

**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 110 kV Sokolnice po  
zavedení přímé transformace 400/110 kV**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

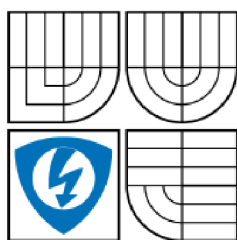
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ KLIMEŠ**

**BRNO 2008**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

*Student:* Klimeš Jiří

*ID:* 78519

*Ročník:* 3

*Akademický rok:* 2007/2008

### 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:

a) před instalací transformátoru 400/110 kV

b) 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:* 17.12.2007

*Termín odevzdání:* 4.6.2008

*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: Jiří Klimeš

Bytem: Nová 199, Vranovice 69125

Narozen/a (datum a místo): 25. 4. 1986 v Hustopečích

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(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 110 kV Sokolnice po zavedení přímé transformace 400/110 kV

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v \*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

---

\* 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





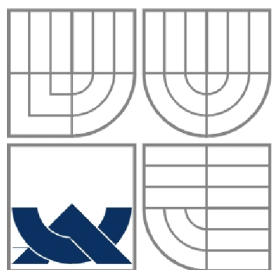
Bibliografická citace práce:

KLIMEŠ, J. *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, 2008. 51 s. 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.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

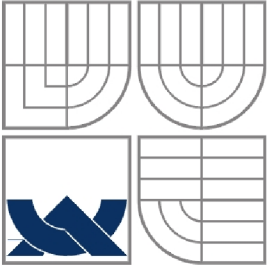
**Zkratové poměry v rozvodně 110 kV  
Sokolnice  
po zavedení přímé transformace  
400/110 kV**

**Jiří Klimeš**

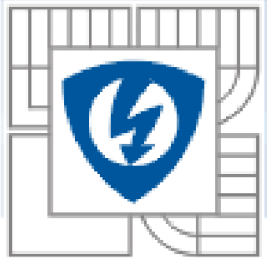
**vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



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

**Bachelor's Thesis**

**Short Circuit Currents in the Sokolnice  
110 kV Switching Station  
with Direct 400/110 kV Transformation  
Applied**

by

**Jiří Klimeš**

**Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.**

**Brno University of Technology, 2008**

**Brno**

## ABSTRAKT

Úkolem této bakalářské práce je vypočítat a zjistit, zda současné technické vybavení rozvodny Sokolnice 110 kV (viz. obr. 3.1) a její parametry vyhoví jmenovité zkratové odolnosti i po zavedení přímé transformace 400/110 kV (viz. obr. 3.2) instalací transformátoru T402.

Výpočet se provede v pojmenovaných jednotkách pro třífázový a jednofázový zkrat podle postupu, který je dán normou ČSN EN 60909-0.

Ze zadaných údajů se vypočítají náhradní zkratové impedance všech prvků v obvodu a jeho postupným zjednodušováním se dojde až k výsledné zkratové impedanci. Protože se výpočet provádí i pro jednofázový zkrat, musí se vypočítat celková zkratová impedance i pro souměrnou zpětnou a netočivou složku. Z výsledné zkratové impedance se poté vypočítá rázový zkratový proud a následně se vypočítá z rázového zkratového proudu rázový zkratový výkon.

Velikost vypočteného rázového zkratového výkonu se porovná s jmenovitou zkratovou odolností rozvodny a tím se zjistí, zda rozvodna vyhoví nebo nevyhoví. Nevyhoví-li, bude se muset pravděpodobně provést výměna dosavadní výzbroje rozvodny za takovou, která už vypočteným rázovým zkratovým výkonům vyhoví.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** výpočet zkratů; zkratové poměry; zkratý

**ABSTRACT**

The task of this bachelor's thesis is calculated to determine whether the current technical equipment switching station Sokolnice 110 kV (see Figure 3.1) and its parameters matches the nominal short-circuit resistance, even after the introduction of direct transformation 400/110 kV (see Figure 3.2).

The calculation is done in units named for the three-phase short circuit, and one short circuit according to the procedure, which is given standard EN 60909-0.

From entered data to calculate the alternative short-circuit impedance of all elements in the network and its progressive simplification of the event to the resulting short-circuit impedance. Since the calculation carried out for one short circuit, it should calculate the total short circuit impedance for symmetrical negative-sequence and zero-sequence component. From the resulting short-circuit impedance is then calculated short circuit current and subsequently calculated from the short-circuit current short circuit power.

The size calculated short-circuit power compared with a nominal short circuit resistance switching station and thus will determine whether or not to switch matches. If it fails, it will likely have to carry out the exchange of existing equipment such as switching, which has been calculated surge short-circuit power matches.

**KEY WORDS:** short-circuit calculation; short circuit currents; short-circuit

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>13</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>14</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 PŘECHODNÉ JEVY .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ .....</b>	<b>15</b>
1.2.1 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU.....	18
1.2.2 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU .....	19
<b>2 VÝPOČTY ZKRATŮ .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 OBECNÁ METODA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 PŘEDPOKLADY VÝPOČTU .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 VÝPOČET VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE .....	22
2.4.2 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY .....	25
<b>2.5 POUŽITÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....</b>	<b>26</b>
<b>2.6 POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ RÁZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD <math>I_k''</math> .....</b>	<b>29</b>
2.6.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT .....	29
2.6.2 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT.....	29
<b>3 VÝPOČET PODLE NORMY ČSN EN 60909-0 .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 ZADÁNÍ.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 PŘEPOČET PRVKŮ OBVODU NA IMPEDANCE.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 NAPÁJECÍ SÍŤ.....	31
3.2.2 TRANSFORMÁTORY.....	32
<b>3.3 TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU PŘED PŘÍMOU TRANSFORMACÍ .....	38
3.3.2 VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU PO PŘÍMÉ TRANSFORMACI .....	41
<b>3.4 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT .....</b>	<b>44</b>
3.4.1 VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU PŘED PŘÍMOU TRANSFORMACÍ .....	45
3.4.2 VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU PO PŘÍMÉ TRANSFORMACI .....	47
<b>4 ZÁVĚR.....</b>	<b>50</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>51</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1- 1</i>	<i>Úbytek napětí v obvodu při trojfázovém zkratu.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1- 2</i>	<i>Druhy zkratů.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1- 3</i>	<i>Průběh zkratového proudu.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2- 1</i>	<i>Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťové napáječe.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2- 2</i>	<i>Trojvinuťový transformátor – označení zapojení vinutí a náhradní schéma.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2- 3</i>	<i>Sousledná složka zkratové impedance.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2- 4</i>	<i>Zpětná složka zkratové impedance.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2- 5</i>	<i>Netočivá složka zkratové impedance.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2- 6</i>	<i>Zapojení sousledných, zpětných a netočivých souměrných složek.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3- 1</i>	<i>Před zavedením přímé transformace 400/110 kV v uzlu SO 4.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3- 2</i>	<i>Po zavedení přímé transformace 400/110 kV v uzlu SO 4.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3- 3</i>	<i>Celý obvod nahrazen souslednými impedancemi.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3- 4</i>	<i>Transformátory nahrazeny jedinou impedancí.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3- 5</i>	<i>Zjednodušení na impedance <math>\underline{Z}_1</math> a <math>\underline{Z}_2</math>.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3- 6</i>	<i>Zjednodušení obvodu na impedanci <math>\underline{Z}_3</math>.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3- 7</i>	<i>Sériově-paralelní zapojení impedancí <math>\underline{Z}_2, \underline{Z}_3</math> a <math>\underline{Z}_{Q3(1)}</math>.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3- 8</i>	<i>Výsledná zkratová impedance <math>\underline{Z}_{K(1)}</math>.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3- 9</i>	<i>Náhrada prvků obvodu souslednými impedancemi.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 3- 10</i>	<i>Transformátory nahrazeny jedinou impedancí.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 3- 11</i>	<i>Naznačení zjednodušení obvodu transfigurací.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 3- 12</i>	<i>Obvod s použitou transfigurací.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 3- 13</i>	<i>Zjednodušení obvodu impedancemi <math>\underline{Z}_1</math> a <math>\underline{Z}_2</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 3- 14</i>	<i>Sériově-paralelní součet impedancí na impedanci <math>\underline{Z}_3</math>.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 3- 15</i>	<i>Výsledná zkratová impedance <math>\underline{Z}_{K(1)}</math>.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 3- 16</i>	<i>Náhradní schéma obvodu pro výpočet netočivé složky zkratové impedance.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 3- 17</i>	<i>Součet impedancí vinutí A a C transformátorů T201 a T202.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 3- 18</i>	<i>Celkové impedance transformátorů T201 a T202.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 3- 19</i>	<i>Výsledná zkratová impedance <math>\underline{Z}_{K(0)}</math>.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 3- 20</i>	<i>Náhradní schéma obvodu pro výpočet netočivé složky zkratové impedance.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 3- 21</i>	<i>Součet impedancí vinutí A a C transformátorů T402 a T201.....</i>	<i>48</i>



---

<i>Obr. 3- 22</i>	<i>Celkové impedance transformátorů T402 a T201 .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 3- 23</i>	<i>Výsledná zkratová impedance <math>\underline{Z}_{K(0)}</math> .....</i>	<i>48</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1- 1</i>	<i>Pravděpodobnost výskytu zkratů v sítích</i> .....	<i>18</i>
<i>Tab. 2- 1</i>	<i>Napěťový součinitel c</i> .....	<i>24</i>
<i>Tab. 3- 1</i>	<i>Zadané rázové zkratové výkony sítí</i> .....	<i>31</i>
<i>Tab. 3- 2</i>	<i>Zadané parametry transformátorů</i> .....	<i>31</i>
<i>Tab. 4- 1</i>	<i>Výsledné hodnoty rázových zkratových výkonů a proudů</i> .....	<i>50</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$a$	Komplexní konstanta
$c$	Napěťový součinitel
$cU_n / \sqrt{3}$	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
$I_{(1)}, I_{(2)}, I_{(0)}$	Proud sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
$I_b$	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
$I_k$	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
$I_k''$	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
$I_{th}$	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_p$	Nárazový zkratový proud
$K$	Korekční součinitel pro impedance
$R$	Rezistance
$S_k''$	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
$t_r$	Jmenovitý převod transformátoru
$U_n$	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
$u_{kr}$	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru v procentech
$x_T$	Poměrná reaktance transformátoru
$X$	Reaktance
$Z$	Impedance
$Z_K$	Zkratová impedance
$Z_Q, Z_{Qt}$	Zkratová impedance sítě, vztažená ke straně transformátoru
$Z_T$	Zkratová impedance transformátoru
$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(0)}$	Sousledná, zpětná a netočivá impedance zkratového obvodu

# 1 ÚVOD

## 1.1 Přejchodné jevy

Příčinou přechodného stavu jsou nenormální jevy vznikající za provozu přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace (vlivem stárnutí, cizího zavinění, úderem blesku apod.) nebo v ovládání soustavy (chybná ruční nebo automatická manipulace s vypínacími prvky apod.). 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 s jmenovitým kmitočtem. Přechodné děje rozdělujeme na:

1. Pomalé – elektromechanické. U nich je perioda přechodných složek 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 soustředěných parametrů.
2. Středně rychlé – elektromagnetické. U nich je perioda přechodných složek srovnatelná s periodou proudu s jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů se zanedbává a elektrická část se řeší za pomoci soustředěných parametrů.
3. Rychlé přechodné jevy – u kterých je perioda přechodných složek podstatně menší než u proudu s jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot je rovněž 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 (velikosti zatížení, odstavování pro kontroly a údržbu apod.), porušení izolace v důsledku jejího stárnutí, vzniku nepředpokládaného přepětí (úder blesku), méně často také náhlou změnou výkonu odběrů.

Příčinou elektromagnetických přechodných dějů je zkratová porucha, tj. náhlá změna izolačního odporu mezi krajními vodiči, popřípadě středním vodičem nebo zemí v uzemněné soustavě.

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

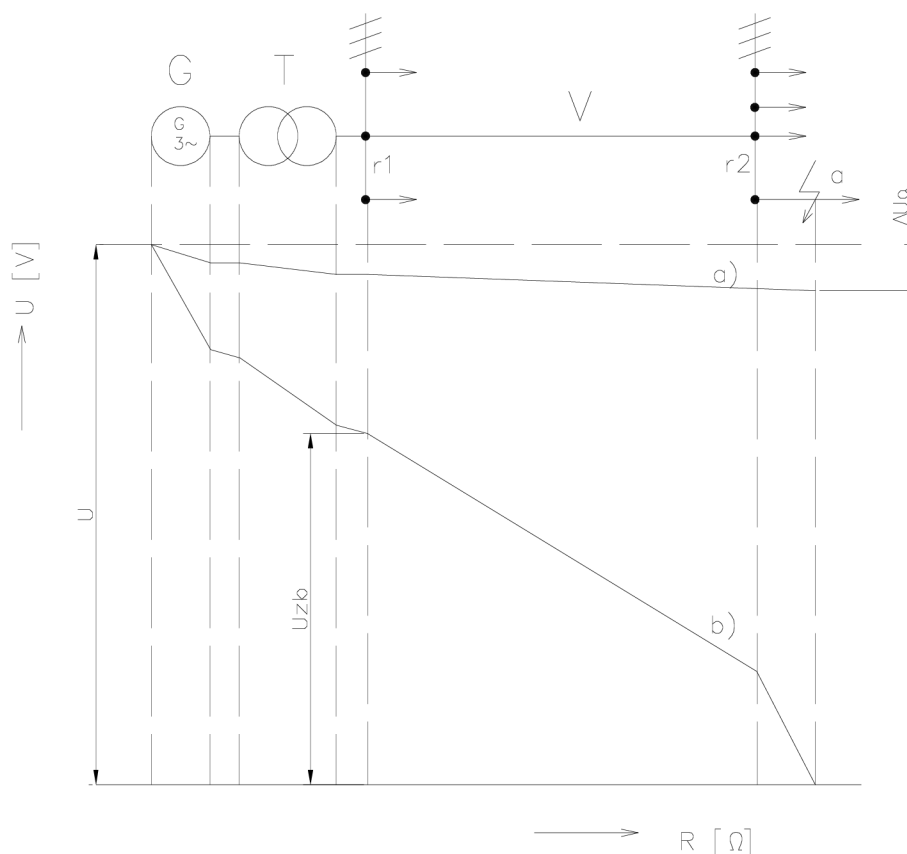
## 1.2 Zkraty v elektrizační soustavě

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

Příčinou chybného vodivého spojení mezi krajními vodiči, středním vodičem nebo zemí může být:

- chybná manipulace,
- mechanické poškození izolace,
- přirozené znehodnocování izolace (např. vlhkostí),
- poškození izolace v důsledku zvýšeného elektrického namáhání při úderu blesku nebo spínacích pochodech.

Zmenšení impedance má za následek zvětšení proudu, který protéká mezi zdroji a místem poruchy. Tento proud ohrožuje zařízení elektrizační soustavy svými dynamickými a tepelnými účinky. Napětí v místě zkratu klesne na nepatrnou velikost (při dokonalém zkratu teoreticky až na nulu), takže celé vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v generátorech, transformátorech, venkovních popř. kabelových vedeních, nebo dalších prvcích sítě (viz. obr. 1-1). V celém postiženém obvodu se projeví pokles napětí, který vzrůstá od zdrojů až k místu zkratu.



Obr. 1-1 Úbytek napětí v obvodu při trojfázovém zkratu [3]

a) při normálním zatížení

b) při zkratu

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

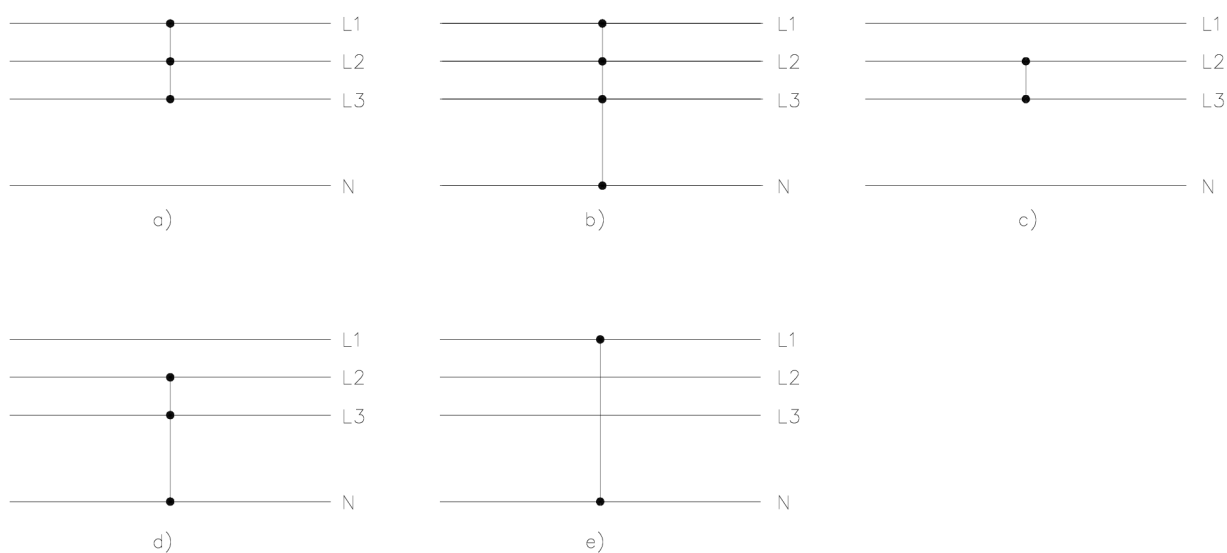
- zkraty dokonalé (kovové), se zanedbatelným přechodovým odporem (dokonalý styk kovových vodičů),

- zkraty nedokonalé s hořícím obloukem nebo jinak nedokonalým stykem vodičů, které ohrožují místo poruchy a jeho okolí požárem.

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

Podle způsobu zatěžování třífázových zdrojů při zkratech rozeznáváme:

- zkraty souměrné
  - třífázové (Obr. 1-2a)
  - třífázové zemní (Obr. 1-2b)
- zkraty nesouměrné
  - dvoufázové (Obr. 1-2c)
  - dvoufázové zemní (Obr. 1-2d)
  - jednofázové (Obr. 1-2e)



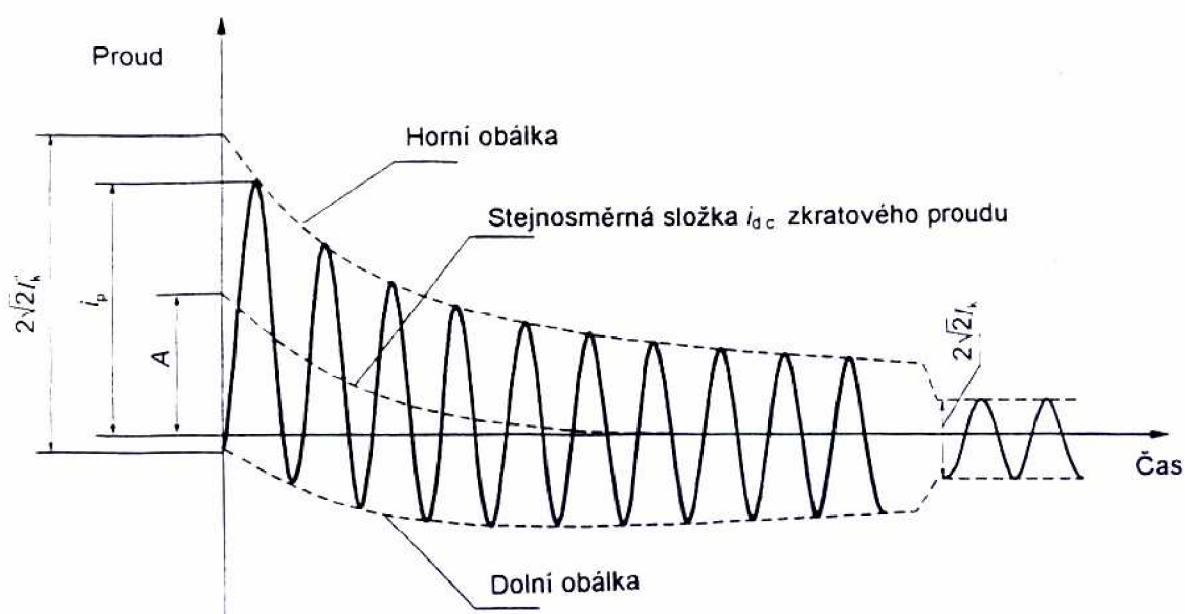
Obr. 1- 2 Druhy zkratů

Tab. 1-1 Praviděpodobnost výskytu zkratů v sítích [5]

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu [%]		
	vn	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

### 1.2.1 Průběh zkratového proudu

Náhlá změna impedance na svorkách zdrojů při zkratové poruše má za následek přechodný děj ve všech prvcích elektrizační soustavy. Velkým zkratovým proudem se poruší rovnováha mezi polem magnetickým a elektrickým v prostoru elektrizační soustavy a do nového rovnovážného stavu přechází soustava pomocí přechodných složek proudu a napětí s vlastní periodou příslušných obvodů. Stanovení časového průběhu napětí a proudu při zkratu se obvykle zjednodušuje – zanedbávají se 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.



Obr. 1-3 Průběh zkratového proudu [2]

## 1.2.2 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Pro potřeby dimenzování elektrických zařízení a nastavení ochran není zapotřebí celý časový průběh zkratového proudu, ale jen tzv. charakteristické hodnoty zkratového proudu:

- počáteční rázový zkratový proud  $I_k''$ ,
- nárazový zkratový proud  $i_p$ ,
- zkratový vypínací proud  $I_b$ ,
- ekvivalentní oteplovací zkratový proud  $I_{th}$ ,
- ustálený zkratový proud  $I_k$ ,
- dobu trvání zkratu  $t_k$ .

**Počáteční rázový zkratový proud**  $I_k''$  je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu a určí se podle vztahu

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} |Z_k|} \quad (1.1)$$

**Nárazový zkratový proud**  $i_p$  je největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase  $t = 0,01$  s po vzniku zkratu.

**Zkratový vypínací proud**  $I_b$  je definován jako efektivní hodnota střídavého proudu v okamžiku vypnutí zkratu  $t_k$ . Souměrný vypínací zkratový proud se využívá společně se stejnosměrnou složkou vypínacího zkratového proudu při kontrole vhodnosti volby vypínačů a jisticích zařízení. Podle normy je možné pro zkraty elektricky vzdálené od synchronního stroje uvažovat souměrný vypínací zkratový proud rovný počátečnímu rázovému zkratovému proudu.

$$I_b = I_k'' \quad (1.2)$$

**Ekvivalentní oteplovací zkratový proud**  $I_{th}$  je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu  $t_k$  vyvine při průchodu rezistancí  $R$  stejné množství tepla  $Q$  jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou. Ekvivalentní oteplovací proud se používá při kontrole tepelných účinků zkratového proudu. Při praktických výpočtech se stanoví z počátečního rázového zkratového proudu  $I_k''$  pomocí koeficientu  $k_e$ , který je tabelován v normě pro různá místa zkratu a různé doby jeho trvání.

$$I_{th} = k_e I_k'' \quad (1.3)$$

**Ustálený zkratový proud**  $I_k$  je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který protéká obvodem po odeznění přechodných dějů.



## 2 VÝPOČTY ZKRATŮ

### 2.1 Obecná metoda

Celkovou výpočtovou impedancí  $Z_k$  lze určit postupným zjednodušováním náhradního obvodu. Tato metoda je však v případě složitějších sítí pracná a její postup nelze jednoduše zobecnit. Možností je ale využití obecné metody výpočtu zkratů založené na Théveninově větě a na metodě uzlových napětí.

Uvažujme dokonalé zkratové spojení k-tého uzlu se zemí. V jednofázovém náhradním schématu zkratového obvodu můžeme toto spojení reprezentovat větní s nulovou impedancí. Zajímá nás pouze proud tekoucí touto větví – zkratový proud. Použijeme-li na tento obvod Théveninovu větu, nahradíme celý obvod pouze jedním náhradním napěťovým zdrojem o napětí  $U_0$  a k němu v sérii zapojenou impedanci – náhradní impedancí  $Z_k$ . Napětí  $U_0$  je napětí, které bychom naměřili v k-tém uzlu před zkratem, tedy asi  $U_0 \cong \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3}}$ . Impedance  $Z_k$  odpovídá impedanci, kterou bychom naměřili před zkratem mezi k-tým uzlem a zemí při zkratovaných napěťových zdrojích. Matice obvodu, který popíšeme metodou uzlových napětí vypadá následovně

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{Y}_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{Y}_{k1} & \cdot & \underline{Y}_{kk} & \cdot & \underline{Y}_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{Y}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \cdot \\ \underline{U}_k \\ \cdot \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \underline{I}_k \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Inverzí admitanční uzlové matice  $[Y]$  získáme impedanční matici  $[Z] = [Y]^{-1}$  a vektor neznámých napětí můžeme vyjádřit z (2.1) následovně:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \cdot \\ \underline{U}_k \\ \cdot \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{Z}_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{Z}_{k1} & \cdot & \underline{Z}_{kk} & \cdot & \underline{Z}_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{Z}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \underline{I}_k \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Z toho plyne, že

$$\frac{\underline{U}_k}{\underline{I}_k} = \underline{Z}_{kk}, \quad (2.3)$$

což je právě hledaná impedance  $Z_k$ . Nyní můžeme dosadit  $Z_k = Z_{kk}$  do rovnice počátečního souměrného rázového zkratového proudu (2.15).

Tento postup jde použít na všechny uzly sítě. Když sestavíme odpovídající matici  $[Y]$  a poté provede její inverzi ( $[Z] = [Y]^{-1}$ ), určíme hodnoty počátečních rázových zkratových proudů ve všech uzlech sítě pomocí diagonálních prvků matice  $[Z]$ .

Takto získané hodnoty impedancí  $Z_k$  jsou ovšem přepočteny na vztažné napětí  $U_v$  a chceme-li získat skutečné hodnoty zkratových proudů, je nutný jejich zpětný přepočet na odpovídající napěťové hladiny.

## 2.2 Předpoklady výpočtu

Zkratové proudy zjišťujeme buď pro volbu a dimenzování elektrického zařízení na jejich účinky, nebo pro volbu a nastavení ochran ve zkratovém obvodu. Největší možné hodnoty zkratových proudů se určují za těchto předpokladů:

- a) zapojení soustavy takové, které v místě zkratu dává největší zkratové proudy,
- b) chod uvažovaných zdrojů je s jmenovitým výkonem, napětím a účínkem,
- c) chod motorů,
- d) při uvažování rezistancí vodičů je jejich teplota 20 °C.

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance  $K_T$  pro síťové transformátory.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní impedance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když tyto předpoklady pro uvažované elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti.

Pro souměrné a nesouměrné zkraty podle obr. 1-2 je vhodné počítat zkratové proudy pomocí metody souměrných složek (viz. kapitola o souměrných složkách).

Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud.

Impedance zařízení v sítích, které mají jinou napěťovou hladinu než je hladina vztažná musí být vyděleny nebo vynásobeny čtvercem jmenovitého převodu transformátoru  $t_r$ . Napětí a proudy musí být přepočteny jmenovitým převodem transformátoru  $t_r$ .

Pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu je dovoleno uvažovat  $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ . Typ zkratu, který vede k největšímu zkratovému proudu závisí na hodnotách sousledných, zpětných a netočivých zkratových impedancí soustavy.

Pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu  $I_k''$ , souměrného zkratového vypínacího proudu  $I_b$  a ustáleného zkratového proudu  $I_k$  v místě zkratu je možné síť

převést pomocí postupného zjednodušování na ekvivalentní zkratovou impedanci  $Z_k$  v místě zkratu. Tento postup není přípustný při výpočtu nárazového zkratového proudu  $i_p$ .

### 2.3 Výpočet ve skutečných hodnotách

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  $U_v$ . Za vztažnou napěťovou hladinu se obvykle volí (jak už je napsáno v kapitole 2.2) 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 sítě. Podélné impedance prvků zkratového obvodu se v tomto případě přepočítávají do náhradního zkratového obvodu pomocí druhé mocniny převodu mezi základním obvodem s napětím  $U_v$  a obvodem s napětím  $U_n$ , ve kterém se nachází přepočítávaná impedance (transformačním převodem  $t_r$ , kterým jsou tyto napěťové hladiny vázány).

### 2.4 Zkratové impedance elektrických zařízení

Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí.

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

Netočivá zkratová impedance  $\underline{Z}_{(0)}$  se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným vedením. V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli  $K_G$ ,  $K_T$  a  $K_S$  nebo  $K_{SO}$  pokud se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu.

Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů, atd. jsou postradatelné; odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem.

#### 2.4.1 Síťové napáječe

Často se stává, že při výpočtech zkratových poměrů neznáme detailní konfiguraci sítě, a proto příspěvek takovéto sítě modelujeme pomocí náhradní impedance vypočtené z jmenovitého napětí dané sítě  $U_{nQ}$  a počátečního rázového zkratového výkonu příspěvku sítě při trojfázovém zkratu  $S''_{kQ}$ , případně počátečního rázového zkratového proudu příspěvku dané sítě  $I''_{kQ}$ .

Je-li trojfázový zkrat v souladu s obr. 2-1a napájen ze sítě, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I''_{kQ}$  v bodě připojení napáječe Q, pak ekvivalentní impedance  $Z_Q$  (sousedná zkratová impedance) sítě v bodě připojení napáječe Q se určuje následovně:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \quad (2.4)$$

Přepočet impedance sítě na vztažnou napěťovou hladinu se provede následovně:

$$Z_{Qp} = Z_Q \left( \frac{U_v}{U_{nQ}} \right)^2 = \frac{c \cdot U_v^2}{\sqrt{3} I''_{kQ} \cdot U_{nQ}} = \frac{c \cdot U_v^2}{S''_{kQ}} \quad (2.5)$$

Je-li zkrat v souladu s obr. 2-1b napájen ze sítě vn, nebo vvn a zvn, u kterého je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I''_{kQ}$  v bodě připojení Q, pak lze souslednou zkratovou impedanci  $Z_{Qt}$  vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím určit takto:

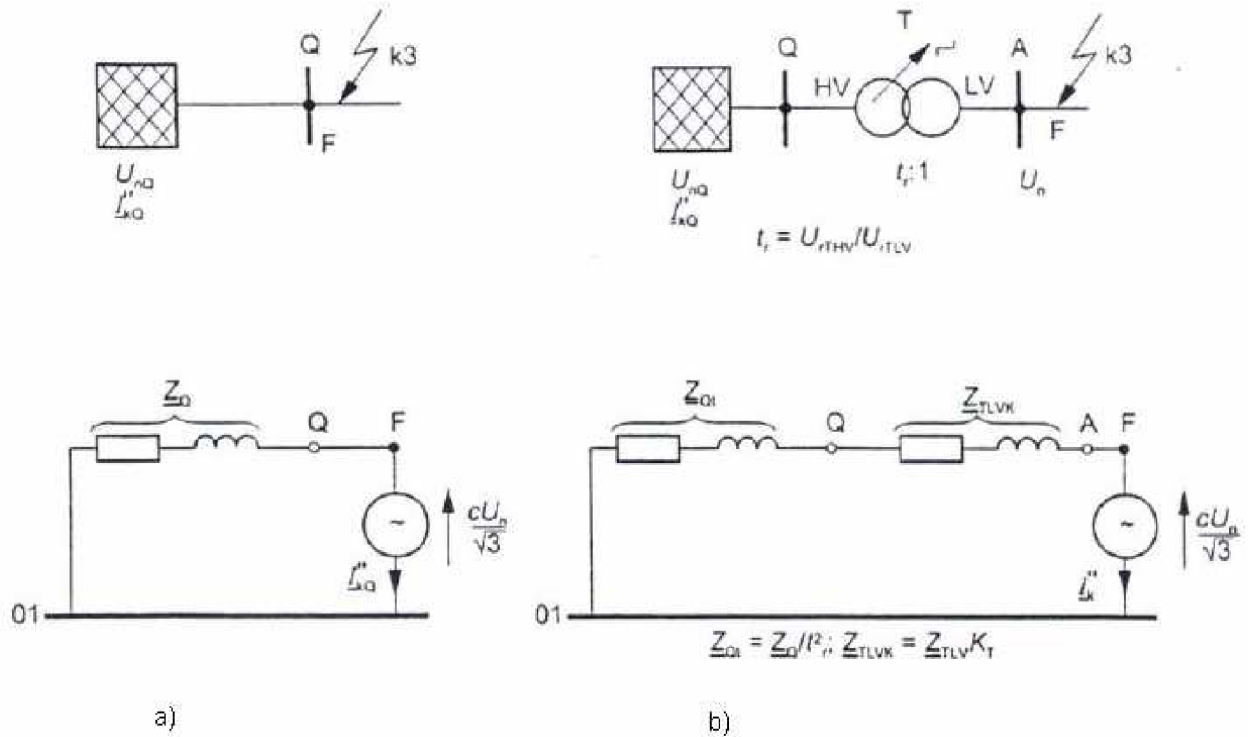
$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (2.6)$$

kde

$U_{nQ}$	je	jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q;
$I''_{kQ}$		počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q;
$S''_{kQ}$		rázový zkratový výkon sítě;
$c$		napěťový součinitel pro napětí $U_{nQ}$ ;
$t_r$		jmenovitý převod transformátoru při kterém je přepínač odboček v základní poloze.

Chceme-li převést tuto impedanci na vztažnou napěťovou hladinu, postupujeme stejně jako v předchozím případě bez transformátoru.

$$Z_{Qp} = Z_{Qt} \left( \frac{U_v}{U_{nQ}} \right)^2 = \frac{c \cdot U_v^2}{\sqrt{3} I''_{kQ} \cdot U_{nQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{c \cdot U_v^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (2.7)$$



Obr. 2-1 Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťové napáječe [2]

a) bez transformátoru

b) s transformátorem

Tab. 2-1 Napěťový součinitel  $c$  [2]

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

### 2.4.2 Trojvůňové transformátory

U trojvůňových transformátůů lze sousledné zkratové impedance  $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$  podle obr. 2-2 vypočítat pomocí tří zkratových reaktancí

$$\underline{Z}_{AB} = jX_{TAB} = j \left( u_{kAB} \frac{U_v^2}{S_{rTAB}} \right) \quad (2.8a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = jX_{TAC} = j \left( u_{kAC} \frac{U_v^2}{S_{rTAC}} \right) \quad (2.8b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = jX_{TBC} = j \left( u_{kBC} \frac{U_v^2}{S_{rTBC}} \right), \quad (2.8c)$$

korekčního součinitele transformátoru

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (2.9a)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (2.9b)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}}, \quad (2.9c)$$

kde  $x_T$  je poměrná reaktance transformátoru a vypočítá se následovně:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \quad (2.10)$$

$U_{rT}$  je jmenovité napětí;

$S_{rT}$  jmenovitý zdánlivý výkon mezi danými stranami;

Korigované hodnoty zkratových impedancí:

$$\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB} \underline{Z}_{AB} \quad (2.11a)$$

$$\underline{Z}_{ACK} = K_{TAC} \underline{Z}_{AC} \quad (2.11b)$$

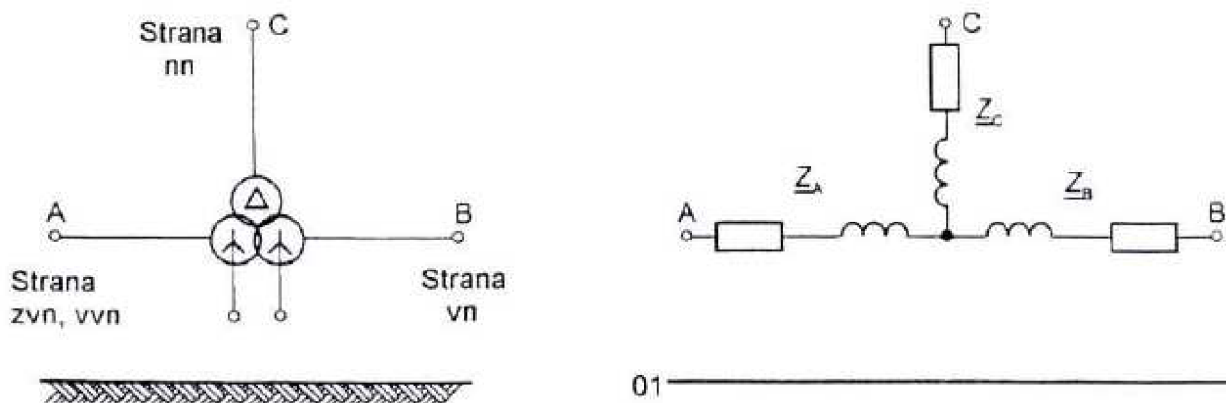
$$\underline{Z}_{BCK} = K_{TBC} \underline{Z}_{BC} \cdot \quad (2.11c)$$

Sousledné zkratové impedance jsou tedy:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (2.12a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (2.12b)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (2.12c)$$



Obr. 2-2 Trojvinuťový transformátor – označení zapojení vinutí a náhradní schéma [2]

## 2.5 Použití souměrných složek

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení.

Každou nesouměrnou soustavu lze nahradit souměrnými složkami fázorů soustavy sousledné, zpětné a netočivé:

- proud sousledné složkové soustavy  $\underline{I}_{(1)}$  ;
- proud zpětné složkové soustavy  $\underline{I}_{(2)}$  ;
- proud netočivé složkové soustavy  $\underline{I}_{(0)}$  ;

Budeme-li fázi L1 považovat za referenční, potom jsou proudy  $\underline{I}_{L1}$ ,  $\underline{I}_{L2}$ ,  $\underline{I}_{L3}$ :

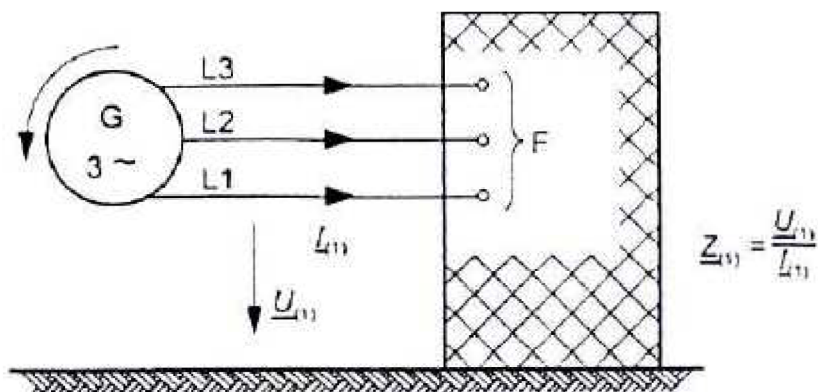
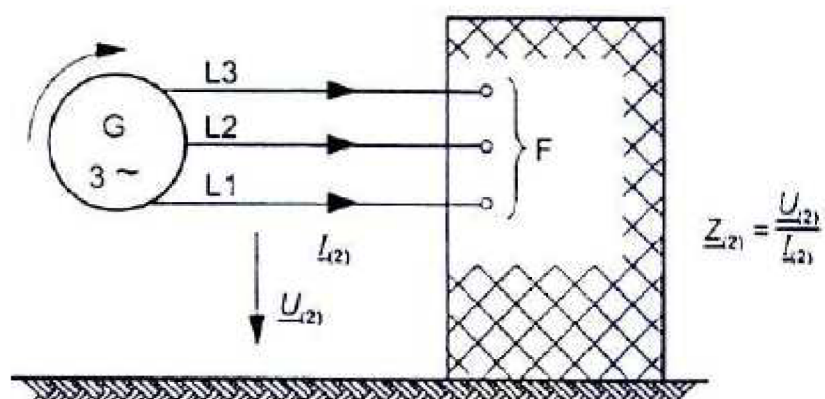
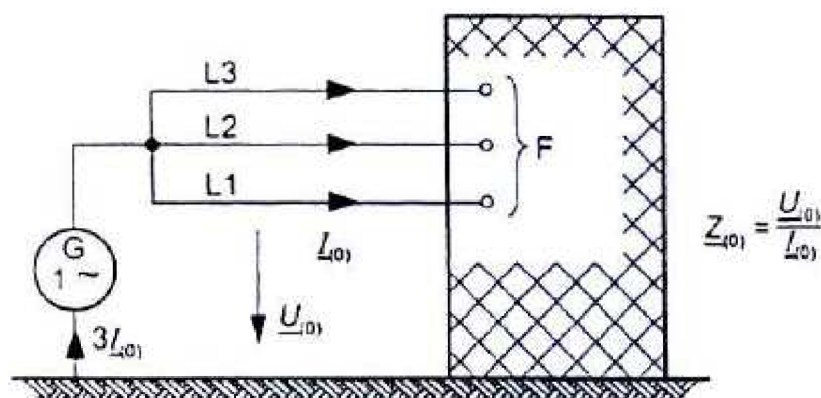
$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (2.13a)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (2.13b)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (2.13c)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (2.14a)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}; \quad (2.14b)$$

Obr. 2-3 Sousedná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(1)}$  [2]Obr. 2-4 Zpětná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(2)}$  [2]Obr. 2-5 Netočivá složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(0)}$  [2]

Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci.

Sousednou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(1)}$  v místě zkratu určíme podle obr. 2-3, když 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.



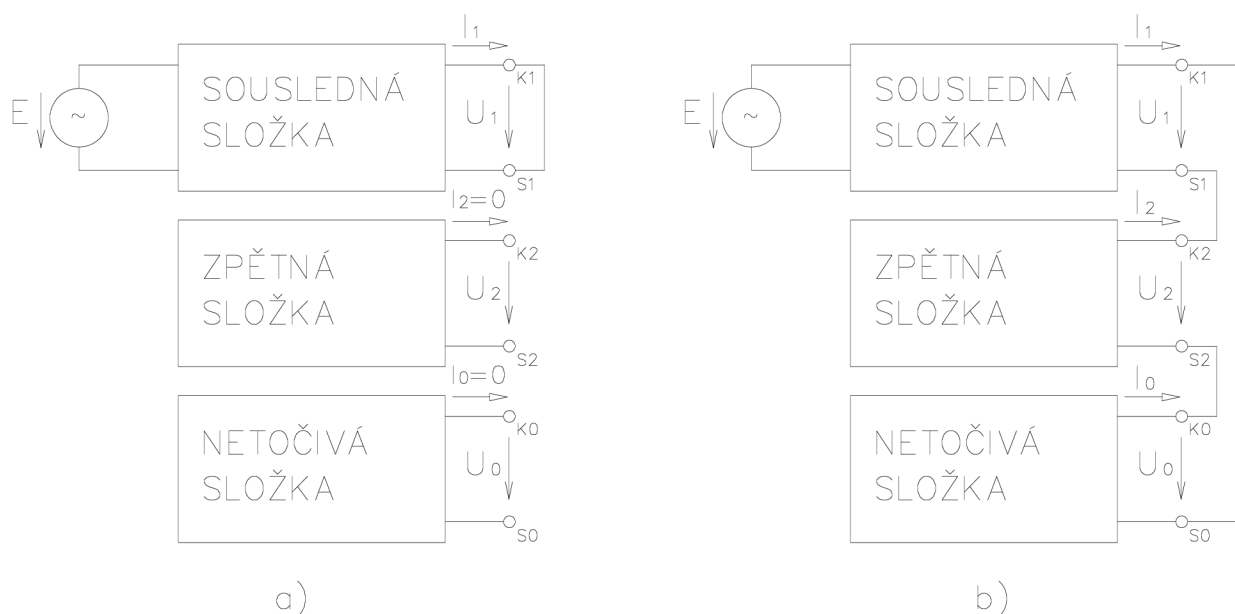
Zpětnou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(2)}$  v místě zkratu F určíme podle obr. 2-4, když souměrnou soustavu napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí (záporném) přiložíme do místa zkratu F.

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou navzájem lišit pouze v případě točivých strojů. Jinak je dovoleno uvažovat  $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ .

Netočivou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(0)}$  v místě zkratu F určíme dle obr. 2-5, když přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením (např. zemnicí soustavou, nulovým vodičem, zemnicími vodiči, stíněním kabelu a pláštěm kabelu).

Kapacity vedení (venkovních vedení a kabelů) v soustavách nízkého napětí se mohou zanedbat pro sousledné, netočivé a zpětné soustavy.

Zanedbání netočivé složky kapacit vedení v soustavách s uzemněným uzlem vede k výsledkům, které jsou mírně vyšší než skutečné hodnoty zkratových proudů. Odchyłka závisí na konfiguraci sítě.



Obr. 2-6 Zapojení sousledných, zpětných a netočivých souměrných složek pro

a) třífázový zkrat

b) jednofázový zkrat

## 2.6 Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_k''$

### 2.6.1 Trojfázový zkrat

Obecně se počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I_k''$  počítá podle rovnice (2.15) z napětí ekvivalentního napěťového zdroje  $cU_n/\sqrt{3}$  v místě zkratu a zkratové impedance  $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ .

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (2.15)$$

V místě zkratu se zavádí ekvivalentní zdroj napětí  $cU_n/\sqrt{3}$  se součinitelem  $c$ , který je uveden v tab. 1-2.

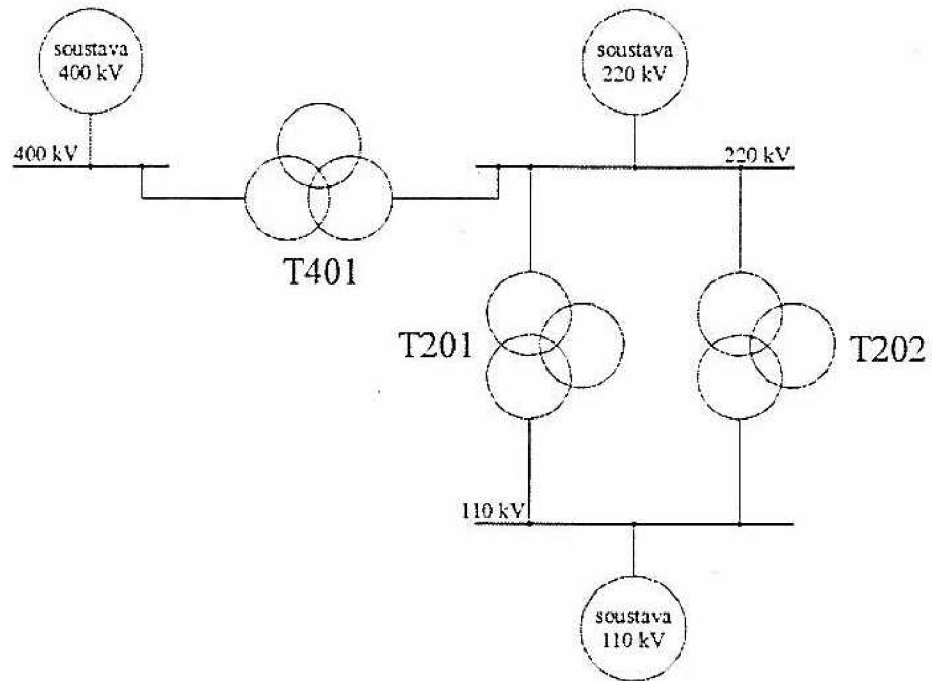
### 2.6.2 Jednofázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu  $I_{k1}''$  se vypočítá takto:

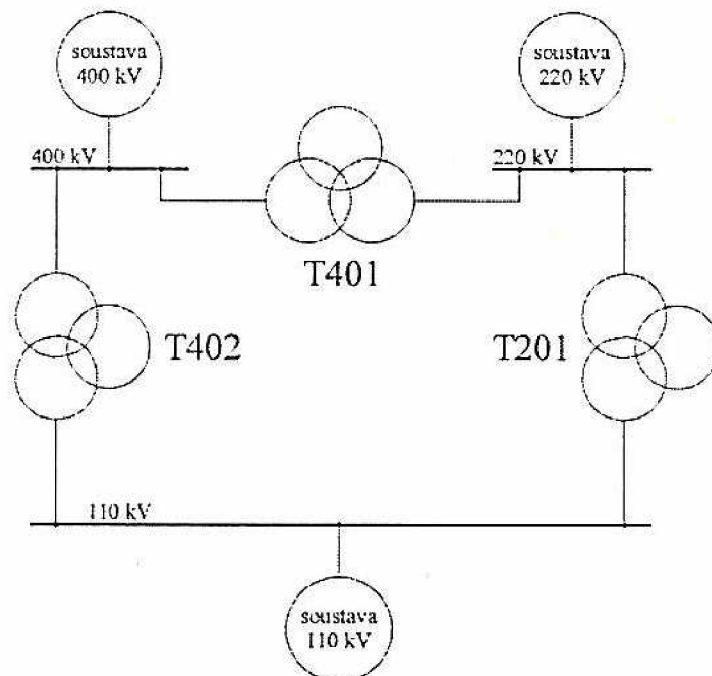
$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (2.16)$$

## 3 VÝPOČET PODLE NORMY ČSN EN 60909-0

### 3.1 Zadání



Obr. 3-1 Před zavedením přímé transformace 400/110 kV v uzlu SO 4



Obr. 3-2 Po zavedení přímé transformace 400/110 kV v uzlu SO 4

Tab. 3-1 Zadané rázové zkratové výkony sítí

soustava	400 kV	220 kV	110 kV
$S_k^{(3)}$ (MVA)	17344	2407,7	1000
$S_k^{(1)}$ (MVA)	14092,5	1818,6	1290

Tab. 3-2 Zadané parametry transformátorů

parametr	T401	T402	T201, T202
$S_{rT}$ (MVA)	400	350	200
$t_r$ (-)	400/231/34	400/121/10,5	231/121/10,5
$u_{krAB}$ (%)	9,75	14	9,3
$u_{krAC}$ (%)	44,3	35	30
$u_{krBC}$ (%)	34	20	18
spojení vinutí	$Y_n/Y_n/D$	$Y_n/Y_n/D$	$Y_n/Y_n/D$

## 3.2 Přepočet prvků obvodu na impedance

### 3.2.1 Napájecí síť

Výsledné náhradní impedance napájecích sítí se vypočítají podle (2.4 a 2.6). Jelikož jsou to napájecí sítě větší než 35 kV, považuje se náhradní impedance za reaktanci (to je možné podle [2]).

#### Síť 400 kV

$$\underline{Z}_{Qr1(1)} = j \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = j \frac{1,1 \cdot (400 \cdot 10^3)^2}{17344 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = (j0,9286) \Omega$$

#### Síť 220 kV

$$\underline{Z}_{Qr2(1)} = j \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = j \frac{1,1 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{2407,7 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{231}{121} \right)^2} \right] = (j6,067) \Omega$$

#### Síť 110 kV

$$\underline{Z}_{Qr3(1)} = j \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = j \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1000 \cdot 10^6} = (j13,31) \Omega$$

### 3.2.2 Transformátory

Výpočet náhradní zkratové impedance trojvinutových transformátorů se provádí dle vzorců (2.8) pro zkratové impedance, (2.10) pro poměrnou reaktanci transformátoru, (2.9) pro impedanční korekční součinitele, (2.11) pro korigované zkratové impedance a (2.12) pro sousledné zkratové impedance.

#### Transformátor T401

Zkratové reaktance transformátoru dvojic vinutí AB, AC a BC (vztažených na stranu A transformátoru):

$$X_{TAB} = u_{krAB} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = 0,0975 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 3,568 \Omega$$

$$X_{TAC} = u_{krAC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = 0,443 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 16,215 \Omega$$

$$X_{TBC} = u_{krBC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = 0,34 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 12,445 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{3,568}{\frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6}} = 0,00892$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{16,215}{\frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6}} = 0,0405$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{12,445}{\frac{(400 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6}} = 0,0311$$

Impedanční korekční součinitelé transformátoru:

$$K_{TAB} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,00892} = 1,0394$$

$$K_{TAC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0405} = 1,0202$$

$$K_{TBC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0311} = 1,02586$$

Korigované zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{TKAB} = K_{TAB} \cdot jX_{TAB} = 1,0394 \cdot j3,568 = (j3,7086) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKAC} = K_{TAC} \cdot jX_{TAC} = 1,0202 \cdot j16,215 = (j16,5425) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKBC} = K_{TBC} \cdot jX_{TBC} = 1,02586 \cdot j12,445 = (j12,7668) \Omega$$

Sousledné zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{T401KA(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKBC}) = \frac{1}{2} (j3,7086 + j16,5425 - j12,7668) = (j3,7422) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T401KB(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKBC} - \underline{Z}_{TKAC}) = \frac{1}{2} (j3,7086 + j12,7668 - j16,5425) = (-j0,0336) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T401KC(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKBC} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKAB}) = \frac{1}{2} (j12,7668 + j16,5425 - j3,7086) = (j12,8004) \Omega$$

### Transformátor T402

Zkratové reaktance transformátoru dvojic vinutí AB, AC a BC (vztažených na stranu A transformátoru):

$$X_{TAB} = u_{krAB} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = 0,14 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 5,8564 \Omega$$

$$X_{TAC} = u_{krAC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = 0,35 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 14,641 \Omega$$

$$X_{TBC} = u_{krBC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left( \frac{1}{t_r^2} \right) = 0,2 \cdot \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left( \frac{400}{121} \right)^2} \right] = 8,3663 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

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

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{14,641}{\frac{(400 \cdot 10^3)^2}{350 \cdot 10^6}} = 0,032$$

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

Impedanční korekční součinitelé transformátoru:

$$K_{TAB} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0128} = 1,037$$

$$K_{TAC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,032} = 1,0253$$

$$K_{TBC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0183} = 1,03365$$

Korigované zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{TKAB} = K_{TAB} \cdot jX_{TAB} = 1,037 \cdot j5,8564 = (j6,073) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKAC} = K_{TAC} \cdot jX_{TAC} = 1,0253 \cdot j14,641 = (j15,0114) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKBC} = K_{TBC} \cdot jX_{TBC} = 1,03365 \cdot j8,3663 = (j8,6478) \Omega$$

Sousledné zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{T402KA(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKBC}) = \frac{1}{2}(j6,073 + j15,0114 - j8,6478) = (j6,2183) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T402KB(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKBC} - \underline{Z}_{TKAC}) = \frac{1}{2}(j6,073 + j8,6478 - j15,0114) = (-j0,1453) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T402KC(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKBC} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKAB}) = \frac{1}{2}(j8,6478 + j15,0114 - j6,073) = (j8,7931) \Omega$$

### Transformátor T201

Zkratové reaktance transformátoru dvojic vinutí AB, AC a BC (vztažených na stranu A transformátoru):

$$X_{TAB} = u_{krAB} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,093 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 6,808 \Omega$$

$$X_{TAC} = u_{krAC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,3 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 21,962 \Omega$$

$$X_{TBC} = u_{krBC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,18 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 13,177 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{6,808}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0255$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{21,962}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0823$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{13,177}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0494$$

Impedanční korekční součinitelé transformátoru:

$$K_{TAB} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0255} = 1,02925$$

$$K_{TAC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0823} = 0,996$$

$$K_{TBC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0494} = 1,0149$$

Korigované zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{TKAB} = K_{TAB} \cdot jX_{TAB} = 1,02925 \cdot j6,808 = (j7,007) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKAC} = K_{TAC} \cdot jX_{TAC} = 0,996 \cdot j21,962 = (j21,874) \Omega$$



$$\underline{Z}_{TKBC} = K_{TBC} \cdot jX_{TBC} = 1,0149 \cdot j13,177 = (j13,373) \Omega$$

Sousledné zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{T201KA(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKBC}) = \frac{1}{2}(j7,007 + j21,874 - j13,373) = (j7,754) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201KB(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKBC} - \underline{Z}_{TKAC}) = \frac{1}{2}(j7,007 + j13,373 - j21,874) = (-j0,747) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201KC(1)} = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{TKBC} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKAB}) = \frac{1}{2}(j13,373 + j21,874 - j7,007) = (j14,12) \Omega$$

### Transformátor T202

Zkratové reaktance transformátoru dvojic vinutí AB, AC a BC (vztažených na stranu A transformátoru):

$$X_{TAB} = u_{krAB} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,093 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 6,808 \Omega$$

$$X_{TAC} = u_{krAC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,3 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 21,962 \Omega$$

$$X_{TBC} = u_{krBC} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = 0,18 \cdot \frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{231}{121}\right)^2} \right] = 13,177 \Omega$$

Poměrné reaktance transformátoru:

$$x_{TAB} = \frac{X_{TAB}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{6,808}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0255$$

$$x_{TAC} = \frac{X_{TAC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{21,962}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0823$$

$$x_{TBC} = \frac{X_{TBC}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{13,177}{\frac{(231 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6}} = 0,0494$$

Impedanční korekční součinitelé transformátoru:

$$K_{TAB} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0255} = 1,02925$$

$$K_{TAC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0823} = 0,996$$

$$K_{TBC} = \frac{0,95 \cdot c}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0494} = 1,0149$$

Korigované zkratové impedance transformátoru:

$$\underline{Z}_{TKAB} = K_{TAB} \cdot jX_{TAB} = 1,02925 \cdot j6,808 = (j7,007) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKAC} = K_{TAC} \cdot jX_{TAC} = 0,996 \cdot j21,962 = (j21,874) \Omega$$

$$\underline{Z}_{TKBC} = K_{TBC} \cdot jX_{TBC} = 1,0149 \cdot j13,177 = (j13,373) \Omega$$

Sousledné zkratové impedance transformátoru:

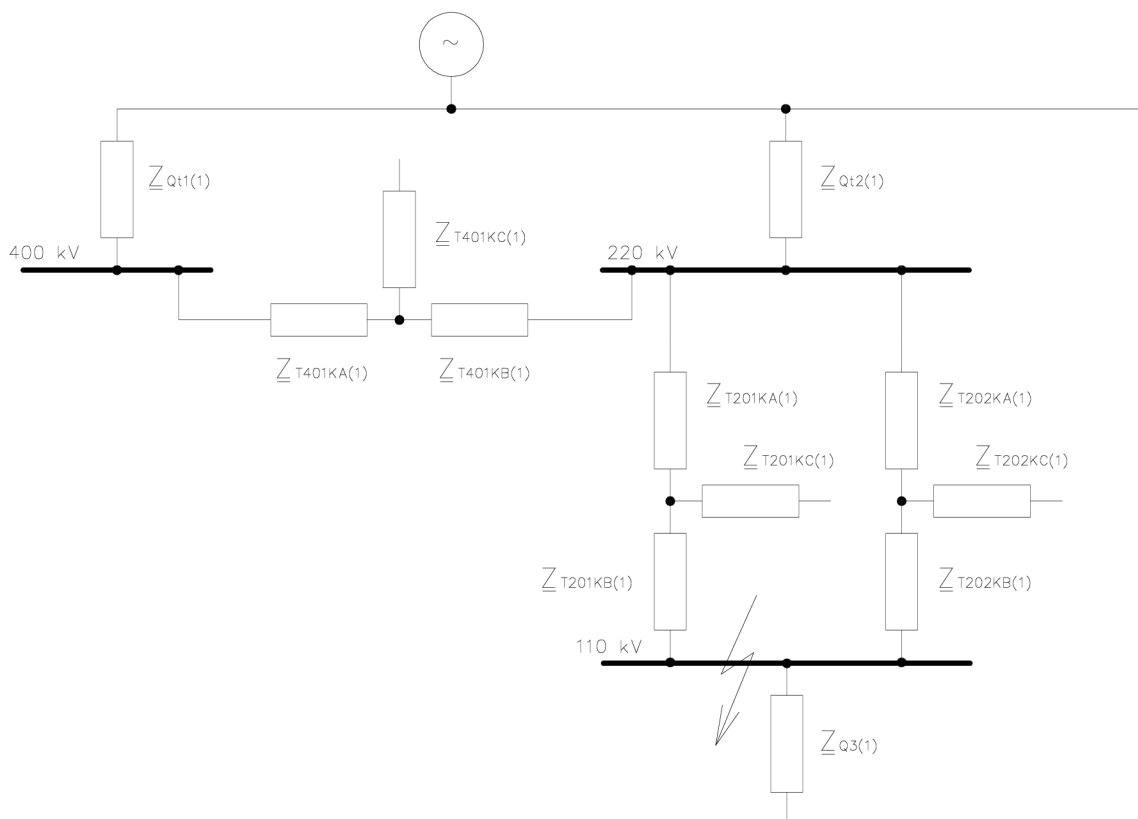
$$\underline{Z}_{T202KA(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKBC}) = \frac{1}{2} (j7,007 + j21,874 - j13,373) = (j7,754) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T202KB(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKAB} + \underline{Z}_{TKBC} - \underline{Z}_{TKAC}) = \frac{1}{2} (j7,007 + j13,373 - j21,874) = (-j0,747) \Omega$$

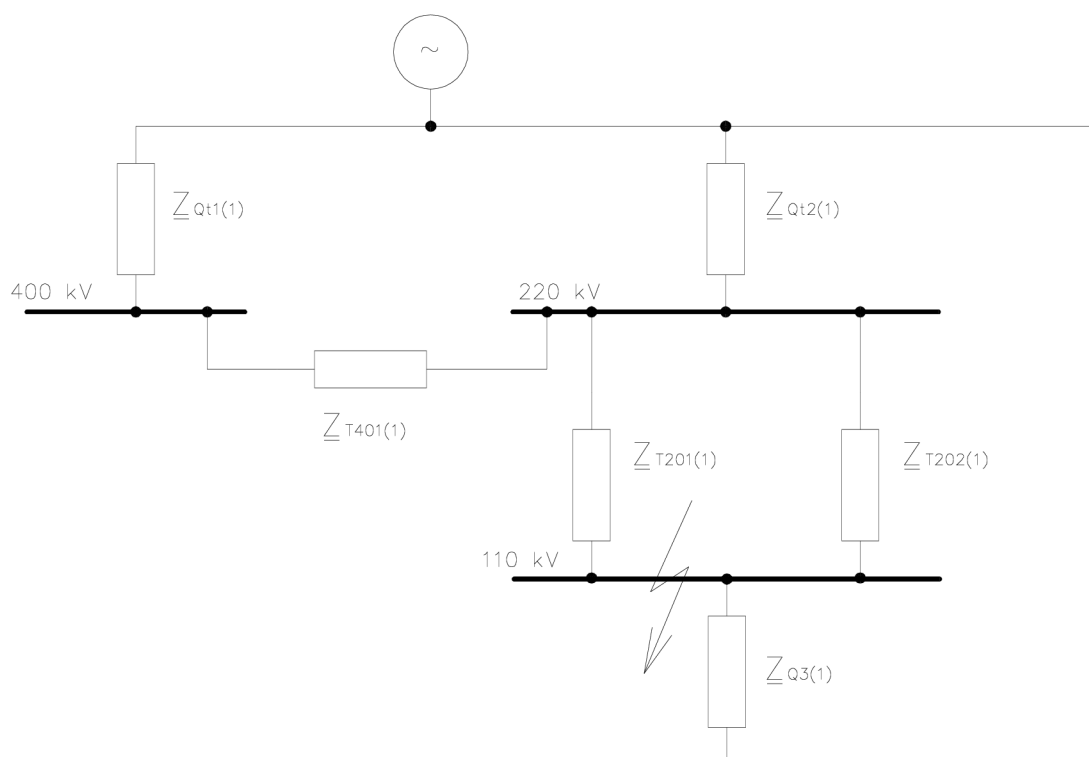
$$\underline{Z}_{T202KC(1)} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{TKBC} + \underline{Z}_{TKAC} - \underline{Z}_{TKAB}) = \frac{1}{2} (j13,373 + j21,874 - j7,007) = (j14,12) \Omega$$

### 3.3 Třífázový zkrat

#### 3.3.1 Výpočet zkratového proudu před přímou transformací



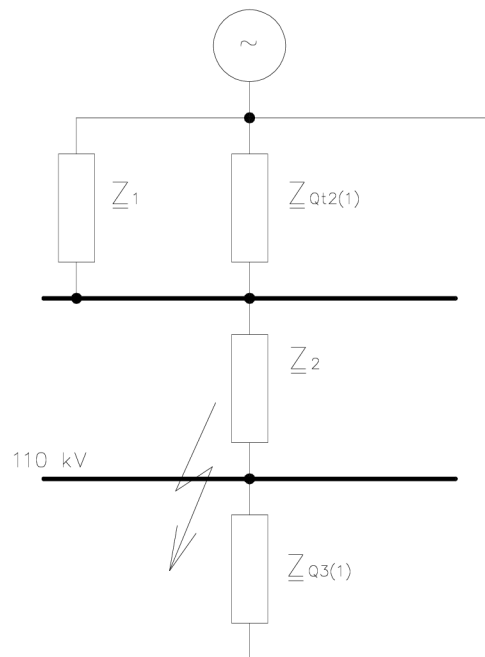
Obr. 3-3 Celý obvod nahrazen souslednými impedancemi



Obr. 3-4 Transformátory nahrazeny jedinou impedancí

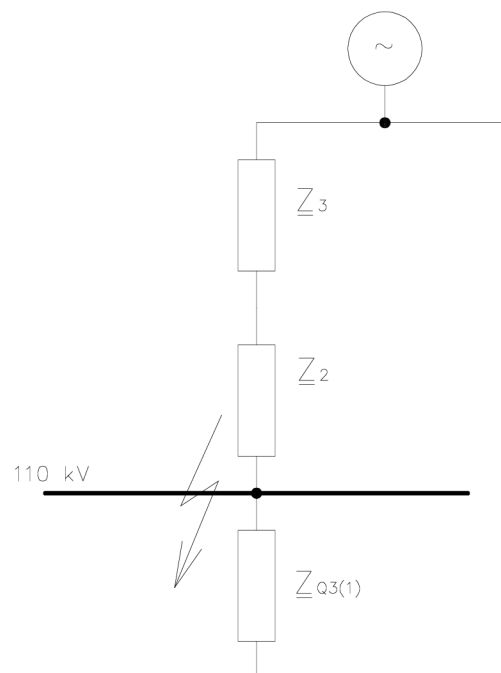
$$\underline{Z}_{T401(1)} = \underline{Z}_{T401KA(1)} + \underline{Z}_{T401KB(1)} = j3,7422 - j0,0336 = (j3,7086) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201(1)} = \underline{Z}_{T202(1)} = \underline{Z}_{T201KA(1)} + \underline{Z}_{T201KB(1)} = j7,754 - j0,747 = (j7,007) \Omega$$

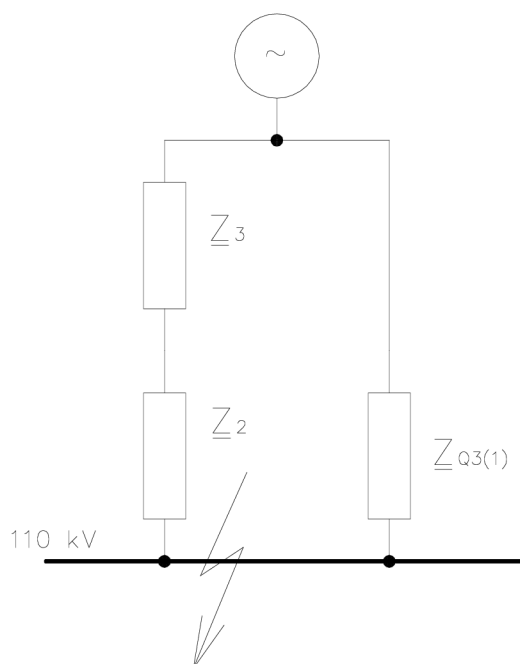
Obr. 3- 5 Zjednodušení na impedance  $\underline{Z}_1$  a  $\underline{Z}_2$ 

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{Qt1(1)} + \underline{Z}_{T401(1)} = j0,9286 + j3,7086 = (j3,8015) \Omega$$

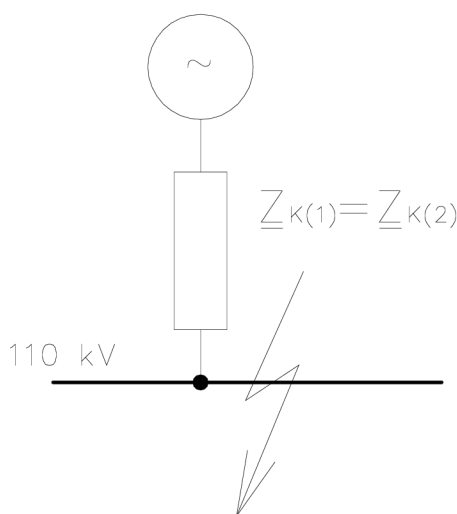
$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{T201(1)} \cdot \underline{Z}_{T202(1)}}{\underline{Z}_{T201(1)} + \underline{Z}_{T202(1)}} = \frac{j7,007 \cdot j7,007}{j7,007 + j7,007} = (j3,5035) \Omega$$

Obr. 3- 6 Zjednodušení obvodu na impedanci  $\underline{Z}_3$

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_{Qr2(1)}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{Qr2(1)}} = \frac{j3,8015 \cdot j6,067}{j3,8015 + j6,067} = (j2,337) \Omega$$



Obr. 3-7 Sériově-paralelní zapojení impedancí  $\underline{Z}_2$ ,  $\underline{Z}_3$  a  $\underline{Z}_{Q3(1)}$



Obr. 3-8 Výsledná zkratová impedance  $\underline{Z}_{K(1)}$

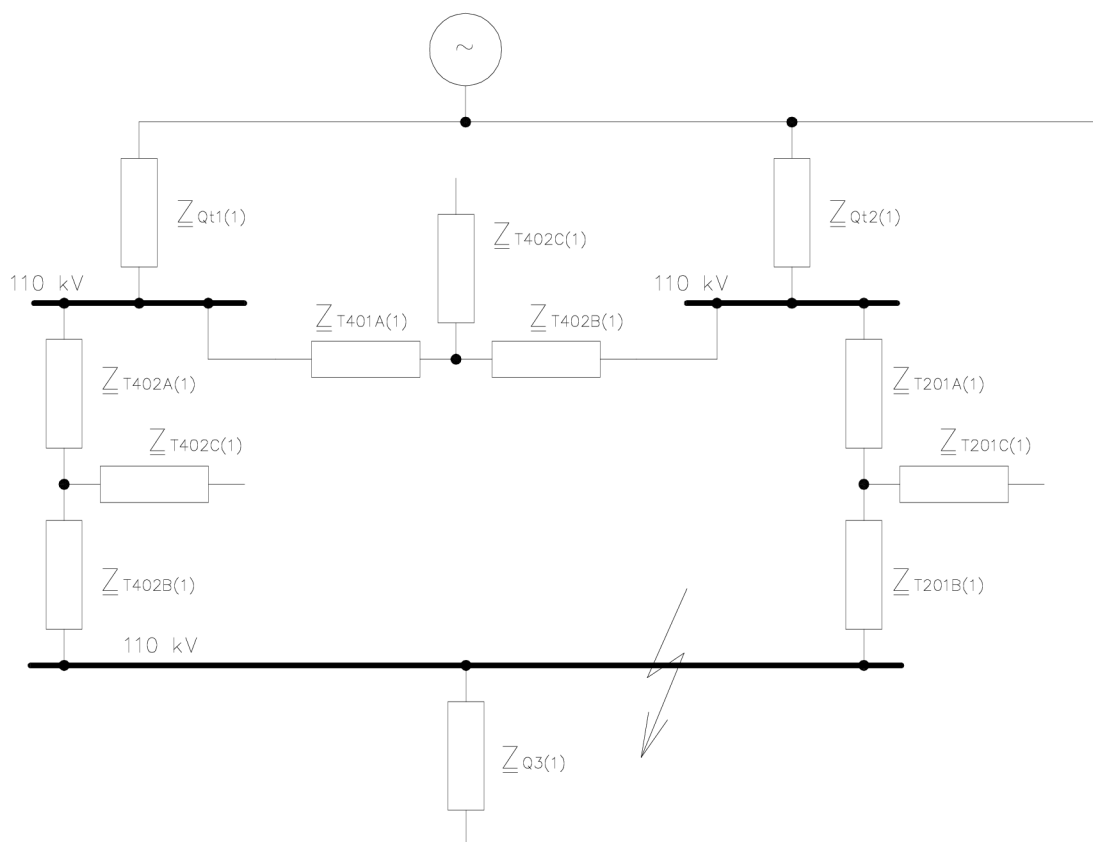
$$\underline{Z}_K = \frac{(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2) \cdot \underline{Z}_{Q3(1)}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{Q3(1)}} = \frac{(j2,337 + j3,5035) \cdot j13,31}{j2,337 + j3,5035 + j13,31} = (j4,0605) \Omega$$

Rázový zkratový proud  $I_k''$  se vypočítá podle vztahu (2.15) a z něj následně rázový zkratový výkon  $S_k''$ .

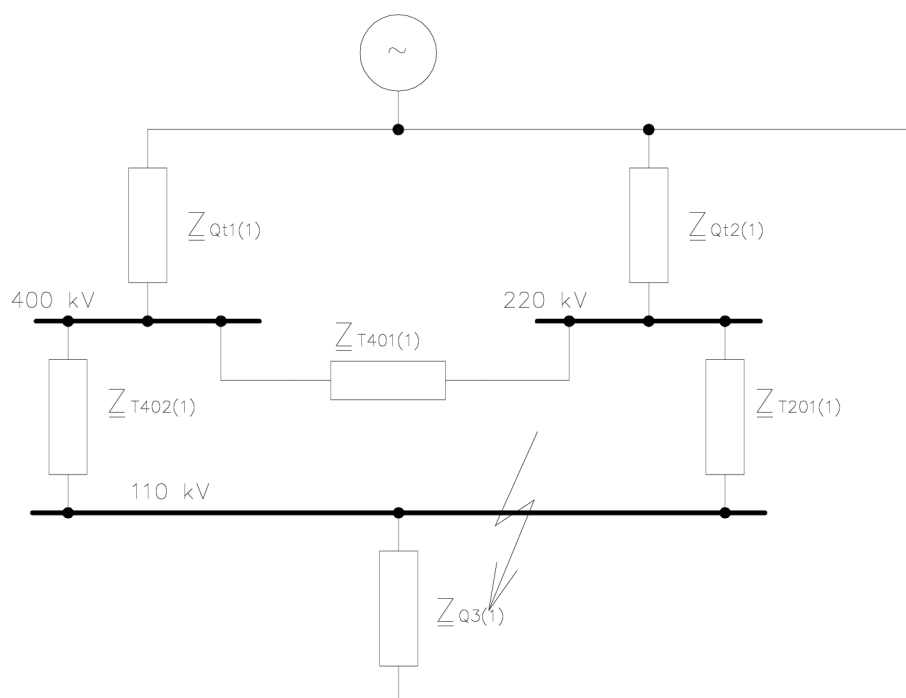
$$\underline{I}_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_K|} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,0605} = \underline{\underline{17204,6 \text{ A}}}$$

$$\Rightarrow \underline{S}_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 17204,6 = \underline{\underline{3278 \text{ MVA}}}$$

### 3.3.2 Výpočet zkratového proudu po přímé transformaci



Obr. 3-9 Náhrada prvků obvodu souslednými impedancemi

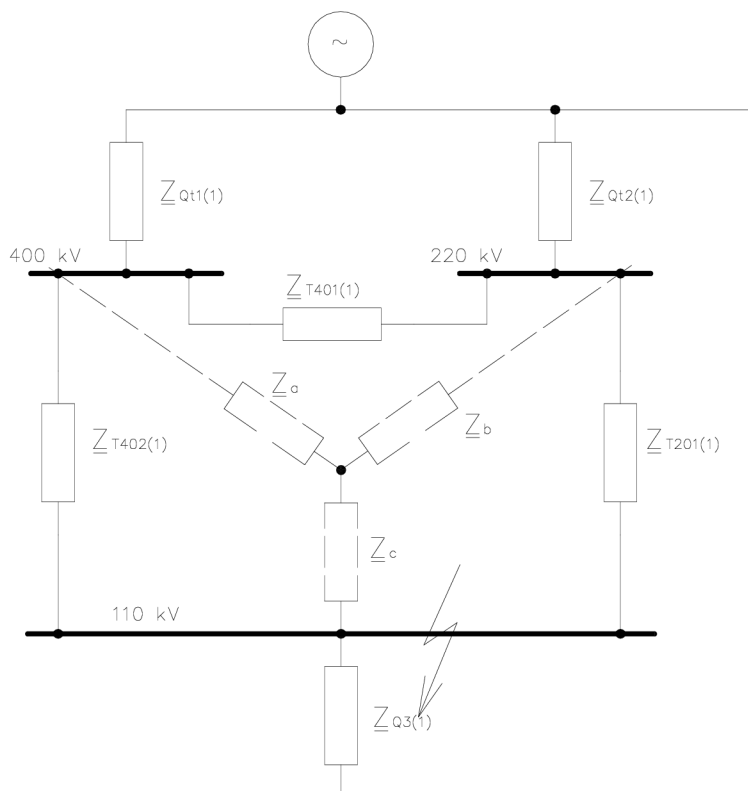


Obr. 3-10 Transformátory nahrazeny jedinou impedancí

$$\underline{Z}_{T401(1)} = (j3,7086) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T402(1)} = \underline{Z}_{T402KA(1)} + \underline{Z}_{T402KB(1)} = j6,2183 - j0,1453 = (j6,073) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201(1)} = (j7,007) \Omega$$



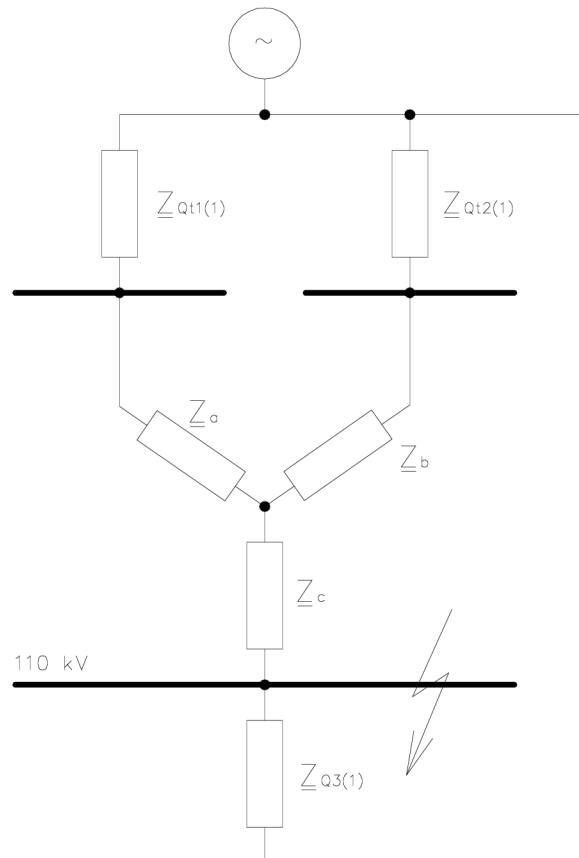
Obr. 3- 11 Naznačení zjednodušení obvodu transfigurací

### Transfigurace

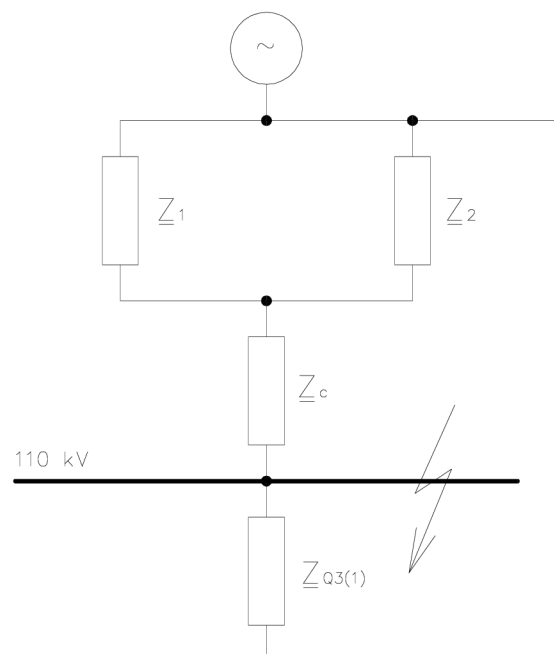
$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{T402(1)} \cdot \underline{Z}_{T401(1)}}{\underline{Z}_{T402(1)} + \underline{Z}_{T401(1)} + \underline{Z}_{T201(1)}} = \frac{j6,073 \cdot j3,7086}{j6,073 + j3,7086 + j7,007} = (j1,3415) \Omega$$

$$\underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{T401(1)} \cdot \underline{Z}_{T201(1)}}{\underline{Z}_{T402(1)} + \underline{Z}_{T401(1)} + \underline{Z}_{T201(1)}} = \frac{j3,7086 \cdot j7,007}{j6,073 + j3,7086 + j7,007} = (j1,5478) \Omega$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{T402(1)} \cdot \underline{Z}_{T201(1)}}{\underline{Z}_{T402(1)} + \underline{Z}_{T401(1)} + \underline{Z}_{T201(1)}} = \frac{j6,073 \cdot j7,007}{j6,073 + j3,7086 + j7,007} = (j2,5347) \Omega$$



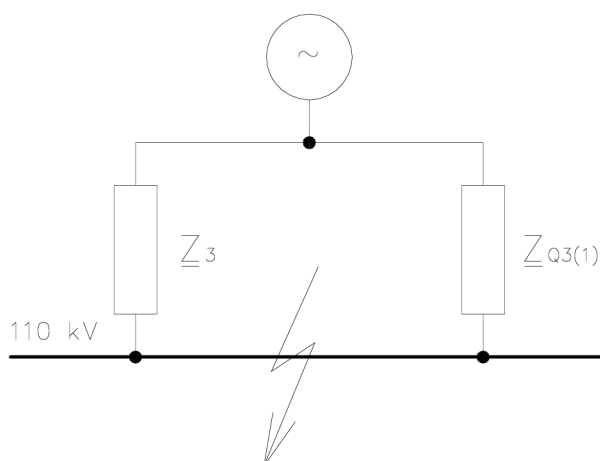
Obr. 3- 12 Obvod s použitou transformací

Obr. 3- 13 Zjednodušení obvodu impedancemi  $\underline{Z}_1$  a  $\underline{Z}_2$ 

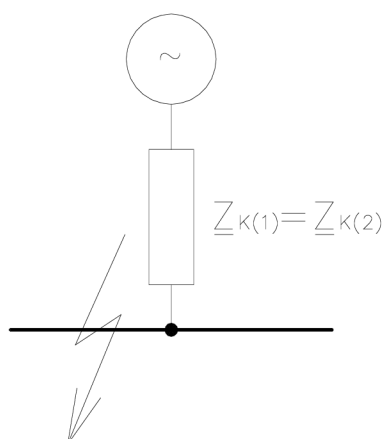
$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{Qt1(1)} + \underline{Z}_a = j0,9286 + j1,3415 = (j2,27) \Omega$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{Qt2(1)} + \underline{Z}_b = j6,067 + j1,5478 = (j7,6148) \Omega$$



Obr. 3-14 Sériově-paralelní součet impedancí na impedanci  $\underline{Z}_3$ 

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} + \underline{Z}_c = \frac{j2,27 \cdot j7,6148}{j2,27 + j7,6148} + j2,5347 = (j4,2834) \Omega$$

Obr. 3-15 Výsledná zkratová impedance  $\underline{Z}_{K(1)}$ 

$$\underline{Z}_K = \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_{Q3(1)}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{Q3(1)}} = \frac{j4,2834 \cdot j13,31}{j4,2834 + j13,31} = (j3,2405) \Omega$$

Rázový zkratový proud  $I_k''$  se vypočítá podle vztahu (2.15) a z něj následně rázový zkratový výkon  $S_k''$ .

$$\underline{I}_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_K|} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,2405} = \underline{\underline{21558,21 A}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{S_k''}} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 21558,21 = \underline{\underline{4107,39 MVA}}$$

### 3.4 Jednofázový zkrat

Při jednofázovém zkratu se ve výpočtech uvažují všechny tři souměrné složky (sousedná, zpětná a netočivá). V našem případě budeme ve výpočtu jednofázového zkratu netočivé složky

napájecích sítí zanedbávat a u transformátorů budeme považovat netočivé složky za rovné složkám sousledným a zpětným.

Přehled výše vypočítaných zkratových sousledných impedancí transformátorů uvažovaných v dalších výpočtech:

#### Transformátor T201

$$\underline{Z}_{T201KA(0)} = \underline{Z}_{T201KA(1)} = \underline{Z}_{T201KA(2)} = (j7,754) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201KB(0)} = \underline{Z}_{T201KB(1)} = \underline{Z}_{T201KB(2)} = (-j0,747) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T201KC(0)} = \underline{Z}_{T201KC(1)} = \underline{Z}_{T201KC(2)} = (j14,12) \Omega$$

#### Transformátor T202

$$\underline{Z}_{T202KA(0)} = \underline{Z}_{T202KA(1)} = \underline{Z}_{T202KA(2)} = (j7,754) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T202KB(0)} = \underline{Z}_{T202KB(1)} = \underline{Z}_{T202KB(2)} = (-j0,747) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T202KC(0)} = \underline{Z}_{T202KC(1)} = \underline{Z}_{T202KC(2)} = (j14,12) \Omega$$

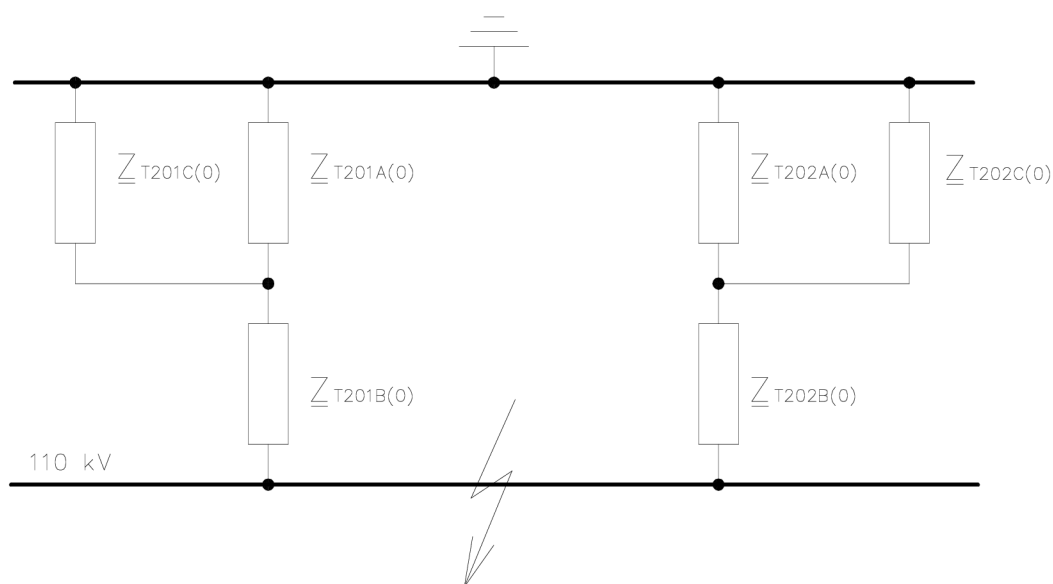
#### Transformátor T402

$$\underline{Z}_{T402KA(0)} = \underline{Z}_{T402KA(1)} = \underline{Z}_{T402KA(2)} = (j6,2183) \Omega$$

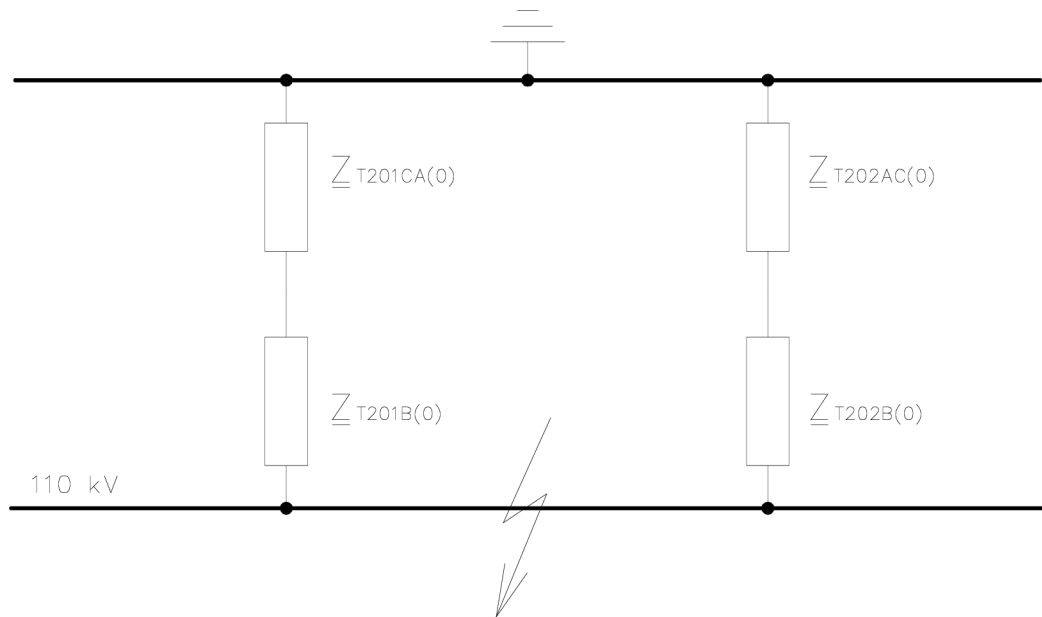
$$\underline{Z}_{T402KB(0)} = \underline{Z}_{T402KB(1)} = \underline{Z}_{T402KB(2)} = (-j0,1453) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T402KC(0)} = \underline{Z}_{T402KC(1)} = \underline{Z}_{T402KC(2)} = (j8,7931) \Omega$$

### 3.4.1 Výpočet zkratového proudu před přímou transformací



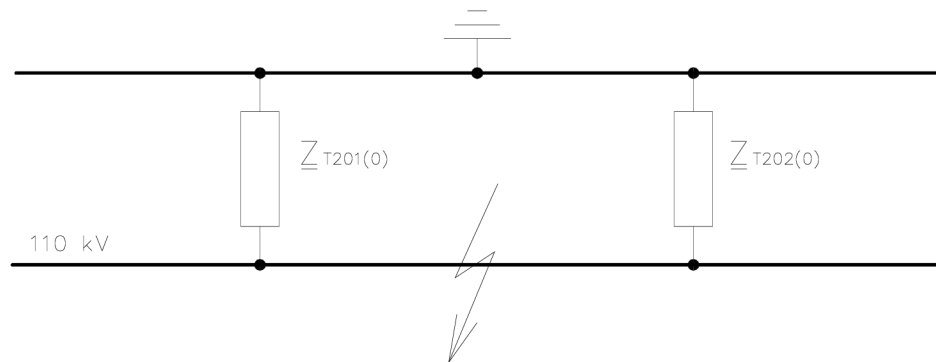
Obr. 3- 16 Náhradní schéma obvodu pro výpočet netočivé složky zkratové impedance



Obr. 3- 17 Součet impedancí vinutí A a C transformátorů T201 a T202

$$\underline{Z}_{T201CA(0)} = \frac{\underline{Z}_{T201KC(0)} \cdot \underline{Z}_{T201KA(0)}}{\underline{Z}_{T201KC(0)} + \underline{Z}_{T201KA(0)}} = \frac{j14,12 \cdot j7,754}{j14,12 + j7,754} = (j5,005) \Omega$$

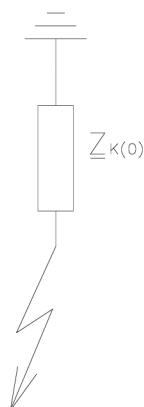
$$\underline{Z}_{T202AC(0)} = \frac{\underline{Z}_{T202KA(0)} \cdot \underline{Z}_{T202KC(0)}}{\underline{Z}_{T202KA(0)} + \underline{Z}_{T202KC(0)}} = \frac{j7,754 \cdot j14,12}{j7,754 + j14,12} = (j5,005) \Omega$$



Obr. 3- 18 Celkové impedance transformátorů T201 a T202

$$\underline{Z}_{T201(0)} = \underline{Z}_{T201CA(0)} + \underline{Z}_{T201B(0)} = j5,005 - j0,747 = (j4,258) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T202(0)} = \underline{Z}_{T202AC(0)} + \underline{Z}_{T202B(0)} = j5,005 - j0,747 = (j4,258) \Omega$$

Obr. 3- 19 Výsledná zkratová impedance  $\underline{Z}_{K(0)}$ 

$$\underline{Z}_{K(0)} = \frac{\underline{Z}_{T201(0)} \cdot \underline{Z}_{T202(0)}}{\underline{Z}_{T201(0)} + \underline{Z}_{T202(0)}} = \frac{j4,258 \cdot j4,258}{j4,258 + j4,258} = (j2,129) \Omega$$

Sousledná a zpětná složka zkratové impedance vypočítaná v 3.3.1.

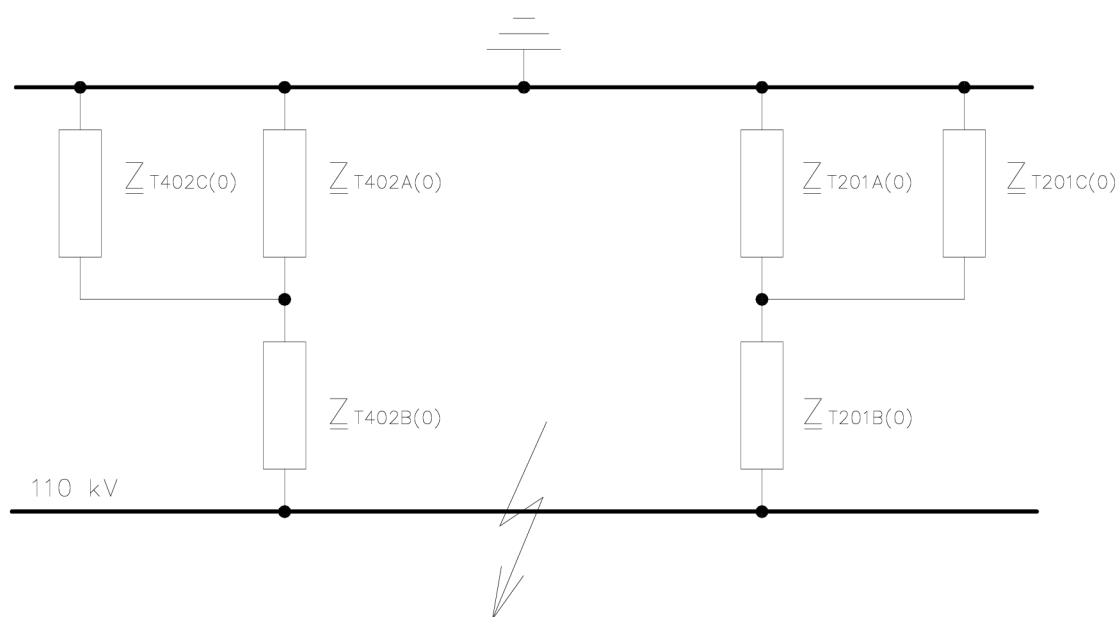
$$\underline{Z}_{K(1)} = \underline{Z}_{K(2)} = (j4,0605) \Omega$$

Rázový zkratový proud  $I_{k1}''$  se vypočítá podle vztahu (2.16) a z něj následně rázový zkratový výkon  $S_{k1}''$ .

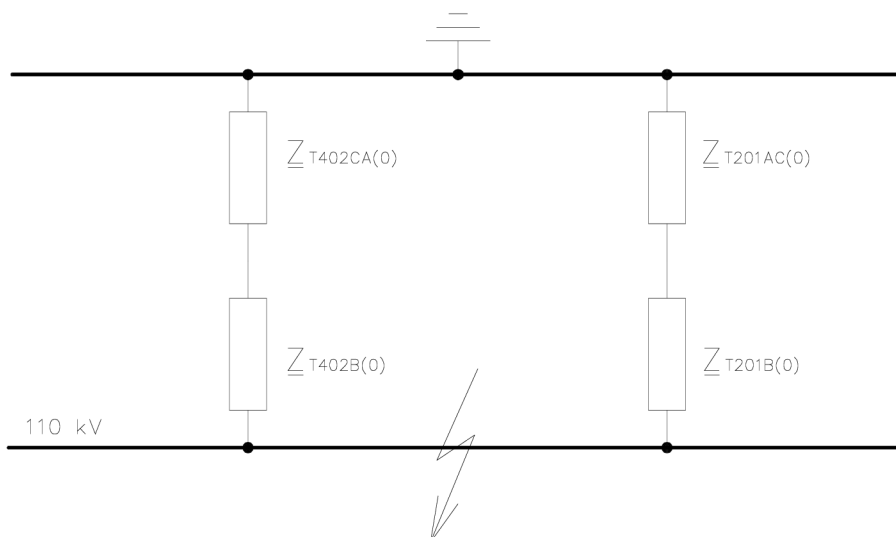
$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{K(1)} + \underline{Z}_{K(2)} + \underline{Z}_{K(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{4,0605 + 4,0605 + 2,129} = \underline{\underline{20446,65 \text{ A}}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{S_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 20446,65 = \underline{\underline{3895,61 \text{ MVA}}}$$

### 3.4.2 Výpočet zkratového proudu po přímé transformaci



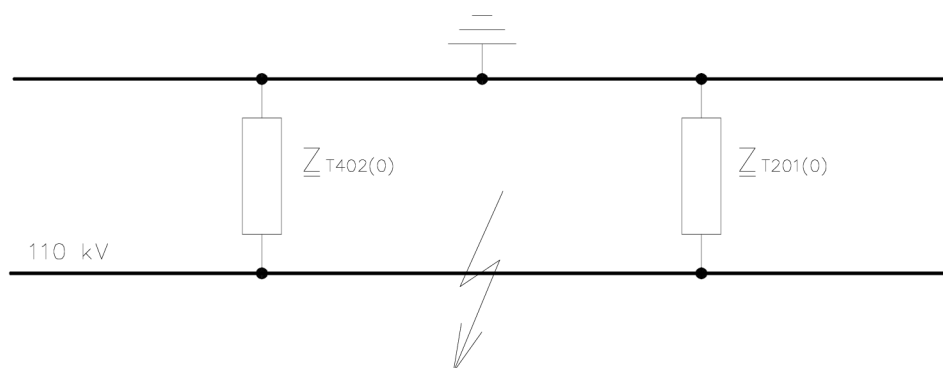
Obr. 3- 20 Náhradní schéma obvodu pro výpočet netočivé složky zkratové impedance



Obr. 3- 21 Součet impedancí vinutí A a C transformátorů T402 a T201

$$\underline{Z}_{T402CA(0)} = \frac{\underline{Z}_{T402KC(0)} \cdot \underline{Z}_{T402KA(0)}}{\underline{Z}_{T402KC(0)} + \underline{Z}_{T402KA(0)}} = \frac{j8,7931 \cdot j6,2183}{j8,7931 + j6,2183} = (j3,642) \Omega$$

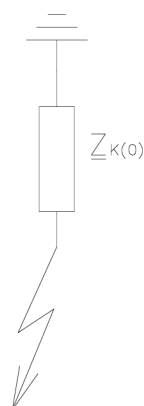
$$\underline{Z}_{T201AC(0)} = (j5,005) \Omega$$



Obr. 3- 22 Celkové impedance transformátorů T402 a T201

$$\underline{Z}_{T201(0)} = (j4,258) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T402(0)} = \underline{Z}_{T402CA(0)} + \underline{Z}_{T402B(0)} = j3,642 - j0,1453 = (j3,4967) \Omega$$

Obr. 3- 23 Výsledná zkratová impedance  $\underline{Z}_{K(0)}$

$$\underline{Z}_{K(0)} = \frac{\underline{Z}_{T402(0)} \cdot \underline{Z}_{T201(0)}}{\underline{Z}_{T402(0)} + \underline{Z}_{T201(0)}} = \frac{j3,4967 \cdot j4,258}{j3,4967 + j4,258} = (j1,92) \Omega$$

Sousledná a zpětná složka zkratové impedance vypočítaná v 3.3.2.

$$\underline{Z}_{K(1)} = \underline{Z}_{K(2)} = (j3,2405) \Omega$$

Rázový zkratový proud  $I_{k1}''$  se vypočítá podle vztahu (2.16) a z něj následně rázový zkratový výkon  $S_{k1}''$ .

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{K(1)} + \underline{Z}_{K(2)} + \underline{Z}_{K(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{3,2405 + 3,2405 + 1,92} = \underline{\underline{24946,81 A}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{S_{k1}''}} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k1}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 24946,81 = \underline{\underline{4753 MVA}}$$

## 4 ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je výpočet zkratových poměrů při třífázovém a jednofázovém zkratu a zhodnocení zkratové odolnosti rozvodny Sokolnice 110 kV po zavedení přímé transformace 400/110 kV.

Stará rozvodna 110 kV byla před instalací transformátoru T402 o jmenovitém výkonu 350 MVA s jmenovitým převodem 400/121 kV dimenzována na jmenovitou zkratovou 3500 MVA.

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá příčinami vzniku přechodových jevů, druhy přechodových jevů, druhy a vznikem zkratů a popisuje průběh napětí při zkratu. V místě zkratu totiž vzrůstá proud a napětí v tomto místě klesá až na nulovou hodnotu. Dále je v této části práce řešen postup při výpočtech zkratů. Jedná se především o obecnou metodu výpočtu, předpoklady výpočtu a výpočet ve skutečných hodnotách. Nejdůležitější v této teoretické části je výpočet podle normy ČSN EN 60909-0, který je založen na přepočtu prvků řešeného obvodu na zkratové impedance a jejich následném přepočtu na vztažnou napěťovou hladinu, která obvykle bývá stejná jako ta, na které vznikl zkrat. Zjednodušováním vzniklého obvodu (sčítáním sériově-paralelních kombinací vypočtených impedancí) dostaneme výslednou zkratovou impedanci. Pomocí této zkratové impedance se vypočte rázový zkratový proud a rázový zkratový výkon.

Praktická část je soustředěna na výpočet rázových zkratových proudů jak pro třífázový zkrat, tak i pro zkrat jednofázový. Výpočty obou těchto zkratů jsou ještě provedeny pro rozvodnu ve starém provedení bez transformátoru T402 a pro nové provedení s instalovaným transformátorem T402.

Z vypočítaných rázových zkratových výkonů (viz. tab. 4.1) je vidět, že stávající provedení rozvodny nevyhoví novým zkratovým poměrům.

Tab. 4-1 Výsledné hodnoty rázových zkratových výkonů a proudů

Druh zkratu	Třífázový		Jednofázový	
	$S_k''$ [MVA]	$I_k''$ [A]	$S_{k1}''$ [MVA]	$I_{k1}''$ [A]
Před přímou transformací	3278	17204,6	3895,61	20446,65
Po přímé transformaci	4107,39	21558,21	4753	24946,81

V tomto případě, tedy že rozvodna ve starém provedení nevyhoví jmenovité zkratové odolnosti, se jeví jako nejlepší varianta řešení výměna výzbroje rozvodny za již vyhovující výzbroj dostatečně dimenzovanou na nové zkratové poměry.

Podle vypočítaných rázových zkratových proudů by se určily zkratové vypínací proudy a ekvivalentní oteplovací zkratové proudy (viz. kapitola 1.2.2) a podle těchto proudů by se vhodně nadimenzovala použitá výzbroj rozvodny.

## **POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] Blažek, V., Skala, P. *Distribuce elektrické energie*. VUT v Brně, Brno, 2004
- [2] ČSN EN 60909:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů.
- [3] Pauza, J. *Výpočet proudu při zkratech*. Praha 1 SNTL, 1989-1990. 116 stran
- [4] Pauza, J. *Zkrat v elektrických rozvodech*. 1. vydání. Praha 1 SNTL, 1970. 248 stran. DT 621.3.014.3
- [5] Toman, P., *Prezentace přednášek z předmětu Ochrany a jištění energetických zařízení*, Brno, 2008