

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**

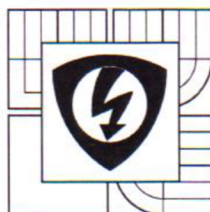
VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V LOKÁLNÍ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

JIŘÍ BYRTUS

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jiří Byrtus

Ročník: 3

ID: 73075

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet zkratových poměrů v lokální distribuční soustavě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do problematiky výpočtu zkratových poměrů.
2. Metodika výpočtu souměrných i nesouměrných zkratů dle platných norem.
3. Výpočet zkratových poměrů v zadané LDS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. David Topolánek

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

BYRTUS, J. Výpočet zkratových poměrů v lokální distribuční soustavě. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 55 stran.

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

.....

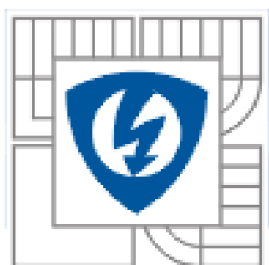


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky



Bakalářská práce

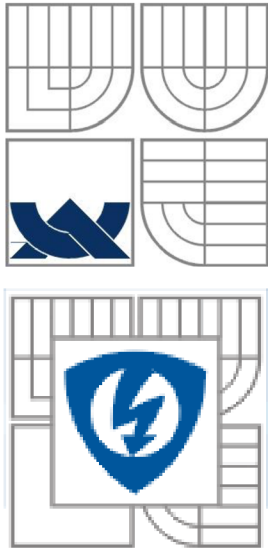
Výpočet zkratových poměrů v lokální distribuční soustavě

Jiří Byrtus

vedoucí: Ing. David Topolánek.

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

Calculation of short-circuit currents at local distribution network

by

Jiří Byrtus

Supervisor: Ing. David Topolánek.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přechodovými jevy v elektrizační soustavě, především zkraty. V první části jsou popsány druhy zkratů, příčiny jejich vzniku i následky jejich působení. Dále zobrazuje časové průběhy zkratových proudů a jejich složek. Je zde uvedena metoda výpočtu zkratových proudů pomocí složkových soustav a určeny základní vztahy pro výpočet zkratových impedancí. Vztahy a metody výpočtu vycházejí z platné normy ČSN EN 60909 – 0. V druhé části je uveden výpočet zkratových proudů konkrétní sítě průmyslového objektu. Ten má za cíl ověřit dimenzování rozvodu na zkratové proudy po připojení synchronního generátoru zadaného výkonu do soustavy.

KLÍČOVÁ SLOVA: zkrat; zkratový proud; zkratová impedance; počáteční souměrný rázový zkratový proud; nárazový zkratový proud; souměrný vypínací zkratový proud; souměrné složky; sousledná složka; zpětná složka; nulová složka

ABSTRACT

This thesis deals with transient phenomena in the electricity grid - especially with short-circuits. First part describes short-circuit types, reasons for their commencement and also consequences of their functioning. The thesis further shows waveforms of short-circuit currents and its components. A method of calculating short-circuits currents, using the constituent systems and the basic equations for calculating short-circuit impedances are also mentioned here. Relations and methods are based on valid standards of IEC 60909 – 0. The second part indicates the calculation of two-phase and three-phase short-circuit currents for specific network of industrial building. This calculation aims to verify the dimensioning of substations for short-circuit currents after connecting a synchronous generator with given power to the main substation.

KEY WORDS: short-circuit; short-circuit current; short-circuit impedance; initial short-circuit current; peak short-circuit current; breaking short-circuit current; symmetrical components; positive-sequence; negative-sequence; zero-sequence

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	14
2 CÍL PRÁCE.....	15
3 PŘECHODNÉ DĚJE	16
3.1 CHARAKTERISTIKA PŘECHODNÉHO DĚJE	16
3.2 ROZDĚLENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ.....	16
4 ZKRATY	17
4.1 VZNIK A ÚČINKY ZKRATŮ.....	17
4.1.1 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATŮ	17
4.1.2 NÁSLEDKY PŮSOBENÍ ZKRATU	17
4.2 ROZDĚLENÍ A DRUHY ZKRATŮ	18
4.3 ČASOVÉ PRŮBĚHY ZKRATŮ	19
4.4 ZÁKLADNÍ VELIČINY.....	20
5 POPIS METODY VÝPOČTU	22
5.1.1 SLOŽKOVÉ SOUSTAVY	22
5.1.2 ZKRATOVÉ IMPEDANCE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	24
5.1.3 VÝPOČET ZKRATOVÝCH IMPEDANCÍ	25
5.1.4 METODA EKVIVALENTNÍHO NAPĚŤOVÉHO ZDROJE	28
5.1.5 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY VÝPOČTU	29
5.1.6 MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY.....	29
5.1.7 MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	30
5.1.8 POSTUP VÝPOČTU	30
6 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	31
6.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT	31
6.1.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT PŘI CHODU NAPRÁZDNO	31
6.1.2 POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ RÁZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{k3}''	32
6.1.3 NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{p1}	32
6.1.4 SLOŽKOVÉ SCHÉMA TROJFÁZOVÉHO ZKRATU	33
6.2 DVOUFÁZOVÝ ZKRAT BEZ DOTYKU SE ZEMÍ.....	33
6.2.1 DVOUFÁZOVÝ ZKRAT PŘI CHODU NAPRÁZDNO	33
6.2.2 POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ RÁZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{k2}''	34
6.2.3 NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{p2}	34
6.2.4 SLOŽKOVÉ SCHÉMA DVOUFÁZOVÉHO ZKRATU	35
6.3 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT	35
6.3.1 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT PŘI CHODU NAPRÁZDNO NAPRÁZDNO.....	35
6.3.2 POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{k1}''	36
6.3.3 NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD.....	37

6.3.4 SLOŽKOVÉ SCHÉMA JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU	37
6.4 SOUMĚRNÝ VYPÍNAČÍ ZKRATOVÝ PROUD I_B.....	37
6.5 USTÁLENÝ ZKRATOVÝ PROUD I_{KMAX}.....	39
6.6 EKVIVALENTNÍ OTEPLOVACÍ PROUD	39
7 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ ZADANÉ SÍTĚ.....	41
7.1 POPIS ZADANÉ SÍTĚ	41
7.2 NÁHRADNÍ ZKRATOVÉ IMPEDANCE PRVKŮ V SOUSTAVĚ.....	42
7.3 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	45
7.3.1 ZKRAT F1 NA HLAVNÍ ROZVODNĚ R21	45
7.3.2 ZKRAT F2 – F6 NA PODRUŽNÝCH ROZVODNÁCH.....	49
7.4 CELKOVÉ VÝSLEDKY	52
7.4.1 VÝSLEDKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ VŠECH ZKRATŮ	52
7.4.2 KONTROLA DIMENZOVÁNÍ ROZVODEN	52
7.4.3 VÝSLEDKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ PŘI PROVOZU TRANSFORMÁTORŮ T1 A T3.....	53
8 ZÁVĚR.....	54
POUŽITÁ LITERATURA	55
PŘÍLOHA A	56
PŘÍLOHA B.....	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Stejnoseměrná složka[2].</i>	19
<i>Obrázek 2: Rázová složka[2].</i>	19
<i>Obrázek 3: Přejídná složka[2].</i>	19
<i>Obrázek 4: Ustálená složka [2].</i>	19
<i>Obrázek 5: Nesouměrný zkratový proud [4].</i>	20
<i>Obrázek 6: Souměrný zkrat bez stejnosměrné složky [4].</i>	20
<i>Obrázek 7: Zkratové impedance složkové soustavy</i>	25
<i>Obrázek 8: Zkratové impedance složkové soustavy</i>	28
<i>Obrázek 9: Trojfázový zkrat</i>	31
<i>Obrázek 10: Složkové schéma sousledné složky trojfázového zkratu</i>	33
<i>Obrázek 11: Dvoufázový zkrat</i>	33
<i>Obrázek 12: Složkové schéma dvoufázového zkratu</i>	35
<i>Obrázek 13: jednofázový zkrat</i>	35
<i>Obrázek 14: Složkové schéma jednofázového zkratu</i>	37
<i>Obrázek 15: Zjednodušené schéma zadané síť</i>	41
<i>Obrázek 16: Náhradní schéma pro trojfázový zkrat F1</i>	45
<i>Obrázek 17: Náhradní schéma pro dvoufázový zkrat F1</i>	46
<i>Obrázek 18: (vlevo) Náhradní schéma pro trojfázový zkrat F2</i>	49
<i>Obrázek 19: (vpravo) Náhradní schéma pro dvoufázový zkrat F2</i>	49

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Druhy zkratů</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2: Koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3: Výsledky vypočtených proudů při jednotlivých zkratech</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4: Porovnání maximálních zkratových hodnot určených výpočtem s hodnotami uvedenými v dokumentaci.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 5: Porovnání maximálních zkratových hodnot určených výpočtem s hodnotami uvedenými v dokumentaci, při původním stavu, tj. bez připojeného generátoru</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 6: vypočtené hodnoty proudů při provozu transformátoru T1 a T3.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	točivý operátor [-]
c	napěťový součinitel [-]
f	kmitočet [Hz]
I_0	netočivá složka proudu [A]
I_1	sousledná složka proudu [A]
I_2	zpětná složka proudu [A]
$I_{a,b,c}$	proudy fázemi nesouměrné soustavy [A]
I_b	Souměrný vypínací zkratový proud [A]
i'_k	přechodná složka zkratového proudu [A]
i''_k	rázová složka zkratového proudu [A]
I''_k	počáteční rázový zkratový proud [A]
i_{kdc}	stejnoseměrná složka zkratového proudu [A]
i_{ku}	ustálená složka zkratového proudu [A]
I_{km}	vrcholová hodnota první půlperrody zkratového proudu při největší stejnosměrné složce [A]
I_{ku}	ustálený zkratový proud [A]
i_p	nárazový zkratový proud [A]
I_{rG}	jmenovitý proud generátoru [A]
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací proud [A]
K	korekční součinitel pro impedance zařízení [-]
k_e	koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu [-]
l	délka vedení [m]
L_k	indukčnost na jednotku délky [$H.m^{-1}$]
p	počet půlpárů [-]
P_r	jmenovitý činný výkon zařízení [W]
q	součinitel pro výpočet souměrného vypínacího zkratového proudu asynchronních motorů [-]
R	rezistance zařízení [Ω]
R_k	rezistance zařízení na jednotku délky [$\Omega.m^{-1}$]

t_{\min}	minimální doba vypnutí [s]
t_r	převod transformátoru [-]
T_k	časová konstanta [-]
U_0	netočivá složka napětí [V]
U_1	sousledná složka napětí [V]
U_2	zpětná složka napětí [V]
$U_{a,b,c}$	napětí fází nesouměrné soustavy [V]
U_f	fázové napětí [V]
U_i	indukované napětí [V]
u_{kr}	jmenovité napětí nakrátko [%]
U_r	jmenovité napětí [V]
X	reaktance zařízení [Ω]
x	poměrná reaktance zařízení [-]
x_g''	poměrná rázová reaktance generátoru [%]
Z	impedance zařízení [Ω]
Z_0	netočivá složka impedance [Ω]
Z_1	sousledná složka impedance [Ω]
Z_2	zpětná složka impedance [Ω]
κ	koeficient pro výpočet nárazového zkratového proudu [-]
μ	koeficientu útlumu [-]
λ_{max}	součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu [-]
φ_n	fázový úhel mezi proudem a napětím [$^\circ$]
η	účinnost [%]

Dolní indexy:

0,1,2	netočivá, sousledná a zpětná složka
G	generátor
k2	počáteční souměrný rázový zkratový proud hodnota dvoufázového zkratu
k3	počáteční souměrný rázový zkratový proud hodnota trojfázového zkratu
M	motor
Q	síťový napáječ
T	transformátor
V	vedení, kabel

1 ÚVOD

V elektrizační soustavě mohou nastat různé provozní stavy. Mimo běžný bezporuchový stav mohou nastat také poruchy, které mohou vážně ohrozit životnost elektrických zařízení. Jednou z těchto poruch je zkrat. V každé síti, ať se jedná o síť distribuční, nebo například menší průmyslové sítě, mohou vzhledem k jejímu uspořádání nastat různé druhy zkratových poruch. Podle velikosti minimálních zkratových proudů se nastavují ochrany zařízení, podle maximálních proudů se dimenzují např. pomocná zařízení, jako jsou rozvodny, rozvaděče, vedení. Ta musí v případě zkratové poruchy vydržet průtoky zkratových proudů až do doby vypnutí příslušných ochrany. V jednotlivých bodech soustavy je tedy třeba ke správnému návrhu určit hodnoty proudů, které se v dané síti mohou vyskytnout.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je ověření dimenzování zkratové odolnosti rozvoden průmyslového objektu. Kontrola se provádí z důvodu rozhodnutí o připojení synchronního generátoru do hlavní rozvodny, čímž vzrostou zkratové poměry v dané síti.

3 PŘECHODNÉ DĚJE

3.1 Charakteristika přechodného děje

Při běžném provozu se soustava nachází v normálním (ustáleném, bezporuchovém) stavu, při němž jsou všechny veličiny, které charakterizují její chod (napětí, proudy, výkony a mechanické momenty v rotačních zdrojích a spotřebičích) v rovnováze. [1] Tento stav je výchozí při návrhu soustavy, dimenzování a určování technických charakteristik. Můžeme také pozorovat pomalé změny některých veličin, způsobené například změnami zatížení, nebo výkonu zdrojů. Na tyto „malé“ změny je soustava dimenzována a není potřeba našeho zásahu do jejího chodu.

Přejchodný děj je vlastně přechod z normálního (bezporuchového) ustáleného stavu do dalšího ustáleného stavu, způsobený nějakým vnějším jevem. Podle toho můžeme přechodné děje rozdělit na normální a poruchové.

Normální přechodné děje – zmíněné již v popisu normálního stavu soustavy, jen málo ovlivňují její parametry a jsou způsobeny činnostmi spojenými s jejím provozováním. Například spínání na zátěži, připojování transformátorů, vedení, generátorů nebo změnami výkonů.

Poruchové přechodné děje – jejich příčinou je porucha v soustavě např. náhlé porušení izolace, úder blesku, odpojení zatížené soustavy, zkrat, zemní spojení atd.

3.2 Rozdělení přechodných dějů

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. Srovnáním jejich periody s periodou proudu o jmenovitém kmitočtu. Rozděluje se na [1]:

1. 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. Patří sem přechodné děje související s náhlou změnou zatížení zdrojů způsobené změnami ve spojení sítě, porušení izolace, vzniku přepětí např. úder blesku.
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 soustředných parametrů. Příčinou těchto dějů je zkratová porucha, tj. náhlá změna izolačního odporu mezi krajními vodiči, případně středním vodičem nebo zemí v uzemněné soustavě.
3. Rychlé - 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. Nejrychlejší přechodné děje vznikají při úderu blesku do některého z prvků soustavy nebo jeho těsné blízkosti.

4 ZKRATY

Nejčastěji se vyskytujícím elektromagnetickým přechodným jevem v elektrických soustavách je zkrat. Pod tímto pojmem rozumíme náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi fázemi nebo spojení se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.

4.1 Vznik a účinky zkratů

4.1.1 Příčiny vzniku zkratů

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratů patří [2]:

- Poruchy izolace - přepětím (úderem blesku), stárnutím
- Poruchy na elektrických zařízeních
- Špatné dimenzování na tepelné a mechanické namáhání
- Poškození při manipulaci, montáži, stavebních pracích
- Chybné manipulace např. s odpojovači; spínání dvou nesynchronizovaných sítí

Tyto příčiny nemusí působit samostatně, většinou se vyskytují současně, nebo následně. Nejčastější příčinou zkratu jsou přepětí atmosférická – přímým úderem blesku do vedení nebo elektrostatickou indukci, nebo provozní – při spínacích pochodech, při zemních spojeních, při náhlé ztrátě zatížení apod. [2]

4.1.2 Následky působení zkratu

Zkratové proudy působí na soustavu, ve které se vyskytly, především těmito vlivy [2]:

- Tepelné působení – vodič se průchodem zkratového proudu přehřívá, může dojít ke zničení izolace.
- Mechanické síly – vznikají průchodem zkratového proudu vodiči a ostatními proud vedoucími částmi, což způsobí namáhání celé soustavy a můžou např. způsobit destrukci vedení.
- Pokles napětí do místa zkratu – způsobí narušení chodu spotřebičů (pokles točivého momentu v motorech) jejich postupné vypínání.
- Rušení – vznikají nebezpečné hodnoty indukovaných napětí např. u slaboproudých vedení v souběhu s vedením, na kterém vznikl zkrat.
- Omezené možnosti přerušení proudu vypínači.

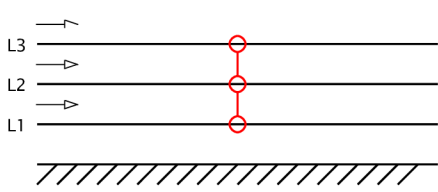
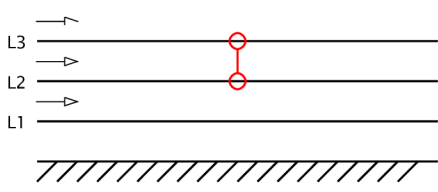
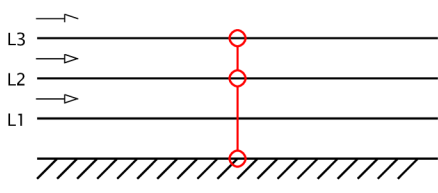
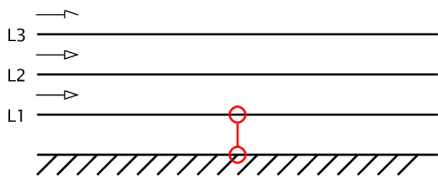
4.2 Rozdělení a druhy zkratů

Zkraty můžeme rozdělit podle přechodového odporu v místě zkratu:

- dokonalé (kovové) – přechodový odpor v místě styku je nulový
- nedokonalé – vytvoří se přes impedanci, kterou nelze zanedbat, místo se silně zahřívá, může hořet oblouk

Zkratový proud je větší při dokonalém zkratu, kdy se nevyskytuje přechodový odpor, proto se tento zkrat předpokládá při určování nejvyšších zkratových proudů. Dále můžeme zkraty rozdělit podle počtu spojených fází viz. tabulka 1.

Tabulka 1: Druhy zkratů

Druh zkratu	Schéma
Souměrný trojfázový	
Dvoufázový	
Dvoufázový zemní	
Jednofázový	

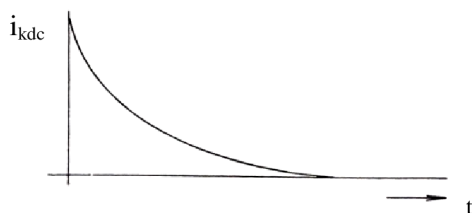
Přesto, že se trojfázový zkrat vyskytuje poměrně málo u venkovních vedení, je potřeba se jím zabývat, protože právě tento zkrat může být směrodatným pro závěry o možnosti provozu ve zkratových podmínkách. Také lze výsledků jeho analýzy použít k určení sousledné složky u asymetrických zkratů. Na rozdíl od venkovního vedení, se u kabelového vyskytuje trojfázový zkrat nejčastěji, oblouk spálí izolaci všech tří fází. Zařízení musí odolat i dalším druhům zkratu způsobujícím jeho nejvyšší namáhání např. dvoufázový zkrat na vedení, které spojuje jednofázové transformátory s trojfázovými přípojnými. Nejvyšší stupeň rušení sdělovacích zařízení způsobuje jednofázový zkrat. [3]

4.3 Časové průběhy zkratů

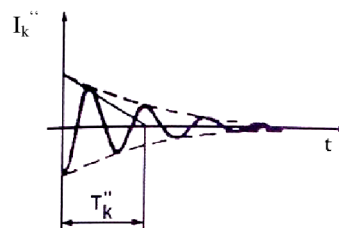
Průběh zkratového proudu je přechodný děj, který závisí na spoustě parametrů. Sledujeme u něho počátek, přechodnou část a ustálenou část (ustálený zkratový chod), kdy došlo k utlumení přechodných dějů. [4] Mohou nastat dva charakteristické průběhy zkratového proudu v závislosti na vzniku stejnosměrné složky. Pokud v okamžiku zkratu napětí prochází nulou, vznikne maximální stejnosměrná složka a výsledný průběh zkratového proudu bude nesouměrný (Obrázek 5.). Pokud napětí prochází jednou z maximálních hodnot, stejnosměrná složka nevznikne a výsledný průběh zkratového proudu bude souměrný (Obrázek 6).

Průběh zkratového proudu obsahuje (Obrázky 1,2,3,4) [2]:

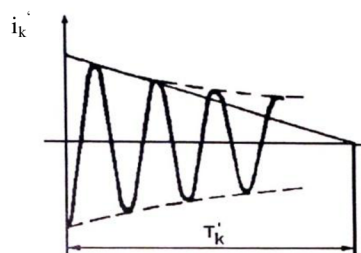
- rázovou složku $i_k''(t)$ – má sinusový průběh o kmitočtu soustavy, exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' .
- přechodnou složku $i_k'(t)$ – má sinusový průběh o kmitočtu soustavy, exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k' .
- ustálenou složku $i_{ku}(t)$ – má sinusový průběh o kmitočtu soustavy a konstantní amplitudu.
- stejnosměrnou složku $i_{kdc}(t)$ – exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou $T_{d.c.}$.



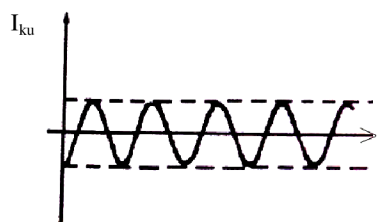
Obrázek 1: Stejnosměrná složka[2].



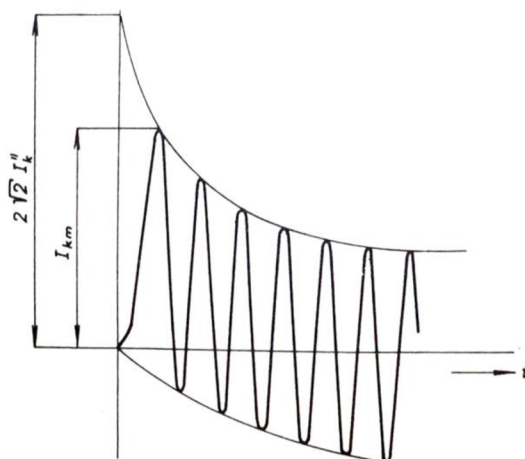
Obrázek 2: Rázová složka[2].



Obrázek 3: Přechodná složka[2].

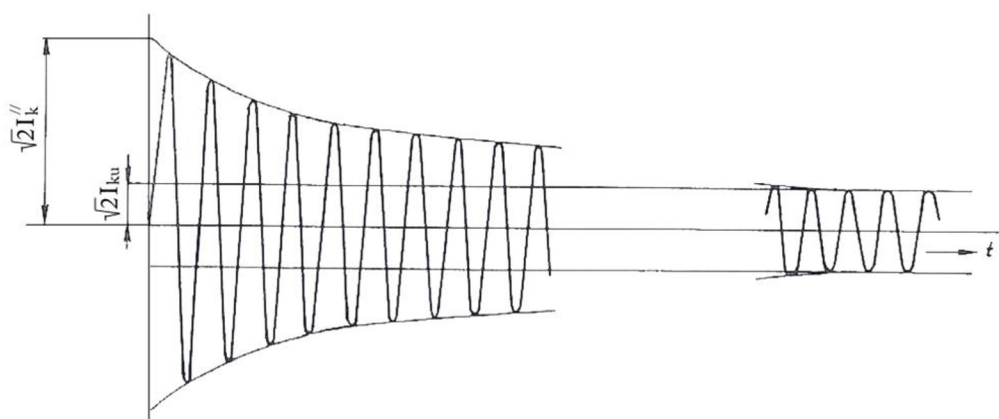


Obrázek 4: Ustálená složka [2].



Obrázek 5: Nesouměrný zkratový proud [4]

I_{km} ... vrcholová hodnota první půlperiody zkratového proudu při největší možné zkratové složce
 I_k'' ... počáteční rázový zkratový proud



Obrázek 6: Souměrný zkrat bez stejnosměrné složky [4]

I_{ku} ... ustálený zkratový proud
 I_k'' ... počáteční rázový zkratový proud

4.4 Základní veličiny

Pro řešení výpočtů zkratových proudů byly zavedeny tyto základní veličiny [2]:

Předpokládaný zkratový proud - je to proud, který by tekł obvodem, kdyby byl zkrat napájený ideálním napěťovým zdrojem se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Počáteční souměrný rázový proud I_k'' - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu.

Nárazový zkratový proud i_p - důležitá hodnota pro provádění kontroly silových (dynamických) účinků při zkratu. Je to maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu, jeho velikost závisí na okamžiku, ve kterém zkrat vzniká (viz. Časové průběhy). Nárazový zkratový proud je vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při největší

neperiodické složce, ta dosáhne maxima při průchodu napětí nulou a při fázovém posunu mezi proudem a napětím 90° .

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} - je důležitý z hlediska dimenzování proti tepelným účinkům. Je to efektivní hodnota proudu, má stejné tepelné účinky a čas (T_k) jako skutečný zkratový proud a odpovídá proudu, kterým můžeme zařízení po dobu zkratu zatížit, aniž bychom ho poškodili nadměrným oteplením.

Vypínací zkratový proud I_b - velikost nesymetrického zkratového proudu v okamžiku vypínání zkratu v čase T_k . Tento údaj určuje maximální zkratový proud, který vypínací zařízení bezpečně vypne (jističe).

5 POPIS METODY VÝPOČTU

Úkolem výpočtu zkratových proudů je určení jejich hodnot ze znalosti prvků v soustavě, velikosti napětí a zapojení dané sítě. Tato kapitola zobrazuje potřebné metody ke správné úpravě schématu zapojení a výpočtu zkratových proudů.

5.1.1 Složkové soustavy

Často se setkáváme s tím, že zdroje dodávají nevyvážená elektromotorická napětí nebo zátěže nemají souměrné obvody. Ve všech těchto případech je porušena souměrnost, proudy v obvodech a napětí mezi fázemi se dostávají do nevyváženého stavu. Z toho důvodu se zavádějí tzv. složkové metody. Jejich podstatou je rozložení nesouměrného děje do několika dalších jednodušších dějů, které podle principu superpozice můžeme opět skládat do děje celkového.[3]

Existuje více metod řešení složkových soustav [3]:

- metoda souměrných složek, autorem je C.L. Fortescue (1918)
- metoda diagonálních složek $\alpha, \beta, 0$; autorkou je Edith Clarkeová (1938)
- metoda složek S, D, Z; autorem je E. W. Kimbark (1939)
- metoda složek R, S, T; autorem je N. Koga (1956)

V tomto textu popíšeme Fortescuovu metodu souměrných složek. Podle ní lze nesouměrnou trojfázovou soustavu napětí $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ rozložit do tří souměrných vektorů a to do soustavy sousledné \bar{U}_1 , zpětné \bar{U}_2 , a netočivé \bar{U}_0 . Mezi soustavami platí vztahy:

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= \frac{\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c}{3} \\ \bar{U}_1 &= \frac{\bar{U}_a + a\bar{U}_b + a^2\bar{U}_c}{3} \\ \bar{U}_2 &= \frac{\bar{U}_a + a^2\bar{U}_b + a\bar{U}_c}{3}\end{aligned}\quad (1)$$

pro obrácený přepočítání platí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + a^2\bar{U}_1 + a\bar{U}_2 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + a\bar{U}_1 + a^2\bar{U}_2\end{aligned}\quad (2)$$

kde a je točivý operátor:

$$a = 1 \angle \frac{2\pi}{3} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\quad (3)$$

$$a^2 = 1 \angle \frac{4\pi}{3} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\quad (4)$$

kde:

$\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$... vektory trojfázové soustavy

\bar{U}_1 ... vektor sousledné složky napětí

\bar{U}_2 ... vektor zpětné složky napětí

\bar{U}_0 ... vektor netočivé složky napětí;

Označíme si matice soustavy nesymetrických napětí \bar{U} a soustavy souměrných složek \bar{U}_F , pro které bude platit:

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} \quad \bar{U}_F = \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Soustavu rovnic (5) můžeme přepsat v maticovém tvaru jako:

$$[\bar{U}] = [\bar{T}] \cdot [\bar{U}_F] \quad (6)$$

kde \bar{T} je transformační matice:

$$[\bar{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

U matice \bar{T} lze provést její inverzi, a proto platí:

$$[\bar{U}_F] = [\bar{T}]^{-1} \cdot [\bar{U}] \quad (8)$$

inverzní transformační matice pro kterou platí $[\bar{T}]^{-1}$:

$$[\bar{T}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (9)$$

Obdobně určíme proudy v jednotlivých fázích pomocí soustavy souměrných složek proudů $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$ jako:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$... proudy nesouměrné soustavy

\bar{I}_1 ... proud sousledné složkové soustavy

\bar{I}_2 ... proud zpětné složkové soustavy

\bar{I}_0 ... proud netočivé složkové soustavy

Souměrné složky vnitřního elektromotorického napětí alternátoru označíme jako $\bar{U}_{i1}, \bar{U}_{i2}, \bar{U}_{i0}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$ a složkové proudy $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$. Pak platí: [4]

$$\begin{aligned}\bar{U}_{i1} &= \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ \bar{U}_{i2} &= \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ \bar{U}_{i0} &= \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (11)$$

protože alternátor je zdrojem vždy jen sousledné složky, platí při chodu naprázdno:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{i1} &= \bar{U}_i = \bar{U}_f \\ \bar{U}_{i2} &= 0 \\ \bar{U}_{i0} &= 0\end{aligned}\quad (12)$$

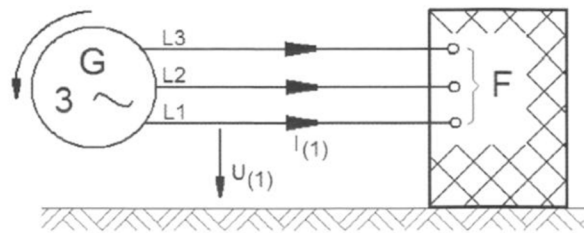
\bar{U}_f ..fázor napětí na svorkách alternátoru

Základní rovnice složkových soustav:

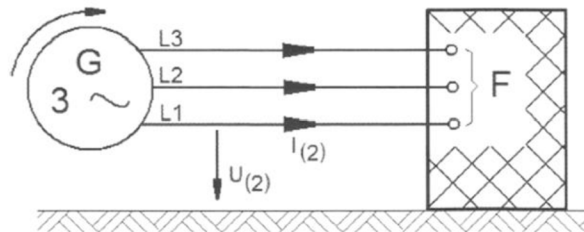
$$\begin{aligned}\bar{U}_i &= \bar{U}_f = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ 0 &= \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (13)$$

5.1.2 Zkratové impedance souměrných složek

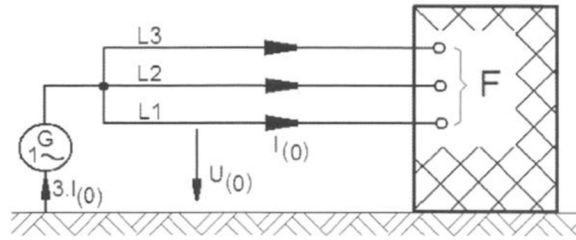
Každá ze souměrných složek soustavy má svou vlastní impedanci, tedy souslednou zkratovou impedanci $\bar{Z}_{(1)}$, zpětnou impedanci $\bar{Z}_{(2)}$ a netočivou $\bar{Z}_{(0)}$. Určení těchto impedancí je zobrazeno na obrázku 7 [5].



a) $\text{Sousledná složka zkratové impedance } \bar{Z}_{(1)} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1}$



b) $\text{Zpětná složka zkratové impedance } \bar{Z}_{(2)} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2}$



c) Netočivá složka zkratové impedance $\bar{Z}_{(0)} = \frac{\bar{U}_0}{\bar{I}_0}$

Obrázek 7: Zkratové impedance složkové soustavy[5]

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová složka rovny: $Z_{(1)} = Z_{(2)}$.

Netočivá zkratová složka impedance $Z_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (např. zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm, kabelovým pancířem). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_S pokud se zkraty počítají pomocí metody ekvivalentního napěťového zdroje [5].

5.1.3 Výpočet zkratových impedancí

Všechny vztahy v této kapitole jsou převzaty z normy IEN 60909-0 (viz. Použitá literatura [5]).

5.1.3.1 Síťové napáječe

Impedanci sítě (síťových napáječů) určíme ze známých parametrů dané sítě podle vztahu:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{rQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} [\Omega; -, V, A] \quad (14)$$

s přepočtem na stranu nižšího napětí transformátoru, přes který je síť ke zkratu připojena:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{rQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \cdot \left(\frac{1}{t_r} \right)^2 \quad (15)$$

kde: U_{rQ} ...jmenovité napětí soustavy

c ...napěťový součinitel

I_{kQ}'' ...počáteční souměrný zkratový proud

t_r ...převod transformátoru [kV/kV]

U výpočtu komplexní hodnoty \bar{Z}_Q , v případě, že neznáme poměr R_Q/X_Q , ani nejsou k dispozici žádné přesné hodnoty pro určení R_Q , udává norma: $R_Q = 0,1 X_Q$ a $X_Q = 0,995 Z_Q$.

Výsledná impedance:

$$\bar{Z}_Q = R_Q + jX_Q \quad (16)$$

5.1.3.2 Dvouvinut'ový transformátor

Zkratová impedance transformátoru:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} [\Omega; \%, V, VA] \quad (17)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} [\Omega; \%, V, VA] \quad (18)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (19)$$

kde:

u_{kr} ...jmenovité napětí nakrátko

u_{Rr} ...jmenovité napětí nakrátko

U_{rT} ...jmenovité napětí transformátoru

S_{rT} ...jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

Korekční součinitel K_T pro transformátor se vypočítá podle vztahu:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_t} \quad (20)$$

kde x_t je poměrná reaktance transformátoru určená podle vztahu:

$$x_t = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} [-; \Omega, V, VA] \quad (21)$$

Výsledná impedance transformátoru se započtením korekčního faktoru (korigovaná impedance) je:

$$\bar{Z}_{TK} = K_T(R_T + jX_T) [\Omega; -, \Omega, \Omega] \quad (22)$$

5.1.3.3 Synchronní generátor

Reaktanci generátoru vypočteme podle vztahu:

$$X_G = x_g'' \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} [\Omega; \%, V, VA] \quad (23)$$

kde x_g'' ...poměrná rázová reaktance generátoru

Norma uvádí, že pro generátor o jmenovitém napětí větším než 1kV a se jmenovitým zdánlivým výkonem generátoru menším než 100MVA ($U_{rG} > 1\text{kV}$; $S_{rG} < 100\text{MVA}$) lze rezistanci generátoru určit jako $R_G = 0,07 X_G$.

Korekční faktor generátoru se určí podle:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_g'' \cdot \sin\varphi_{nG}} \quad [-; V, V, -, \%, ^\circ] \quad (24)$$

kde:

U_n ...jmenovité napětí soustavy

U_{rG} ... jmenovité napětí generátoru

φ_{nG} ... fázový úhel mezi proudem a napětím generátoru

Výsledná korigovaná impedance generátoru tedy bude:

$$\bar{Z}_{GK} = K_G(R_G + jX_G) \quad [\Omega; -, \Omega, \Omega] \quad (25)$$

5.1.3.4 Asynchronní motory

Asynchronní motory vysokého a nízkého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , k nárazovému zkratovému proudu i_p , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a u nesouměrných zkratů také k ustálenému zkratovému proudu I_k . [5]

Příspěvek motorů vysokého napětí se musí zahrnout do výpočtu maximálního zkratového proudu. Příspěvky nízkonapěťových motorů se musí zahrnout při výpočtu ve vlastní spotřebě elektráren a v průmyslových a podobných rozvodech, například v sítích chemického a ocelářského průmyslu a přečerpávacích stanic. [5]

Impedanci asynchronních motorů určíme podle:

$$\bar{Z}_{GK} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{LM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad [\Omega; A, A, V, VA] \quad (26)$$

kde:

U_{rM} ...jmenovité napětí motoru

S_{rM} ...jmenovitý zdánlivý příkon motoru

I_{rM} ...jmenovitý proud motoru

I_{LR}/I_{rM} ... poměr záběrového proudu ke jmenovitému při zabrzděném motoru

Pro výpočet rezistance a reaktance motorů lze použít následující normou dané vztahy[5]:

$R_M/X_M = 0,10$, s $X_M = 0,995 Z_M$	pro motory VN o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $\geq 1\text{MW}$
$R_M/X_M = 0,15$, s $X_M = 0,989 Z_M$	pro motory VN o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1\text{MW}$
$R_M/X_M = 0,42$, s $X_M = 0,922 Z_M$	pro skupiny motorů NN včetně připojovacích kabelů

Impedance motoru:

$$\bar{Z}_M = R_M + jX_M [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (27)$$

Skupiny motorů nízkého napětí se můžou nahradit ekvivalentním motorem, jehož impedance se vypočítá podle rovnice (23), poměr $I_{LR}/I_{rM} = 5$ a $R_M/X_M = 0,42$.

Příspěvek skupiny nízkonapěťových motorů lze zanedbat, pokud tento příspěvek není větší než 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu bez uvažování těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I''_{kM} [A; A] \quad (28)$$

5.1.3.5 Vedení a kabely

Ze známých parametrů pro vedení a kabely můžeme spočítat jejich impedanci:
Pro reaktanci vedení platí:

$$X_V = l \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k [\Omega; m, Hz, H \cdot m^{-1}] \quad (29)$$

Pro rezistanci platí:

$$R_V = l \cdot R_k [\Omega; m, \Omega \cdot m^{-1}] \quad (30)$$

kde:

l ... délka vedení

f ... frekvence

L_k ... indukčnost na jednotku délky

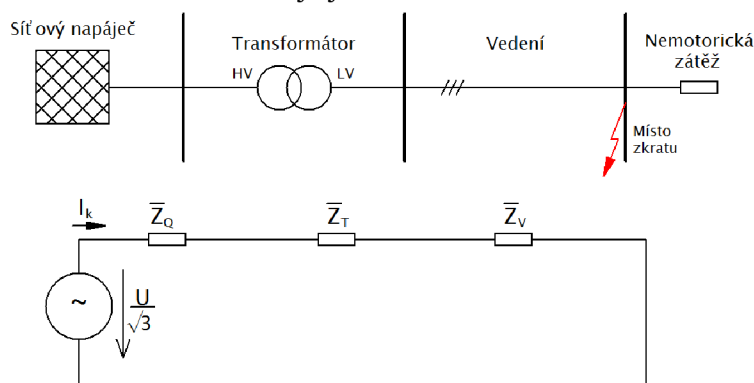
R_k ... rezistivita na jednotku délky

Impedance vedení tedy:

$$\bar{Z}_V = R_V + jX_V \quad (31)$$

5.1.4 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje

V obvodu nahradíme všechny prvky zkratovými impedancemi. Určíme místo zkratu a v něm připojíme napěťový zdroj, který je jediným napětím soustavy, ostatní zdroje v obvodu, včetně síťových napáječů se nahradí jejich vnitřními impedancemi. Všechna další napětí jsou tedy nulová. [5] Příklad umístění náhradního zdroje je na obrázku 8.



Obrázek 8: Zkratové impedance složkové soustavy

5.1.5 Zjednodušující předpoklady výpočtu

U výpočtu zkratových proudů se zavádí tato zjednodušení [2]:

- Neměnný typ zkratu po celou dobu jeho trvání
- Stejně zapojení obvodu po celou dobu zkratu
- Impedance transformátorů se počítají pro případ zapojení přepínačů odboček v základní poloze
- Zanedbáváme odpor oblouku
- Zanedbáváme kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže, kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě

Dále je vhodné zohlednit následující předpoklady:

- Zkrat nastává pouze v jednom bodě obvodu
- Při vícefázovém zkratu vzniká zkrat na všech fázích současně
- Předpokládáme dokonalý kovový zkrat
- V okamžiku zkratu jsou všechna indukovaná elektromotorická napětí alternátorů v síti ve fázi
- Alternátory byly před zkratem zatíženy jmenovitým výkonem při jmenovitém napětí
- Zanedbáme magnetizační proudy transformátorů
- Synchronní motory, kompenzátory a asynchronní motory bereme jako zdroje přispívající do místa zkratu
- Zanedbáme vliv zatížení
- Předpokládáme zachování symetrie trojfázové soustavy

Uvedený postup a zjednodušující předpoklady jsou platné pro výpočet zkratů v síti nn, vn, vvn a zvn do 550kV, při frekvenci 50Hz nebo 60Hz. Pro soustavy s napětími nad 550kV jsou potřeba zvláštní výpočty. Dále jsou tyto postupy platné pro zemní zkraty, tj. pro poruchy v soustavách s přímo uzemněným uzlem transformátoru a v sítích, kde je uzel transformátoru uzemněn přes impedanci. [2]

5.1.6 Maximální zkratové proudy

Počítají se pro účely dimenzování zařízení. Pro získání maximální hodnoty zkratového proudu se počítá s maximálními příspěvky od elektráren a síťových napáječů. Do výpočtu se zahrnují motory a rezistence vedení se uvažuje za teploty 20°C.

Při výpočtu maximálních zkratových proudů se volí tyto podmínky [5]:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} , pokud není příslušná národní norma

- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu
- pokud je použita ekvivalentní impedance \bar{Z}_Q reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkatová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku od síťových napáječů
- motory musí být zahrnuty podle potřeby
- uvažují se rezistance R_L vedení (venkovních i kabelových) při teplotě 20°C.

5.1.7 Minimální zkatové proudy

Určujeme pro účely volby a nastavení ochran.

Pro určení minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky [5]:

- použije se napěťový součinitel c_{\min}
- konfigurace soustavy s minimálními příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- motory musí být zanedbány
- rezistance R_L vedení (venkovních i kabelových, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě

5.1.8 Postup výpočtu

1. Pro řešené schéma, uvedeme potřebné hodnoty prvků v obvodu, jmenovitá napětí, určíme místo a druh zkratu.
2. Určíme zkatové impedance všech zařízení v obvodu. V případě výskytu více napěťových hladin tyto impedance přepočítáme na jednu napěťovou hladinu - místě zkratu, pomocí převodu transformátorů
3. Vytvoříme náhradní schéma podle druhu zkratu, u trojfázového zkratu pouze pro souslednou složku. Zpětnou a netočivou složku určíme u nesouměrných zkratů.
4. Zjednodušíme na výslednou impedanci do místa zkratu.
5. Spočítáme počáteční rázový proud a ostatní zkatové veličiny.

6 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ

V síti zadané v praktické části mohou nastat trojfázové a dvoufázové zkraty, postup jejich výpočtu zobrazuje tato kapitola, doplněn je i výpočet jednofázového zkratu.

K výpočtu jednotlivých zkratových proudů připomeňme tyto veličiny:

$\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ a $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$ reálné hodnoty napětí a proudů při zkratu

$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$ a $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$ sousledné, zpětné a netočivé složky napětí a proudů a vztahy mezi nimi, rovnice (2) a (10):

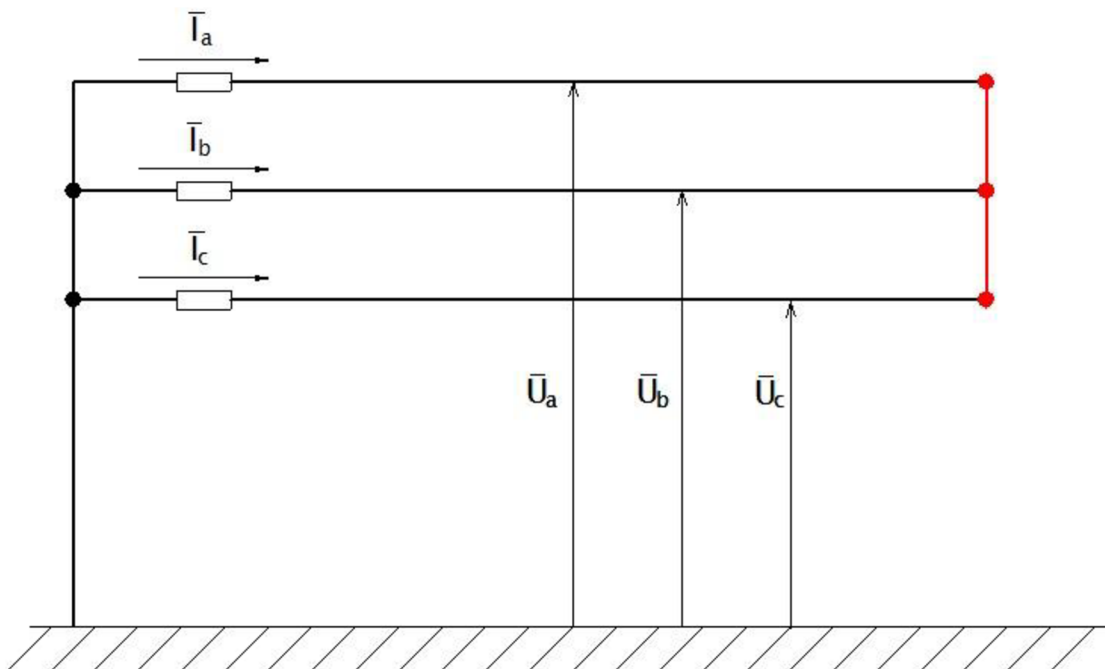
$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 & \bar{I}_a &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + a^2\bar{U}_1 + a\bar{U}_2 & \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a^2\bar{I}_1 + a\bar{I}_2 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + a\bar{U}_1 + a^2\bar{U}_2 & \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + a\bar{I}_1 + a^2\bar{I}_2\end{aligned}$$

Výpočty v této kapitole jsou v souladu se zdrojem [4] a [5].

6.1 Trojfázový zkrat

6.1.1 Trojfázový zkrat při chodu naprázdno

Trojfázový zkratový proud je zpravidla největší a proto se na tento zkrat dimenzují elektrická zařízení. U venkovních vedení se vyskytují zřídka, ale u vedení kabelových nejčastěji (malá vzdálenost mezi vodiči, rychlé spálení izolace při zkratu).



Obrázek 9: Trojfázový zkrat

U trojfázového zkratu se napětí v místě zkratu rovnají nule:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_b = \bar{U}_c = 0 \quad (32)$$

po dosazení do (2):

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + a^2\bar{U}_1 + a\bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + a\bar{U}_1 + a^2\bar{U}_2 = 0\end{aligned}\quad (33)$$

z řešení soustavy vyplyne, že: $\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = 0$

Dosazením do (11) dostaneme:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_1} \quad \bar{I}_2 = 0 \quad \bar{I}_0 = 0 \quad (34)$$

Dosazením do (10) pak:

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_1} \quad \bar{I}_b = a^2 \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_1} \quad \bar{I}_0 = a \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_1} \quad (35)$$

Při trojfázovém zkratu se tedy uplatní pouze složková soustava. [4]

6.1.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{k3}

U trojfázového zkratu se počáteční souměrný rázový zkratový proud pomocí metody ekvivalentního napěťového zdroje a výsledné zkratové impedance v místě zkratu určí [5]:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_k|} [A; -, V, \Omega] \quad (36)$$

kde:

c ... napěťový součinitel

$U_n/\sqrt{3}$... ekvivalentní napěťový zdroj

Z_k ... výsledná zkratová impedance

6.1.3 Nárazový zkratový proud i_p

Nárazový (dynamický) zkratový proud i_p , potřebný k dimenzování zařízení na silové účinky vypočítáme podle vztahu [5]:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3}'' [A; -, A] \quad (37)$$

kde:

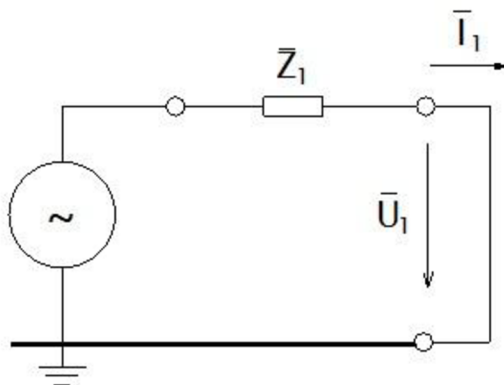
κ ... je nárazový koeficient daný zjednodušeným vztahem:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} [-; \Omega, \Omega] \quad (38)$$

Poměru R/X se určí z hodnot rezistivity a reaktance celkové impedance do místa zkratu. Je možné ho určit i graficky, z průběhů uvedených v normě [5].

6.1.4 Složkové schéma trojfázového zkratu

Jak bylo popsáno v 5.1.1. u trojfázového zkratu se uplatní pouze sousledná složka, proto při výpočtu metodou náhradního zdroje bude náhradní obvod vypadat podle obrázku 10:



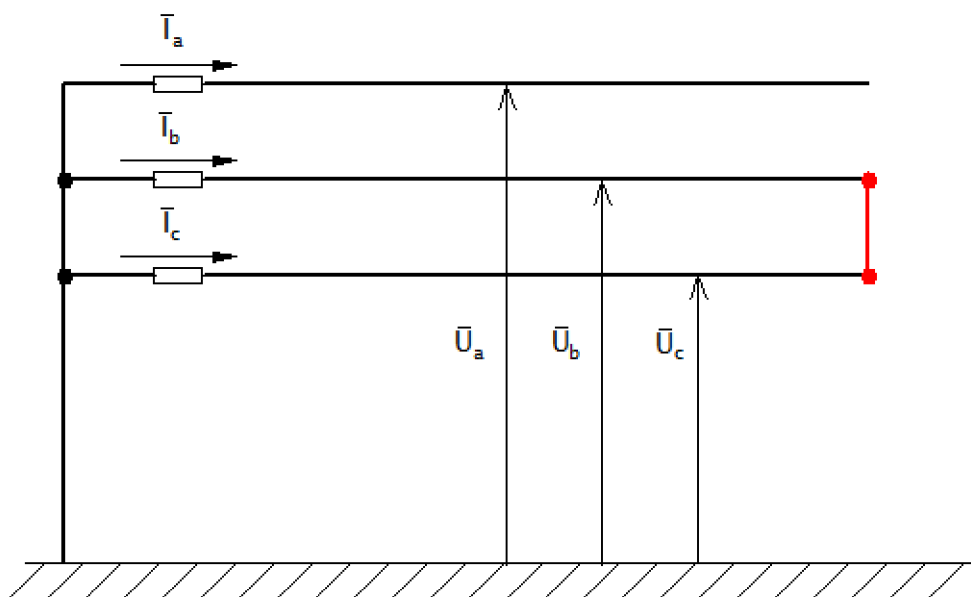
Obrázek 10: Složkové schéma sousledné složky trojfázového zkratu

6.2 Dvoufázový zkrat bez dotyku se zemí

Mohou nastat dva druhy dvoufázových zkratů, spojení dvou fází a země – tzv. dvoufázový zemní zkrat a spojení pouze dvou fází bez dotyku se zemí, ten popíše následující kapitola.

6.2.1 Dvoufázový zkrat při chodu naprázdno

Obrázek 11 ukazuje spojení dvou fází bez dotyku se zemí, tento zkrat může nastat například v izolovaných soustavách.



Obrázek 11: Dvoufázový zkrat

Pro dvoufázový zkrat bez dotyku se zemí platí [4]:

$$\begin{aligned}\bar{U}_b = \bar{U}_c &\Rightarrow \bar{U}_b - \bar{U}_c = 0 \\ \bar{I}_a = 0 \quad \bar{I}_c &= -\bar{I}_b\end{aligned}\quad (39)$$

Dosazením do (10):

$$\begin{aligned}\bar{I}_a = 0 &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a^2\bar{I}_1 + a\bar{I}_2 \\ \bar{I}_c = -\bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a\bar{I}_1 + a^2\bar{I}_2\end{aligned}\quad (40)$$

Sečtením těchto rovnic dostaneme $\bar{I}_0 = 0$ a z první rovnice plyne $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$. Netočivá složka u tohoto zkratu nevznikne.

Z rovnic (2) dále vyplyne, že: $\bar{U}_1 = \bar{U}_2$ z toho po dosazení do rovnic (11) dostaneme:

$$\begin{aligned}\bar{U}_i &= \bar{Z}_1\bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= -\bar{Z}_2\bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= 0\end{aligned}\quad (41)$$

Z toho dostaneme:

$$\bar{U}_i = (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{I}_1\quad (42)$$

Zkratový proud ve fázi c ($\bar{U}_i = \bar{U}_f$):

$$\bar{I}_c = a\bar{I}_1 + a^2\bar{I}_2 = j \frac{\sqrt{3}\bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}\quad (43)$$

Při dvoufázovém zkratu bez dotyku se zemí potřebujeme k výpočtu souslednou a zpětnou. [4]

Sousledné složky se od zpětných liší pouze v případě točivých strojů, u vzdálených zkratů se používá $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. [5]

POZNÁMKA:

Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává konstantní [5].

6.2.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{k2}

Počáteční souměrný rázový zkratový proud dvoufázového zkratu bez dotyku se zemí:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3}''[A; -, V, \Omega]\quad (44)$$

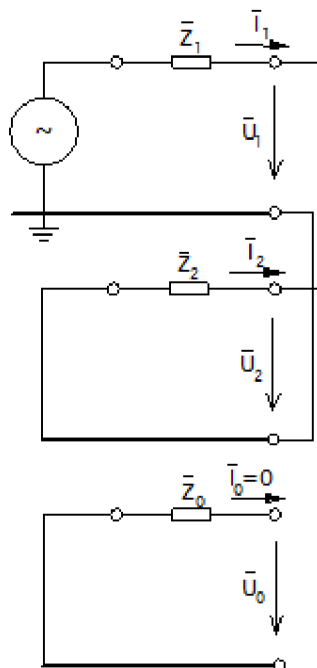
6.2.3 Nárazový zkratový proud i_{p2}

Nárazový (dynamický) zkratový proud i_p , potřebný k dimenzování zařízení na silové účinky vypočítáme podle vztahu [5]:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' [A; -, A] \quad (45)$$

Nárazový koeficient se použije stejný jako v případě trojfázového zkratu.

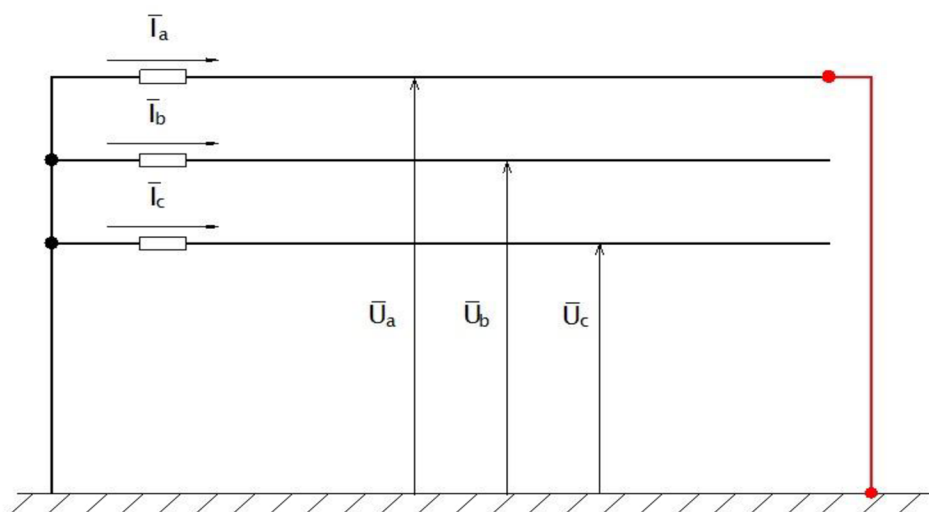
6.2.4 Složkové schéma dvoufázového zkratu



Obrázek 12: Složkové schéma dvoufázového zkratu

6.3 Jednofázový zkrat

6.3.1 Jednofázový zkrat při chodu naprázdno naprázdno



Obrázek 13: jednofázový zkrat

Pro jednofázový zkrat platí [4]:

$$\bar{U}_a = 0 \quad \bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad (46)$$

Z toho dostaneme po dosazení do (2) a (10):

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_2 = 0 \end{aligned} \quad (47)$$

Z toho:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 \quad (48)$$

Dosazením do (13) dostaneme:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_i - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \\ \bar{U}_2 &= -\bar{Z}_2 \bar{I}_1 \\ \bar{U}_0 &= -\bar{Z}_0 \bar{I}_1 \end{aligned} \quad (49)$$

Sečtením této soustavy dostaneme:

$$\bar{U}_i = (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) \bar{I}_1 \quad (50)$$

Odkud:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_i}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (51)$$

Pro fázi a podle obrázku 13 bude proud touto fází ($\bar{U}_i = \bar{U}_f$):

$$\bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 = \frac{3\bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (52)$$

Při výpočtu jednofázového zkratu je tedy třeba stanovit všechny tři složkové impedance [4].

6.3.2 Počáteční souměrný zkratový proud I_{k1}

Počáteční souměrný rázový zkratový proud jednofázového zkratu:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0|} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0|} [A; -, V, \Omega, \Omega] \quad (53)$$

Pokud je netočivá impedance menší než sousledná (zpětná) bude počáteční souměrný rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu větší než při trojfázovém. [5]

6.3.3 Nárazový zkratový proud

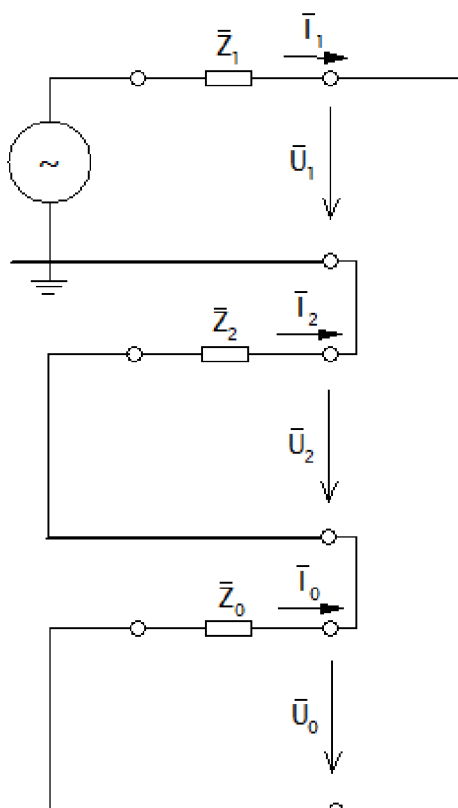
Nárazový (dynamický) zkratový proud i_p pro jednofázový zkrat:

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1} [A; -, A] \quad (54)$$

Nárazový koeficient se opět použije stejný jako v případě trojfázového zkratu.

6.3.4 Složkové schéma jednofázového zkratu

Při výpočtu jednofázového zkratu jsou zahrnuty všechny složkové impedance a jejich řazení znázorňuje obrázek 14.



Obrázek 14: Složkové schéma jednofázového zkratu

6.4 Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Při vzdáleném zkratu se souměrný vypínací zkratový proud rovná počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu, u trojfázových zkratů (I_b) i dvoufázových zkratů (I_{b2}):

$$\begin{aligned} I_b &= I''_k \\ I_{b2} &= I''_{k2} \\ I_{b1} &= I''_{k1} \end{aligned} \quad (55)$$

V jiných případech se souměrný vypínací proud počítá pomocí součinitele μ , jako:

$$\begin{aligned} I_b &= \mu I''_k [A; -, A] \\ I_{b2} &= \mu I''_{k2} \end{aligned} \quad (56)$$

$$I_{b1} = \mu I''_{k1}$$

kde:

μ ... součinitel útlumu

Součinitel útlumu závisí na minimální době vypnutí a poměru I''_{kG}/I_{rG} . Hodnoty se určí podle následujících rovnic [5]:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I''_k}{I_{rG}}} && \text{pro } t = 0,02\text{s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51e^{-0,30 \frac{I''_k}{I_{rG}}} && \text{pro } t = 0,05\text{s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I''_k}{I_{rG}}} && \text{pro } t = 0,1\text{s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I''_k}{I_{rG}}} && \text{pro } t \geq 0,25\text{s} \end{aligned} \quad (57)$$

kde:

I''_k ... počáteční rázový proud

I_{rG} ... jmenovitý proud generátoru

Pokud poměr I''_{kG}/I_{rG} [A,A] není větší než 2, pak platí $\mu=1$ pro všechny doby útlumu. [5]

U výpočtu souměrného vypínacího zkratového proudu motorů se postupuje podobně, ale poměr I''_{kG}/I_{rG} se nahradí poměrem I''_{kM}/I_{rM} a do výpočtu se zavede další koeficient q :

$$I_{bM} = q \mu I''_{kM} [A; -, A] \quad (58)$$

kde:

q ... součinitel pro výpočet souměrného vypínacího zkratového proudu asynchronních motorů

$$\begin{aligned} q &= 1,03 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{pro } t = 0,02 \text{ s} \\ q &= 0,79 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{pro } t = 0,05 \text{ s} \\ q &= 0,57 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{pro } t = 0,1 \text{ s} \\ q &= 0,26 + 0,10 \ln(P_{rM}/p) && \text{pro } t \geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (59)$$

kde:

P_{rM}/p ... činný výkon na půlpár motoru [MW,-]

U nezauzlených sítí se souměrný vypínací zkratový proud vypočítá jako součet příspěvků jednotlivých zařízení připojených k síti [5]:

$$I_b = \sum_i I_{bi} \quad (60)$$

6.5 Ustálený zkratový proud I_{kmax}

Synchronní stroje (generátory, motory, kompenzátory) se závislými statickými budiči nepřispívají k I_k v případě zkratu na svorkách stroje, ale přispívají, jestliže je určitá impedance mezi těmito svorkami a místem zkratu. Příspěvek elektrárenského bloku se počítá, pokud se zkrat vyskytne na straně vyššího napětí blokového transformátoru [5].

Pro výpočet I_{kmax} (maximální hodnota ustáleného zkratového proudu) se počítá s maximálním buzením synchronního generátoru [5]:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} [A; -, A] \quad (61)$$

Součinitel λ_{max} se určí z obrázků 18 (pro stroje s hladkým rotorem) a 19 (stroje s vyniklými póly) v normě IEC 60909-0.

V nezauzlených sítích se ustálený zkratový proud určí jako součet příspěvků jednotlivých zařízení:

$$I_k = \sum_i I_{ki} \quad (62)$$

U nesouměrných zkratů se nebere v úvahu pokles magnetického toku v generátoru a použijí se rovnice [5]:

$$\begin{aligned} I_{k2} &= I''_{k2} \\ I_{k1} &= I''_{k1} \end{aligned} \quad (63)$$

6.6 Ekvivalentní oteplovací proud

Tepelné namáhání zařízení při zkratu závisí především na době trvání zkratu a na průběhu zkratového proudu. Doba trvání zkratu se obvykle pohybuje v rozmezí 0,05 až 2 s a závisí na typu a nastavení ochran.

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} definujeme, jako stálý proud který po dobu trvání zkratu t_k vyvine stejné množství tepla jako časově proměnný zkratový proud [4] a je definován vztahem:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \cdot \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt [A; s, A]} \quad (64)$$

Pro zjednodušení tohoto výrazu je pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu zaveden zjednodušený vztah[4]:

$$I_{th} = k_e \cdot I''_k [A; -, A] \quad (65)$$

kde: I''_k ... počáteční rázový zkratový proud

k_e ... koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu

Hodnoty koeficient k_e jsou uvedeny v tabulce 2 [4]:

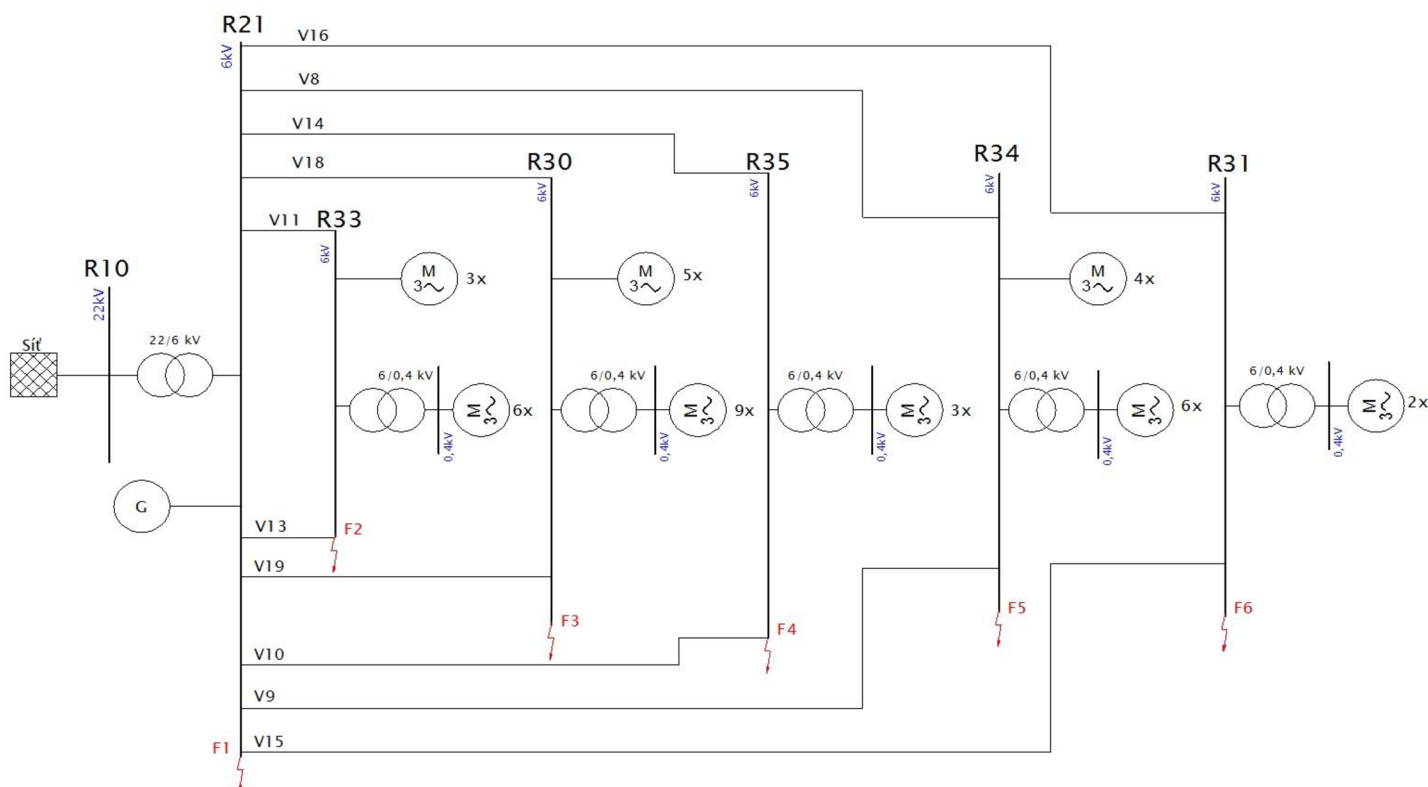
Tabulka 2: Koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu.

t_k [s]	k_e	
	Druh soustavy	
	VVN, VN	NN
$\leq 0,05$	1,6	1,5
$0,05 < \leq 0,1$	1,5	1,2
$0,1 < \leq 0,2$	1,4	1,1
$0,2 < \leq 1,0$	1,3	1,05
$1,0 < \leq 3,0$	1,1	1,0
$3,0 <$	1,0	1,0

7 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ ZADANÉ SÍTĚ

7.1 Popis zadané sítě

Jedná se o lokální distribuční síť chemických závodů. Zjednodušené schéma sítě je zobrazeno na obrázku 15, úplné schéma je přiloženo jako příloha C. Pro pokrytí vlastní spotřeby se rozhodlo o připojení synchronního generátoru v hlavní rozvodně R21 6kV. Úkolem této práce je výpočtem zkratových proudů ověřit zkratovou odolnost hlavní rozvodny a všech podružných rozveden po připojení tohoto generátoru. Jelikož je síť izolovaná, mohou nastat pouze trojfázové a dvoufázové zkraty. Zadané parametry částí obvodu jsou přiloženy v příloze A.



Obrázek 15: Zjednodušené schéma zadané sítě

Protože má tato lokální distribuční síť velké množství transformátorů VN/NN musíme při výpočtu zkratových proudů brát v úvahu jejich zatížení. Jelikož nejsou zadány žádné bližší charakteristiky, uvažuje se, že zátěž je tvořena motorickou zátěží o polovičním jmenovitém výkonu transformátoru.

7.2 Náhradní zkratové impedance prvků v soustavě

Ve výpočtu využijeme pouze sousledné a zpětné složky impedancí, ty se rovnají. Pro zjednodušení je při výpočtu impedancí vynechán index 1 označující souslednou složku.

7.2.1.1 Síťový napáječ

Impedance sítě přepočtená na napěťovou hladinu v místě zkratu:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{ns}^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{420 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 0,0943 \Omega \quad (66)$$

U_{ns} ... jmenovité napětí sítě

S_k'' ... trojfázový zkratový výkon v místě připojení

t_r ... převod transformátoru

Podle normy je možno určit rezistanci a reaktanci jako:

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q = 0,995 \cdot 0,0943 = 0,0938 \Omega \quad (67)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,0938 = 9,38 \text{ m}\Omega$$

Sousledná impedance sítě:

$$\overline{Z}_Q = R_Q + jX_Q = (9,38 \cdot 10^{-3} + j93,8 \cdot 10^{-3})\Omega \quad (68)$$

7.2.1.2 Transformátor T4 22/6 kV

$$Z_{T4} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{LV}^2}{S_{nT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = 0,18 \Omega \quad (69)$$

Určení činné a jalové složky impedance transformátoru z poměrného napětí nakrátko a ztrát na krátko:

$$e_r = \frac{\Delta P_k}{S} = \frac{78,5 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} = 4,906 \cdot 10^{-3} \quad (70)$$

$$e_r^2 + e_x^2 = e^2 \quad (71)$$

$$e_x = \sqrt{e^2 - e_r^2} = \sqrt{0,08^2 - (4,906 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0798 \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_T &= e_r \cdot \frac{U_n^2}{S_T} + j e_x \cdot \frac{U_n^2}{S_T} = 4,906 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} + j 0,0798 \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = \\ &= (0,011 + j 0,1796)\Omega \end{aligned} \quad (73)$$

Korekční součinitel pro transformátor:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_t} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0798} = 0,9973 \quad (74)$$

Výsledná korigovaná sousledná impedance transformátoru T4:

$$\overline{Z}_{T4K} = K_T \overline{Z}_T = 0,9973 \cdot (0,011 + j0,1796) = (0,011 + j0,1791) \Omega \quad (75)$$

7.2.1.3 Generátor

Reaktance generátoru:

$$X_G = x_g'' \cdot \frac{U_n^2}{S_{nG}} = 0,17 \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{4 \cdot 10^6} = 1,53 \Omega \quad (76)$$

Rezistance generátoru (viz. 5.1.3.3, nebo norma):

$$R_G = 0,07 \cdot X_G = 0,07 \cdot 1,53 = 0,1071 \Omega \quad (77)$$

Korekční součinitel generátoru:

$$K_G = \frac{U_{ns}}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_g'' \cdot \sin \varphi_{nG}} = \frac{6000}{6000} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,17 \cdot \sin 31,78^\circ} = 1,01 \quad (78)$$

Celková sousledná impedance:

$$\overline{Z}_G = K_G (R_G + jX_G) = 1,01(0,1071 + j1,53) = (0,1082 + j1,5453) \Omega \quad (79)$$

7.2.1.4 Motory VN

Příklad výpočtu pro motor *M241a* v rozvodně *R33*.

Určené hodnoty podle normy 60909-2 [7]:

$$\cos \varphi \cdot \eta = 0,8$$

$$\frac{I_{LR}}{I_{LM}} = 5$$

$$S_M = \frac{P_M}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{160 \cdot 10^3}{0,8} = 200 \text{ kVA} \quad (80)$$

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{LM}}} \cdot \frac{U_{nM}^2}{S_M} = \frac{1}{5} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{0,2 \cdot 10^6} = 36 \Omega \quad (81)$$

Pro motory VN o P_M na dvojici pólů menším než 1MW platí:

$$\begin{aligned} X_M &= 0,989 \cdot Z_M = 0,995 \cdot 36 = 35,604 \Omega \\ R_M &= 0,15 \cdot X_M = 0,15 \cdot 35,604 = 5,3406 \Omega \end{aligned} \quad (82)$$

Celková impedance motoru:

$$\overline{Z}_M = R_M + jX_M = (5,3406 + j35,604)\Omega \quad (83)$$

7.2.1.5 Transformátory 6/0,4 kV

Transformátory VN/NN jsou vypočteny stejným postupem jako trafo $T4$, uvedeme tedy jen výpočet korekčního součinitele a celkovou impedanci. Příklad pro trafo $T9$ v rozvodně $R33$:

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_t} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,057} = 1,01 \quad (84)$$

Korigovaná impedance transformátoru:

$$\overline{Z}_{T9K} = K_T \overline{Z}_{T9} = 1,01 \cdot (0,5328 + j2,0525) = (0,538 + j2,073) \Omega \quad (85)$$

7.2.1.6 Motory NN

Příklad pro motor za $T9$ v rozvodně $R33$. Zvolené hodnoty podle:

$$\cos\varphi \cdot \eta = 0,8 \quad \frac{I_{LR}}{I_{LM}} = 5$$

Je zadáno, že motor má poloviční výkon transformátoru ($S_{MT9} = 0,5 \text{ MVA}$), tedy impedance přepočtená na napěťovou hladinu v místě zkratu

$$Z_{MT9} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{LM}}} \cdot \frac{U_{nMT9}^2}{S_{MT9}} \cdot (t_r)^2 = \frac{1}{5} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{0,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{6}{0,4}\right)^2 = 14,4 \Omega \quad (86)$$

Pro skupiny motorů NN platí [5]:

$$\begin{aligned} X_{MT9} &= 0,922 \cdot Z_M = 0,922 \cdot 14,4 = 13,2768 \Omega \\ R_{MT9} &= 0,42 \cdot X_M = 0,42 \cdot 13,2768 = 5,5763 \Omega \end{aligned} \quad (87)$$

Impedance motoru:

$$\overline{Z}_{MT9} = R_{MT9} + jX_{MT9} = (5,5763 + j13,2768)\Omega \quad (88)$$

7.2.1.7 Kably:

Příklad pro kabel V7 od transformátoru T4 do hlavní rozvodny R21:

$$X_{V7} = l \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k = 0,025 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} = 1,806 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (89)$$

$$R_{V7} = l \cdot R_k = 0,025 \cdot 0,06 = 1,5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (90)$$

Impedance kabelu:

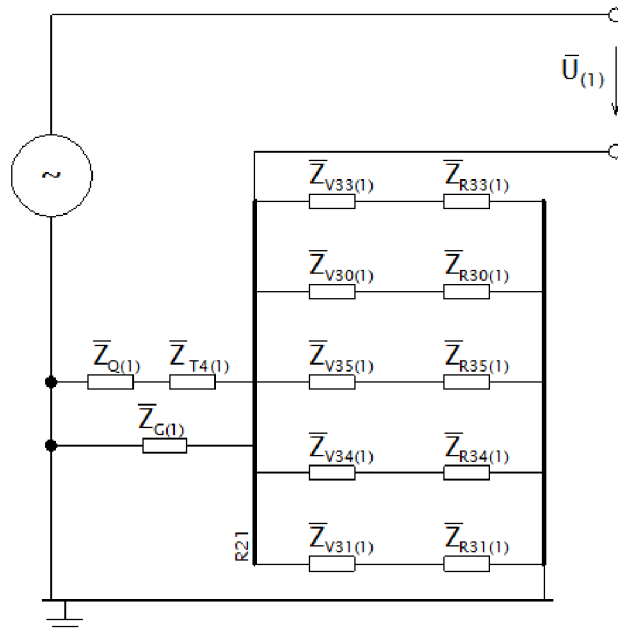
$$\overline{Z}_{V7} = R_{V7} + jX_{V7} = (0,0015 + j0,0018) \Omega \quad (91)$$

Všechny vypočtené impedance včetně jejich kombinací, použitých i v následujících výpočtech jsou uvedeny v tabulce v příloze B.

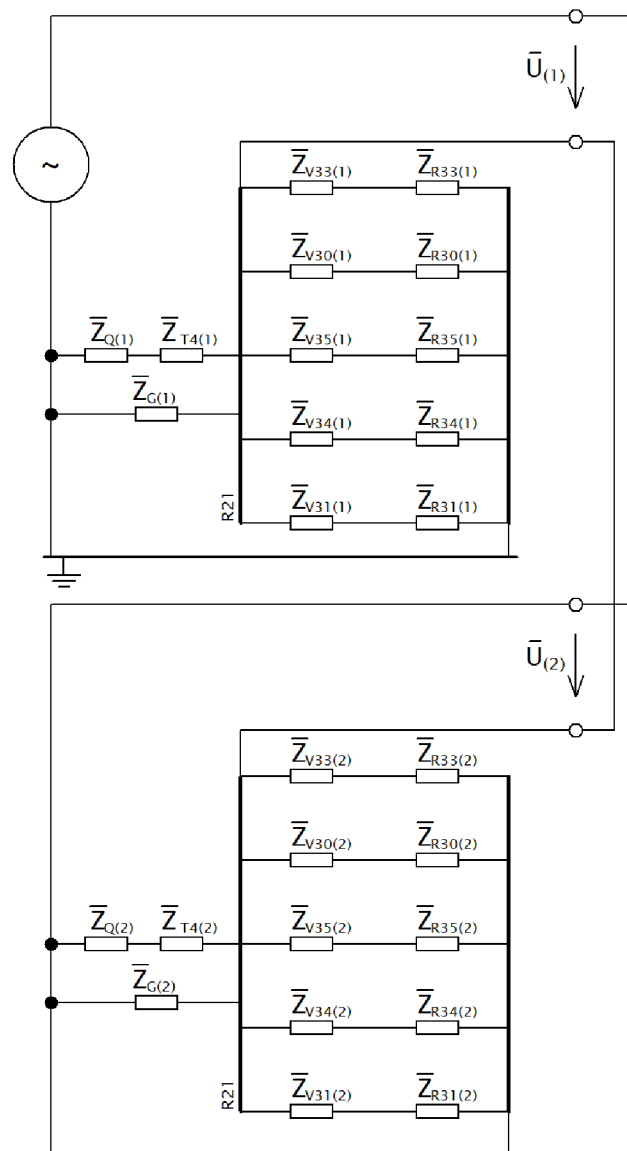
7.3 Výpočet zkratových proudů

7.3.1 Zkrat F1 na hlavní rozvodně R21

Na obrázcích je složkové schéma pro trojfázový (obrázek 16) a dvoufázový (obrázek 17) zkrat v místě F1, pro částečné zjednodušení jsou v něm vynechány impedance kabelů, jimiž je připojen transformátor T4. Do výpočtu již tyto impedance zahrnuty jsou.



Obrázek 16: Náhradní schéma pro trojfázový zkrat F1



Obrázek 17: Náhradní schéma pro dvoufázový zkrat F1

7.3.1.1 Určení celkové impedance při zkratu v F1

Impedance \overline{Z}_{QT4} je sériová kombinace impedancí sítě, transformátoru T4, vedení V7 a V71:

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{QT4} &= \overline{Z}_Q + \overline{Z}_{T4} + \overline{Z}_{V7} + \overline{Z}_{V71} = \\ &= (9,38 \cdot 10^{-3} + j93,8 \cdot 10^{-3}) + (0,011 + j0,1791) + (0,0015 + j0,0018) + (0,005 + j0,002) = \quad (92) \\ &= (0,0274 + j0,2769) \Omega \end{aligned}$$

Celková impedance do místa zkratu F1:

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{F1} &= \left(\frac{1}{\overline{Z}_{QT4}} + \frac{1}{\overline{Z}_G} + \frac{1}{\overline{Z}_{VR33}} + \frac{1}{\overline{Z}_{VR30}} + \frac{1}{\overline{Z}_{VR35}} + \frac{1}{\overline{Z}_{VR34}} + \frac{1}{\overline{Z}_{VR31}} + \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{1}{0,0274+j0,2769} + \frac{1}{0,1082 + j1,5453} + \frac{1}{0,7642 + j2,1386} + \frac{1}{0,3223 + j1,0845} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2,1213 + j5,1086} + \frac{1}{0,5523 + j1,7328} + \frac{1}{3,1059 + j7,7422} \right)^{-1} = (0,0266 + j0,1546)\Omega\end{aligned}\quad (93)$$

Kde \overline{Z}_{VRxx} jsou celkové impedance podružných rozveden včetně kabelových vedení, příklad výpočtu pro rozvodnu R33:

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{VR33} &= \overline{Z}_{V33} + \left(\frac{\overline{Z}_{TM33} \cdot \overline{Z}_{M33}}{\overline{Z}_{TM33} + \overline{Z}_{M33}} \right)^{-1} = \\ &= (0,0225 + j0,0165) + \left(\frac{(1,018 + 2,557) \cdot (1,78 + j11,868)}{(1,018 + 2,557) + (1,78 + j11,868)} \right)^{-1} = (0,7642 + j2,1386)\Omega\end{aligned}\quad (94)$$

Kde \overline{Z}_{TM33} je impedance motorů NN (jejich paralelní kombinace) a \overline{Z}_{M33} impedance motorů VN připojených v rozvodně.

7.3.1.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kF1}

Trojfázový zkrat:

$$I''_{k3F1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{F1}|} = \frac{1,1 \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot |(0,0266 + j0,1546)|} = 24,29 \text{ kA}\quad (95)$$

Dvoufázový zkrat:

$$I''_{k2F1} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\overline{Z}_{F1}|} = \frac{1,1 \cdot 6000}{2 \cdot |(0,0266 + j0,1546)|} = 21,04 \text{ kA}\quad (96)$$

7.3.1.3 Nárazový zkratový proud i_{pF1}

Nárazový zkratový proud v místě F1 spočítáme jako součet příspěvků nárazových zkratových proudů jednotlivých větví obvodu [5]:

$$i_{pF1} = \kappa_{QT4} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kQT4} + \kappa_G \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kQT4} + \sum_x \kappa_{Rx} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kRx}\quad (97)$$

kde:

κ ... součinitele nárazového zkratového proudu z poměru R/X jednotlivých větví

$\sum_x \kappa_{Rx} \sqrt{2} I''_{k3Rx}$...součet příspěvků k nárazovému zkratovému proudu podružných rozveden

Výpočet součinitelů z poměru R/X jednotlivých impedancí:

$$\begin{aligned}
 \kappa_{QT4} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,094} = 1,748 \\
 \kappa_G &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,07} = 1,81 \\
 \kappa_{R33} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,357} = 1,36 \\
 \kappa_{R30} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,297} = 1,42 \\
 \kappa_{R35} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,415} = 1,30 \\
 \kappa_{R34} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,318} = 1,40 \\
 \kappa_{R31} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,401} = 1,31
 \end{aligned} \tag{98}$$

Nárazový zkratový proud při trojfázovém zkratu F1:

$$\begin{aligned}
 i_{p3F1} &= \kappa_{QT4} \sqrt{2} I''_{k3QT4} + \kappa_G \sqrt{2} I''_{k3G} + \kappa_{R33} \sqrt{2} I''_{k3R33} + \kappa_{R30} \sqrt{2} I''_{k3R30} + \kappa_{R35} \sqrt{2} I''_{k3R35} + \\
 &+ \kappa_{R34} \sqrt{2} I''_{k3R34} + \kappa_{R31} \sqrt{2} I''_{k3R31} = \\
 &= 1,758 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,69 + 1,81 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,459 + 1,36 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,677 + 1,42 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,368 + \\
 &+ 1,30 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,688 + 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,095 + 1,31 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,456 = \mathbf{56,418 \text{ kA}}
 \end{aligned} \tag{99}$$

Pro dvoufázový zkrat je dovoleno použít stejné koeficienty jako u trojfázového zkratu:

$$\begin{aligned}
 i_{p2F1} &= \kappa_{QT4} \sqrt{2} I''_{k2QT4} + \kappa_G \sqrt{2} I''_{k2G} + \kappa_{R33} \sqrt{2} I''_{k2R33} + \kappa_{R30} \sqrt{2} I''_{k2R30} + \kappa_{R35} \sqrt{2} I''_{k2R35} + \\
 &+ \kappa_{R34} \sqrt{2} I''_{k2R34} + \kappa_{R31} \sqrt{2} I''_{k2R31} = \\
 &= 1,748 \cdot \sqrt{2} \cdot 11,859 + 1,81 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,13 + 1,36 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,453 + 1,42 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,916 + \\
 &+ 1,30 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,596 + 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,814 + 1,31 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,395 = \mathbf{48,859 \text{ kA}}
 \end{aligned} \tag{100}$$

7.3.1.4 Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Souměrný vypínací zkratový proud byl určen jako:

$$I_{bF1} = I''_{k3QT4} + \mu I''_G + \sum I''_{k3Rxx} \tag{101}$$

kde: $\sum I''_{k3Rxx}$... součet zkratových proudů rozveden

Koeficient útlumu generátoru pro $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ (viz. 6.4):

$$\mu = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \frac{I_{kG}}{I_{rG}}} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \cdot 6,39} = 0,713 \tag{102}$$

Souměrný vypínací proud při trojfázovém zkratu v F1:

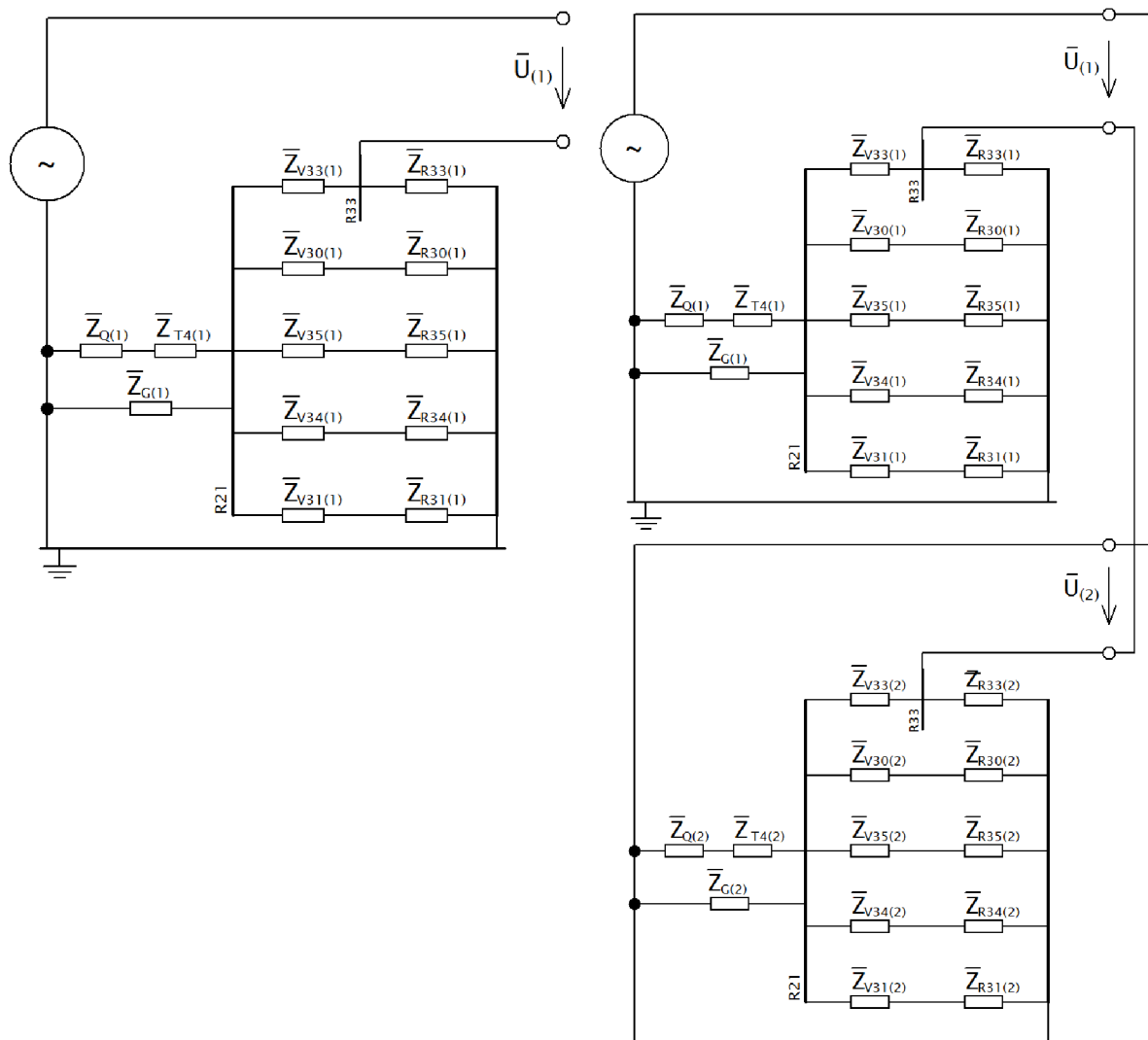
$$I_{b3F1} = I''_{k3QT4} + \mu I''_{k3G} + \sum I''_{k3Rxx} = 13,694 + 0,713 \cdot 2,549 + 8,286 = 23,797 \text{ kA} \tag{103}$$

Souměrný vypínací proud při dvoufázovém zkratu v F1:

$$I_{b2F1} = I''_{k2QT4} + \mu I''_{k2G} + \sum I''_{k2Rxx} = 11,859 + 0,713 \cdot 2,13 + 7,176 = 20,554 \text{ kA} \tag{104}$$

7.3.2 Zkrat F2 – F6 na podružných rozvodnách

Při zkratu na podružné rozvodně tečou do místa zkratu proudy z motorů VN (pokud jsou připojeny) a NN připojených do dané rozvodny a proudy zbytku sítě. Na obrázcích 18 a 19 jsou složková schémata pro zkraty F2 na v rozvodně R33. Taktéž příklad výpočtu zkratů je uveden pro tuto rozvodnu. Zkraty na ostatních podružných rozvodnách se počítají obdobně.



Obrázek 18: (vlevo) Náhradní schéma pro trojfázový zkrat F2

Obrázek 19: (vpravo) Náhradní schéma pro dvoufázový zkrat F2

7.3.2.1 Určení celkové zkratové impedance při zkratu F2

Součet impedancí sítě, generátoru, všech vedlejších rozvodů, kromě té, na které vznikl zkrat a vedení do rozvodny R33:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{RF2} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}_{QT4}} + \frac{1}{\bar{Z}_G} + \frac{1}{\bar{Z}_{VR30}} + \frac{1}{\bar{Z}_{VR35}} + \frac{1}{\bar{Z}_{VR34}} + \frac{1}{\bar{Z}_{VR31}} \right)^{-1} + \bar{Z}_{V33} = \\ &= \left(\frac{1}{0,0274+j0,2769} + \frac{1}{0,1082+j1,5453} + \frac{1}{0,3223+j1,0845} + \frac{1}{2,1213+j5,1086} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{0,5523+j1,7328} + \frac{1}{3,1059+j7,7422} \right)^{-1} + (0,0225 + 0,0165) = (0,0489 + j0,1827)\Omega\end{aligned}\quad (105)$$

Celková impedance pro zkrat F2:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{F2} &= \left(\frac{\bar{Z}_{RF2} \cdot \bar{Z}_{R33}}{\bar{Z}_{RF2} + \bar{Z}_{R33}} \right)^{-1} = \left(\frac{(0,0489 + j0,1827) \cdot (0,7417 + j2,1221)}{(0,0489 + j0,1827) + (0,7417 + j2,1221)} \right)^{-1} = \\ &= (0,0461 + j0,1683)\Omega\end{aligned}\quad (106)$$

kde:

\bar{Z}_{R33} ... impedance rozvodny R33 bez kabelu
 \bar{Z}_{V33} ... impedance kabelů k R33

7.3.2.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kF2}

Trojfázový zkrat:

$$I''_{k3F2} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{F2}|} = \frac{1,1 \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot |(0,0461 + j0,1683)|} = 21,837 \text{ kA} \quad (107)$$

Dvoufázový zkrat:

$$I''_{k2F2} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\bar{Z}_{F2}|} = \frac{1,1 \cdot 6000}{2 \cdot |(0,0461 + j0,1683)|} = 18,911 \text{ kA} \quad (108)$$

7.3.2.3 Nárazový zkratový proud i_{pF2}

Nárazový zkratový proud v místě F2 vypočítáme jako součet příspěvků nárazových zkratových proudů rozvodny a zbytku sítě, tedy:

$$i_{pF1} = \kappa_{RF2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kRF2} + \kappa_{R33} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kR33} \quad (109)$$

kde:

I''_{k3RF2} ... počáteční souměrný rázový zkratový proud dodávaný ze zbytku sítě

I''_{k3R33} ... počáteční souměrný rázový zkratový proud dodávaný z rozvodny R33

Výpočet součinitelů z poměru R/X jednotlivých impedancí:

$$\begin{aligned}\kappa_{RF2} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,27} = 1,46 \\ \kappa_{R33} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,349} = 1,36\end{aligned}\quad (110)$$

Nárazový zkratový proud při trojfázovém zkratu F1:

$$\begin{aligned}i_{p3F2} &= \kappa_{RF2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3RF2} + \kappa_{R33} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3R33} = \\ &= 1,46 \cdot \sqrt{2} \cdot 20,15 + 1,36 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,695 = \mathbf{44,865 \text{ kA}}\end{aligned}\quad (111)$$

Pro dvoufázový zkrat (stejně koeficienty jako u trojfázového zkratu):

$$\begin{aligned}i_{p2F2} &= \kappa_{RF2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2RF2} + \kappa_{R33} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2R33} = \\ &= 1,46 \cdot \sqrt{2} \cdot 17,451 + 1,36 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,468 = \mathbf{38,855 \text{ kA}}\end{aligned}\quad (112)$$

7.3.2.4 Souměrný vypínací proud I_b

U zkratu v F2 určíme souměrný vypínací zkratový proud podle:

$$I_{bF2} = I''_{kRF2} + \mu_M q_M I''_{M33} + \mu_e q_e I''_{TMe33}\quad (113)$$

kde: $\mu_M q_M I''_{M33}$... příspěvek VN motorů rozvodny R33

$\mu_e q_e I''_{TMe33}$... příspěvek NN ekvivalentního motoru

Koeficienty pro výpočet vypínacího proudu VN motorů pro $t_{\min} = 0,1s$ (viz. 6.4):

$$\begin{aligned}\mu_M &= 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \frac{I''_{kM}}{I_{rM}}} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \cdot 5,5} = 0,744 \\ q_M &= 0,57 + 0,12 \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) = 0,57 + 0,12 \ln(0,48) = 0,482\end{aligned}\quad (114)$$

Koeficienty pro výpočet vypínacího proudu skupiny NN motorů pro $t_{\min} = 0,1s$:

$$\begin{aligned}\mu_e &= 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \frac{I''_{kMe}}{I_{rMe}}} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \cdot 4,79} = 0,775 \\ q_e &= 0,57 + 0,12 \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) = 0,57 + 0,12 \ln(2,4) = 0,68\end{aligned}\quad (115)$$

Kde: I''_{kMe} ... hodnota zkratového proudu ekvivalentních motorů přepočtená na stranu vyššího napětí transformátoru VN/NN (viz. [5])

Souměrný vypínací proud při trojfázovém zkratu v F2:

$$\begin{aligned}I_{b3F2} &= I''_{k3RF2} + \mu_M q_M I''_{k3M33} + \mu_e q_e I''_{k3TMe33} = \\ &= 20,15 + 0,744 \cdot 0,482 \cdot 0,317 + 0,775 \cdot 0,68 \cdot 1,384 = \mathbf{20,993 \text{ kA}}\end{aligned}\quad (116)$$

Souměrný vypínací proud při dvoufázovém zkratu v F1:

$$I_{b2F2} = I''_{k2RF2} + \mu_M q_M I''_{k2M33} + \mu_e q_e I''_{k2TMe33} =$$

$$= 17,45 + 0,744 \cdot 0,482 \cdot 0,274 + 0,775 \cdot 0,68 \cdot 1,198 = \mathbf{18,16 \text{ kA}}$$
(117)

7.4 Celkové výsledky

V této kapitole jsou uvedeny výsledky vypočítaných zkratových proudů. Hodnoty u trojfázového zkratu byly ve všech případech vyšší, proto byly zvoleny k porovnání s proudy uvedenými v dokumentaci.

7.4.1 Výsledky zkratových proudů všech zkratů

Tabulka 3: Výsledky vypočtených proudů při jednotlivých zkratech

Zkrat	I_k		i_p		I_b	
	I_{k3}	I_{k2}	i_{p3}	i_{p2}	I_{b3}	I_{b2}
	kA	kA	kA	kA	kA	kA
F1 (R21)	24,298	21,042	56,418	48,860	23,735	20,555
F2 (R33)	21,841	18,915	44,852	38,843	20,959	18,151
F3 (R30)	24,173	20,934	54,851	47,502	22,475	19,464
F4 (R35)	16,245	14,068	28,438	24,628	15,928	13,794
F5 (R34)	21,801	18,880	44,676	38,691	20,701	17,928
F6 (R31)	21,351	18,491	42,329	36,658	21,148	18,315

7.4.2 Kontrola dimenzování rozvodů

Tabulka 4: Porovnání maximálních zkratových hodnot určených výpočtem s hodnotami uvedenými v dokumentaci

Zkrat	$I_k^{(1)}$	$I_{k3}^{(2)}$	vyhovuje	$i_p^{(1)}$	$i_{p3}^{(2)}$	vyhovuje	$I_b^{(1)}$	$I_{b3}^{(2)}$	vyhovuje
	kA	kA		kA	kA		kA	kA	
F1 (R21)	24,2	24,298	Ne	54,7	56,4185	Ne	26,6	23,735	Ano
F2 (R33)	20,5	21,841	Ne	46,5	44,8518	Ano	22,5	20,959	Ano
F3 (R30)	23,4	24,173	Ne	53	54,8508	Ne	25,8	22,475	Ano
F4 (R35)	14,4	16,245	Ne	32,6	28,438	Ano	15,8	15,801	Ano
F5 (R34)	20,5	21,801	Ne	46,5	44,6762	Ano	22,5	20,701	Ano
F6 (R31)	20,2	21,351	Ne	45,8	42,3292	Ano	22,3	21,148	Ano

1) Hodnota současného dimenzování

2) Hodnota vypočteného proudu po připojení generátoru

Tabulka 5: Porovnání maximálních zkratových hodnot určených výpočtem s hodnotami uvedenými v dokumentaci, při původním stavu, tj. bez připojeného generátoru

Zkrat	$I_{k3}^{(1)}$	$I_{k3}^{(2)}$	vyhovuje	$i_p^{(1)}$	$i_{p3}^{(2)}$	vyhovuje	$I_b^{(1)}$	$I_{b3}^{(2)}$	vyhovuje
	kA	kA		kA	kA		kA	kA	
F1 (R21)	24,2	21,852	Ano	54,7	50,107	Ano	26,6	21,981	Ano
F2 (R33)	20,5	19,871	Ano	46,5	40,807	Ano	22,5	18,989	Ano
F3 (R30)	23,4	21,754	Ano	53	48,767	Ano	25,8	20,052	Ano
F4 (R35)	14,4	14,400	Ano	32,6	26,783	Ano	15,8	14,843	Ano
F5 (R34)	20,5	19,849	Ano	46,5	40,700	Ano	22,5	18,749	Ano
F6 (R31)	20,2	19,441	Ano	45,8	38,629	Ano	22,3	19,238	Ano

7.4.3 Výsledky zkratových proudů při provozu transformátorů T1 a T3

Dříve bylo vyvedení výkonu ze sítě, řešeno pomocí dvou transformátorů T1 a T2. V současné době jsou tyto mimo provoz a jsou nahrazeny transformátorem T4 o větším jmenovitém výkonu. Provedli jsme ještě jeden výpočet, pro zkratové poměry při provozu s uvedenými transformátory, hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: vypočtené hodnoty proudů při provozu transformátoru T1 a T3

Zkrat	I_k		i_p		I_b	
	I_{k3}	I_{k2}	i_{p3}	i_{p2}	I_{b3}	I_{b2}
	kA	kA	kA	kA	kA	kA
F1 (R21)	27,413	23,740	63,379	54,888	26,843	23,247
F2 (R33)	24,251	21,002	49,188	42,598	23,367	20,237
F3 (R30)	27,246	23,596	61,708	53,441	25,547	22,125
F4 (R35)	17,460	15,121	30,088	26,057	17,145	14,848
F5 (R34)	24,182	20,943	48,926	42,371	23,082	19,990
F6 (R31)	23,674	20,502	46,282	40,082	23,471	20,326

8 ZÁVĚR

V první části práce byly stručně popsány přechodové děje v elektrizační soustavě. Podrobněji zde byly rozebrány zkraty, jejich rozdělení a druhy. Byl zde zaznamenán postup výpočtu pomocí metody souměrných složek a určení zkratových impedancí zařízení. Uveden byl postup výpočtu zkratových proudů pro trojfázový, dvoufázový a jednofázový zkrat. Metody výpočtu zkratových proudů jsou použity v souladu s platnou normou ČSN 60909 – 0.

V další části byla řešena konkrétní lokální distribuční síť v průmyslovém objektu. Tato síť je izolovaná a je provozována na napěťové hladině 6 kV. Tato soustava se skládá z hlavní rozvodny, do níž je kabelovým vedením připojeno pět podružných rozvodů. V každé z nich jsou provozovány asynchronní motory VN a transformátory VN/NN, u kterých předpokládáme, že jsou zatíženy motory o polovičním jmenovitém výkonu transformátorů. Cílem práce bylo ověřit zkratovou odolnost všech rozvodů po připojení synchronního generátoru k síti.

Výpočtem se určily zkratové proudy v jednotlivých rozvodnách při trojfázových a dvoufázových zkratech. Velikosti těchto proudů se porovnaly s hodnotami uvedenými v dokumentaci k původnímu stavu sítě.

Z výsledků (tabulky kapitola 7.4) vyplývá, že připojením generátoru k síti se překročí zkratová odolnost na všech rozvodnách. Vznikne-li trojfázový zkrat na kterékoli rozvodně, budou velikosti počátečního souměrného rázového zkratového proudu vždy vyšší, než je maximální hodnota uvedená v dokumentaci. Nárazový zkratový proud překročí stanovenou hodnotu v případě vzniku trojfázového zkratu v hlavní rozvodně (F1) a v rozvodně R30 (F3). Velikosti souměrných vypínacích zkratových proudů jsou ve všech případech zkratu nižší než hodnoty v dokumentaci. Pokud se tedy rozhodne o připojení synchronního generátoru k síti, je potřeba provést opatření k omezení zkratových proudů, např. zařazením omezujícího reaktoru.

Ověřeny byly i hodnoty zkratových proudů pro případ, kdy je síť provozována bez generátoru. Hodnoty zkratových proudů nepřekročily dimenzování rozvodů. Dále byly vypočteny velikosti zkratových proudů při provozu s transformátory T1 a T3 místo transformátoru T4. Hodnoty zkratových proudů v tomto uspořádání sítě byly ve všech případech vyšší než při chodu pouze s transformátorem T4.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUČERA, D.: Elektroenergetika I.
VUT, Brno, 1986
- [2] MEŠTER, M.: Výpočet skratových proudů trojfázových střídavých soustavách.
ABB Elektro, Bratislava, 2005.
- [3] REISS, L., MALÝ, K., PAVLÍČEK, Z.: Teoretická elektroenergetika II.
STNL Praha, Alfa Bratislava, 1978.
- [4] FEJT, Z., ČERMÁK, J.: Elektroenergetika.
ČVUT, Praha, 1981.
- [5] IEC 60909 – 0: 2002. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0: Výpočet proudů*. idt IEC 60909-0:2001 + idt IEC 60909-0:2001/ Cor. 1:2002-02
- [6] IEC TR 60909-1 zavedena v ČSN IEC 909-1:1997 (33 3023) *Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách - část 1: Součinitele pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách podle IEC 909*. idt IEC 909-1:1991
- [7] IEC TR3 60909-2:1992 zavedena v ČSN IEC 909-2:1997 (33 3024) *Data pro výpočty zkratových proudů v souladu s IEC 909*. idt IEC 909-2:1992
- [8] IEC TR 60909-4: 2000 *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents*.

PŘÍLOHA A

Zadané parametry prvků soustavy.

Síť:

S_{k3}''	S_{kl}''	U_{ns}
[VA]	[VA]	[V]
420000000	400000000	22000

Transformátory:

Z rozvodny	Název		u_k	P_{kT}	U_{LV}	U_{HV}	S_{nT}	S_{nm}
			[%]	[kW]	[kV]	[kV]	[MVA]	[MVA]
R10	T3	T4	8	78,5	6,1	22	16	8
R31	T5	T13	6,2	17,7	0,4	6	1	0,5
R31	T6	T1	6,19	14,2	0,4	6	1	0,5
R33	T8	T250	6,29	14,2	0,4	6	0,25	0,13
R33	T9	T13	5,89	14,8	0,4	6	1	0,5
R33	T10	T6	5,89	15,3	0,4	6	1	0,5
R33	T12	T11	5,85	14,7	0,4	6	1	0,5
R33	T14	T12	5,88	14,7	0,4	6	1	0,5
R33	T16	T4	5,91	14,4	0,4	6	1	0,5
R33	T17	T5	5,78	14,2	0,4	6	1	0,5
R34	T19	T9	5,73	13,8	0,4	6	1	0,5
R34	T20	T0	5,19	14,2	0,4	6	1	0,5
R34	T21	T1	5,91	14,2	0,4	6	1	0,5
R34	T22	T10	5,82	14,5	0,4	6	1	0,5
R34	T23	T2	5,91	14,2	0,4	6	1	0,5
R34	T24	T7	5,87	14,7	0,4	6	1	0,5
R35	T25	T73	6,06	14,2	0,4	6	1	0,5
R35	T27	T70	4,29	14,2	0,4	6	1	0,5
R35	T28	T71	6,04	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T29	T2	5,98	13,9	0,4	6	1	0,5
R30	T32	T16	6,1	18,1	0,4	6	1	0,5
R30	T33	T52	4,09	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T35	T23	9,93	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T36	T19	5,93	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T38	T22	6,44	18,4	0,4	6	1	0,5
R30	T40	T20	5,86	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T41	T29	6,01	14,2	0,4	6	1	0,5
R30	T42	T17	6,13	17,6	0,4	6	1	0,5

Generátor připojovaný do hlavní rozvodny:

S_{ng}	U_{ng}	x_d''	$\cos\phi_{nG}$	ϕ_{nG}
[VA]	[V]	[-]	[-]	[°]
4000000	6000	0,17	0,85	31,788

VN motory v pomocných rozvodnách:

Z rozvodny	Název		U_{nM}	P_{nM}
			[kV]	[kW]
R30	S1	M1	6	400
R30	S1	M2	6	700
R30	K-systém	M12	6	250
R30	K-systém	M13	6	250
R30	CHV	M19	6	400
R33	Rozklad	M 241 a	6	160
R33	Rozklad	M 241 b	6	160
R33	Rozklad	M 241 c	6	160
R34	Mlýn	M 106 a	6	315
R34	Mlýn	M 106 b	6	315
R34	Kompresor	K 1	6	250
R34	Kompresor	K 2	6	250

Kabelová vedení:

Název	od	do	U_{nv}	typ	průřez	délka	R_k	L_k
			kV		[mm ²]	[m]	[Ω/Km]	[mH/Km]
V1	PSP a.s.	R10	22	AXEKCY	3x(1x240)	750	0,125	0,52
V2	PSP a.s.	R10	22	AXEKCY	3x(1x240)	750	0,125	0,52
V3	PSP a.s.	R10	22	AXEKCY	3x(1x240)	750	0,125	0,52
V4	PSP a.s.	R10	22	AXEKCY	3x(1x240)	750	0,125	0,52
V51	R10	T1	22	AXEKCY	3x(1x150)	22	0,206	0,55
V61	R10	T3	22	AXEKCY	3x(1x240)	22	0,125	0,52
V71	R10	T4	22	AXEKCY	3x(1x63)pásovina	10	0,47	0,6
V5	T1	R21	6	10-AYKCY	3x(3x500)	22	0,06	0,23
V6	T3	R21	6	10-AYKCY	3x(3x500)	29	0,06	0,23
V7	T4	R21	6	10-AYKCY	3x(4x500)	25	0,06	0,23
V18	R21	R30	6	10-AYKCY	2x3x(1x300)	15	0,1	0,5
V19	R21	R30	6	10-AYKCY	2x3x(1x300)	15	0,1	0,5
V16	R21	R31	6	10-AXEKCY	3x(1x240)	450	0,125	0,23
V9	R21	R31	6	10-AXEKCY	3x(1x240)	450	0,125	0,23
V11	R21	R33	6	10-AYKCY	2x(3x240)	360	0,125	0,29
V13	R21	R33	6	10-AYKCY	2x(3x240)	360	0,125	0,29
V8	R21	R34	6	10-AYKCY	2x(3x240)	380	0,125	0,29
V15	R21	R34	6	10-AYKCY	2x(3x240)	380	0,125	0,29
V10	R21	R35	6	6-AYKCY	2x(3x240)	1350	0,125	0,28
V14	R21	R35	6	6-AYKCY	2x(3x240)	1350	0,125	0,28

PŘÍLOHA B

Impedance rozvoden.

Rozvodna, zařízení:	Označení	Impedance \bar{Z} [Ω]:			
		zařízení	kombinace	rozvodny	včetně kabelů
R33					
vedení V11	Z_{V11}	0,045+0,033j	$Z_{V33}^{1)}$		
vedení V13	Z_{V13}	0,045+0,033j	0,0225+0,0165j		
motory VN	Z_{M33}	1,7803+11,868j			
trafa VN/NN	Z_{T33}	0,089+0,3444j	$Z_{TM33}^{2)}$	$Z_{R33}^{3)}$	$Z_{VR33}^{4)}$
motory NN	Z_{Me33}	0,9293+2,2128j	1,0183+2,5572j	0,7417+2,1221j	0,7642+2,1386j
R30					
vedení V18	Z_{V18}	0,002+0,002j	$Z_{V30}^{1)}$		
vedení V19	Z_{V19}	0,002+0,002j	0,001+0,001j		
motory VN	Z_{M30}	0,4273+2,8484j			
transf. VN/NN	Z_{T30}	0,0584+0,2364j	$Z_{TM30}^{2)}$	$Z_{R30}^{3)}$	$Z_{VR30}^{4)}$
motory NN	Z_{Me30}	0,6196+1,4752j	0,678+1,7116j	0,3213+1,0835j	0,3223+1,0845j
R35					
vedení V14	Z_{V14}	0,169+0,119j	$Z_{V35}^{1)}$		
vedení V10	Z_{V10}	0,169+0,119j	0,0845+0,0595j		
motory VN	Z_{M35}	nejsou připojeny			
transf. VN/NN	Z_{T35}	0,1781+0,6234j	$Z_{TM35}^{2)}$		$Z_{VR35}^{4)}$
motory NN	Z_{Me35}	1,8587+4,4257j	2,0368+5,0491j		2,1213+5,1086j
R34					
vedení V8	Z_{V8}	0,048+0,035j	$Z_{V34}^{1)}$		
vedení V15	Z_{V15}	0,048+0,035j	0,024+0,0175j		
motory VN	Z_{M34}	0,7562+5,0414j			
transf. VN/NN	Z_{T34}	0,0867+0,3365j	$Z_{TM34}^{2)}$	$Z_{R34}^{3)}$	$Z_{VR34}^{4)}$
motory NN	Z_{Me34}	0,9293+2,2128j	1,016+2,5493j	0,5283+1,7153j	0,5523+1,7328j
R31					
vedení V16	Z_{V16}	0,056+0,033j	$Z_{V31}^{1)}$		
vedení V9	Z_{V9}	0,056+0,033j	0,028+0,0165j		
motory VN	Z_{M31}	nejsou připojeny			
transf. VN/NN	Z_{T31}	0,2899+1,0872j	$Z_{TM31}^{2)}$		$Z_{VR31}^{4)}$
motory NN	Z_{Me31}	2,788+6,6385j	3,0779+7,7257j		3,1059+7,7422j

- 1) Paralelní kombinace kabelových vedení
- 2) Sériové spojení transformátorů VN/NN a k nim připojených motorů
- 3) Paralelní kombinace VN motorů a NN motorů (včetně transformátorů), impedance rozvodny bez vedení
- 4) Celková impedance rozvodny včetně kabelů

Impedance sítě, transformátoru T4 a generátoru:

Zařízení	Označení	Impedance \bar{Z} [Ω]:	
		zařízení	kombinace
Síť	Z_Q	0,00938+0,0938j	
Transf. T4	Z_{T4}	0,011+0,1791j	$Z_{QT4}^{1)}$
Vedení V7 a V71	Z_{VT4}	0,007+0,002j	0,0274+0,2769j
Generátor	Z_G	0,1082+1,5453j	

1) Sériové spojení síťového napáječe, transformátoru T4 a vedení V7 a V71

Impedance motorů připojených k rozvodnám:

R33							
Transformátor		T9	T10	T12	T14	T16	T17
Z_{THV}	[Ω]	0,538+2,074j	0,557+2,069j	0,535+2,06j	0,535+2,071j	0,524+2,085j	0,517+2,039j
Motory nn							
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j
Motory VN		M 241 a	M 241 b	M 241 c			
Z_M	[Ω]	5,341+35,604j	5,341+35,604j	5,341+35,604j			

R30						
Transformátor		T29	T32	T33	T35	T36
Z_{THV}	[Ω]	0,505+2,114j	0,658+2,117j	0,522+1,41j	0,504+3,491j	0,516+2,094j
Motory nn						
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j
Motory VN		M1	M2	M12	M13	M19
Z_M	[Ω]	2,136+14,242j	1,221+8,138j	3,418+22,787j	3,418+22,787j	2,136+14,242j

R30					
Transformátor		T38	T40	T41	T42
Z_{THV}	[Ω]	0,667+2,239j	0,015+2,13j	0,516+2,123j	0,64+2,134j
Motory nn					
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j

R35				
Transformátor		T25	T27	T28
Z_{THV}	[Ω]	0,516+2,141j	0,522+1,487j	0,516+2,133j
Motory nn				
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j

R34							
Transformátor		T19	T20	T21	T22	T23	T24
Z_{THV}	[Ω]	0,502+2,025j	0,519+1,823j	0,516+2,086j	0,528+2,051j	0,516+2,086j	0,535+2,067j
Motory nn							
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j	5,576+13,277j
Motory VN		M 106 a	M 106 b	K 1	K 2		
Z_M	[Ω]	2,713+18,085j	2,713+18,085j	3,418+22,787j	3,418+22,787j		

R31			
Transformátor		T5	T6
Z_{THV}	[Ω]	0,643+2,158j	0,516+2,187j
Motory nn			
Z_{Me}	[Ω]	5,576+13,277j	5,576+13,277j