě nebyly uvažovány korekční součinitele 2 a 3 vinut'ových transformátorů.

Výpočet sousledné zkratové impedance transformátoru se vypočte ze vzorce (17), (18), (19), a výpočet netočivé impedance transformátoru potom ze vztahu (21),(22),(23).

Výpočet impedancí nadřazených sítí se provede dle vzorců (11) a (12).

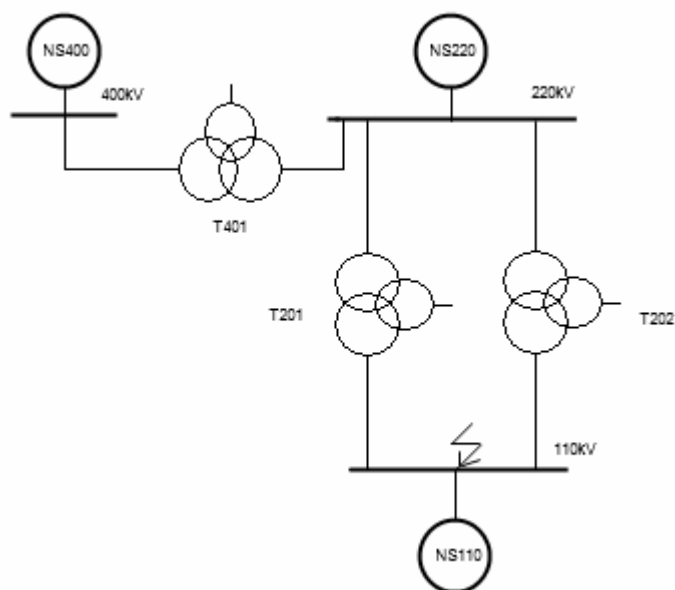
Výpočet zkratových proudů a výkonů se provede stejně jako v normě EN60909, a to dle vzorců (2) a (3).

ČSN 33 30 20 umožňuje výpočet zkratů s užitím jak nominálního převodu transformátorů, tak také s fiktivním převodem, jenž nerespektuje skutečné převody transformátorů.

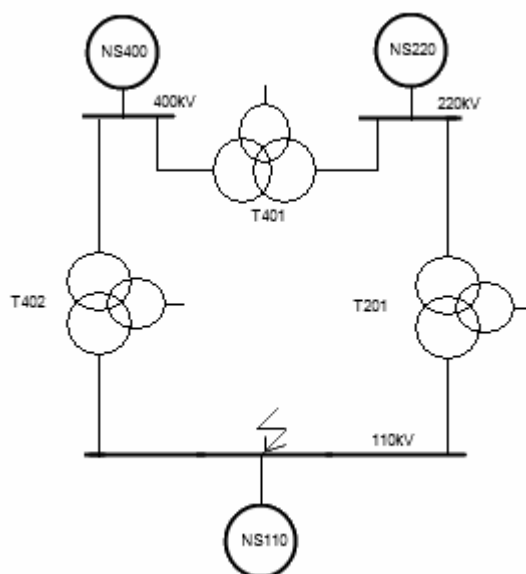
Výpočet s fiktivním převodem transformátorů je považován za informativní a proto jej v této práci neuvažují.

6. VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET ZKRATU V ROZVODNĚ 110kV
SOKOLNICE V UZLU S04

**6. VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET ZKRATU
V ROZVODNĚ 110kV SOKOLNICE V UZLU S04**



Obrázek 9: Zapojení rozvodny před zavedením přímé transformace



Obrázek 10: Zapojení rozvodny po zavedení přímé transformace

6. VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET ZKRATU V ROZVODNĚ 110kV
SOKOLNICE V UZLU S04

soustava	400kV	220kV	110kV
Sk3'' (MVA)	17344,0	2407,7	1000,0
Sk1'' (MVA)	14095,5	1818,6	1290,0

Tabulka 2: Zadané rázové zkratové výkony nadřazených sítí

parametr	T401	T402	T201, T202
SnT (MVA)	400	350	200
tr (-)	400/231/34	400/121/10,5	231/121/10,5
ukrAB (%)	9,8	14,0	9,3
ukrAC (%)	44,3	35,0	30,0
ukrBC (%)	34,0	20,0	18,0
spojení vinutí	Yn/Yn/D	Yn/Yn/D	Yn/Yn/D

Tabulka 3: Zadané parametry transformátorů v uzlu S04

rozvodna	jmenovitá odolnost (MVA)
110kV	3500
220kV	10000
400kV	25000

Tabulka 4: Jmenovitá zkratová odolnost rozvodny

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV SOKOLNICE DLE ČSN 33 30 20

7.1 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ZAŘÍZENÍ ROZVODNY

7.1.1. SOUSTAVA 400kV

Sousledná a zpětná složka

$$\bar{Z}_{S1(1)} = \bar{Z}_{S1(2)} = \frac{c \cdot U_{n1}^2}{S''_{k31}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{1,1 \cdot (400 \cdot 10^3)^2}{17344 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400}\right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 0,9286 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S1(0)} &= c \cdot U_{n2}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k11}} - \frac{2}{S''_{k31}} \right) \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \\ &= 1,1 \cdot (400 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{14092,5 \cdot 10^6} - \frac{2}{17344 \cdot 10^6} \right) \cdot \left(\frac{231}{400}\right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 1,5713 \Omega \end{aligned}$$

7.1.2 SOUSTAVA 220kV

Sousledná a zpětná složka

$$\bar{Z}_{S2(1)} = \bar{Z}_{S2(2)} = \frac{c \cdot U_{n2}^2}{S''_{k32}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{1,1 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{2407,7 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 6,0671 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S2(0)} &= c \cdot U_{n2}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k12}} - \frac{2}{S''_{k32}} \right) \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \\ &= 1,1 \cdot (220 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{1818,6 \cdot 10^6} - \frac{2}{2407,7 \cdot 10^6} \right) \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 11,9631 \Omega \end{aligned}$$

7.1.3 SOUSTAVA 110kV*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{S3(1)} = \bar{Z}_{S3(2)} = \frac{c \cdot U_{n3}^2}{S''_{k33}} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1000 \cdot 10^6} = 13,3100 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S3(0)} &= c \cdot U_{n3}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k13}} - \frac{2}{S''_{k33}} \right) = \\ &= 1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{1290 \cdot 10^6} - \frac{2}{1000 \cdot 10^6} \right) = 4,3335 \Omega \end{aligned}$$

7.1.4 TRANSFORMÁTOR T401*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{T1(1)} = \bar{Z}_{T1(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{9,75}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 3,5687 \Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{44,3}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 16,2149 \Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{34}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 12,4449 \Omega$$

Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T1A(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2} (3,5687 + 16,2149 - 12,4449) = 3,6694 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1B(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2} (12,4449 + 3,5687 - 16,2149) = -0,1007 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1C(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2} (16,2149 + 12,4449 - 3,5687) = 12,5455 \Omega$$

7.1.5 TRANSFORMÁTOR T402*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{T2(1)} = \bar{Z}_{T2(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{14}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 5,8564\Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{35}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 14,6410\Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{20}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 8,3663\Omega$$

Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T2A(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2}(5,8564 + 14,6410 - 8,3663) = 6,0656\Omega$$

$$\bar{Z}_{T2B(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2}(8,3663 + 5,8564 - 14,6410) = -0,2092\Omega$$

$$\bar{Z}_{T2C(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2}(14,6410 + 8,3663 - 5,8564) = 8,5754\Omega$$

7.1.6 TRANSFORMÁTOR T201, T202*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{T3,4(1)} = \bar{Z}_{T3,4(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{9,3}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 6,8081\Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{30}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 21,9615\Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{18}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 13,1769\Omega$$

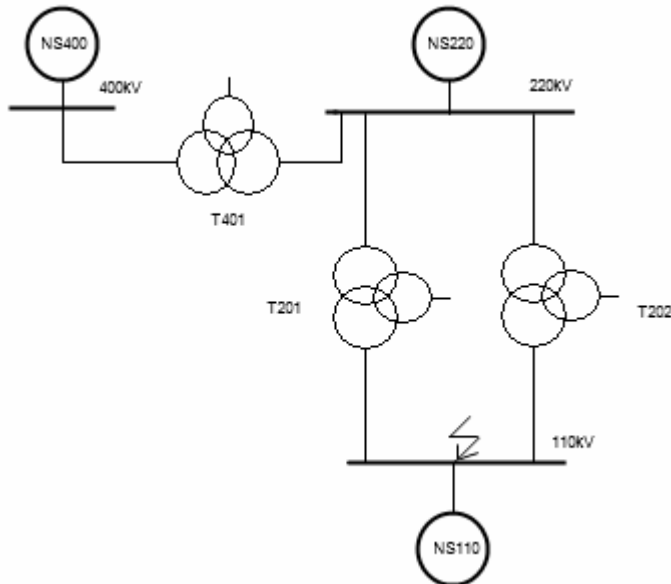
Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T3,4A(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2}(6,8081 + 21,9615 - 13,1769) = 7,7963\Omega$$

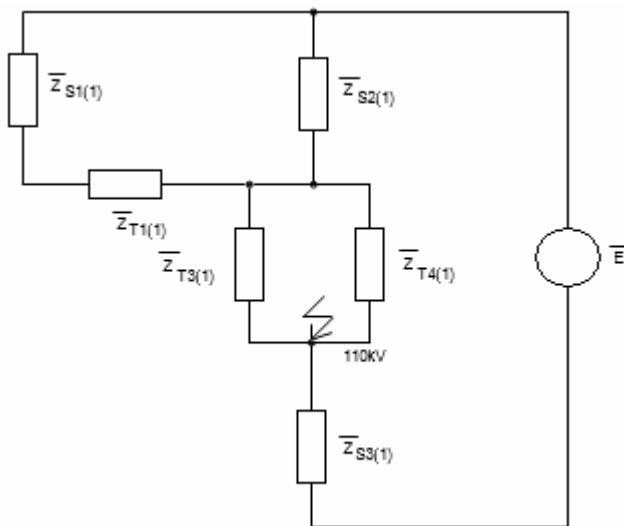
$$\bar{Z}_{T3,4B(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2}(13,1769 + 6,8081 - 21,9615) = -0,9883\Omega$$

$$\bar{Z}_{T3,4C(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2}(21,9615 + 13,1769 - 6,8081) = 14,1652\Omega$$

7.2 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE

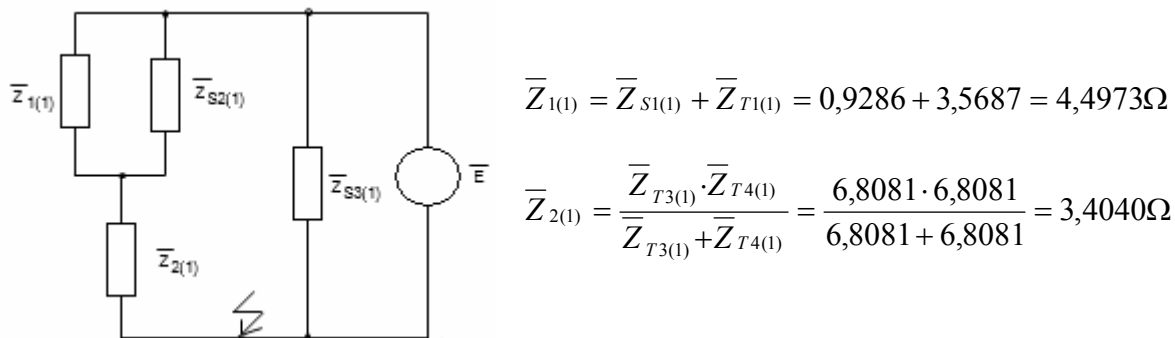


Obrázek 11: Zapojení rozvodny před přímou transformací

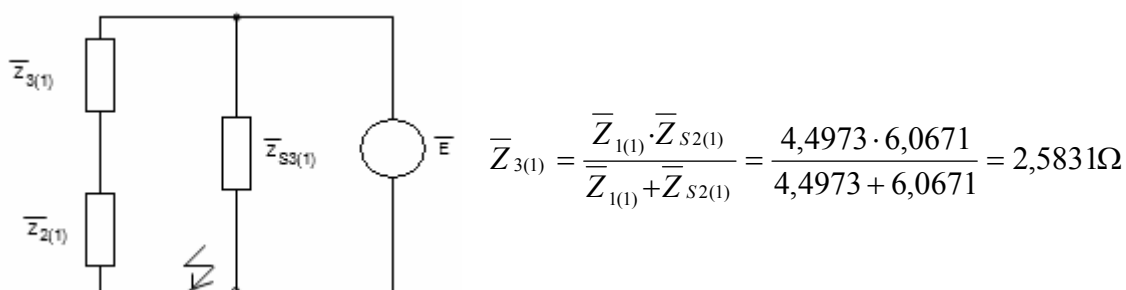


Obrázek 12: Překreslené schéma sousledné složky

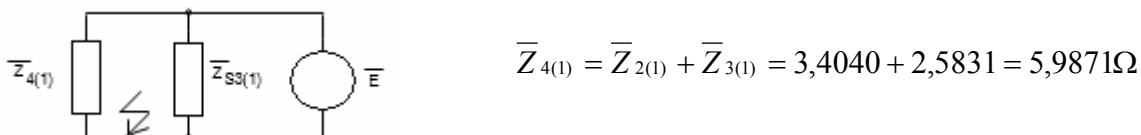
7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



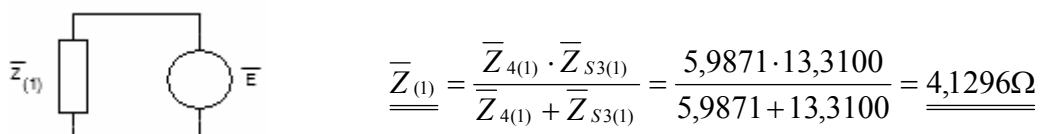
Obrázek 13: Zjednodušování obvodu 1



Obrázek 14: Zjednodušování obvodu 2

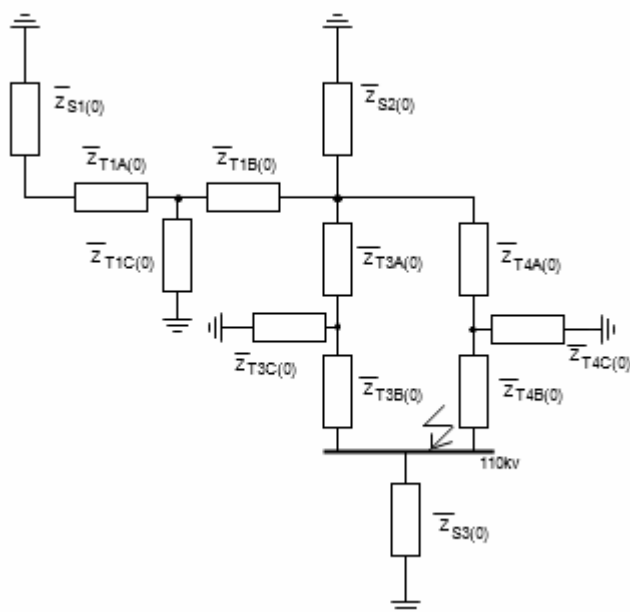


Obrázek 15: Zjednodušování obvodu 3

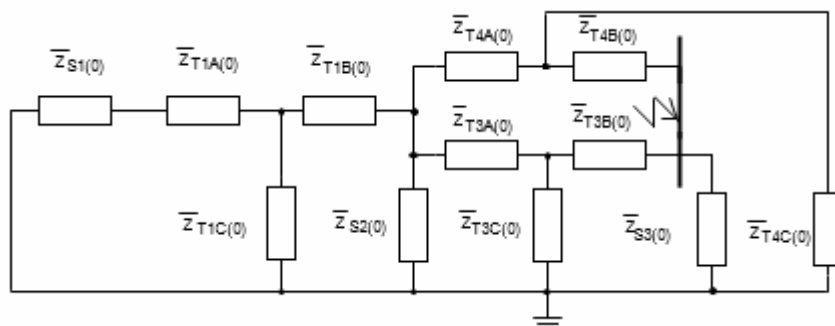


Obrázek 16: Výsledná sousledná 3f impedance před zavedením přímé transformace

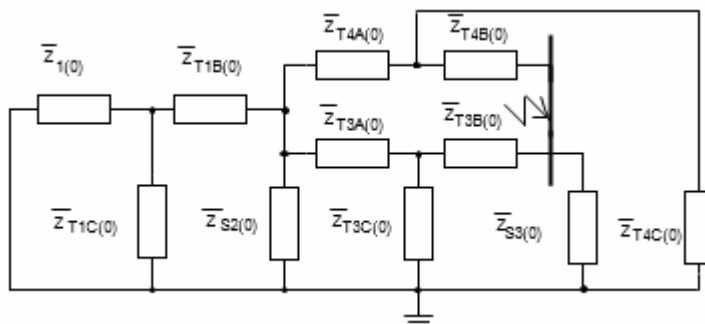
7.3 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE



Obrázek 17: Zapojení netočivé složky v rozvodně před přímou transformací



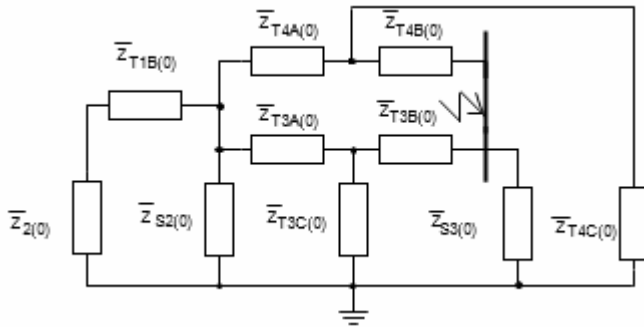
Obrázek 18: Překreslené schéma netočivé složky



$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1(0)} &= \bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T1A(0)} = \\ &= 1,5713 + 3,6694 = \\ &= 5,2407\Omega \end{aligned}$$

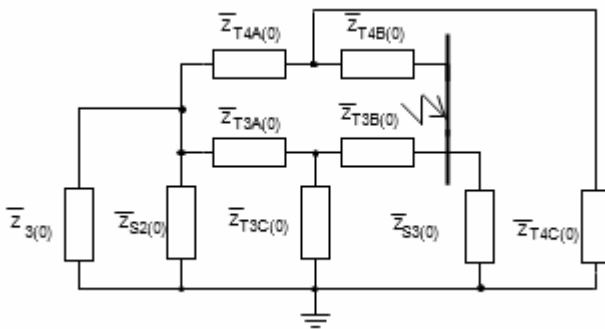
Obrázek 19: Zjednodušování obvodu 1

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



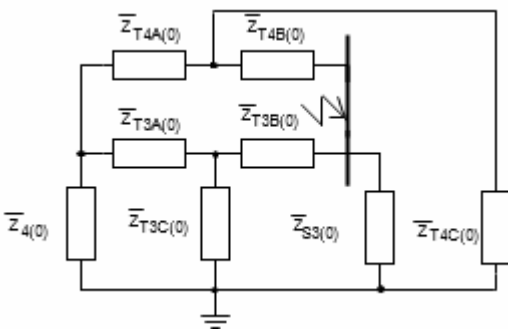
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2(0)} &= \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \\ &= \frac{5,2407 \cdot 12,5455}{5,2407 + 12,5455} = \\ &= 3,6965\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 20: Zjednodušení obvodu 2



$$\begin{aligned}\bar{Z}_{3(0)} &= \bar{Z}_{2(0)} + \bar{Z}_{T1B(0)} = \\ &= 3,6965 - 0,1007 = \\ &= 3,5959\Omega\end{aligned}$$

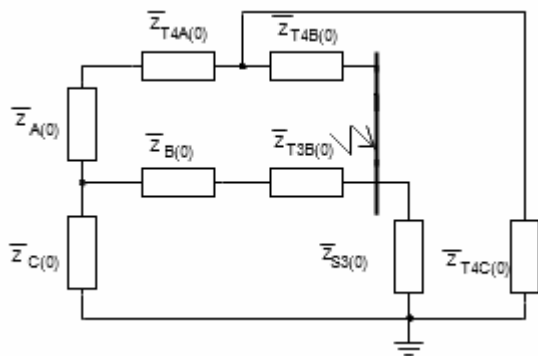
Obrázek 21: Zjednodušení obvodu 3



$$\begin{aligned}\bar{Z}_{4(0)} &= \frac{\bar{Z}_{3(0)} \cdot \bar{Z}_{S2(0)}}{\bar{Z}_{3(0)} + \bar{Z}_{S2(0)}} = \\ &= \frac{3,5959 \cdot 11,9631}{3,5959 + 11,9631} = \\ &= 2,7648\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 22: Zjednodušení obvodu 4

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20

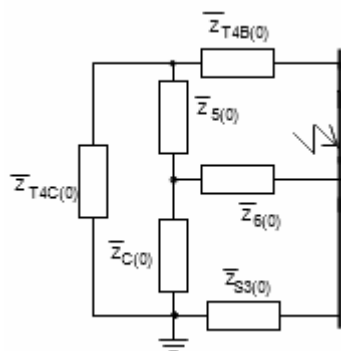


Obrázek 23: Zjednodušování obvodu 4 – Transfigurace $\bar{Z}_{T3A(0)}$, $\bar{Z}_{4(0)}$, $\bar{Z}_{T3C(0)}$

$$\bar{Z}_{A(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{T3A(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{2,7648 \cdot 7,7963}{2,7648 + 7,7963 + 14,1652} = 0,8718\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(0)} = \frac{\bar{Z}_{T3A(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{7,7963 \cdot 14,1652}{2,7648 + 7,7963 + 14,1652} = 4,4663\Omega$$

$$\bar{Z}_{C(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{2,7648 \cdot 14,1652}{2,7648 + 7,7963 + 14,1652} = 1,5839\Omega$$

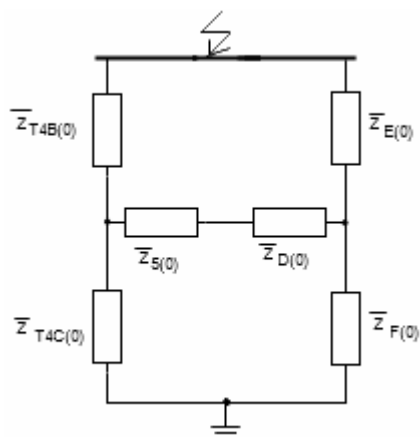


$$\bar{Z}_{5(0)} = \bar{Z}_{A(0)} + \bar{Z}_{T4A(0)} = 0,8718 + 7,7963 = 8,6681\Omega$$

$$\bar{Z}_{6(0)} = \bar{Z}_{B(0)} + \bar{Z}_{T3B(0)} = 4,4663 - 0,9883 = 3,4781\Omega$$

Obrázek 24: Zjednodušování obvodu 5

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20

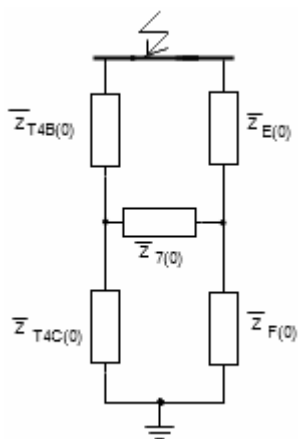


Obrázek 25: Zjednodušování obvodu 6 – Transfigurace $\bar{Z}_{6(0)}$, $\bar{Z}_{C(0)}$, $\bar{Z}_{S3(0)}$

$$\bar{Z}_{D(0)} = \frac{\bar{Z}_{6(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{3,4781 \cdot 1,5839}{3,4781 + 1,5839 + 4,3335} = 0,5863\Omega$$

$$\bar{Z}_{E(0)} = \frac{\bar{Z}_{6(0)} \cdot \bar{Z}_{S3(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{3,4781 \cdot 4,3335}{3,4781 + 1,5839 + 4,3335} = 1,6042\Omega$$

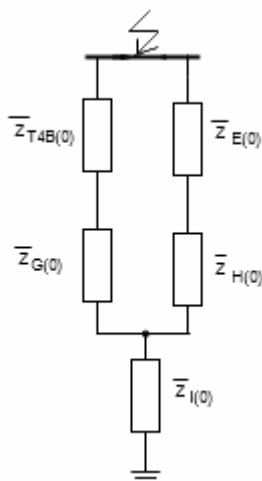
$$\bar{Z}_{F(0)} = \frac{\bar{Z}_{S3(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{4,3335 \cdot 1,5839}{3,4781 + 1,5839 + 4,3335} = 0,7305\Omega$$



$$\bar{Z}_{7(0)} = \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{D(0)} = 8,6687 + 0,5863 = 9,2544\Omega$$

Obrázek 26: Zjednodušování obvodu 7

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20

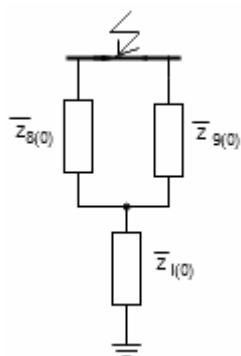


Obrázek 27: Zjednodušení obvodu 8 – Transfigurace $\bar{Z}_{7(0)}$, $\bar{Z}_{T4C(0)}$, $\bar{Z}_{F(0)}$

$$\bar{Z}_{G(0)} = \frac{\bar{Z}_{7(0)} \cdot \bar{Z}_{T4C(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{9,2544 \cdot 14,1652}{9,2544 + 14,1652 + 0,7305} = 5,4281\Omega$$

$$\bar{Z}_{H(0)} = \frac{\bar{Z}_{7(0)} \cdot \bar{Z}_{F(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{9,2544 \cdot 0,7305}{9,2544 + 14,1652 + 0,7305} = 0,2799\Omega$$

$$\bar{Z}_{I(0)} = \frac{\bar{Z}_{F(0)} \cdot \bar{Z}_{T4C(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{0,7305 \cdot 14,1652}{9,2544 + 14,1652 + 0,7305} = 0,4285\Omega$$

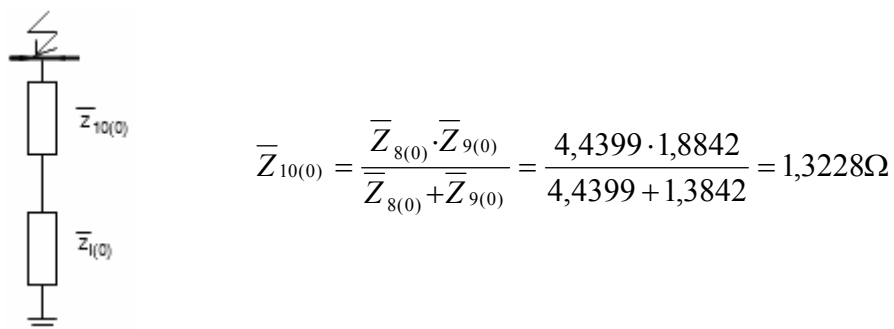


$$\bar{Z}_{8(0)} = \bar{Z}_{G(0)} + \bar{Z}_{T4B(0)} = 5,4284 - 0,9883 = 4,4399\Omega$$

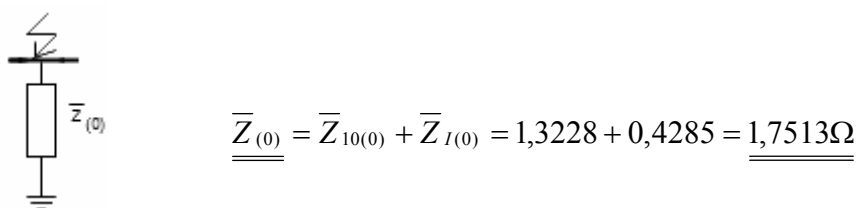
$$\bar{Z}_{9(0)} = \bar{Z}_{E(0)} + \bar{Z}_{H(0)} = 1,6042 + 0,2799 = 1,8842\Omega$$

Obrázek 28: Zjednodušení obvodu 9

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20

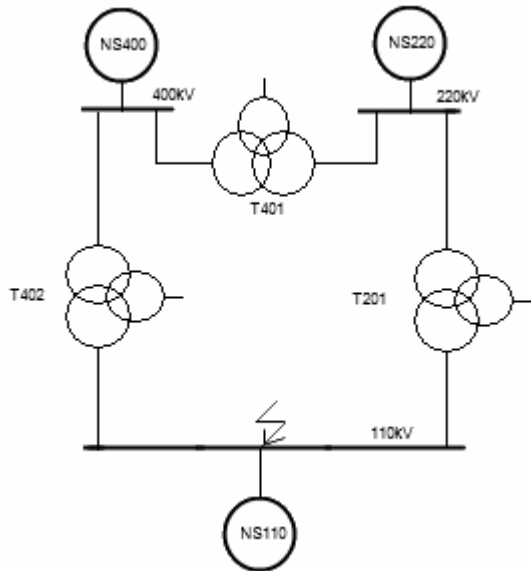


Obrázek 29: Zjednodušení obvodu 10

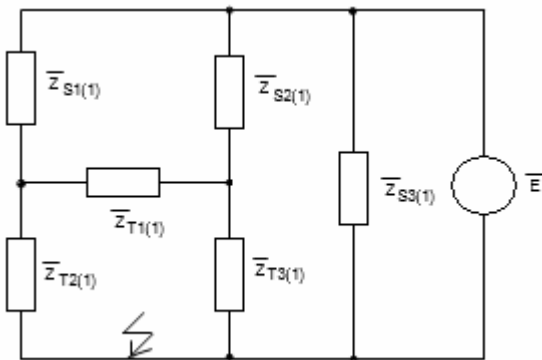


Obrázek 30: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu před zavedením přímé transformace

7.4 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

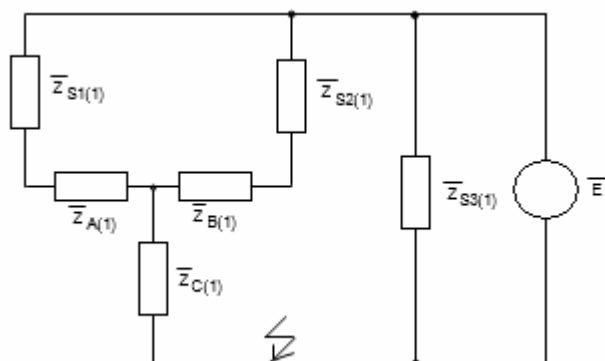


Obrázek 31: Zapojení rozvodny po přímé transformaci



Obrázek 32: Překreslené schéma impedancí

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20

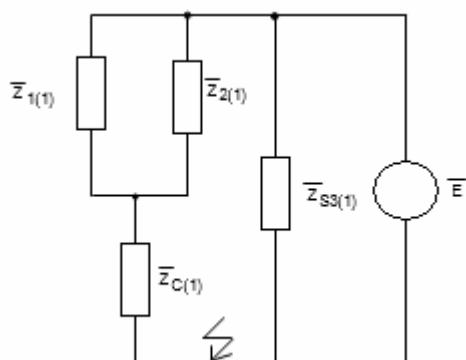


Obrázek 33: Zjednodušování obvodu 1 – Transfigurace $\bar{Z}_{A(1)}$, $\bar{Z}_{T1(1)}$, $\bar{Z}_{T2(1)}$

$$\bar{Z}_{A(1)} = \frac{\bar{Z}_{T1(1)} \cdot \bar{Z}_{T2(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{3,5687 \cdot 5,8564}{3,5687 + 5,8564 + 6,8081} = 1,2875\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(1)} = \frac{\bar{Z}_{T1(1)} \cdot \bar{Z}_{T3(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{3,5687 \cdot 6,8081}{3,5687 + 5,8564 + 6,8081} = 1,4967\Omega$$

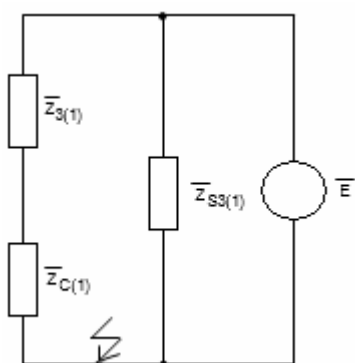
$$\bar{Z}_{C(1)} = \frac{\bar{Z}_{T2(1)} \cdot \bar{Z}_{T3(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{5,8564 \cdot 6,8081}{3,5687 + 5,8564 + 6,8081} = 2,4561\Omega$$



$$\bar{Z}_{1(1)} = \bar{Z}_{S1(1)} + \bar{Z}_{A(1)} = 0,9286 + 1,2875 = 2,2161\Omega$$

$$\bar{Z}_{2(1)} = \bar{Z}_{S2(1)} + \bar{Z}_{B(1)} = 6,0671 + 1,4967 = 7,5656\Omega$$

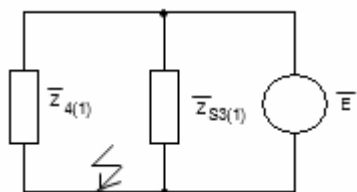
Obrázek 34: Zjednodušování obvodu 2



$$\bar{Z}_{3(1)} = \frac{\bar{Z}_{1(1)} \cdot \bar{Z}_{2(1)}}{\bar{Z}_{1(1)} + \bar{Z}_{2(1)}} = \frac{2,2161 \cdot 7,5656}{2,2161 + 7,5656} = 1,7140\Omega$$

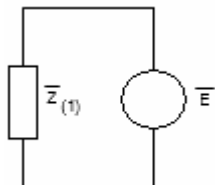
Obrázek 35: Zjednodušování obvodu 3

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



$$\bar{Z}_{4(1)} = \bar{Z}_{3(1)} + \bar{Z}_{C(1)} = 1,7140 + 2,4561 = 4,1701\Omega$$

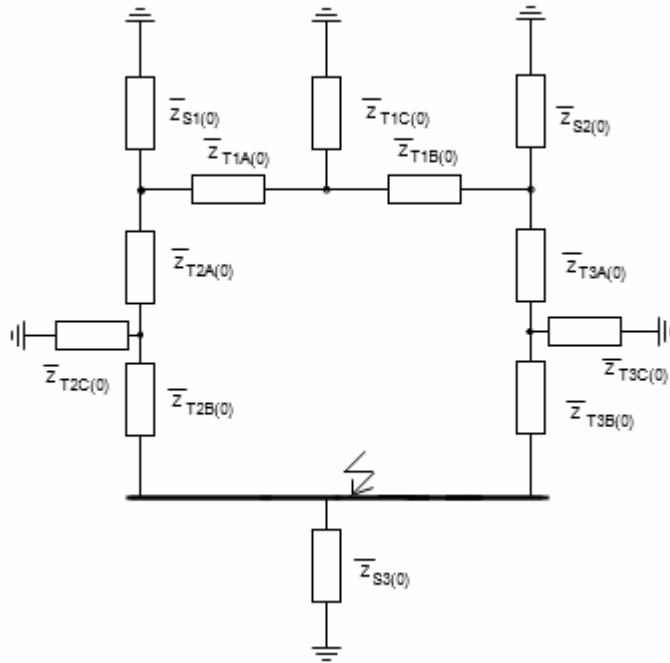
Obrázek 36: Zjednodušení obvodu 4



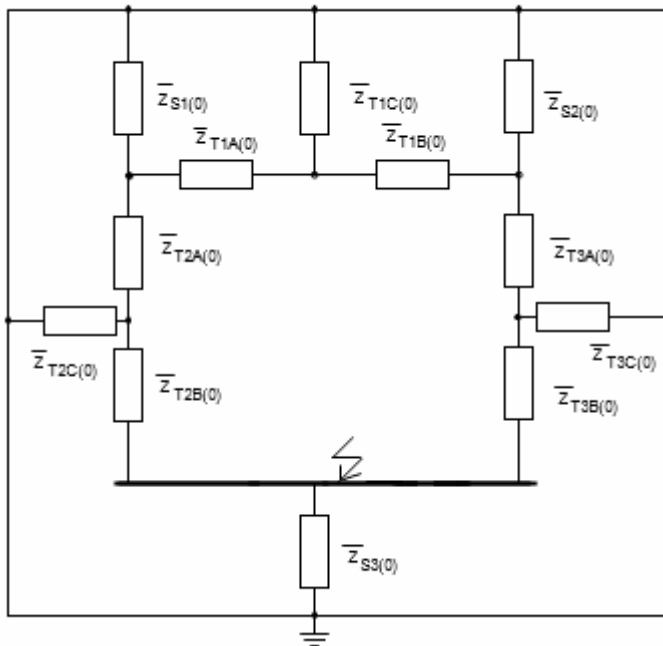
$$\underline{\underline{\bar{Z}_{(1)}}} = \frac{\bar{Z}_{4(1)} \cdot \bar{Z}_{S3(1)}}{\bar{Z}_{4(1)} + \bar{Z}_{S3(1)}} = \frac{4,1701 \cdot 13,3100}{4,1701 + 13,3100} = \underline{\underline{3,1753\Omega}}$$

Obrázek 37: Výsledná sousledná 3f zkratová impedance po zavedení přímé transformace

7.5 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

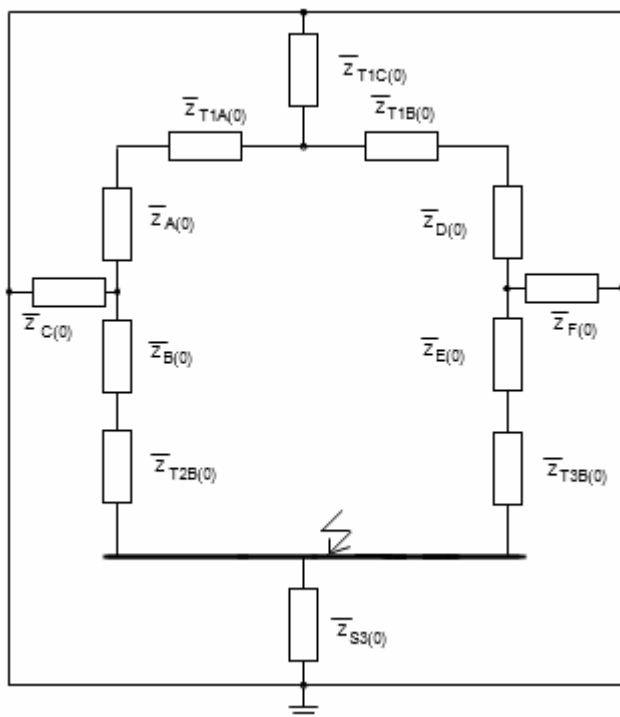


Obrázek 38: Zapojení netočivé složky v rozvodně po přímé transformaci



Obrázek 39: Překreslené schéma impedancí

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



Obrázek 40: Zjednodušování obvodu 1 –

Transfigurace $\bar{Z}_{S1(0)}$, $\bar{Z}_{T2A(0)}$, $\bar{Z}_{T2C(0)}$ a $\bar{Z}_{S2(0)}$, $\bar{Z}_{T3A(0)}$, $\bar{Z}_{T3C(0)}$

$$\bar{Z}_{A(0)} = \frac{\bar{Z}_{S1(0)} \cdot \bar{Z}_{T2A(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{1,5713 \cdot 6,0565}{1,5713 + 6,0565 + 8,5754} = 0,5879\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(0)} = \frac{\bar{Z}_{S1(0)} \cdot \bar{Z}_{T2C(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{1,5713 \cdot 8,5754}{1,5713 + 6,0565 + 8,5754} = 0,8311\Omega$$

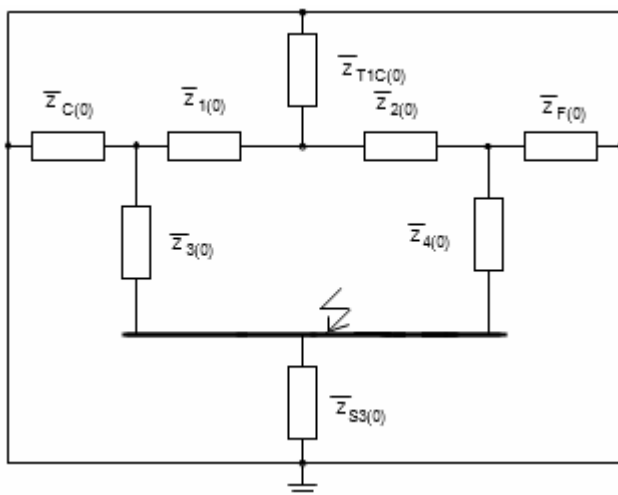
$$\bar{Z}_{C(0)} = \frac{\bar{Z}_{T1A(0)} \cdot \bar{Z}_{T2C(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{6,0565 \cdot 8,5754}{1,5713 + 6,0565 + 8,5754} = 3,2084\Omega$$

$$\bar{Z}_{D(0)} = \frac{\bar{Z}_{S2(0)} \cdot \bar{Z}_{T3A(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{11,9631 \cdot 7,7963}{11,9631 + 7,7963 + 14,1652} = 2,7493\Omega$$

$$\bar{Z}_{E(0)} = \frac{\bar{Z}_{T3A(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{7,7963 \cdot 14,1652}{11,9631 + 7,7963 + 14,1652} = 3,2553\Omega$$

$$\bar{Z}_{F(0)} = \frac{\bar{Z}_{S2(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{11,9631 \cdot 14,1652}{11,9631 + 7,7963 + 14,1652} = 4,9952\Omega$$

7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



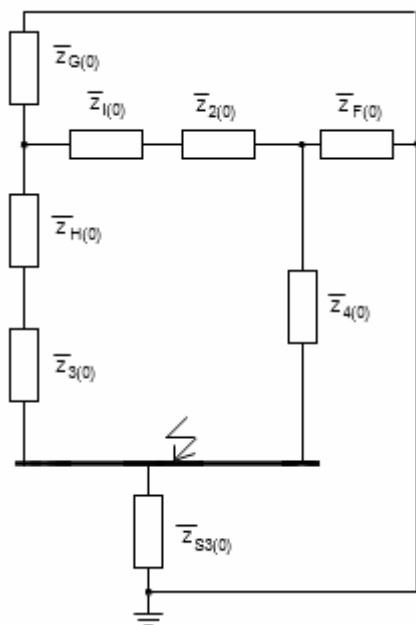
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1(0)} &= \bar{Z}_{T1A(0)} + \bar{Z}_{A(0)} = \\ &= 3,6694 + 0,5879 = 4,2573\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2(0)} &= \bar{Z}_{T1B(0)} + \bar{Z}_{D(0)} = \\ &= -0,1007 + 2,7493 = 2,6486\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{3(0)} &= \bar{Z}_{T2B(0)} + \bar{Z}_{B(0)} = \\ &= -0,2092 + 0,8311 = 0,6220\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{4(0)} &= \bar{Z}_{T3B(0)} + \bar{Z}_{E(0)} = \\ &= -0,9883 + 3,2553 = 2,2671\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 41: Zjednodušení obvodu 2



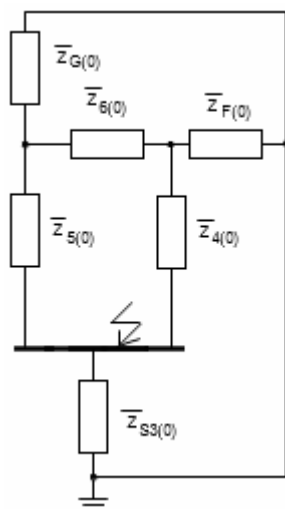
Obrázek 42: Zjednodušení obvodu 3 - Transfigurace $\bar{Z}_{1(0)}$, $\bar{Z}_{C(0)}$, $\bar{Z}_{T1C(0)}$

$$\bar{Z}_{G(0)} = \frac{\bar{Z}_{C(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{3,2084 \cdot 12,5455}{3,2084 + 4,2573 + 12,5455} = 2,0114\Omega$$

$$\bar{Z}_{H(0)} = \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{4,2573 \cdot 12,5455}{3,2084 + 4,2573 + 12,5455} = 2,6690\Omega$$

$$\bar{Z}_{I(0)} = \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{4,2573 \cdot 3,2084}{3,2084 + 4,2573 + 12,5455} = 0,6826\Omega$$

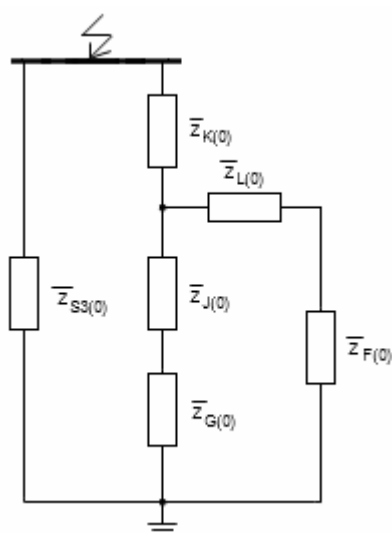
7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



$$\bar{Z}_{5(0)} = \bar{Z}_{H(0)} + \bar{Z}_{3(0)} = 2,6690 + 0,6220 = 3,2910\Omega$$

$$\bar{Z}_{6(0)} = \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{2(0)} = 0,6826 + 2,6486 = 3,3312\Omega$$

Obrázek 43: Zjednodušování obvodu 4



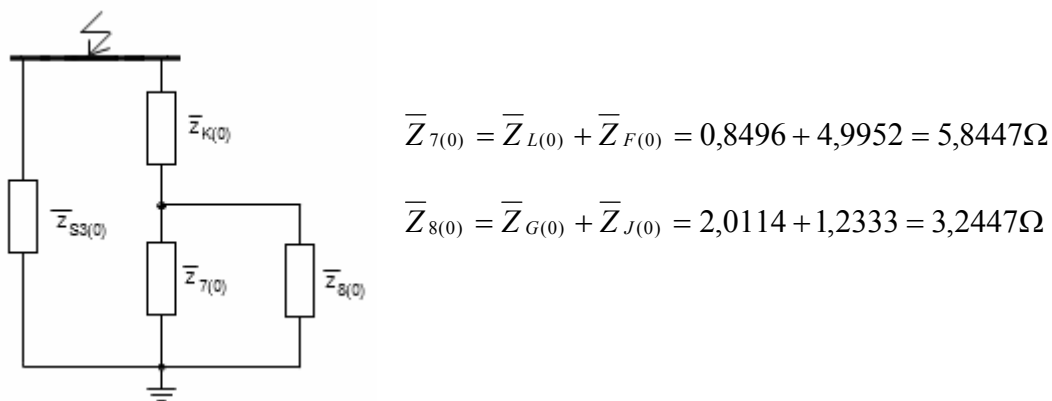
Obrázek 44: Zjednodušování obvodu 5 - Transfigurace $\bar{Z}_{4(0)}$, $\bar{Z}_{5(0)}$, $\bar{Z}_{6(0)}$

$$\bar{Z}_{K(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{5(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{2,2671 \cdot 3,2910}{2,2671 + 3,2910 + 3,3312} = 0,8393\Omega$$

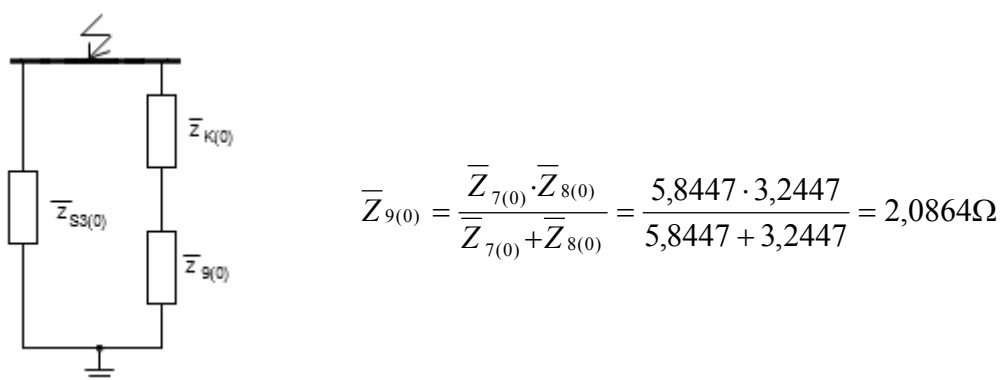
$$\bar{Z}_{J(0)} = \frac{\bar{Z}_{5(0)} \cdot \bar{Z}_{6(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{3,2910 \cdot 3,3312}{2,2671 + 3,2910 + 3,3312} = 1,2333\Omega$$

$$\bar{Z}_{L(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{6(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{2,2671 \cdot 3,3312}{2,2671 + 3,2910 + 3,3312} = 0,8496\Omega$$

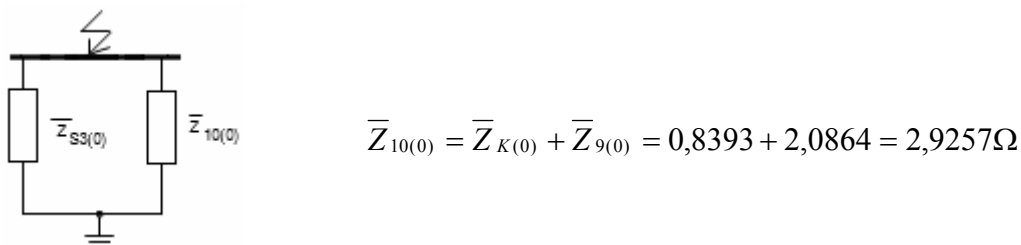
7. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN 33 30 20



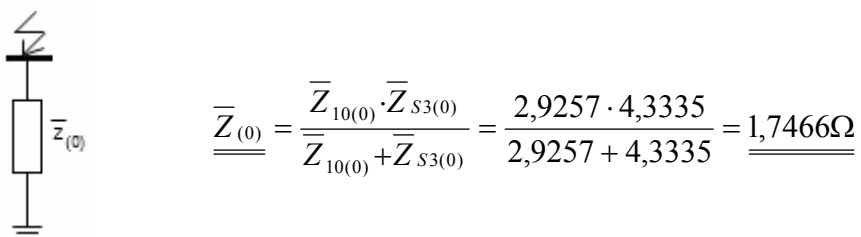
Obrázek 45: Zjednodušení obvodu 6



Obrázek 46: Zjednodušení obvodu 7



Obrázek 47: Zjednodušení obvodu 8



Obrázek 48: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu po zavedení přímé transformace

7.6 ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON DLE ČSN 33 30 20**7.6.1 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE**

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k3}''}} = \frac{c \cdot \bar{U}_N}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,1296} = \underline{\underline{16916,7432 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k3}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 16916,7432 = \underline{\underline{3223,0725 MVA}}$$

7.6.2 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k3}''}} = \frac{c \cdot \bar{U}_N}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,1753} = \underline{\underline{22000,8763 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k3}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 22000,8763 = \underline{\underline{4191,7299 MVA}}$$

7.6.3 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k1}''}} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_N}{2 \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{2 \cdot 4,1296 + 1,7513} = \underline{\underline{20935,8321 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 20935,8321 = \underline{\underline{3988,8117 MVA}}$$

7.6.4 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k1}''}} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_N}{2 \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,1753 + 1,7466} = \underline{\underline{25882,7925 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 25882,7925 = \underline{\underline{4931,3343 MVA}}$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV SOKOLNICE DLE ČSN EN 60909

8.1 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ZAŘÍZENÍ ROZVODNY

8.1.1. SOUSTAVA 400kV

Sousledná a zpětná složka

$$\bar{Z}_{S1(1)} = \bar{Z}_{S1(2)} = \frac{c \cdot U_{n1}^2}{S''_{k31}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{1,1 \cdot (400 \cdot 10^3)^2}{17344 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400}\right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 0,9286 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S1(0)} &= c \cdot U_{n2}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k11}} - \frac{2}{S''_{k31}} \right) \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \\ &= 1,1 \cdot (400 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{14092,5 \cdot 10^6} - \frac{2}{17344 \cdot 10^6} \right) \cdot \left(\frac{231}{400}\right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 1,5713 \Omega \end{aligned}$$

8.1.2 SOUSTAVA 220kV

Sousledná a zpětná složka

$$\bar{Z}_{S2(1)} = \bar{Z}_{S2(2)} = \frac{c \cdot U_{n2}^2}{S''_{k32}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{1,1 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{2407,7 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 6,0671 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S2(0)} &= c \cdot U_{n2}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k12}} - \frac{2}{S''_{k32}} \right) \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \\ &= 1,1 \cdot (220 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{1818,6 \cdot 10^6} - \frac{2}{2407,7 \cdot 10^6} \right) \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 11,9631 \Omega \end{aligned}$$

8.1.3 SOUSTAVA 110kV*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{S3(1)} = \bar{Z}_{S3(2)} = \frac{c \cdot U_{n3}^2}{S''_{k33}} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1000 \cdot 10^6} = 13,3100 \Omega$$

Netočivá složka

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{S3(0)} &= c \cdot U_{n3}^2 \cdot \left(\frac{3}{S''_{k13}} - \frac{2}{S''_{k33}} \right) = \\ &= 1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{3}{1290 \cdot 10^6} - \frac{2}{1000 \cdot 10^6} \right) = 4,3335 \Omega \end{aligned}$$

8.1.4 TRANSFORMÁTOR T401*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{T1(1)} = \bar{Z}_{T1(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$X_{TAB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{9,75}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 3,5687 \Omega$$

$$X_{TAC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{44,3}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 16,2149 \Omega$$

$$X_{TBC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r1}^2} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{34}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{231}{400} \right)^2 \cdot \left(\frac{121}{231} \right)^2 = 12,4449 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB} \cdot S_{TAB}}{U_{TAB}^2} = \frac{3,5687 \cdot 400 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0089$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC} \cdot S_{TAC}}{U_{TAC}^2} = \frac{16,2149 \cdot 400 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0405$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC} \cdot S_{TBC}}{U_{TBC}^2} = \frac{12,4449 \cdot 400 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0311$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

Korekční součinitelé transformátoru:

$$k_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAB}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0089} = 1,0394$$

$$k_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0405} = 1,0202$$

$$k_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TBC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0311} = 1,0259$$

Korigované zkratové impedance transformátoru T401:

$$\bar{Z}_{AB} = X_{TAB} \cdot k_{TAB} = 3,5687 \cdot 1,0394 = 3,7095 \Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = X_{TAC} \cdot k_{TAC} = 16,2149 \cdot 1,0202 = 16,5422 \Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = X_{TBC} \cdot k_{TBC} = 12,4449 \cdot 1,0259 = 12,7666 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1(1)} = 3,7095 \Omega$$

Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T1A(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2} (3,7095 + 16,5422 - 12,7666) = 3,7426 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1B(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2} (12,7666 + 3,7095 - 16,5422) = -0,0331 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1C(0)} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2} (16,5422 + 12,7666 - 3,7095) = 12,7997 \Omega$$

8.1.5 TRANSFORMÁTOR T402*Sousledná a zpětná složka*

$$\bar{Z}_{T2(1)} = \bar{Z}_{T2(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$X_{TAB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{14}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 5,8564 \Omega$$

$$X_{TAC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{35}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 14,6410 \Omega$$

$$X_{TBC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{20}{100} \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{400}\right)^2 = 8,3663 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB} \cdot S_{TAB}}{U_{TAB}^2} = \frac{5,8564 \cdot 350 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0128$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC} \cdot S_{TAC}}{U_{TAC}^2} = \frac{14,6410 \cdot 350 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0320$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC} \cdot S_{TBC}}{U_{TBC}^2} = \frac{8,3663 \cdot 350 \cdot 10^6}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,0183$$

Korekční součinitelé transformátoru:

$$k_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAB}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0128} = 1,0370$$

$$k_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0320} = 1,0253$$

$$k_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TBC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0183} = 1,0336$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

Korigované zkratové impedance transformátoru T402:

$$\bar{Z}_{AB} = X_{TAB} \cdot k_{TAB} = 5,8564 \cdot 1,0370 = 6,0733\Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = X_{TAC} \cdot k_{TAC} = 14,6410 \cdot 1,0253 = 15,0114\Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = X_{TBC} \cdot k_{TBC} = 8,3663 \cdot 1,0336 = 8,6478\Omega$$

$$\bar{Z}_{T2(1)} = 6,0733\Omega$$

Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T2A(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2}(6,0733 + 15,0114 - 8,6478) = 6,2184\Omega$$

$$\bar{Z}_{T2B(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2}(8,6478 + 6,0733 - 15,0114) = -0,1452\Omega$$

$$\bar{Z}_{T2C(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2}(15,0114 + 8,6478 - 6,0733) = 8,7930\Omega$$

8.1.6 TRANSFORMÁTOR T201, T202

Sousledná a zpětná složka

$$\bar{Z}_{T3,4(1)} = \bar{Z}_{T3,4(2)} = \bar{Z}_{AB}$$

Zkratové reaktance transformátoru:

$$X_{TAB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{TAB}^2}{S_{TAB}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{9,3}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 6,8081\Omega$$

$$X_{TAC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{TAC}^2}{S_{TAC}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{30}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 21,9615\Omega$$

$$X_{TBC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{TBC}^2}{S_{TBC}} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{18}{100} \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121}{231}\right)^2 = 13,1769\Omega$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB} \cdot S_{TAB}}{U_{TAB}^2} = \frac{6,8081 \cdot 200 \cdot 10^6}{(231 \cdot 10^3)^2} = 0,0255$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC} \cdot S_{TAC}}{U_{TAC}^2} = \frac{21,9615 \cdot 200 \cdot 10^6}{(231 \cdot 10^3)^2} = 0,0823$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC} \cdot S_{TBC}}{U_{TBC}^2} = \frac{11,9518 \cdot 200 \cdot 10^6}{(231 \cdot 10^3)^2} = 0,0494$$

Korekční součinitelé transformátoru:

$$k_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAB}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0255} = 1,0292$$

$$k_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TAC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0823} = 0,9958$$

$$k_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{TBC}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0494} = 1,0149$$

Korigované zkratové impedance transformátoru:

$$\bar{Z}_{AB} = X_{TAB} \cdot k_{TAB} = 6,1751 \cdot 1,0292 = 7,0071 \Omega$$

$$\bar{Z}_{AC} = X_{TAC} \cdot k_{TAC} = 19,9197 \cdot 0,9958 = 21,8697 \Omega$$

$$\bar{Z}_{BC} = X_{TBC} \cdot k_{TBC} = 11,9518 \cdot 1,0149 = 13,3736 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T3,4(1)} = 7,0071 \Omega$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

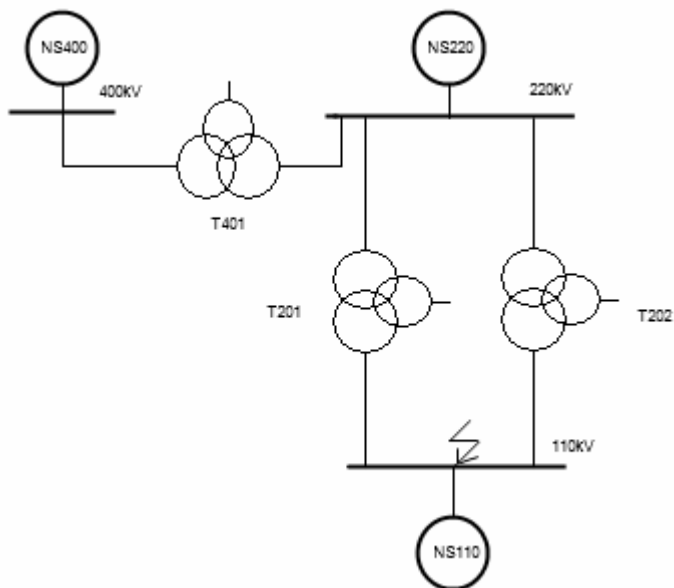
Netočivá složka

$$\bar{Z}_{T3,4A(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) = \frac{1}{2}(7,0071 + 21,8697 - 13,3736) = 7,7516\Omega$$

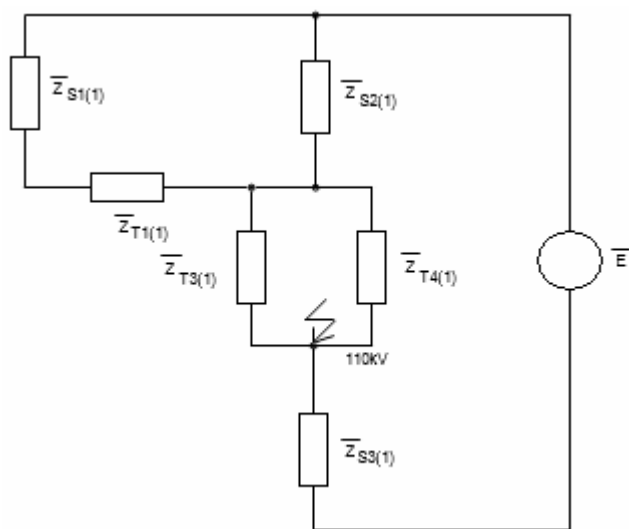
$$\bar{Z}_{T3,4B(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) = \frac{1}{2}(13,3736 + 7,0071 - 21,8697) = -0,7445\Omega$$

$$\bar{Z}_{T3,4C(0)} = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) = \frac{1}{2}(21,8697 + 13,3736 - 7,0071) = 14,1180\Omega$$

8.2 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE

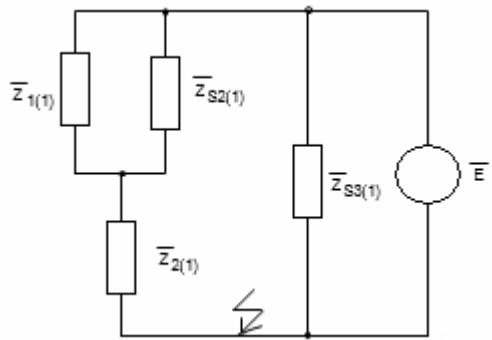


Obrázek 49: Zapojení rozvodny před přímou transformací



Obrázek 50: Překreslené schéma sousledné složky

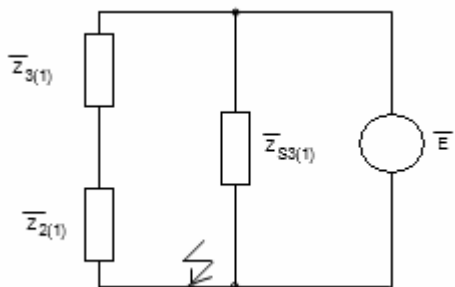
8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



$$\bar{Z}_{1(1)} = \bar{Z}_{S1(1)} + \bar{Z}_{T1(1)} = 0,9286 + 3,7095 = 4,6381\Omega$$

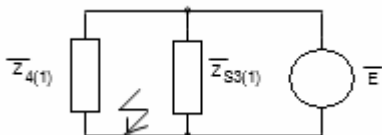
$$\bar{Z}_{2(1)} = \frac{\bar{Z}_{T3(1)} \cdot \bar{Z}_{T4(1)}}{\bar{Z}_{T3(1)} + \bar{Z}_{T4(1)}} = \frac{7,0071 \cdot 7,0071}{7,0071 + 7,0071} = 3,5036\Omega$$

Obrázek 51: Zjednodušování obvodu 1



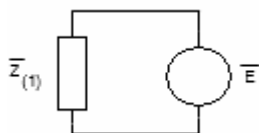
$$\bar{Z}_{3(1)} = \frac{\bar{Z}_{1(1)} \cdot \bar{Z}_{S2(1)}}{\bar{Z}_{1(1)} + \bar{Z}_{S2(1)}} = \frac{4,6381 \cdot 6,0671}{4,6381 + 6,0671} = 2,6286\Omega$$

Obrázek 52: Zjednodušování obvodu 2



$$\bar{Z}_{4(1)} = \bar{Z}_{2(1)} + \bar{Z}_{3(1)} = 3,5036 + 2,6286 = 6,1322\Omega$$

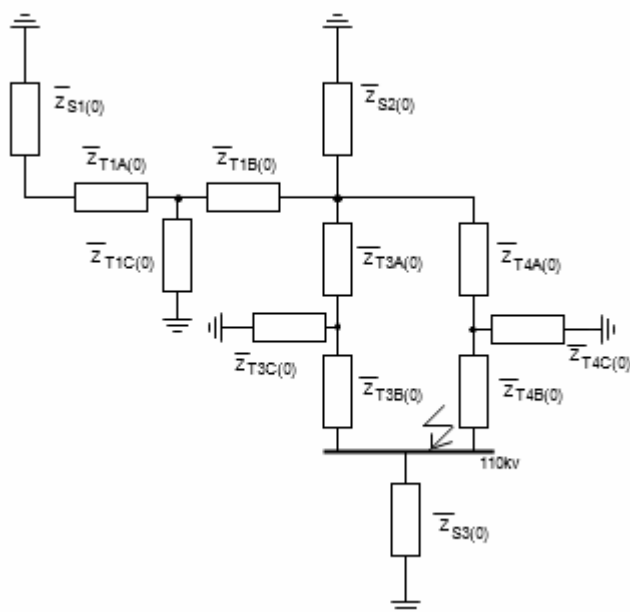
Obrázek 53: Zjednodušování obvodu 3



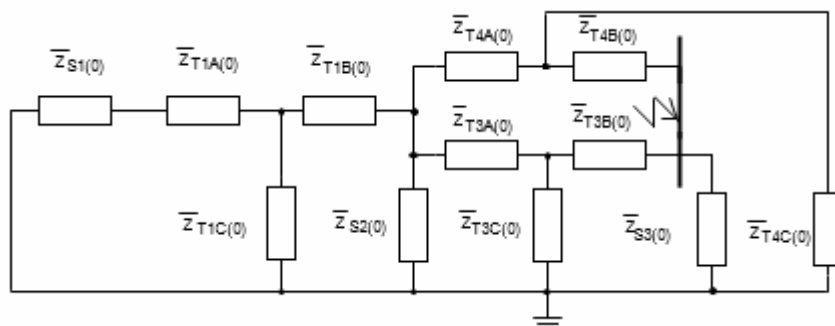
$$\underline{\underline{\bar{Z}_{(1)}}} = \frac{\bar{Z}_{4(1)} \cdot \bar{Z}_{S3(1)}}{\bar{Z}_{4(1)} + \bar{Z}_{S3(1)}} = \frac{6,1322 \cdot 13,3100}{6,1322 + 13,3100} = \underline{\underline{4,1980\Omega}}$$

Obrázek 54: Výsledná sousledná 3f impedance před zavedením přímé transformace

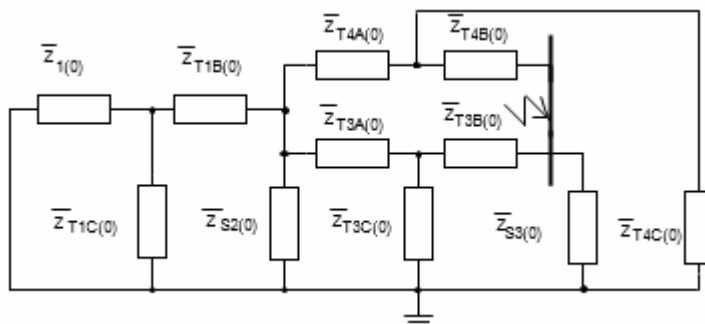
8.3 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE



Obrázek 55: Zapojení netočivé složky v rozvodně před přímou transformací



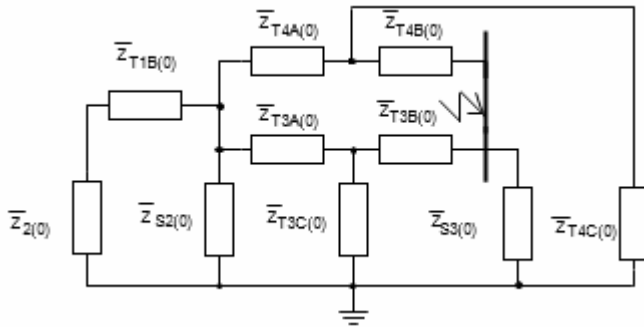
Obrázek 56: Překreslené schéma netočivé složky



$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1(0)} &= \bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T1A(0)} = \\ &= 1,5713 + 3,7426 = \\ &= 5,3139\Omega \end{aligned}$$

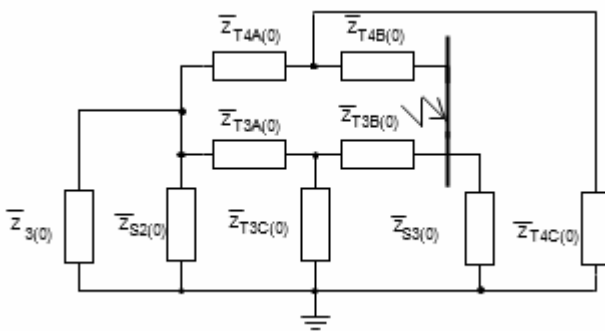
Obrázek 57: Zjednodušování obvodu 1

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



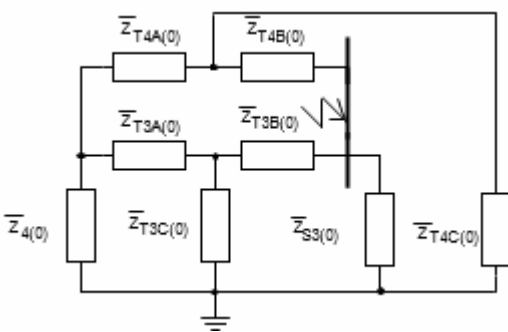
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2(0)} &= \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \\ &= \frac{5,3139 \cdot 12,7997}{5,3139 + 12,7997} = \\ &= 3,7550\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 58: Zjednodušení obvodu 2



$$\begin{aligned}\bar{Z}_{3(0)} &= \bar{Z}_{2(0)} + \bar{Z}_{T1B(0)} = \\ &= 3,7550 - 0,0331 = \\ &= 3,7219\Omega\end{aligned}$$

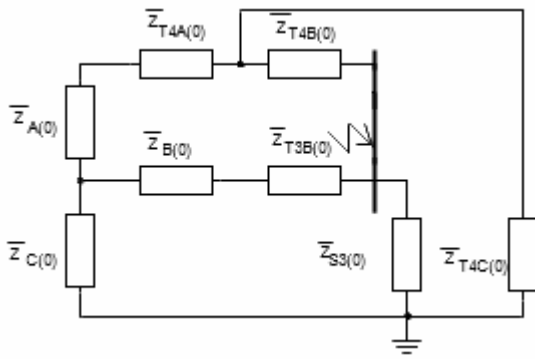
Obrázek 59: Zjednodušení obvodu 3



$$\begin{aligned}\bar{Z}_{4(0)} &= \frac{\bar{Z}_{3(0)} \cdot \bar{Z}_{S2(0)}}{\bar{Z}_{3(0)} + \bar{Z}_{S2(0)}} = \\ &= \frac{3,7219 \cdot 11,9631}{3,7219 + 11,9631} = \\ &= 2,8387\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 60: Zjednodušení obvodu 4

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

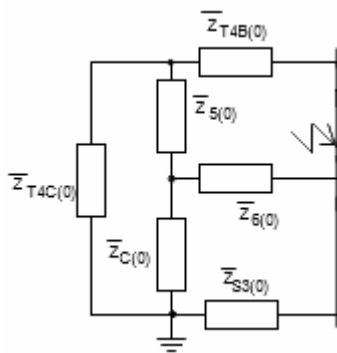


Obrázek 61: Zjednodušování obvodu 4 – Transfigurace $\bar{Z}_{T3A(0)}$, $\bar{Z}_{4(0)}$, $\bar{Z}_{T3C(0)}$

$$\bar{Z}_{A(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{T3A(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{2,8387 \cdot 7,7516}{2,8387 + 7,7516 + 14,1180} = 0,8906\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(0)} = \frac{\bar{Z}_{T3A(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{7,7516 \cdot 14,1180}{2,8387 + 7,7516 + 14,1180} = 4,4292\Omega$$

$$\bar{Z}_{C(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{2,8387 \cdot 14,1180}{2,8387 + 7,7516 + 14,1180} = 1,6220\Omega$$

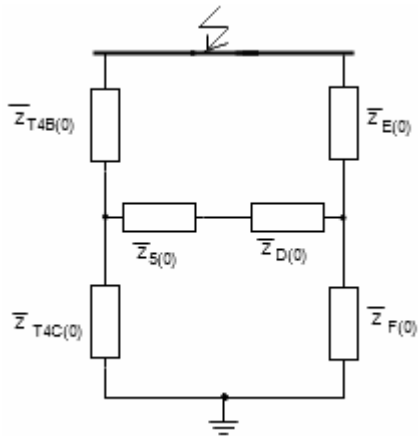


$$\bar{Z}_{5(0)} = \bar{Z}_{A(0)} + \bar{Z}_{T4A(0)} = 0,8906 + 7,7516 = 8,6422\Omega$$

$$\bar{Z}_{6(0)} = \bar{Z}_{B(0)} + \bar{Z}_{T3B(0)} = 4,4292 - 0,7445 = 3,6847\Omega$$

Obrázek 62: Zjednodušování obvodu 5

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

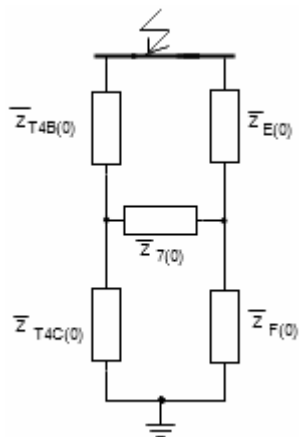


Obrázek 63: Zjednodušení obvodu 6 – Transfigurace $\bar{Z}_{6(0)}$, $\bar{Z}_{C(0)}$, $\bar{Z}_{S3(0)}$

$$\bar{Z}_{D(0)} = \frac{\bar{Z}_{6(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{3,6847 \cdot 1,6220}{3,6847 + 1,6220 + 4,3335} = 0,6200\Omega$$

$$\bar{Z}_{E(0)} = \frac{\bar{Z}_{6(0)} \cdot \bar{Z}_{S3(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{3,6847 \cdot 4,3335}{3,6847 + 1,6220 + 4,3335} = 1,6564\Omega$$

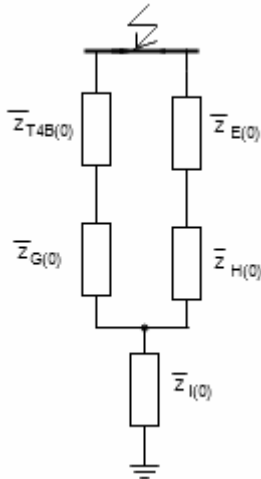
$$\bar{Z}_{F(0)} = \frac{\bar{Z}_{S3(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{6(0)} + \bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{S3(0)}} = \frac{1,6220 \cdot 4,3335}{3,6847 + 1,6220 + 4,3335} = 0,7291\Omega$$



$$\bar{Z}_{7(0)} = \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{D(0)} = 8,6422 + 0,6200 = 9,2622\Omega$$

Obrázek 64: Zjednodušení obvodu 7

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

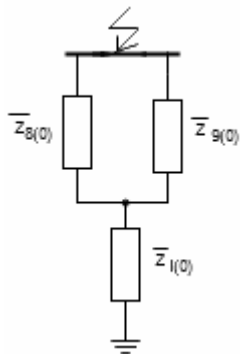


Obrázek 65: Zjednodušení obvodu 8 – Transfigurace $\bar{Z}_{7(0)}$, $\bar{Z}_{T4C(0)}$, $\bar{Z}_{F(0)}$

$$\bar{Z}_{G(0)} = \frac{\bar{Z}_{7(0)} \cdot \bar{Z}_{T4C(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{9,2622 \cdot 14,1180}{9,2622 + 14,1180 + 0,7291} = 5,4238\Omega$$

$$\bar{Z}_{H(0)} = \frac{\bar{Z}_{7(0)} \cdot \bar{Z}_{F(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{9,2622 \cdot 0,7291}{9,2622 + 14,1180 + 0,7291} = 0,2801\Omega$$

$$\bar{Z}_{I(0)} = \frac{\bar{Z}_{F(0)} \cdot \bar{Z}_{T4C(0)}}{\bar{Z}_{7(0)} + \bar{Z}_{T4C(0)} + \bar{Z}_{F(0)}} = \frac{0,7291 \cdot 14,1180}{3,6847 + 1,6220 + 4,3335} = 0,4269\Omega$$

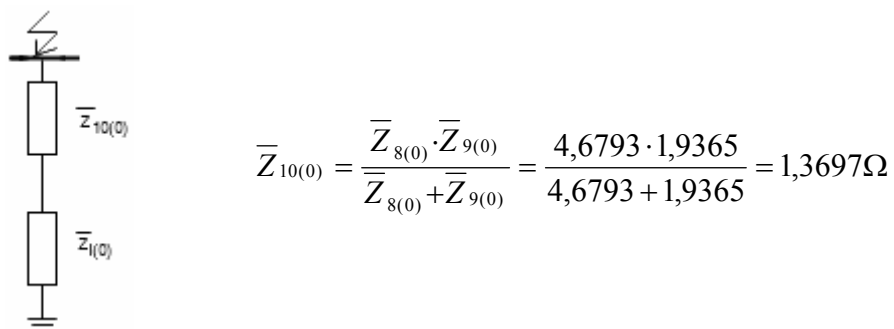


$$\bar{Z}_{8(0)} = \bar{Z}_{G(0)} + \bar{Z}_{T4B(0)} = 5,4238 - 0,7445 = 4,6793\Omega$$

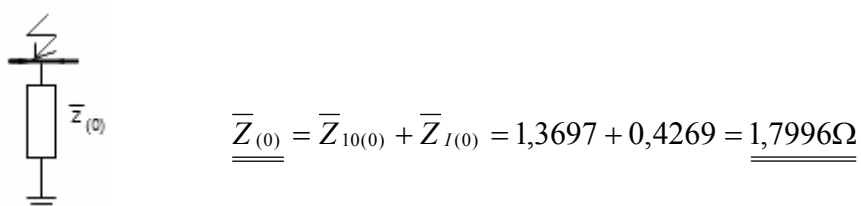
$$\bar{Z}_{9(0)} = \bar{Z}_{H(0)} + \bar{Z}_{E(0)} = 0,2801 + 1,6564 = 1,9365\Omega$$

Obrázek 66: Zjednodušení obvodu 9

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

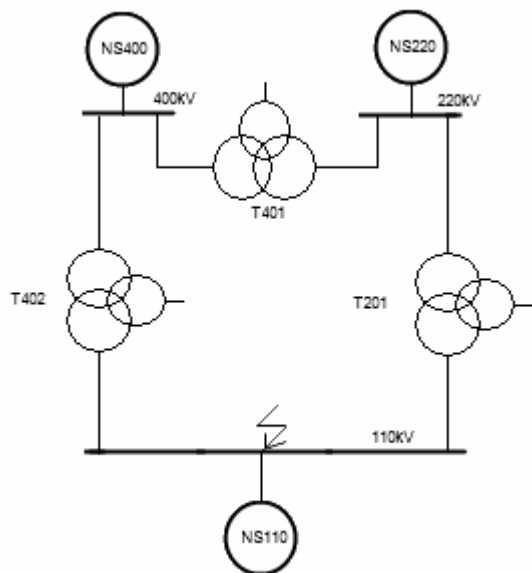


Obrázek 67: Zjednodušení obvodu 10

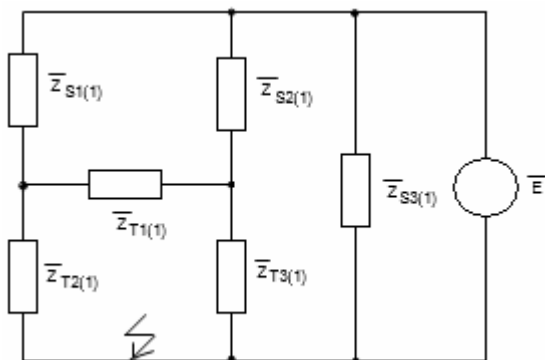


Obrázek 68: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu před zavedením přímé transformace

8.4 VÝPOČET IMPEDANCE TŘÍFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

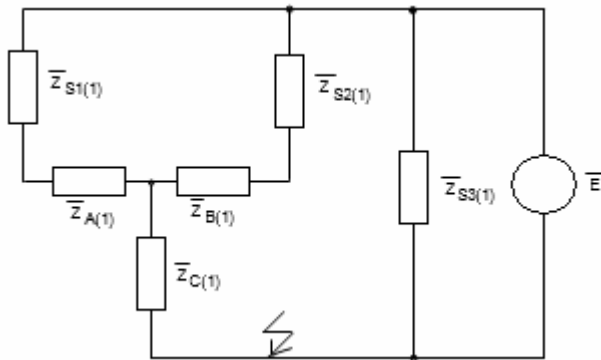


Obrázek 69: Zapojení rozvodny po přímé transformaci



Obrázek 70: Překreslené schéma impedancí

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909

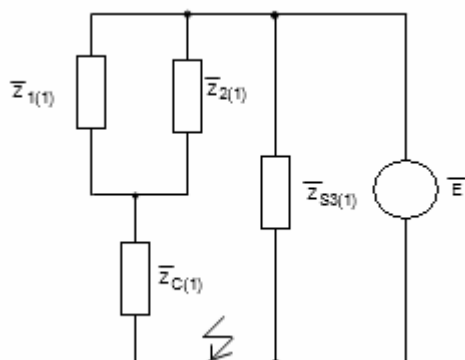


Obrázek 71: Zjednodušování obvodu 1 – Transfigurace $\bar{Z}_{A(1)}$, $\bar{Z}_{T1(1)}$, $\bar{Z}_{T2(1)}$

$$\bar{Z}_{A(1)} = \frac{\bar{Z}_{T1(1)} \cdot \bar{Z}_{T2(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{3,7095 \cdot 6,0733}{3,7095 + 6,0733 + 7,0071} = 1,3418\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(1)} = \frac{\bar{Z}_{T1(1)} \cdot \bar{Z}_{T3(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{3,7095 \cdot 7,0071}{3,7095 + 6,0733 + 7,0071} = 1,5481\Omega$$

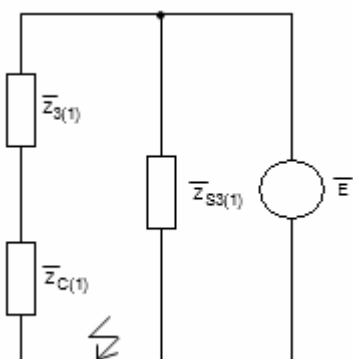
$$\bar{Z}_{C(1)} = \frac{\bar{Z}_{T2(1)} \cdot \bar{Z}_{T3(1)}}{\bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{T3(1)}} = \frac{6,0733 \cdot 7,0071}{3,7095 + 6,0733 + 7,0071} = 2,5346\Omega$$



$$\bar{Z}_{1(1)} = \bar{Z}_{S1(1)} + \bar{Z}_{A(1)} = 0,9286 + 1,3418 = 2,2704\Omega$$

$$\bar{Z}_{2(1)} = \bar{Z}_{S2(1)} + \bar{Z}_{B(1)} = 6,0671 + 1,5481 = 7,6152\Omega$$

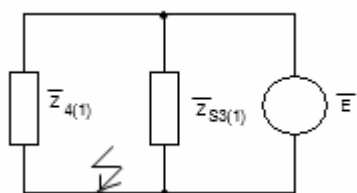
Obrázek 72: Zjednodušování obvodu 2



$$\bar{Z}_{3(1)} = \frac{\bar{Z}_{1(1)} \cdot \bar{Z}_{2(1)}}{\bar{Z}_{1(1)} + \bar{Z}_{2(1)}} = \frac{2,2704 \cdot 7,6152}{2,2704 + 7,6152} = 1,7490\Omega$$

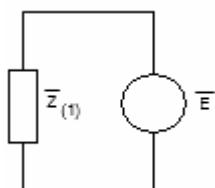
Obrázek 73: Zjednodušování obvodu 3

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



$$\bar{Z}_{4(1)} = \bar{Z}_{3(1)} + \bar{Z}_{C(1)} = 1,7490 + 2,5346 = 4,2836\Omega$$

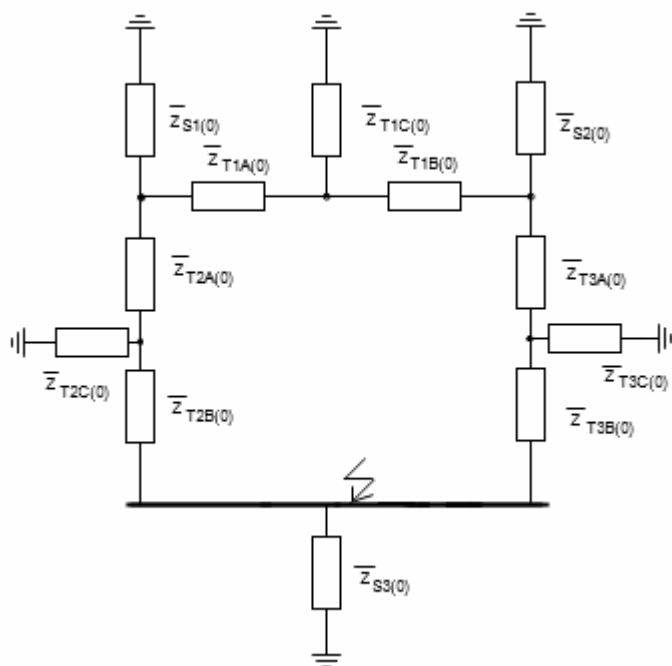
Obrázek 74: Zjednodušení obvodu 4



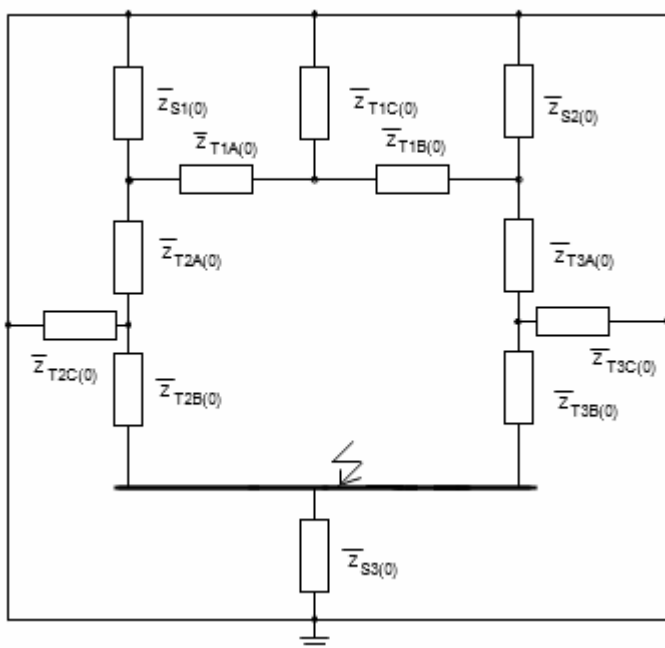
$$\underline{\underline{\bar{Z}_{(1)}}} = \frac{\bar{Z}_{4(1)} \cdot \bar{Z}_{S3(1)}}{\bar{Z}_{4(1)} + \bar{Z}_{S3(1)}} = \frac{4,2836 \cdot 13,3100}{4,2836 + 13,3100} = \underline{\underline{3,2407\Omega}}$$

Obrázek 75: Výsledná sousledná 3f zkratová impedance po zavedení přímé transformace

8.5 VÝPOČET IMPEDANCE JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

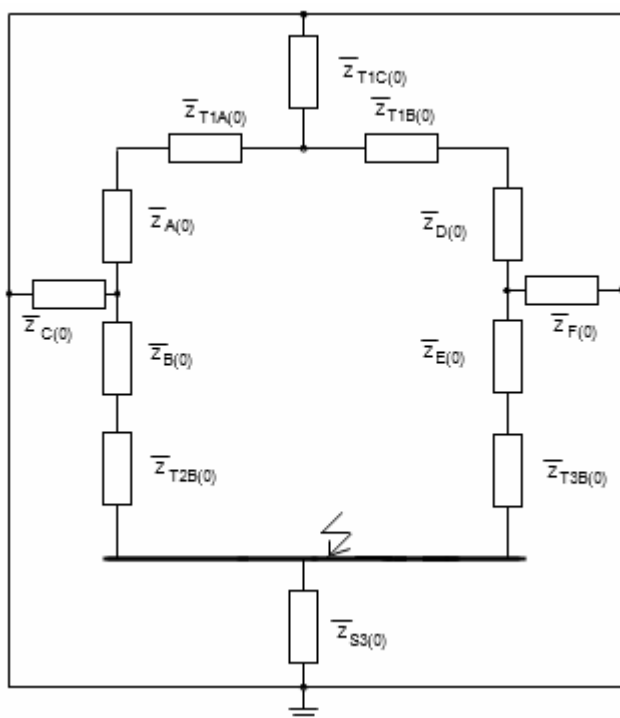


Obrázek 76: Zapojení netočivé složky v rozvodně po přímé transformaci



Obrázek 77: Překreslené schéma impedancí

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



Obrázek 78: Zjednodušení obvodu 1 –

Transfigurace $\bar{Z}_{S1(0)}$, $\bar{Z}_{T2A(0)}$, $\bar{Z}_{T2C(0)}$ a $\bar{Z}_{S2(0)}$, $\bar{Z}_{T3A(0)}$, $\bar{Z}_{T3C(0)}$

$$\bar{Z}_{A(0)} = \frac{\bar{Z}_{S1(0)} \cdot \bar{Z}_{T2A(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{1,5713 \cdot 6,2184}{1,5713 + 6,2184 + 8,7930} = 0,5892\Omega$$

$$\bar{Z}_{B(0)} = \frac{\bar{Z}_{S1(0)} \cdot \bar{Z}_{T2C(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{1,5713 \cdot 8,7930}{1,5713 + 6,2184 + 8,7930} = 0,8332\Omega$$

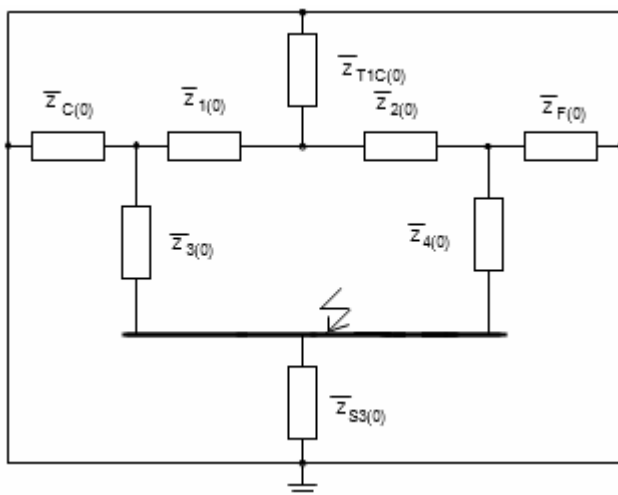
$$\bar{Z}_{C(0)} = \frac{\bar{Z}_{T1A(0)} \cdot \bar{Z}_{T2C(0)}}{\bar{Z}_{S1(0)} + \bar{Z}_{T2A(0)} + \bar{Z}_{T2C(0)}} = \frac{6,2184 \cdot 8,7930}{1,5713 + 6,2184 + 8,7930} = 3,2973\Omega$$

$$\bar{Z}_{D(0)} = \frac{\bar{Z}_{S2(0)} \cdot \bar{Z}_{T3A(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{11,9631 \cdot 7,7516}{11,9631 + 7,7516 + 14,1180} = 2,7409\Omega$$

$$\bar{Z}_{E(0)} = \frac{\bar{Z}_{T3A(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{7,7516 \cdot 14,1180}{11,9631 + 7,7516 + 14,1180} = 3,2347\Omega$$

$$\bar{Z}_{F(0)} = \frac{\bar{Z}_{S2(0)} \cdot \bar{Z}_{T3C(0)}}{\bar{Z}_{S2(0)} + \bar{Z}_{T3A(0)} + \bar{Z}_{T3C(0)}} = \frac{11,9631 \cdot 14,1180}{11,9631 + 7,7516 + 14,1180} = 4,9921\Omega$$

8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



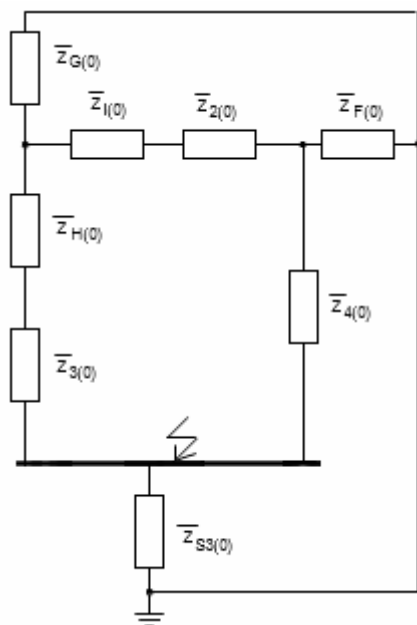
$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1(0)} &= \bar{Z}_{T1A(0)} + \bar{Z}_{A(0)} = \\ &= 3,7426 + 0,5892 = 4,3318\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2(0)} &= \bar{Z}_{T1B(0)} + \bar{Z}_{D(0)} = \\ &= -0,0331 + 2,7409 = 2,7078\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{3(0)} &= \bar{Z}_{T2B(0)} + \bar{Z}_{B(0)} = \\ &= -0,1452 + 0,8332 = 0,6880\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{4(0)} &= \bar{Z}_{T3B(0)} + \bar{Z}_{E(0)} = \\ &= -0,7445 + 3,2347 = 2,4902\Omega\end{aligned}$$

Obrázek 79: Zjednodušení obvodu 2



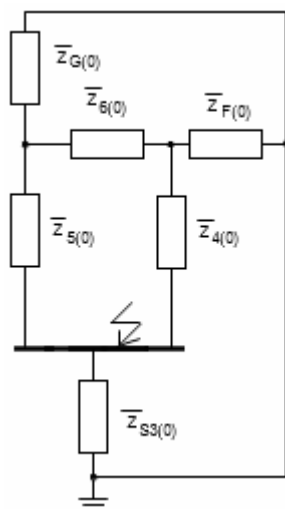
Obrázek 80: Zjednodušení obvodu 3 - Transfigurace $\bar{Z}_{1(0)}$, $\bar{Z}_{C(0)}$, $\bar{Z}_{T1C(0)}$

$$\bar{Z}_{G(0)} = \frac{\bar{Z}_{C(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{3,2973 \cdot 12,7997}{3,2973 + 4,3318 + 12,7997} = 2,0659\Omega$$

$$\bar{Z}_{H(0)} = \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{T1C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{4,2573 \cdot 12,7997}{3,2973 + 4,3318 + 12,7997} = 2,7141\Omega$$

$$\bar{Z}_{I(0)} = \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{C(0)}}{\bar{Z}_{C(0)} + \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{T1C(0)}} = \frac{4,2573 \cdot 3,2973}{3,2973 + 4,3318 + 12,7997} = 0,6992\Omega$$

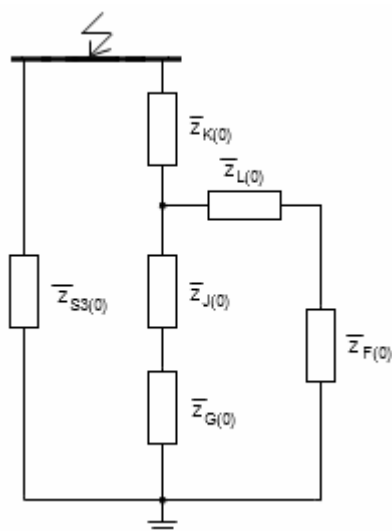
8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



$$\bar{Z}_{5(0)} = \bar{Z}_{H(0)} + \bar{Z}_{3(0)} = 2,7141 + 0,6880 = 3,4021\Omega$$

$$\bar{Z}_{6(0)} = \bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{2(0)} = 0,6992 + 2,7078 = 3,4070\Omega$$

Obrázek 81: Zjednodušování obvodu 4



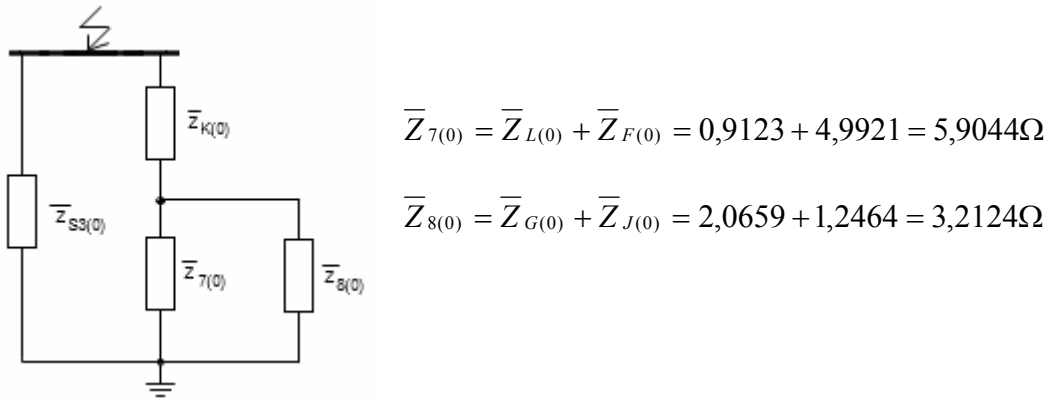
Obrázek 82: Zjednodušování obvodu 5 - Transfigurace $\bar{Z}_{4(0)}$, $\bar{Z}_{5(0)}$, $\bar{Z}_{6(0)}$

$$\bar{Z}_{K(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{5(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{2,4902 \cdot 3,4021}{2,4902 + 3,4021 + 3,4070} = 0,9110\Omega$$

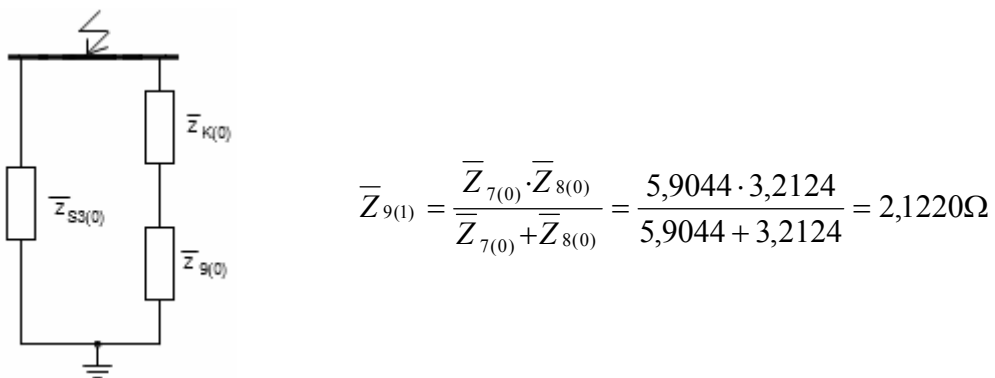
$$\bar{Z}_{J(0)} = \frac{\bar{Z}_{5(0)} \cdot \bar{Z}_{6(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{3,4021 \cdot 3,4070}{2,4902 + 3,4021 + 3,4070} = 1,2464\Omega$$

$$\bar{Z}_{L(0)} = \frac{\bar{Z}_{4(0)} \cdot \bar{Z}_{6(0)}}{\bar{Z}_{4(0)} + \bar{Z}_{5(0)} + \bar{Z}_{6(0)}} = \frac{2,4902 \cdot 3,4070}{2,4902 + 3,4021 + 3,4070} = 0,9123\Omega$$

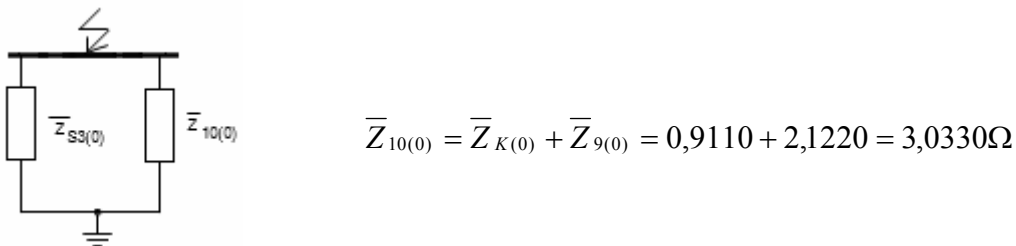
8. VÝPOČET ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODNY 110kV DLE ČSN EN 60909



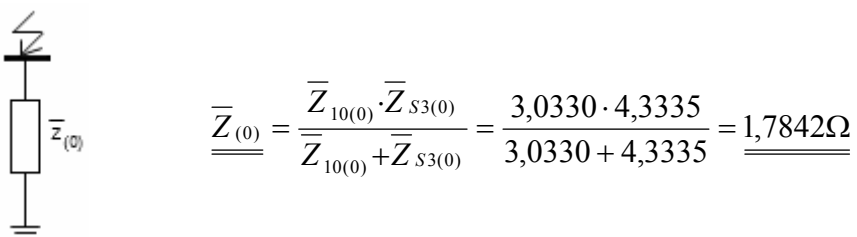
Obrázek 83: Zjednodušení obvodu 6



Obrázek 84: Zjednodušení obvodu 7



Obrázek 85: Zjednodušení obvodu 8



Obrázek 86: Výsledná netočivá impedance 1f zkratu po zavedení přímé transformace

8.6 ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON DLE ČSN EN 60909**8.6.1 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE**

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k3}''}} = \frac{c \cdot \bar{U}_N}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,1980} = \underline{\underline{16641,1107 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k3}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 16641,1107 = \underline{\underline{3170,5574 MVA}}$$

8.6.2 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k3}''}} = \frac{c \cdot \bar{U}_N}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,2407} = \underline{\underline{21556,8805 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k3}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 21556,8805 = \underline{\underline{4107,1373 MVA}}$$

8.6.3 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PŘED ZAVEDENÍM PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k1}''}} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_N}{2 \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{2 \cdot 4,1980 + 1,7996} = \underline{\underline{20555,7444 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 20555,7444 = \underline{\underline{3916,3953 MVA}}$$

8.6.4 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PO ZAVEDENÍ PŘÍMÉ TRANSFORMACE

$$\underline{\underline{\bar{I}_{k1}''}} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_N}{2 \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,2407 + 1,7842} = \underline{\underline{25355,4670 A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{S}_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_N \cdot \bar{I}_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 25355,4670 = \underline{\underline{4830,8653 MVA}}$$

9. ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je určení poměrů při třífázovém a jednofázovém zkratu v rozvodně 110kV Sokolnice v uzlu S04 před a po instalaci přímé transformace 400/110kV (před a po roce 1995). Přímá transformace je provedena instalací transformátoru T402 do původní konfigurace rozvodny, kdy zároveň došlo k odinstalaci transformátoru T202. Práce vyšetřuje, jak velkou změnu zkratových poměrů instalace přímé transformace představuje.

Práce je rozdělena na dvě části, z nichž první se zabývá teorií nezbytnou pro výpočet zkratových poměrů, druhy zkratových poruch, průběhy zkratových proudů a průběhy napětí při zkratu a metodami výpočtu zkratů. Výpočet použitý v této práci je dle metody postupného zjednodušování obvodu zkratové impedance, s aplikací metody souměrných složek.

Druhá část práce se věnuje praktickému výpočtu zkratových poměrů v rozvodně 110kV Sokolnice v uzlu S04, a to jak podle původní české normy ČSN 33 30 20 s nominálním převodem transformátorů, tak i podle normy evropské ČSN EN 60909. Tímto je tedy určen rozdíl mezi výpočty podle obou výše zmíněných norem. Hodnoty byly vypočteny v programu MATLAB 7, s přesností na 4 desetinná místa.

Hodnoty vypočtených zkratových proudů a výkonů jsou uvedeny v následujících tabulkách:

ČSN 33 30 20				
Druh zkratu	Třífázový		Jednofázový	
Stav rozvodny	S_{k3} (MVA)	I_{k3} (A)	S_{k1} (MVA)	I_{k1} (A)
Před přímou transformací	3223,0725	16916,7432	3988,8117	20935,8321
Po přímé transformaci	4191,7299	22000,8763	4931,3343	25882,7925

Tabulka 5: Zkratový proud a výkon v rozvodně 110kV podle ČSN 33 30 20

ČSN EN 60909				
Druh zkratu	Třífázový		Jednofázový	
Stav rozvodny	S_{k3} (MVA)	I_{k3} (A)	S_{k1} (MVA)	I_{k1} (A)
Před přímou transformací	3170,5574	16641,1107	3916,3953	20555,7444
Po přímé transformaci	4107,1373	21556,8805	4830,8653	25355,4670

Tabulka 6: Zkratový proud a výkon v rozvodně 110kV podle ČSN EN 60909

Rozdíl mezi ČSN 33 30 20 a ČSN EN 60909				
Druh zkratu	Třífázový		Jednofázový	
Stav rozvodny	S_{k3} (%)	I_{k3} (%)	S_{k1} (%)	I_{k1} (%)
Před přímou transformací	1,6294		1,8155	
Po přímé transformaci	2,0181		2,0374	

Tabulka 7: Zhodnocení rozdílu mezi ČSN 33 30 20 a ČSN EN 60909

9. ZÁVĚR

Z tabulek 5 a 6 vyplývá, že instalací přímé transformace dojde v rozvodně ke **zvýšení** zkratových poměrů při obou druzích zkratu. Tuto skutečnost potvrzuje výpočet podle normy ČSN 33 30 20 i ČSN EN 60909.

Jelikož původní vypínače rozvodny 110kV měly jmenovitou zkratovou odolnost 3500 MVA, novým poměrům (4107MVA) při zkratu vypínače **nevyhoví** a je třeba je vyměnit za vypínače s vyšší zkratovou odolností. Pro kontrolu dynamických účinků zkratu použijeme třífázový zkrat, pro kontrolu na dovolené oteplení uijeme zkrat jednofázový. Navrhovaný zkratový výkon nových vypínačů je vzhledem k budoucím možnostem rozšíření rozvodny 5000 MVA.

Tabulka 7 uvádí rozdíl mezi hodnotami vypočtenými dle ČSN 33 30 20 a ČSN EN 60909. Je vidět, že rozdíl mezi těmito hodnotami je maximálně **2%**, přitom výpočtem podle ČSN 33 30 20 vychází vyšší zkratové poměry. Z toho vyplývá, že korekční součinitele impedancí transformátorů a generátorů, nově zavedené v normě ČSN EN 60909, mají **velmi malý vliv** na výslednou hodnotu zkratových proudů a výkonů. Této odchylky se dá dosáhnout počítáním na nižší počet desetinných míst (3 místo 4).

10. POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] BLAŽEK, V. , SKALA P. , *Distribuce elektrické energie*, skriptum VUT Brno, 2004
- [2] BALÁK, R. , PAUZA, J. , *Elektroenergetika II*, SNTL Praha 1983, 344 stran,
TD 621.311(073.3)
- [3] ČSN EN 60909-0, *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*, část 0
- [4] ČSN EN 60909-0-1, *Zkratové proudy v 3f soustavách, část 1 - Koeficienty zkratů*
- [5] ČSN EN 60909-0-3, *Zkratové proudy v 3f soustavách, část 3 – Nesouměrný průběh*
- [6] ČSN EN 60909-0-4, *Zkratové proudy v 3f soustavách, část 4 – Příklady výpočtu*
- [7] BLAŽEK, V. , PAAR, M. , *Přenosové sítě*, skriptum VUT Brno, 2007
- [8] MEŠTER, M. , *Výpočet skratových prúdov*, ISBN 80-89057-10-1, ABB Bratislava
- [9] ČSN 33 30 20, *Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě*