

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

2020

Hessel German David

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zkratové výpočty ve střídavých a stejnosměrných sítích

AC and DC Short-Circuit Calculations in Electrical Networks

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. German David Hessel**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Zkratové výpočty ve střídavých a stejnosměrných sítích
AC and DC Short-Circuit Calculations in Electrical Networks**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor zkratových jevů
2. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909
3. Výpočty zkratů v ss sítích
4. Parametry prvků soustavy
5. Řešení modelového příkladu sítě pomocí vzorců z příslušných technických norem
6. Řešení stejného modelového příkladu sítě s využitím komerčního softwaru
7. Porovnání výsledků, zhodnocení vhodnosti použití softwaru

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL 1989 Praha
2. Haluzík E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skripta VUT Brno 1985
3. Trojánek, Z., Hájek J., Kvasnica, P.: Přechodové jevy v el. soustavách, SNTL 1988 Praha
4. Normy ČSN, firemní literatura, technická dokumentace.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Ostravě dne 30. 4. 2020



.....
Bc. German David Hessel


Poděkování

Mé velké poděkování patří Dr. Ing. Jiřímu Gureckému a Ing. Janu Velebovi, za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady trpělivost a vstřícnost při konzultacích a vypracovávání diplomové práce. Taky bych chtěl poděkovat za příležitost k použití modelovacího programu DigSILENT PowerFactory a získání zkušenosti při zpracovávání jednotlivých scénářů.

Prohlášení společnosti ABB s.r.o. – pobočka Ostrava, Nova Karolína

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě dne 30. 4. 2020


.....
Ing. Jan Veleba, Ph.D., vedoucí oddělení
pro síťové výpočty, ABB EUOPC Ostrava

Abstrakt

Práce se zabývá metodikou výpočtu zkratových poměrů v sítích způsobených nepříznivými atmosférickými vlivy nebo poruchami jednotlivých prvků, které jsou v dané síti zapojeny. Navrhování a modelování stejnosměrných a střídavých sítí má za účel analýzy jejich chování při různých typech zkratů, které se v praxi mohou vyskytnout. Cílem výpočtů je zjišťování exaktních minimálních hodnot zkratů v sítích pro nastavení ochran, které jsou zodpovědné za správný a bezpečný provoz jednotlivých částí sítě, a také zjišťování maximálních hodnot zkratů, za účelem kontroly dimenzování jednotlivých zařízení.

Na konci práce jsou uvedeny výsledky pro porovnání matematického řešení podle normy IEC 60909-0 a IEC 61660-1 a řešení pomocí modelovacího programu DIgSILENT PowerFactory. Jsou uvedené také chyby výpočtů, odchylky a vyhodnocení jednotlivých metod řešení.

Klíčová slova

Zkrat, zkratový proud, stejnosměrné sítě, střídavé sítě, výpočet zkratových proudů, DIgSILENT PowerFactory, IEC 60909-0, IEC 61660-1, korekční faktor, souměrné zkraty, nesouměrné zkraty.

Abstract

This thesis deals with the methodology of calculation of short-circuit conditions in the network caused by adverse atmospheric influences or failures in the individual elements that are installed in the given network. Designing and modeling of DC and AC networks is done in order to analyze their behavior under different types of short-circuits that may occur in practice. The purpose of the calculations is to determine the exact minimum short-circuit values in the networks for setting up protections, which are responsible for the correct and safe operation of individual parts of the network, and also, to determine the maximum short-circuit currents in order to check the short-circuit ratings of individual components in the network.

At the end, comparison of mathematical solution according to the standards IEC 60909-0 and IEC 61660-1 and of solution using modeling program DIgSILENT PowerFactory are presented. Calculation errors, deviations and evaluation of individual solution methods are shown as well.

Keywords

Short-circuit, short circuit current, DC networks, AC networks, calculation of short-circuit current DIgSILENT PowerFactory, IEC 60909-0, IEC 61660-1, correction factor, symmetrical short-circuit, asymmetrical short-circuit.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1. Úvod	14
2. Zkratky ve střídavých sítích	15
2.1. Základní pojmy	15
2.2. Průběhy zkratových proudů	16
2.3. Druhy zkratů	18
2.4. Stejnosemnná složka i_{DC}	18
2.5. Střídavá složka i_k	19
2.6. Příčiny vzniku zkratů	20
2.7. Účinky zkratových proudů	20
2.8. Omezení účinků zkratových proudů	22
2.9. Omezení zkratových proudů	22
3. Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0	24
3.1. Rovnice pro výpočet impedance	24
3.2. Hodnoty napěťového součinitele	28
4. Praktické výpočty 3f zkratů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0	29
4.1. První případ	29
4.2. Druhý případ	31
4.3. Třetí případ	33
4.4. Čtvrtý případ	36
4.5. Pátý případ	38
4.6. Grafické vyjádření činitel kappu	40
5. Zkratky ve stejnosmnných sítích	41
5.1. Základní pojmy	41
5.2. Průběhy zkratových proudů	42
6. Výpočet zkratových proudů ve stejnosmnných sítích dle IEC 61660-1	43
6.1. Metodika výpočtů zkratů	44
6.2. Rovnice pro výpočet zkratů dle zařízení	45
6.2.1. Odpor a indukčnost vtažené na délku kabelu	46
6.2.2. Usměřovač	47

6.2.3. Baterie	51
6.2.4. Kondenzátor	53
6.2.5. Stejnosemřný motor s cizím buzením (SSMCB)	58
7. Výpočet korekce celkových zkratových proudů	63
8. Praktické výpočty 3f zkratů ve stejnosmřných sítích dle IEC 61660-1.....	65
8.1. Usměřňovač.....	65
8.2. Baterie	68
8.3. Kondenzátor	70
8.4. Stejnosemřný motor s cizím buzením	73
9. Praktické výpočty 3f zkratů ve střídavých sítích pomocí DigSILENTu.....	78
9.1. První případ.....	78
9.2. Druhý případ	78
9.3. Třetí případ.....	79
9.4. Čtvrtý případ	79
9.5. Pátý případ	80
10. Praktické výpočty 3f zkratů ve stejnosmřných sítích pomocí DigSILENTu.....	80
10.1. Usměřňovač.....	81
10.2. Baterie	81
10.3. Kondenzátor	82
10.4. Stejnosemřný motor s cizím buzením	82
11. Výpočet korekce celkových zkratových proudů dle IEC 61660-1.....	83
12. Výpočet celkových zkratových proudů pomocí DigSILENTu	88
13. Vyhodnocení při použití DigSILENT PowerFactory.....	89
14. Porovnání výsledků při výpočtu zkratových proudů pomocí matematického řešení a pomocí DigSILENT PowerFactory.....	90
15. Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti dle IEC 60909-0 a IEC 61660-1	92
16. Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti pomocí DigSILENTu	97
17. Závěr	98
Seznam použité literatury.....	100
Seznam příloh.....	101

Seznam symbolů a zkratk

A	Počáteční hodnota DC složky.
AC	Střídavé.
c	Napěťový činitel.
C	Kondenzátor, kapacitance.
c_{min}	Minimální hodnota napěťového činitele.
c_{max}	Maximální hodnota napěťového činitele.
D	Usměrňovač.
DC	Stejnoseměrné.
E_B	Napětí baterie naprázdno.
E_C	Napětí kondenzátoru.
λ	Faktor pro výpočet stejnosměrného zkratového proudu.
f	Kmitočet sítě.
F	Místo vzniku zkratu.
G	Generátor.
HV	Vysoké napětí.
$HVDC$	Vysokonapěťové stejnosměrné.
$i(t)$	Okamžitá hodnota proudu.
$i_1(t), i_2(t)$	Části průběhu zkratového proudu.
I_b	Vypínací proud.
I_{DC}	Stejnoseměrný proud.
I_k	Ustálený zkratový proud.
I_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový proud.
I_{LR}	Proud motoru nakrátko.
I_T	Jmenovitý proud.
i_{DC}	Stejnoseměrná složka zkratového proudu.
i_P	Nárazový zkratový proud.
J	Moment setrvačnosti rotoru motoru.
k_3	Trojfázový zkrat.
k	Označení faktorů pro výpočet časové konstanty a doby nárůstu.
K	Korekční faktor pro impedanci.
K	Korigované impedance.
κ	Činitel kappa.
L_F	Ekvivalentní nasycená indukčnost obvodu pole při zkratu.

Seznam symbolů a zkratk

L_{OF}	Ekvivalentní nenasycená indukčnost obvodu pole při zkratu.
LV	Nízké napětí.
M	Asynchronní motor.
n	Otáčky motoru.
n_o	Otáčky motoru naprázdno.
n_n	Jmenovité otáčky motoru.
η	Účinnost motoru.
p	Poměr zkratových proudů.
p_T	Převod transformátoru.
ρ	Rezistivita kabelu.
φ	Fázový posuv.
ΔP_K	Činné ztráty transformátoru.
P_M	Výkon motoru.
R	Celkový zkratový odpor.
R_G	Odpor generátoru.
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon.
$SSMCB$	Stejnoseměrný motor s cizím buzením.
S_k''	Zdánlivý zkratový výkon.
S_{rG}	Jmenovitý zdánlivý výkon generátoru.
t	Čas.
t_p	Doba nárůstu.
τ	Časová konstanta.
T	Dvouvinutový transformátor.
T_K	Doba trvání zkratu.
U_n	Jmenovité napětí sítě.
U_{rG}	Jmenovité napětí generátoru.
μ_K	Napětí nakrátko transformátoru.
r_s	Hodnota statorového odporu generátoru v procentech.
ω_o	Netlumená úhlová frekvence.
ω_d	Tlumená úhlová frekvence.
X	Celková zkratová reaktance.
X_d''	Rázová zkratová reaktance generátoru.
Z	Impedance.
Z_k	Celková zkratová impedance.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Průběh souměrného zkratového proudu. [3]</i>	16
<i>Obr. 2 Průběh nesouměrného zkratového proudu. [3]</i>	16
<i>Obr. 3 Průběh zkratového proudu při vzdálený zkratu s konstantní střídavou složkou. [1]</i>	17
<i>Obr. 4 Průběh zkratového proudu při blízkém zkratu s klesající střídavou složkou. [1]</i>	17
<i>Obr. 5 Charakteristiky zkratových proudů v síti. [1]</i>	18
<i>Obr. 6 Efektivní hodnota souměrného zkratového proudu.[3]</i>	19
<i>Obr. 7 Utržení podpěrky a zkroucení hliníkový propojek v důsledku nadměrného dynamického namáhání. [5]</i>	21
<i>Obr. 8 Upálení přívodu v důsledku tepelného přetížení průchodem zkratového proudu. [5]</i>	21
<i>Obr. 9 Rozdělení sekcí v rozvodnách. [7]</i>	22
<i>Obr. 10 Změna konfigurace sítě. [7]</i>	23
<i>Obr. 11 Možnosti zapojení reaktoru. [7]</i>	23
<i>Obr. 12 Připojení synchronního generátoru do sítě. [1]</i>	29
<i>Obr. 13 Připojení generátoru do sítě přes transformátor. [1]</i>	31
<i>Obr. 14 Schéma připojení soustavy a vedení přes transformátor. [1]</i>	33
<i>Obr. 15 Připojení asynchronního motoru do sítě. [1]</i>	36
<i>Obr. 16 Připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor. [1]</i>	38
<i>Obr. 17 Hodnoty K v závislosti na poměru R/X nebo X/R. [1]</i>	40
<i>Obr. 18 Typické průběhy zkratových proudů dle zařízení. [2]</i>	42
<i>Obr. 19 Normovaná aproximace průběhu ss zkratového proudu. [2]</i>	43
<i>Obr. 20 Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů stejnosměrné sítě. [2]</i>	45
<i>Obr. 21 Tvar DC kabelu (na levé straně) a tvar přípojnice (na pravé straně).[2]</i>	46
<i>Obr. 22 Náhradní schéma usměrňovače a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]</i>	47
<i>Obr. 23 Faktor λ_D pro stanovení kvazi ustáleného zkratového proudu I_{kD}. [2]</i>	48
<i>Obr. 24 Faktor κ_D pro určení nárazového zkratového proudu i_{pD}. [2]</i>	49
<i>Obr. 25 Náhradní schéma chemické baterie a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]</i>	51
<i>Obr. 26 Doba nárůstu t_{pB} a časová konstanta τ_{1B} pro výpočet zkratů. [2]</i>	52
<i>Obr. 27 Náhradní schéma kondenzátoru a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]</i>	53
<i>Obr. 28 Faktor κ_C pro výpočet nárazového zkratového proudu. [2]</i>	55
<i>Obr. 29 doba nárůstu t_{pC} pro výpočet zkratů. [2]</i>	55
<i>Obr. 30 Faktor k_{1C} pro vyjádření časové konstanty τ_{1C}. [2]</i>	56

Seznam obrázků

<i>Obr. 31</i> Faktor k_{2C} pro vyjádření časové konstanty τ_{2C} . [2]	56
<i>Obr. 32</i> Náhradní schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením a zkratové parametry motoru pro výpočet zkratových proudů. [2]	58
<i>Obr. 33</i> Faktor κ_M pro vyjádření nárazového zkratového proudu i_{pM} s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]	60
<i>Obr. 34</i> Faktory k_{1M} a k_{2M} pro určení doba nárůstu t_{pM} a časové konstanty nárůstu τ_{1M} pro jmenovitou rychlost a menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} \geq 10 \tau_F$. [2]	61
<i>Obr. 35</i> Doba nárůstu t_{pM} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]	61
<i>Obr. 36</i> Faktor k_{3M} pro určení τ_{1M} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]	62
<i>Obr. 37</i> Faktor k_{4M} pro určení τ_{2M} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]	63
<i>Obr. 38</i> Průběh stejnosměrného zkratového proudu tekoucího přes usměrňovač.	67
<i>Obr. 39</i> Průběh stejnosměrného zkratového proudu baterie.	70
<i>Obr. 40</i> Průběh stejnosměrného zkratového proudu kondenzátoru.	72
<i>Obr. 41</i> Průběh stejnosměrného zkratového proudu stejnosměrného motoru při $I_{kM} \neq 0$	75
<i>Obr. 42</i> Průběh stejnosměrného zkratového proudu stejnosměrného motoru při $I_{kM} = 0$	77
<i>Obr. 43</i> Schéma připojení generátoru s výslednými zkratovými proudy.	78
<i>Obr. 44</i> Schéma připojení generátoru s transformátorem, s výslednými zkratovými proudy.	78
<i>Obr. 45</i> Schéma připojení soustavu s transformátorem, s výslednými zkratovými proudy.	79
<i>Obr. 46</i> Schéma přímého připojení motoru do sítě s výslednými zkratovými proudy.	79
<i>Obr. 47</i> Přímé připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor, s výslednými zkratovými proudy.	80
<i>Obr. 48</i> Schéma připojení usměrňovače s výslednými parametry.	81
<i>Obr. 49</i> Schéma připojení baterie s výslednými parametry.	81
<i>Obr. 50</i> Schéma připojení kondenzátoru s výslednými parametry.	82
<i>Obr. 51</i> Schéma připojení motoru s výslednými parametry.	82
<i>Obr. 52</i> Celkový zkratový proud v lokaci F1.	86
<i>Obr. 53</i> Celkový zkratový proud v lokaci F2.	87
<i>Obr. 54</i> Výsledný zkratový proud v lokaci F1.	88
<i>Obr. 55</i> Výsledný zkratový proud v lokaci F2.	89
<i>Obr. 56</i> Průběh zkratového proudu usměrňovače při zkratu na přípojnici A.	95
<i>Obr. 57</i> Průběh zkratového proudu usměrňovače při zkratu na přípojnici B.	97
<i>Obr. 58</i> Výsledky stejnosměrného zkratového proudu na přípojnici A.	97
<i>Obr. 59</i> Výsledky stejnosměrného zkratového proudu na přípojnici B.	98

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Napětové činitele pro výpočet zkratů dle IEC 60909-0. [1]</i>	28
<i>Tab. 2 Vstupní parametry synchronního generátoru.</i>	29
<i>Tab. 3 Vstupní parametry generátoru a transformátoru.</i>	31
<i>Tab. 4 Vstupní parametry soustavy, transformátoru a vedení.</i>	33
<i>Tab. 5 Vstupní parametry asynchronního motoru.</i>	36
<i>Tab. 6 Vstupní parametry motoru a transformátoru.</i>	38
<i>Tab. 7 Vyjádření odporů pro výpočet korigovaných zkratových proudů. [2]</i>	64
<i>Tab. 8 Vstupní parametry usměrňovače.</i>	65
<i>Tab. 9 Konfigurace jednotlivých článků baterie.</i>	68
<i>Tab. 10 Vstupní parametry baterie.</i>	68
<i>Tab. 11 Vstupní parametry kondenzátoru.</i>	70
<i>Tab. 12 Vstupní parametry stejnosměrného motoru.</i>	73
<i>Tab. 13 Výsledné zkratové proudy v lokaci F1.</i>	86
<i>Tab. 14 Výsledné zkratové proudy v lokaci F2.</i>	87
<i>Tab. 15 V Výsledné výpočty zkratových proudů ve střídavé síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.</i>	90
<i>Tab. 16a Výsledné výpočty zkratových proudů ve stejnosměrné síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.</i>	90
<i>Tab. 16b Výsledné výpočty zkratových proudů ve stejnosměrné síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.</i>	91
<i>Tab. 17 Vstupní parametry AC–DC sítě.</i>	92

1. Úvod

Elektrická síť je soubor elektrických zařízení, vzájemně propojených, sloužící pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie. Jednotlivá zařízení mají být chráněna, aby zajistila správný a trvalý chod sítě bez přerušení dodávky elektrické energie. Konfigurace sítě a velikost napěťových hladin určují spolehlivost sítě. Nežádoucí výpadek elektrické energie má za následek poškození různých druhů zařízení v domácnostech, zastavení provozu a výroby v průmyslových podnicích a může způsobit ohrožení lidského života v případě nemocnic.

Tyto výpadky jsou výsledkem poruch, které mohou nastat v síti. Většina sítí je schopna trvale provozovat dodávky elektrické energie při vzniku zkratu, jenom v nejhroších případech dojde k vypnutí poškozeného úseku až po dobu, kdy se tento úsek opraví a obnoví se provozní stav sítě.

V praxi se vyskytují různé typy zkratů, při kterých může dojít k dokonalému nebo nedokonalému spojení mezi fázemi, mezi fázemi a zemí nebo mezi jednou fází a zemí. Každý druh zkratu vyvolá nebezpečný nárůst proudu a zároveň může mít každý jiné velikosti poruchového proudu, které závisí na hladině napětí, počtu zařízení v poškozeném úseku a také, zda se jedná o napětí střídavé nebo stejnosměrné.

Tato práce se zaměřuje jen na 3f zkraty z toho důvodu, že ostatní typy zkratů (2f, 2f-zemní, 1f) při modelování DC zkratů nejsou potřeba (viz norma IEC 61660-1). Také se budu více zabývat zkraty ve stejnosměrných sítích a jednotlivými zařízeními, které jsou zdroji přechodových dějů a zároveň způsobují velké zkratové proudy při vzniku jakékoli poruchy blízko uzlových bodů, kde jsou připojené. Tato zařízení se rozdělují na usměrňovače, kondenzátorové baterie, chemické baterie a stejnosměrné motory s cizím buzením (SSMCB).

Metodika výpočtu zkratových proudů je rozdělena na dvě části, první část se věnuje výpočtu pomocí matematických rovnic pro jednotlivé prvky a druhá část popisuje výpočet pomocí modelovacího programu.

Postup pro řešení zkratů v síti:

- Matematické řešení:

- Náhradní schéma sítě.
- Výpočet impedance jednotlivých prvků.
- Výpočet celková zkratová impedance.
- Výpočet zkratových proudů.
- Výpočet zkratových výkonů.

- Řešení pomocí softwaru:

- Modelování schéma sítě.
- Nastavení parametry jednotlivých prvků.
- Nastavení zkratu a místa vniku.
- Spouštění simulace a zobrazení výsledků.

2. Zkratky ve střídavých sítích

Poruchové stavy jsou způsobené nežádoucím spojením fází mezi sebou nebo mezi jednou nebo více fázemi se zemí. Tyto stavy jsou také způsobené zvyšováním frekvence v síti, údery blesku, přepětím v síti, podpětím atd., které zároveň způsobují výrazný pokles impedance v poškozeném úseku.

2.1. Základní pojmy

Ekvivalentní elektrický obvod: model popisující chování obvodu pomocí sítě s ideálními prvky. [1]

Zkrat: náhodná nebo úmyslná vodivá dráha mezi dvěma nebo více vodivými částmi (např. trojfázový zkrat), kde rozdíl v elektrickém potenciálu mezi těmito vodivými částmi může být roven nebo být blízko nuly. [1]

Jednofázový zkrat: náhodná nebo úmyslná vodivá dráha mezi vodičem a zemí v pevně uzemněném systému nebo v impedanci uzemněném systému (viz obr. 5). [1]

Dvofázový zkrat: náhodná nebo úmyslná vodivá dráha mezi dvěma vodiči, které mohou být spojeny se zemí nebo bez ní (viz obr. 5). [1]

Trojfázový zkrat: nežádoucí spojení tří fází bez země nebo se zemí. Všechny vodiče jsou stejně proudově zatížené a vedou stejný zkratový proud (viz obr. 5). [3]

Zkratový proud: nadproud vzniklý zkratem v elektrickém systému. [1]

Souměrný zkratový proud I_k : efektivní hodnota střídavé souměrné složky případného zkratového proudu, kde se aperiodická složka proudu, pokud existuje, zanedbává (viz obr. 1). [1]

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci (viz obr. 1). [1]

Stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu i_{DC} : střední hodnota mezi horní a dolní obálkou zkratového proudu klesající od počáteční hodnoty na nulu (viz obr. 2). [1]

Nárazový zkratový proud i_p : maximální možná okamžitá hodnota potenciálního zkratového proudu (viz obr. 2). [1]

Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém zůstává velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v podstatě konstantní (viz obr. 3). [1]

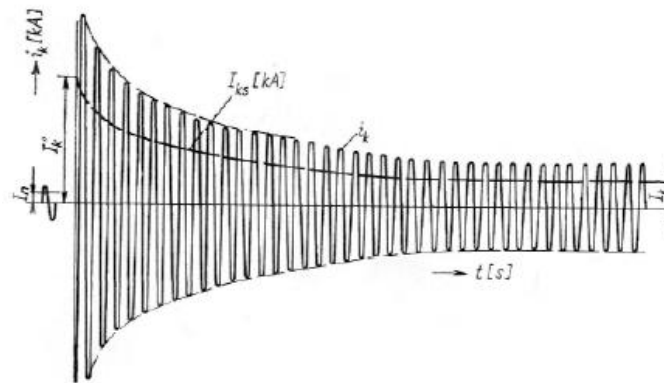
Elektricky blízký zkrat: zkrat, během kterého velikost střídavé souměrné složky potenciálního zkratového proudu klesá (viz obr. 4). [1]

Proud nakrátko motoru I_{LR} : symetrický efektivní proud asynchronního motoru se zablokovaným rotorem napájený jmenovitým napětím U_{TM} při jmenovité frekvenci. [1]

2.2. Průběhy zkratových proudů

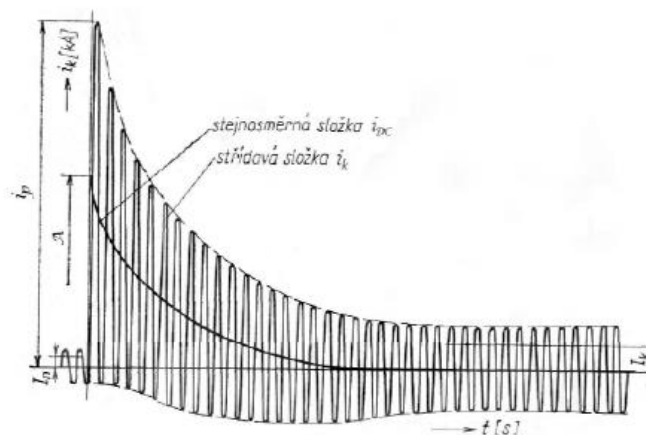
Při každém zkratu, bez ohledu na to, co jej vyvolalo, se jedná o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. z normálního pracovního proudu na ustálený zkratový proud. Tento přechod není skokový, je doprovázen přechodným dějem, který trvá určitou dobu. Po tuto dobu se průběh proudu mění nejen periodicky, ale v obvodu se vyskytnou také vyrovnávací proudy, které tento přechod zprostředkují. Výsledný zkratový proud se skládá ze dvou hlavních složek, AC složka a DC složka. [3]

- **Souměrný zkrat:**



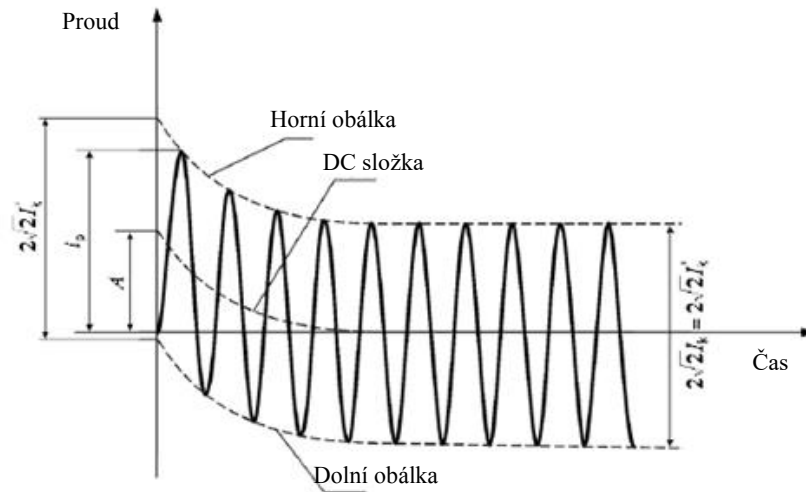
Obr. 1 Průběh souměrného zkratového proudu. [3]

- **Nesouměrný zkrat:**



Obr. 2 Průběh nesouměrného zkratového proudu. [3]

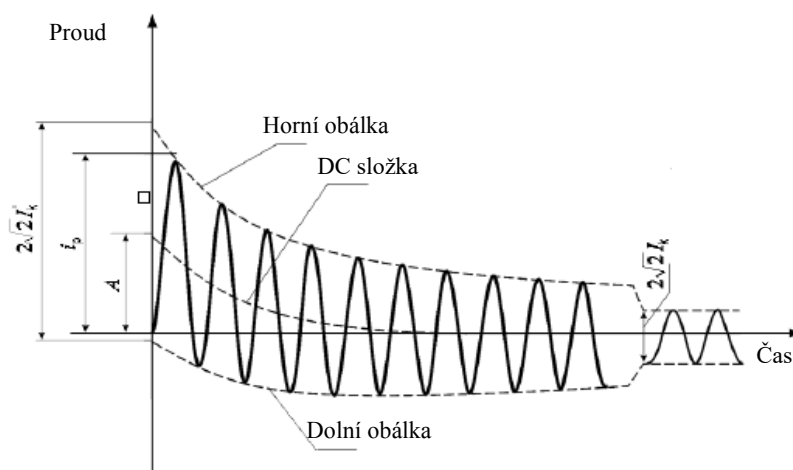
- Elektrický vzdálený zkrat:



Obr. 3 Průběh zkratového proudu při vzdálený zkratu s konstantní střídavou složkou. [1]

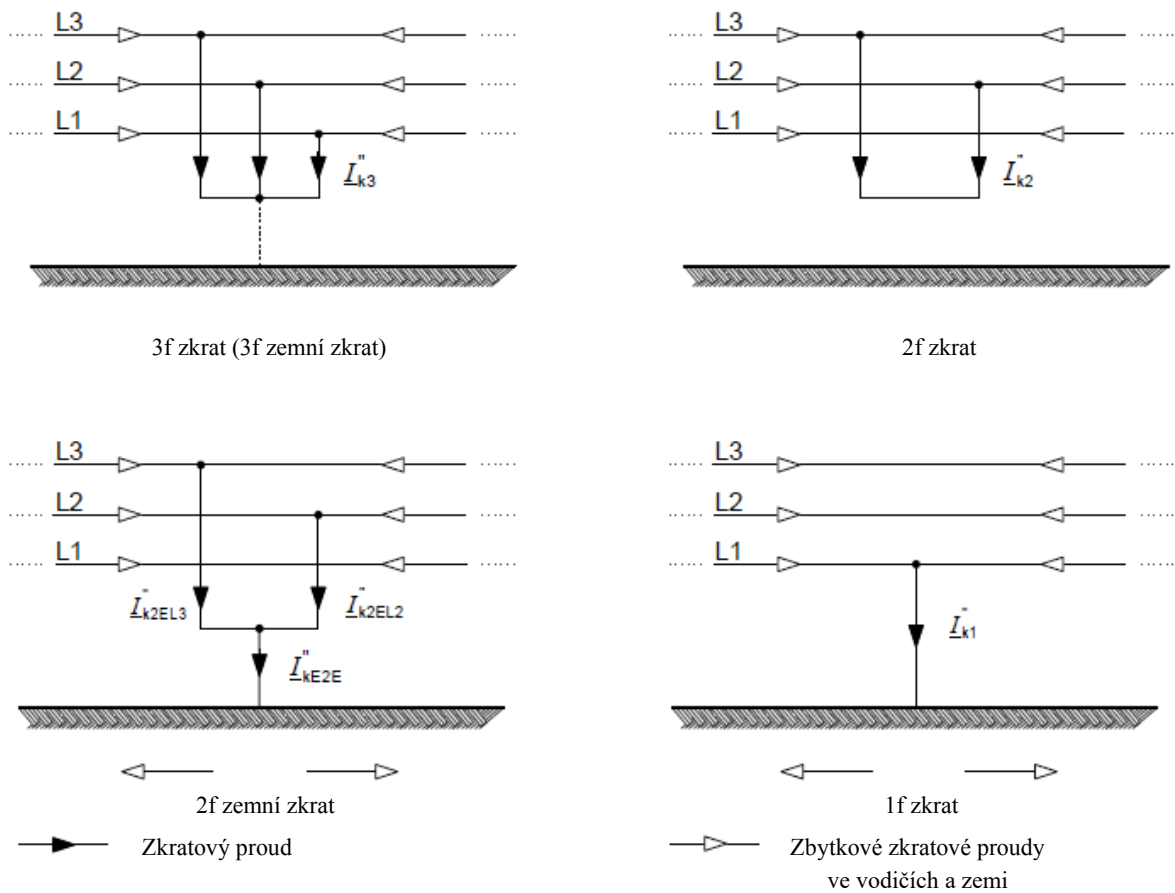
Ve většině praktických případů u nesouměrného zkratu není nutné počítat DC složku. Pouze je důležité znát efektivní hodnotu střídavé souměrné složky proudu a nárazového zkratového proudu i_p při výskytu zkratu. Nejvyšší hodnota i_p závisí na časové konstantě, klesající aperiodické složce a frekvenci f , poměru R/X nebo X/R , a zkratové impedanci Z_k , a je jí dosaženo, pokud zkrat začíná při nulovém napětí. [1]

- Elektrický blízký zkrat:



Obr. 4 Průběh zkratového proudu při blízkém zkratu s klesající střídavou složkou. [1]

2.3. Druhy zkratů



Obr. 5 Charakteristiky zkratových proudů v síti. [1]

2.4. Stejnosečná složka i_{DC}

Tato složka se vyskytuje více u nesouměrných zkratů (viz obr. 2), kde je její počáteční velikost různá a závisí na okamžiku, ve kterém zkrat nastal. Stejnosečná složka má exponenciální charakter a má tendenci klesat po určitou dobu do nuly. Doba jejího trvání se pohybuje do 0,25 s, kde po tomto čase zanikne. Je-li napětí v okamžiku zkratu nejmenší (nulové), tak DC složka dosáhne maximální hodnoty. V případě 3f zkratu, jsou fáze posunuty o 120° , to znamená, že stejnosečná složka bude pro každou fázi jiná a její maximální hodnota může být jenom v jedné fázi. [3]

Z důvodu, že ve většině případů se uvažují nejhorší podmínky, musíme počítat s maximální stejnosečnou složkou:

$$i_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t \cdot \frac{R}{X}} \quad (1)$$

Kde:

I_k'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud.

f – jmenovitý kmitočet.

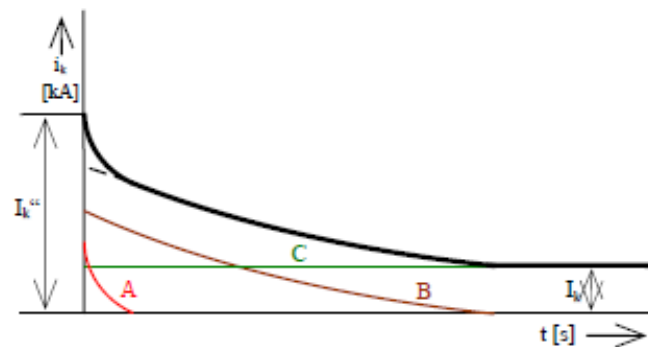
t – doba trvání zkratu.

R/X – poměr zkratový odpor a zkratovou reaktanci sítě k místu zkratu.

2.5. Střídavá složka i_k

Tato složka se vyskytuje u souměrných zkratů (u nesouměrných zkratů zanikne po určité době), a má kmitavý charakter, který je souměrný podle osy x (viz obr. 1) a její amplituda klesá exponenciálně až na ustálenou hodnotu. Má stejný průběh jako zkratový proud ve fázi, kde nevzniká stejnosměrná složka.

Souměrný zkratový proud je tvořený třemi složkami (viz obr. 6) které jsou:



Obr. 6 Efektivní hodnota souměrného zkratového proudu.[3]

A – rázová složka zkratového proudu.

B – přechodná složka zkratového proudu.

C – ustálená složka zkratového proudu.

Všechny tři složky mají sinusový průběh o kmitočtu soustavy. Složky A i B mají tendenci klesat podle exponenciály, zatímco složka C zůstává po celou dobu trvání zkratu konstantní. Z průběhu je důležité jenom ten počáteční rázový zkratový proud, který se používá jako hlavní hodnota pro dimenzování elektrických zařízení a ochranné systémy, a je určen podle následující vztahu. [3]

$$I_k'' = K_1 \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = K_1 \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_K^2 + X_K^2}} \quad (2)$$

Kde:

I_k'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud.

K_1 – koeficient uvedeno v normě IEC 60909-0.

c – napěťový činitel podle norma IEC 60909-0.

U_n – jmenovité napětí na místě zkratu.

Z_K – celková zkratová impedance.

R_K – celkový zkratový odpor.

X_K – celková zkratová reaktance.

2.6. Příčiny vzniku zkratů

Typické příčiny vzniku zkratu, které se vyskytují nejvíce:

- Úder blesku v exponovaných zařízeních jako jsou přenosové sítě.
- Předčasné stárnutí izolace, způsobené zejména trvalým přetížením, nesprávná ventilace zařízení, extrémní teploty, částečné výboje uvnitř izolačních materiálů.
- Degradace kvality povrchu (znečištění) - atmosférická průmyslová sůl v izolátorech.
- Poruchy v zařízeních.
- Nesprávný chod systému.
- Poškození venkovních vedení a kabelů (vítr, padání větví ze stromu).
- Špatné manipulace se zařízením v rozvodnách. [6]

2.7. Účinky zkratových proudů

Při vzniku zkratu se projevují v síti velké proudy, které vyvolávají mnohé nepříznivé účinky. Tyto účinky ohrožují bezpečnost obsluhy elektrického zařízení a taky bezpečný provoz distribuce elektrické energie. Jsou vyvolány nejen zkratovými proudy, ale taky dalšími případy, jako je pokles napětí ve zkratovém obvodu a vznik elektrického oblouku (v případě, že jde o obloukový zkrat).

Čím je zkratový proud větší, tím jsou jeho účinky výraznější. Proto se dimenzují zařízení, která jsou ve zkratovém obvodu tak, aby byla schopna těmito účinkům odolávat. Z toho důvodu se realizují výpočty zkratových proudů, aby se zjistilo, jaká je velikost zkratového proudu (dle druhu), tak velikost jeho účinku. Nejdůležitější účinky se rozdělí na dva typy, a to jsou dynamické a tepelné. [4]

- Dynamické (sílové) účinky:

- Způsobují přiblížování vodičů, které jsou přetížené a jsou blízko umístěné k sobě. Tato reakce může způsobit hoření elektrického oblouku mezi vodiči (tzv. obloukový zkrat).
- Působí proti vypínacímu mechanismu výkonového vypínače, tzn. že během vypnutí zkratového proudu se mohou kontakty znovu přitahovat a tím ovlivňovat vypínací schopnost vypínače a poškodit ostatní zařízení ve zkratovém obvodu (stále tekoucí zkratový proud).
- Způsobují poškození izolátorů (viz obr. 7). Tím, že jsou vodiče upevněné v izolátorech (např. na svorkách transformátorů), mají tendenci se uvolnit z upevňovacích svorek a mohou rozbít horní část izolátoru a tím může dojít k nebezpečnému přiblížování vodičů nebo ke zkratu. [5]



Obr. 7 Utržení podpěrky a zkroucení hliníkový propojek v důsledku nadměrného dynamického namáhání. [5]

- Tepelné účinky:

- Hlavní charakteristikou tohoto účinku je, že elektrická energie se přemění na teplo kvůli ztrátám. Tepelné ztráty jsou přímo úměrné procházejícímu proudu kabelem nebo lanem, a proto při průchodu zkratového proudu může dojít k poškození kabelů, lan nebo páskovin (viz obr. 8), kontaktů vypínače, spojek, k ovlivnění impedance obvodu (tj. z důvodu zvýšení odporu sítě) a může dojít ke vzniku zkratu, explozi nebo požáru v závislosti na okolním prostředí. [5]



Obr. 8 Upálení přívodu v důsledku tepelného přetížení průchodem zkratového proudu. [5]

2.8. Omezení účinků zkratových proudů

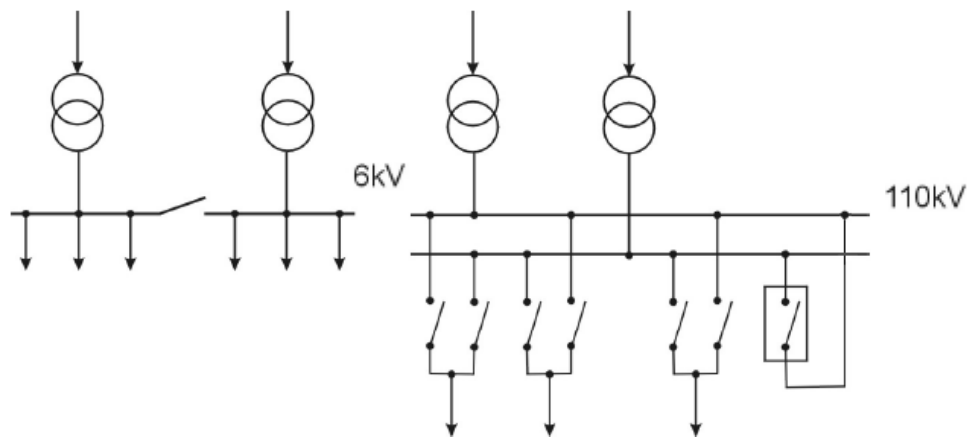
Sem patří výměna zařízení, popřípadě změna konfigurace sítě, pro zlepšení provozu a distribuce energie a minimalizování účinků způsobených zkratovými proudy:

- **Omezení velikost zkratového proudu:** změna konfigurace sítě, omezovací reaktory.
- **Omezení silových účinků:** použití pojistek, změna konstrukce přípojníc.
- **Omezení tepelných účinků:** větší průřez vodiče, izolované prostředí (zapouzdřené vodiče).
- **Omezení účinků na obsluhu:** krytí rozvodných zařízení (zábleskové ochrany), dálkové ovládání.

2.9. Omezení zkratových proudů

Zde se vyskytují nejpoužívanější způsoby pro omezení velikost zkratového proudu:

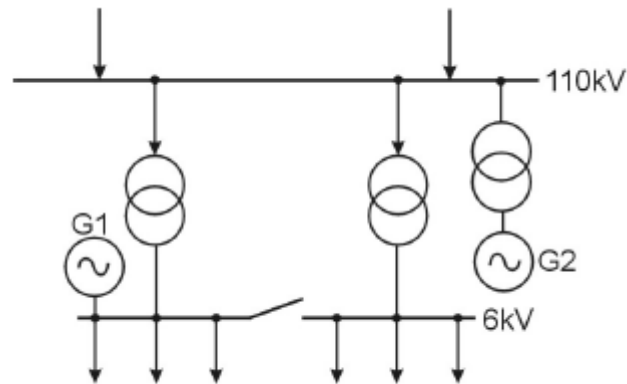
- Zamezení vniku zkratu: zapouzdřené rozvody.
- Omezení zkratových proudů:
 1. Minimalizovat výkonů zdrojů: rozdělení do samostatných sekcí (viz obr. 9).



Obr. 9 Rozdělení sekcí v rozvodnách. [7]

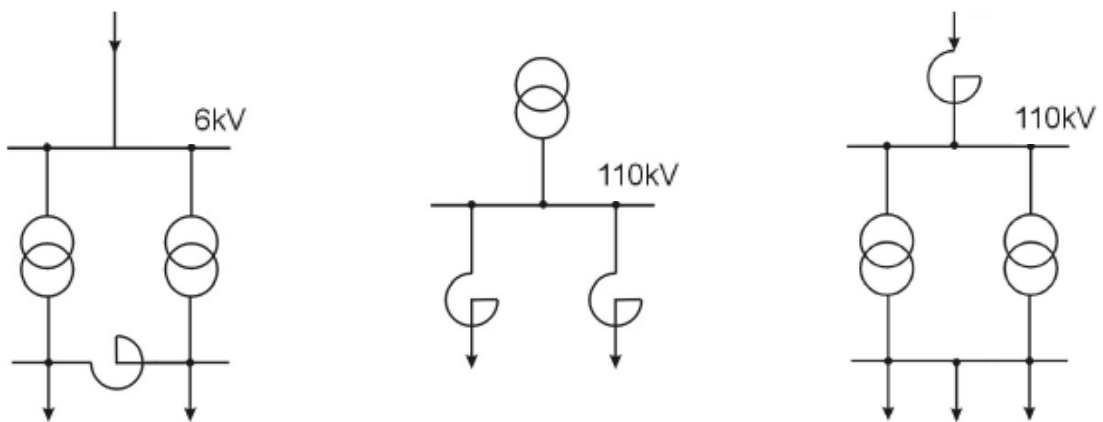
Zkraty ve střídavých sítích

2. Zvětšení zkratové reaktance: alternátory a transformátory s větší reaktancí, bloková zapojení generátor – transformátor (viz obr. 10).



Obr. 10 Změna konfigurace sítě. [7]

3. Použití omezovacích reaktorů (viz obr. 11):



Obr. 11 Možnosti zapojení reaktoru. [7]

Nevýhody použití reaktorů:

- Větší ztráty a úbytek napětí během provozního (bezporuchového) stavu.
- Těžká manipulace kvůli hmotnosti a robustnosti reaktoru. [7]

3. Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

Mnoho stejnosměrných sítí jsou napájeny střídavým napětím, které je usměrněno vysokonapěťovým usměrňovačem. To znamená, že při vzniku zkratu (buď 3f, 2f nebo 1f) na střídavé straně, bude poruchový proud procházet přes usměrňovače na stranu stejnosměrnou. Aby bylo možné spočítat velikost proud, který bude procházet usměrňovačem, je potřeba znát hodnoty zkratového proudu na střídavé straně.

Zkratové impedance elektrických zařízení: Pro výpočet zkratů je potřeba určit celkovou zkratovou impedanci obvodu, tzn. že je nutné určit impedance jednotlivých prvků zapojených do zkratového obvodu. Pro výpočet maximálních hodnot se budou uvažovat korekční faktory, hlavně pro generátory a transformátory. Tyto faktory jsou důležité pro přesnější výpočty zkratových proudů. [1]

3.1. Rovnice pro výpočet impedance:

- **Nadřazená soustava:**

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad [\Omega] \quad (3)$$

V případě že máme hodnotu R_Q/X_Q je možno provést výpočet pomocí tohoto poměru:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

Kde:

U_{nQ} – Jmenovité napětí mezi koncovými body v soustavě.

I''_{kQ} – počáteční souměrný rázový zkratový proud.

c – napěťový činitel (viz tab. 1).

R_Q/X_Q – poměr zkratových parametrů soustavě. [1]

- **Dvouvinutový transformátor:**

Pokud jsou známy jeho hodnoty činného odporu a reaktance, tak lze počítat jako:

$$Z_T = R_T + jX_T \quad [\Omega] \quad (5)$$

Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

V případě že tyto parametry nejsou uvedené, lze počítat takto:

$$Z_T = \frac{\mu_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

$$R_T = P_{krT} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad [\Omega] \quad (8)$$

Korekční faktor transformátoru:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (9)$$

Kde x_T je poměrná hodnota reaktance:

$$x_T = \frac{X_T}{\left(\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \right)} \quad (10)$$

Pro výslednou impedanci transformátoru platí:

$$Z_{TK} = K_T \cdot Z_T \quad [\Omega] \quad (11)$$

Kde:

U_{rT} – jmenovité napětí transformátoru buď na primární nebo sekundární straně.

I_{rT} – proud tekoucí transformátorem buď na primární nebo sekundární straně.

S_{rT} – zdánlivý výkon transformátoru.

P_{krT} – činné ztráty transformátoru nakrátko.

μ_{kr} – napětí nakrátko transformátoru uvedené v procentech.

c_{max} – napěťový činitel (viz tab. 1).

Z_{TK} – korigovaná impedance transformátoru. [1]

Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

- Vedení:

Stejně jako u transformátoru lze počítat impedanci vedení pomocí jejího činného odporu a reaktance:

$$Z_V = R_V + jX_V \quad [\Omega] \quad (12)$$

V případě, že parametry vedení jsou vztaženy na jednotku délky (v Ω/km), pak lze počítat takto:

$$R_V = R_{kV} \cdot l_V \quad [\Omega] \quad (13)$$

$$X_V = X_{kV} \cdot l_V \quad [\Omega] \quad (14)$$

$$Z_V = \sqrt{R_V^2 + X_V^2} \quad [\Omega] \quad (15)$$

Kde l_V je celková délka vedení.

Pro výpočet impedanci vedení s jinými parametry jako jsou materiál a průřez vodiče a taky počet vodičů (pokud se jedná o dvojitě nebo více kabelové vedení) se používají jiné rovnice, které pro budoucí témata nebude potřeba rozebírat. [1]

- Synchronní generátor:

Tyto rovnice se používají jak pro samostatný generátor připojený přímo do sítě (např. na nn, vn), tak pro zapojení generátor – transformátor v síti (tzv. na vn, vvn).

$$Z_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_G'') = K_G \cdot \sqrt{R_G^2 + X_G^2} \quad [\Omega] \quad (16)$$

$$R_G = \frac{r_s}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad [\Omega] \quad (17)$$

$$X_G = \frac{X_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad [\Omega] \quad (18)$$

Korekční faktor generátoru:

Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} \quad (19)$$

Kde x_d'' je bezrozměrná hodnota:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{100 \%} \quad (20)$$

Kde:

Z_{GK} – korigovaná zkratová impedance generátoru.

c_{max} – napěťový činitel (viz tab. 1).

U_n – jmenovité napětí sítě.

U_{rG} – napětí na svorkách generátoru.

R_G – činný odpor generátoru.

r_s – činný odpor generátoru uvedený v poměrných jednotkách v procentech.

X_d'' – rázová zkratová reaktance generátoru.

Z_G – impedance generátoru.

$\cos\varphi$ – účinník generátoru. [1]

- Asynchronní 3f motor:

Následující rovnice jsou používány pro přesnější výpočet impedance asynchronního motoru a obsahují hodnoty, které jsou závislé na typu motoru, poměru činného odporu a reaktance, vinutí motoru a taky na velikosti napětí, na které je konstruován.

$$Z_M = \frac{U_n^2}{I_{kn}/I_n \cdot S_n} \quad [\Omega] \quad (21)$$

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi \cdot \eta} \quad [\text{VA}] \quad (22)$$

Výpočet zkratových proudů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

$$R_M = \sqrt{\frac{Z_M^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} \quad [\Omega] \quad (23)$$

$$X_M = R_M \cdot \frac{X}{R} \quad [\Omega] \quad (24)$$

Kde:

Z_M – impedance motoru.

S_n – zdánlivý výkon motoru.

R_M – činný odpor motoru.

X_M – reaktance motoru.

X/R – poměr zkratové reaktance a zkratového odporu motoru.

I_{kn}/I_n – poměr rozběhového proudu a jmenovitého proudu motoru. [1]

Tyto poměry jsou hodnoty, které jsou uvedeny v katalogu motoru. V případě, že tyto hodnoty nejsou dostupné, používají se jiné hodnoty v závislosti na druhu motoru podle normy IEC 60909-0. Ostatní parametry jako R_M a X_M jsou používány pro výpočet i_p , které jsou zároveň závislé na poměru X/R .

3.2. Hodnoty napěťového součinitele

Maximálních a minimálních hodnotách pro napěťové součinitele jsou uvedené v tabulce 1.

Tab. 1 Napěťové činitele pro výpočet zkratů dle IEC 60909-0. [1]

Jmenovité napětí sítě U_n	Napěťový součinitel pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{max} \ a$	minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V do 1000 V (IEC 60038:2009, Tabulka 1)	1,05 <i>c</i> 1,10 <i>d</i>	0,95 <i>c</i> 0,90 <i>d</i>
Vysoké napětí <i>b</i> > 1 kV do 230 kV (IEC 60038:2009, Tabulky 3,4)	1,10	1,00
Vysoké napětí <i>b, e</i> > 230 kV (IEC 60038:2009, Tabulka 5)	1,10	1,00

a – $c_{max}U_n$ by neměl překročit maximální napětí U_m pro zařízení v síti.

b – není-li jmenovité napětí definováno, $c_{max}U_n = U_m$ nebo $c_{min}U_n = 0,90U_m$ se může použít.

c – pro nízkonapěťové sítě s tolerancí $\pm 6\%$, například pro sítě převedené z 380 V na 400 V.

d – pro vysokonapěťové sítě s tolerancí $\pm 10\%$.

e – pro jmenovité napětí sítě, kde $U_m > 420$ kV, nejsou napěťové součinitele definované v této normě.

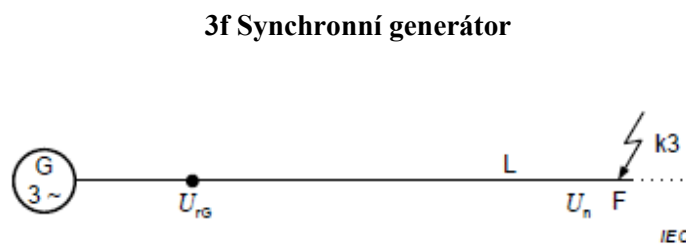
4. Praktické výpočty 3f zkratů ve střídavých sítích dle IEC 60909-0

Jak bylo uvedeno na začátku kapitola, předchozí rovnici jsou používány pro výpočet zkratů na střídavé síti, která slouží pro napájení stejnosměrná síť přes usměrňovače. Z důvodu že každá síť má jinou konfiguraci, se bude uvažovat nejběžnější případy které v praxi se mohou vyskytnout z hlediska napájení stejnosměrných sítích.

Následující případy obsahují 5 možných napájecích zdrojů stejnosměrné sítě:

4.1. První případ

Schéma přímého připojení synchronního turbogenerátoru do sítě je na obr. 12 a jeho vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 2.



Obr. 12 Připojení synchronního generátoru do sítě. [1]

Tab. 2 Vstupní parametry synchronního generátoru.

Vstupní parametry		
Generátor		
U_n	13.5	kV
S_n	30	MVA
X''_d	6	%
r_s	5	%
$\cos\phi$	0.8	-

Výpočty:

$$R_G = \frac{r_s}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,30 \Omega \quad (25)$$

$$X_G = \frac{X_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,36 \Omega \quad (26)$$

$$Z_G = \sqrt{R_G^2 + X_G^2} = \sqrt{0,30^2 + 0,36^2} = 0,47 \Omega \quad (27)$$

$c_{max} = 1,10$ dle tab. 1

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} = \frac{13,5}{13,5} \cdot \frac{1,1}{1 + \frac{6}{100} \cdot \sqrt{1 - 0,8^2}} = 1,06 \quad (28)$$

Celková zkratová impedance:

$$Z_k = K_G \cdot Z_G = 1,06 \cdot 0,47 = 0,5 \Omega \quad (29)$$

Trojfázový zkratový proud:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 13,5}{\sqrt{3} \cdot 0,5} = 17,02 \text{ kA} \quad (30)$$

Činitel kappa:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{0,3 \cdot 1,06}{0,36 \cdot 1,06}} = 1,10 \quad (31)$$

R a X mají být korigovány vynásobením K_G .

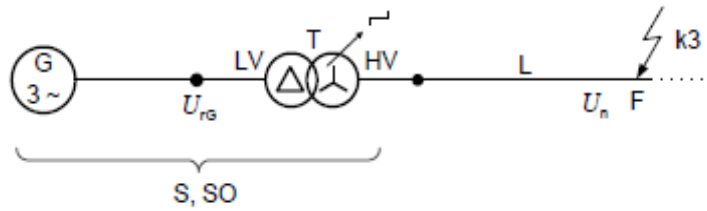
Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_{k3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 17,02 = 26,49 \text{ kA} \quad (32)$$

4.2. Druhý případ

Schéma připojení generátoru s transformátorem je na obr. 13 a jejich vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 3.

Generátor – Transformátor



Obr. 13 Připojení generátoru do sítě přes transformátor. [1]

Tab. 3 Vstupní parametry generátoru a transformátoru.

Vstupní parametry					
Generátor			Transformátor		
U_n	13.5	kV	S_n	60	MVA
S_n	30	MVA	μ_k	10	%
X''_d	6	%	dP_k	1	%
r_s	5	%	ΔP_k	0.6	MW
$\cos\phi$	0.8	-			

$$LV = 13,5 \text{ kV}$$

$$HV = 22 \text{ kV}$$

Výpočty:

$$R_G = \frac{r_s}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,30 \Omega \quad (33)$$

$$X_G = \frac{X''_d}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,36 \Omega \quad (34)$$

$c_{max} = 1,10$ dle tab. 1

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} = \frac{13,5}{13,5} \cdot \frac{1,1}{1 + \frac{6}{100} \cdot \sqrt{1 - 0,8^2}} = 1,06 \quad (35)$$

$$Z_T = \frac{\mu_k}{100 \%} \cdot \frac{U_{LV}^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{13,5^2}{60} = 0,3 \Omega \quad (36)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_{LV}^2}{S_n^2} = 0,6 \cdot \frac{13,5^2}{60^2} = 0,03 \Omega \quad (37)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,3^2 - 0,03^2} = 0,3 \Omega \quad (38)$$

$$p_T = \frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{22}{13,5} = 1,63 \quad (39)$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,099} = 0,99 \quad (40)$$

$$x_T = \frac{X_T \cdot S_{rT}}{U_{LV}^2} = \frac{0,3 \cdot 60}{13,5^2} = 0,099 \quad (41)$$

Celková zkratová impedance:

$$R = (R_G \cdot K_G + R_T \cdot K_T) \cdot p_T^2 = (0,3 \cdot 1,06 + 0,03 \cdot 0,99) \cdot 1,63^2 = 0,94 \Omega \quad (42)$$

$$X = (X_G \cdot K_G + X_T \cdot K_T) \cdot p_T^2 = (0,36 \cdot 1,06 + 0,3 \cdot 0,99) \cdot 1,63^2 = 1,82 \Omega \quad (43)$$

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,94^2 + 1,82^2} = 2,05 \Omega \quad (44)$$

Trojfázový zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c_{max} \cdot U_{HV}}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 2,05} = 6,83 \text{ kA} \quad (45)$$

Činitel kappa:

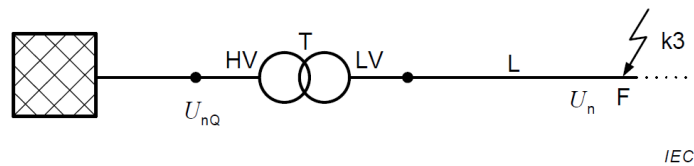
$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{0,94}{1,82}} = 1,23 \quad (46)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot 1,23 \cdot 6,83 = 11,87 \text{ kA} \quad (47)$$

4.3. Třetí případ

Schéma připojení nadřazené soustavy a vedení přes snižovací transformátor je na obr. 14 a jejich vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 4.

Soustava – Transformátor – Vedení

Obr. 14 Schéma připojení soustavy a vedení přes transformátor. [1]

Tab. 4 Vstupní parametry soustavy, transformátoru a vedení.

Vstupní parametry								
Transformátor			Vedení			Soustava		
S_n	60	MVA	R_k	0.4	Ω/km	S_k	700	MVA
μ_k	10	%	X_k	0.35	Ω/km	X/R	10	
dP_k	1	%	l_k	20	km			
ΔP_k	0.6	MW						

$$LV = 22 \text{ kV}$$

$$HV = 110 \text{ kV}$$

Výpočty:

$$Z_T = \frac{\mu_k}{100 \%} \cdot \frac{U_{HV}^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{60} = 20,17 \ \Omega \quad (48)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_{HV}^2}{S_n^2} = 0,6 \cdot \frac{110^2}{60^2} = 2,02 \ \Omega \quad (49)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{20,17^2 - 2,02^2} = 20,07 \ \Omega \quad (50)$$

$$p_T = \frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{110}{22} = 5 \quad (51)$$

$$c_{max} = 1,10 \text{ dle tab. 1}$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,099} = 0,99 \quad (52)$$

$$x_T = \frac{X_T \cdot S_{rT}}{U_{HV}^2} = \frac{20,07 \cdot 60}{110^2} = 0,099 \quad (53)$$

$$I_{kQ} = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U_{HV}} = \frac{700}{\sqrt{3} \cdot 110} = 3,67 \text{ kA} \quad (54)$$

$$Z_Q = \frac{c_{max} \cdot U_{HV}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 3,67} = 19,01 \ \Omega \quad (55)$$

$$R_Q = \sqrt{\frac{Z_Q^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \sqrt{\frac{19,01^2}{1 + 10^2}} = 1,892 \, \Omega \quad (56)$$

$$X_Q = R_Q \cdot \frac{X}{R} = 1,892 \cdot 10 = 18,92 \, \Omega \quad (57)$$

$$R_V = R_{kV} \cdot l_V = 0,4 \cdot 20 = 8 \, \Omega \quad (58)$$

$$X_V = X_{kV} \cdot l_V = 0,35 \cdot 20 = 7 \, \Omega \quad (59)$$

Celková zkratová impedance:

$$R = \frac{(R_T \cdot K_T + R_Q)}{p_T^2} + R_V = \frac{(2,02 \cdot 0,99 + 1,89)}{5^2} + 8 = 8,16 \, \Omega \quad (60)$$

$$X = \frac{(X_T \cdot K_T + X_Q)}{p_T^2} + X_V = \frac{(20,07 \cdot 0,99 + 18,92)}{5^2} + 7 = 8,55 \, \Omega \quad (61)$$

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{8,16^2 + 8,55^2} = 11,81 \, \Omega \quad (62)$$

Trojfázový zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c_{max} \cdot U_{LV}}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 11,81} = 1,18 \, \text{kA} \quad (63)$$

Činitel kappa:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{8,16}{8,55}} = 1,08 \quad (64)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot 1,08 \cdot 1,18 = 1,80 \text{ kA} \quad (65)$$

4.4. Čtvrtí případ

Schéma přímého připojení asynchronního motoru do sítě je na obr. 15 a jeho vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 5.

3f Asynchronní motor



Obr. 15 Připojení asynchronního motoru do sítě. [1]

Tab. 5 Vstupní parametry asynchronního motoru.

Vstupní parametry		
Motor		
U_n	0.4	kV
P_n	22	kW
I_{lr}/I_n	7	(5-8)×I _n
cosφ	0.85	-
η	0.9	-
X/R	3.89	(3-4)

Výpočty:

$$S_n = \frac{p_n}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{22}{0,85 \cdot 0,9} = 28,76 \text{ kVA} \quad (66)$$

$$Z_M = \frac{U_n^2}{\left(I_{tr}/I_n\right) \cdot S_n} = \frac{400^2}{7 \cdot 28,76 \cdot 10^3} = 0,79 \Omega \quad (67)$$

$$R_M = \sqrt{\frac{Z_M^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \sqrt{\frac{0,79^2}{1 + 3,89^2}} = 0,20 \Omega \quad (68)$$

$$X_M = R_M \cdot \frac{X}{R} = 0,20 \cdot 3,89 = 0,77 \Omega \quad (69)$$

$$c_{max} = 1,05 \text{ dle tab. 1}$$

Celková zkratová impedance:

$$Z_k = Z_M = 0,79 \Omega \quad (70)$$

Trojfázový zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,05 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,79} = 0,31 \text{ kA} \quad (71)$$

Činitel kappa:

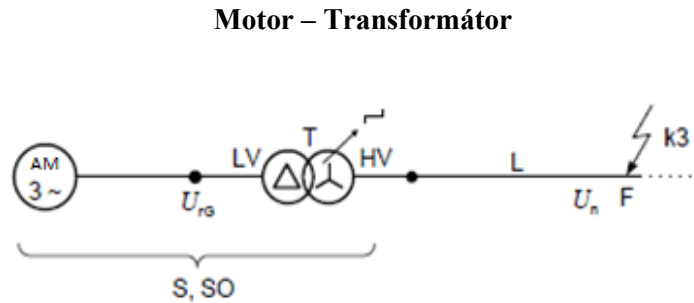
$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{1,98}{7,70}} = 1,47 \quad (72)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot 1,47 \cdot 0,03 = 0,64 \text{ kA} \quad (73)$$

4.5. Pátý případ

Schéma připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor je na obr. 16 a jejich vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 6.



Obr. 16 Připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor. [1]

Tab. 6 Vstupní parametry motoru a transformátoru.

Vstupní parametry					
Motor			Transformátor		
U_n	0.4	kV	S_n	1	MVA
P_n	500	kW	μ_k	6	%
I_{lr}/I_n	7.51	(5-8) $\times I_n$	dP_k	1	%
$\cos\phi$	0.85	-	ΔP_k	0.01	MW
η	0.9	-			
X/R	3.89	-			

$$LV = 0,4 \text{ kV}$$

$$HV = 6 \text{ kV}$$

Výpočty:

$$S_n = \frac{p_n}{\cos\phi \cdot \eta} = \frac{500}{0,85 \cdot 0,9} = 653,6 \text{ kVA} \quad (74)$$

$$Z_M = \frac{U_n^2}{(I_{lr}/I_n) \cdot S_n} = \frac{400^2}{7,51 \cdot 653,6 \cdot 10^3} = 0,03 \Omega \quad (75)$$

$$R_M = \sqrt{\frac{Z_M^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \sqrt{\frac{0,03^2}{1 + 3,89^2}} = 0,008 \Omega \quad (76)$$

$$X_M = R_M \cdot \frac{X}{R} = 0,008 \cdot 3,89 = 0,032 \Omega \quad (77)$$

$$Z_T = \frac{\mu_k}{100\%} \cdot \frac{U_{LV}^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,4^2}{1} = 0,0096 \Omega \quad (78)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_{LV}^2}{S_n^2} = 0,01 \cdot \frac{0,4^2}{1^2} = 0,0016 \Omega \quad (79)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,0096^2 - 0,0016^2} = 0,0095 \Omega \quad (80)$$

$$p_T = \frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{6}{0,4} = 15 \quad (81)$$

$c_{max} = 1,10$ dle tab. 1

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0592} = 1,01 \quad (82)$$

$$x_T = \frac{X_T \cdot S_{rT}}{U_{LV}^2} = \frac{0,0095 \cdot 1}{0,4^2} = 0,0592 \quad (83)$$

Celková zkratová impedance:

$$R = (R_M + R_T \cdot K_T) \cdot p_T^2 = (0,008 + 0,0016 \cdot 1,01) \cdot 15^2 = 2,19 \Omega \quad (84)$$

$$X = (X_M + X_T \cdot K_T) \cdot p_T^2 = (0,032 + 0,0095 \cdot 1,01) \cdot 15^2 = 9,25 \Omega \quad (85)$$

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{2,19^2 + 9,25^2} = 9,51 \, \Omega \quad (86)$$

Trojfázový zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c_{max} \cdot U_{HV}}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 9,51} = 0,40 \, \text{kA} \quad (87)$$

Činitel kappa:

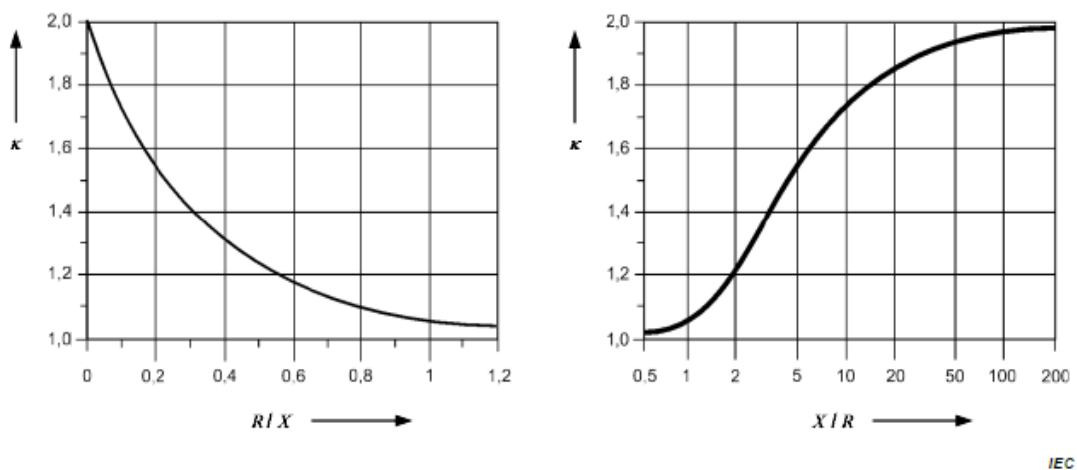
$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{21,89}{92,53}} = 1,50 \quad (88)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot 1,50 \cdot 0,40 = 0,85 \, \text{kA} \quad (89)$$

4.6. Grafické vyjádření činitel kappa

V případě že není dostupná rovnice pro výpočet činitel kapa, lze jeho hodnotu grafický vyjadřovat (viz obr. 17). Tato hodnota bude mít menší přesnost, ale neovlivňuje významně hodnotu i_p .



Obr. 17 Hodnoty κ v závislosti na poměru R/X nebo X/R . [1]

Pro výchozí případy byly spočítány hodnoty nárazového zkratového proudu z toho důvodu, že pro následující výpočty pro stejnosměrné sítě, bude potřeba znát tyto hodnoty pro jednotlivé případy. Pro druhý, třetí a pátý případ, které obsahují transformátor, pro výpočet 3f zkratu, bylo potřeba uvažovat jeho poměr, z důvodu, že se jedná o dvě vinutí, které mají jinou impedanci a zároveň, jsou závislé jak na materiálu, průřezu a tvaru vodiče, tak na napájení, frekvenci a teplotě prostředí, ve kterém jsou vinutí umístěna (tzv. suchý, plynový nebo olejový transformátor).

Pro tyto případy se zanedbaly některé parametry jako jsou pracovní teplota transformátoru nebo tvar vodiče z toho důvodu, že se počítalo podle normy IEC 60909-0 a zde nejsou uvedené rovnice pro přesnější výpočet impedanci v závislosti na atmosférických podmínkách.

5. Zkratky ve stejnosměrných sítích

Poruchové stavy ve stejnosměrné síti jsou podobné jako u střídavé sítě, tyto stavy jsou způsobené nežádoucím spojením mezi fází (+) a nulovým vodičem (-) a taky při vzniku přepětí nebo nadproudů v zařízeních, které jsou připojené k síti, jako jsou chemické baterie, stejnosměrné motory s cizím buzením, vysokonapěťové usměrňovače a kondenzátorové baterie. HVDC sítě jsou používány jako meziobvod pro silové vedení, například pro trakční pohon. Zároveň, jsou používány pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti z důvodu, že nemají tolik velké ztráty jako vodiče nebo lana napájená střídavým napětím.

5.1. Základní pojmy

Zkrat: náhodná nebo úmyslná vodivá dráha mezi dvěma nebo více vodivými částmi (např. trojfázovou zkrat), kde rozdíl v elektrickém potenciálu mezi těmito vodivými částmi může být rovno nebo blízko nuly.

- Pozn.: V té normě se předpokládá nulové impedance při zkratu. [2]

Zkratový proud: nadproud vzniklý v důsledku zkratu způsobený poruchou nebo nesprávným zapojením elektrických zařízení v obvodu.

Společná větev: síťová větev s několika částečnými zkratovými proudy z různých zdrojů. [2]

Nárazový zkratový proud i_p : maximální možná okamžitá hodnota potenciálního zkratového proudu na straně DC (viz obr. 13). [2]

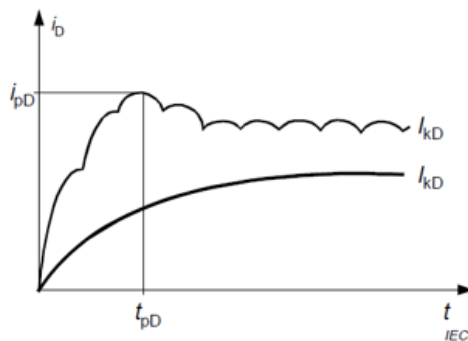
Kvazi-ustálený zkratový proud I_k : hodnota zkratového proudu při vzniku zkratu na straně DC po jedné sekundě. (viz obr. 14). [2]

Doba nárůstu t_p : časový interval mezi okamžikem vzniku zkratu a maximální hodnotou zkratového proudu (viz obr. 13). [2]

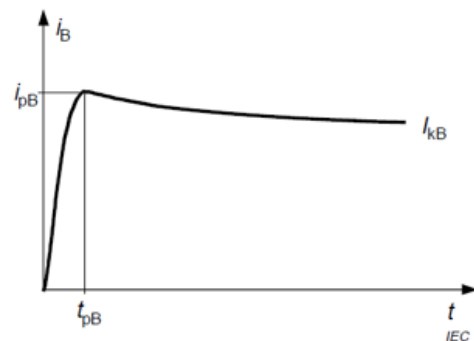
Doba trvání zkratu T_k : časový interval mezi okamžikem vzniku zkratu až do okamžiku vypnutí na DC straně (viz obr. 14). [2]

5.2. Průběhy zkratových proudů

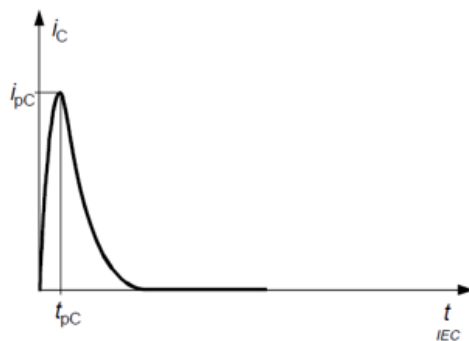
Zde se vyskytnou průběhy zkratů pro usměrňovač, kondenzátorovou baterii, chemickou baterii a stejnosměrný motor s cizím buzením (viz obr. 18). [2]



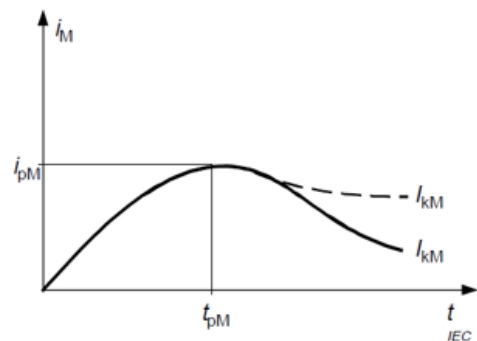
13a – Usměrňovač bez a s vyhlazovacím reaktorem



13b – Baterie



13c – Kondenzátor



13d

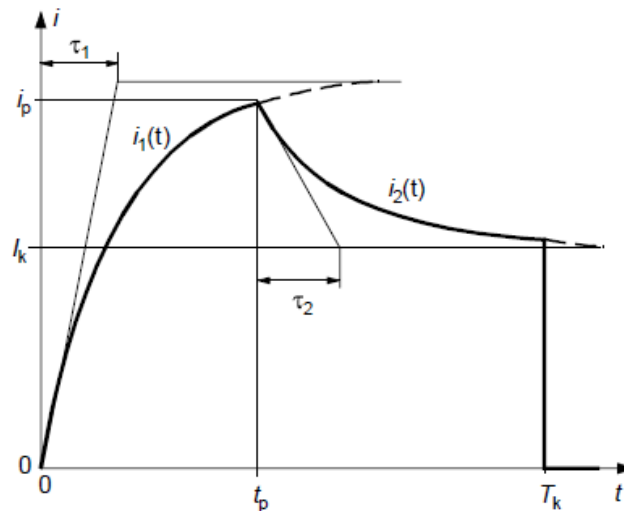
— Motor bez přídavné setrvačné hmoty
 - - - Motor s přídavnou setrvačnou hmotou

Obr. 18 Typické průběhy zkratových proudů dle zařízení. [2]

Pro výpočet stejnosměrného zkratu je potřeba znát maximální proud v okamžiku zkratu, to znamená, že musíme uvažovat okamžitou hodnotu proudu $i_1(t)$ a $i_2(t)$. Tyto proudy jsou zároveň závislé na časových konstantách τ_1 a τ_2 , době nárůstu t_p a poměru zkratových proudů p . Všechny tyto hodnoty jsou používány pro vykreslení správného průběhu zkratového proudu v závislosti na zařízení, které budeme počítat. Tyto parametry jsou definované v následující kapitole.

6. Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro výpočet zkratů je potřeba určit hodnoty časových konstant τ_1 a τ_2 a dobu nárůstu t_p , které charakterizují průběh zkratového proudu dle zařízení (viz obr. 19). V případě usměrňovače lze vyjadřovat tyto parametry matematicky, ale tyto rovnice nejsou platné pro všechna stejnosměrná zařízení. V tom případě se používají grafické metody pro vyjádření těchto hodnot.



Obr. 19 Normovaná aproximace průběhu ss zkratového proudu. [2]

Kde:

τ_1 – časová konstanta nárůstu.

τ_2 – časová konstanta klesání.

Okamžité hodnoty proudu $i_1(t)$ a $i_2(t)$ se mohou určit pomocí následujících rovnic:

$$i_1(t) = i_p \cdot \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (90)$$

$$i_2(t) = i_p \cdot \left((1 - p)e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p \right) \quad t_p \leq t \quad (91)$$

$$p = \frac{I_k}{i_p} \quad (92)$$

Pokud maximální proud není definován, pak bude $i_p = I_k$ a $t_p = T_k$. V tom případě, rovnice (90) popisuje celý časový průběh zkratového proudu. Předpokládáme, že impedance mezi body z různého potenciálu je nulová, a že vlivy zatěžovacích vedeních jsou zanedbatelné. [2]

Při výpočtu maximálních zkratových proudů se musí brát v úvahu následující spínací a provozní podmínky tak, aby tekl maximální zkratový proud:

- Odporů vodičů se uvažují při teplotě 20 °C plus max. zkratové příspěvky z nadřazené AC sítě.
- Odporů přípojnic jsou zanedbatelné.
- Ovládání pro omezení zkratového proudu není účinné.
- Uvažování odporu usměřovače.
- Baterie je nabitá na plnou kapacitu.
- Musí se brát v úvahu všechny odpory a indukčnosti, které stojí v cestě průchodu ss zkratového proudu. [2]

6.1. Metodika výpočtů zkratů

Obsahuje-li náhradní schéma zapojení systému pouze jedno zařízení, počítá se proud v místě zkratu s ohledem na sériové odpory a indukčnosti. Pokud nastane případ, kde tento systém obsahuje několik zařízení, tak se zkratový proud počítá s přidáním zkratových proudů různých zdrojů (v případě, že zkrat nastane na místě F1 jak je uvedeno na obr. 20).

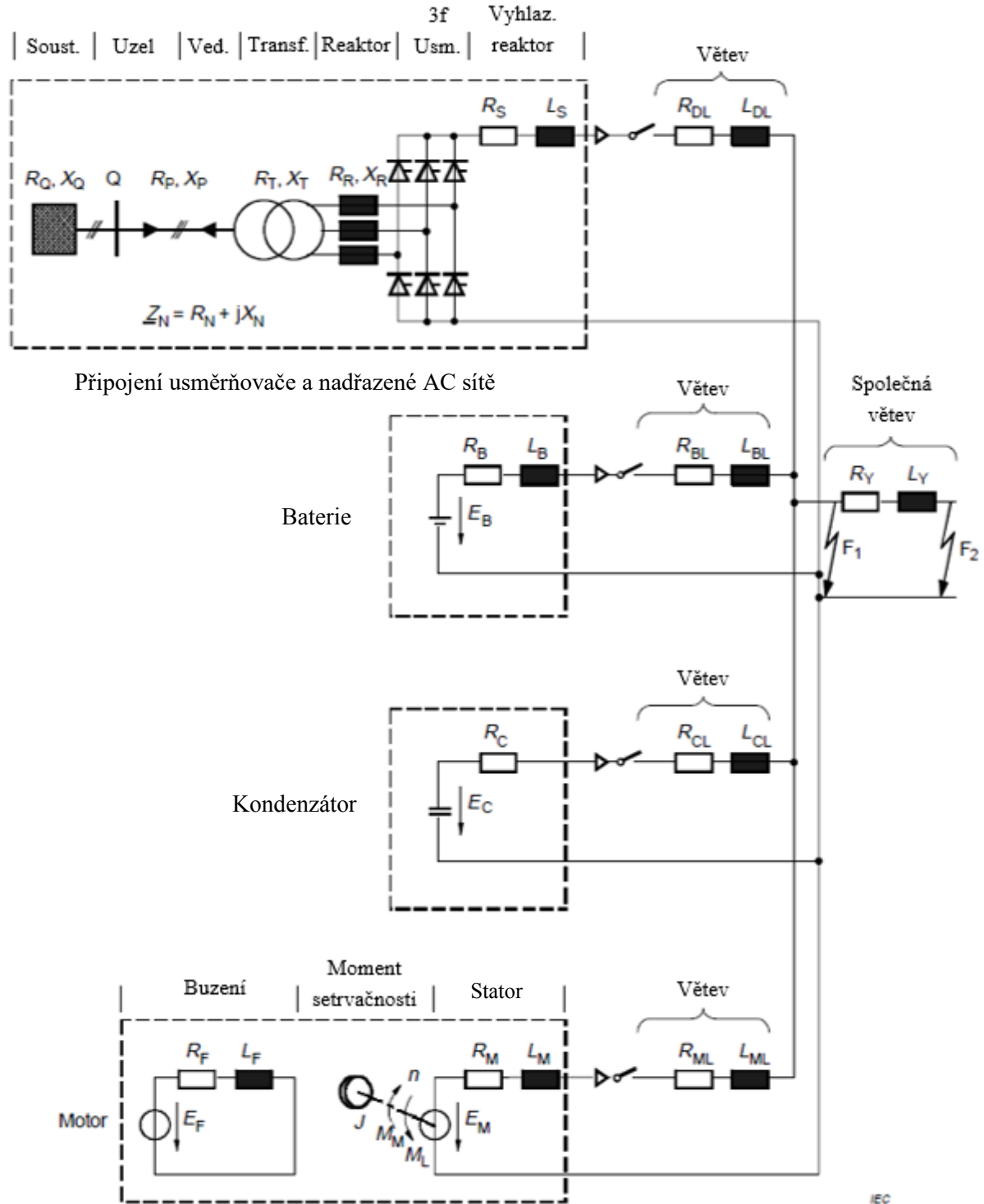
Obsahuje-li soustava několik zařízení a zároveň je připojena společná větev (tj. zkrat je na místě F2, viz obr. 20), pro výpočet zkratových proudů se musí uvažovat následující podmínky:

- Výpočet zkratu na místě F1 s různými zařízeními a s přidáním R_Y a L_Y pro společnou větev
- Vložit vypočítané hodnoty zkratových proudů od jednotlivých zdrojů do rovnic (90) až (92).
- Přidat různé časové funkce k časové funkci celkového zkratového proudu na místě F2. [2]

V této práci se budou uvažovat podmínky pro výpočet při vzniku zkratu v lokaci F1, kde jsou zároveň připojena různá zařízení, a také v lokaci F2 se stejnou konfigurací sítě.

6.2. Rovnice pro výpočet zkratů dle zařízení

Pro výpočet stejnosměrných zkratů se uvažuje konfigurace sítě uvedena na obr. 20.



Obr. 20 Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů stejnosměrné sítě. [2]

6.2.1. Odpor a indukčnost vtažené na délku kabelu

Hodnoty odporu a indukčnosti jsou získány vynásobením příslušných hodnot smyčkového odporu a smyčková indukčnost na jednotku délky R' a L' jednosměrnou délkou kabelu. Pomocí průřezu kabelu S a jeho rezistivity ρ , odpor smyčky lze počítat následujícím způsobem:

$$R' = 2 \cdot \frac{\rho}{S} \quad [\Omega/m] \quad (93)$$

Kde ρ při teplotě 20° je 1/54 ($\Omega \cdot mm^2/m$) pro měď, a 1/34 ($\Omega \cdot mm^2/m$) pro hliník. Pro výpočet odporu na základě teploty kabelu se používá následující rovnice:

$$R = R_{20} \cdot [1 + 0,004 \text{ K}^{-1} \cdot (\theta - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \quad [\Omega/m] \quad (94)$$

Smyčková indukčnost lze spočítat na základě tvaru vodiče (viz obr. 21).



Obr. 21 Tvar DC kabelu (na levé straně) a tvar přípojnice (na pravé straně).[2]

Smyčková indukčnost stejnosměrného kabelu:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) \quad [\text{mH/m}] \quad (95)$$

Kde:

μ_0 – permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

a – střední vzdálenost mezi kabely.

r – poloměr kabelů.

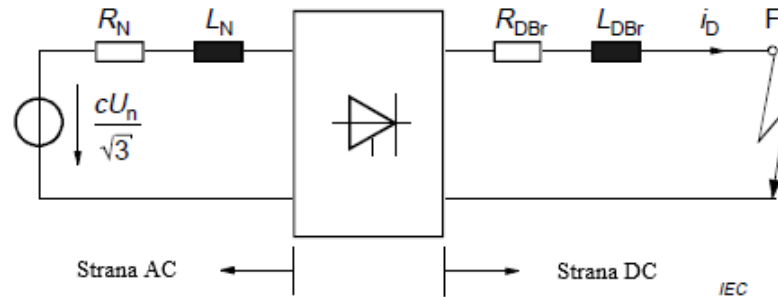
Smyčková indukčnost přípojnic:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left(\frac{3}{2} + \ln \frac{a}{(d+b)} \right) \quad [\text{mH/m}] \quad \text{kdy } a > b \quad (96)$$

Indukčnost smyčky několika paralelních kabelů nebo tyčí se zjistí pomocí geometrické metody střední vzdálenosti.[2]

6.2.2. Usměrňovač

Náhradní schéma usměrňovače je na obr. 22.



Obr. 22 Náhradní schéma usměrňovače a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]

$$R_N = R_Q + R_P + R_T + R_R \quad [\Omega] \quad (97)$$

$$X_N = X_Q + X_P + X_T + X_R \quad [\Omega] \quad (98)$$

Kde:

R_Q, X_Q – zkratový odpor a reaktance střídavé sítě podle IEC 60909 na sekundární straně transformátoru.

R_P, X_P – zkratový odpor a reaktance v napájecím vedení na sekundární straně transformátoru.

R_T, X_T – zkratový odpor a reaktance na sekundární straně transformátoru podle IEC 60909.

R_R, X_R – zkratový odpor a reaktance reaktoru, pokud existuje.

Pro výpočet maximálního ss zkratového proudu se musí spočítat min. impedance pomocí maximálního zkratového proudu na AC straně (v uzlu, kde je zapojen usměrňovač), a naopak, pro minimální ss zkratového proudu se počítá max. impedance pomocí minimálního zkratového proudu na AC straně. [2]

$$Z_{Qmin} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQmax}} \quad [\Omega] \quad (99)$$

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y \quad [\Omega] \quad (100)$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{DL} + L_Y \quad [\Omega] \quad (101)$$

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Kde:

R_S, L_S – odpor a reaktance vyhlazovací reaktoru.

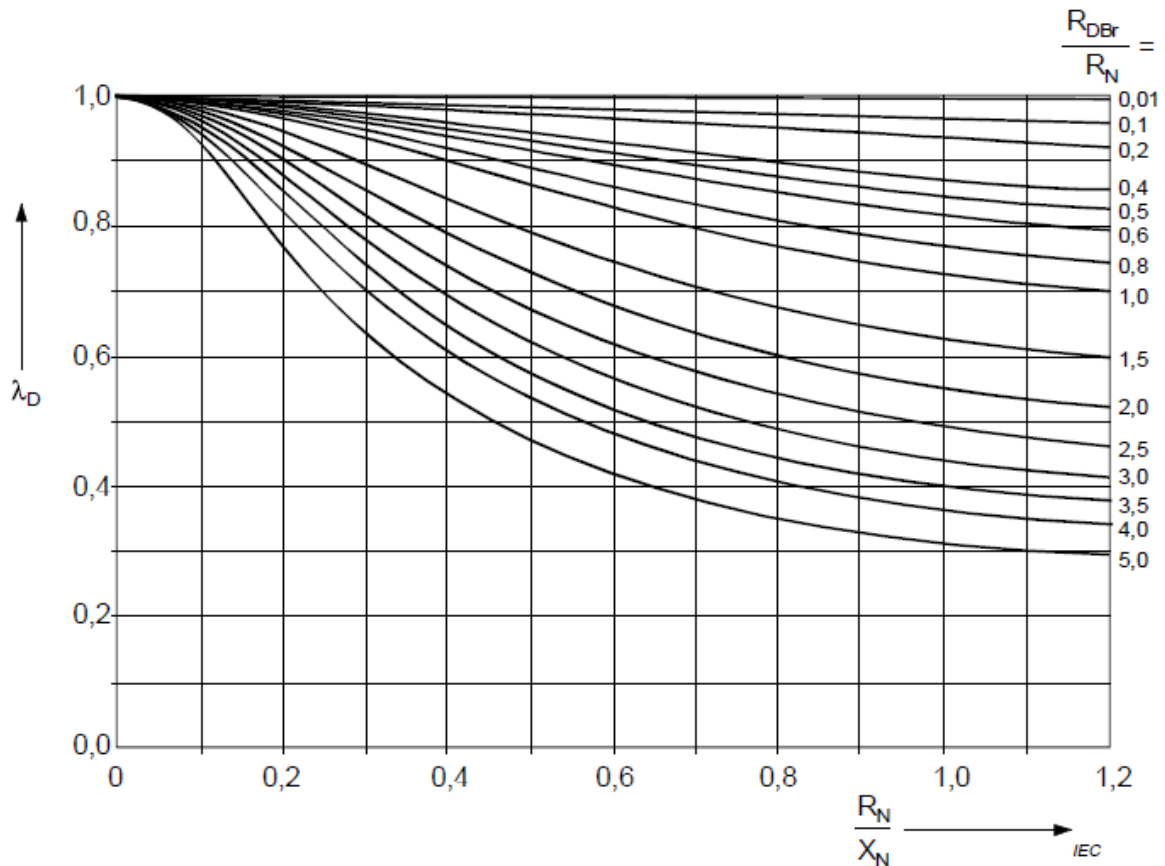
R_{DL}, L_{DL} – odpor a reaktance přípojovacího vedení usměřovače.

R_Y, L_Y – odpor a reaktance společné větve, pokud existuje. [2]

Kvazi-ustálený zkratový proud:

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad [\text{kA}] \quad (102)$$

Faktor λ_D závisí na poměru $R_N / X_N / R_{Dbr} / R_N$, a taky se může vyjádřit pomocí obr. 23.



Obr. 23 Faktor λ_D pro stanovení kvazi ustáleného zkratového proudu I_{kD} . [2]

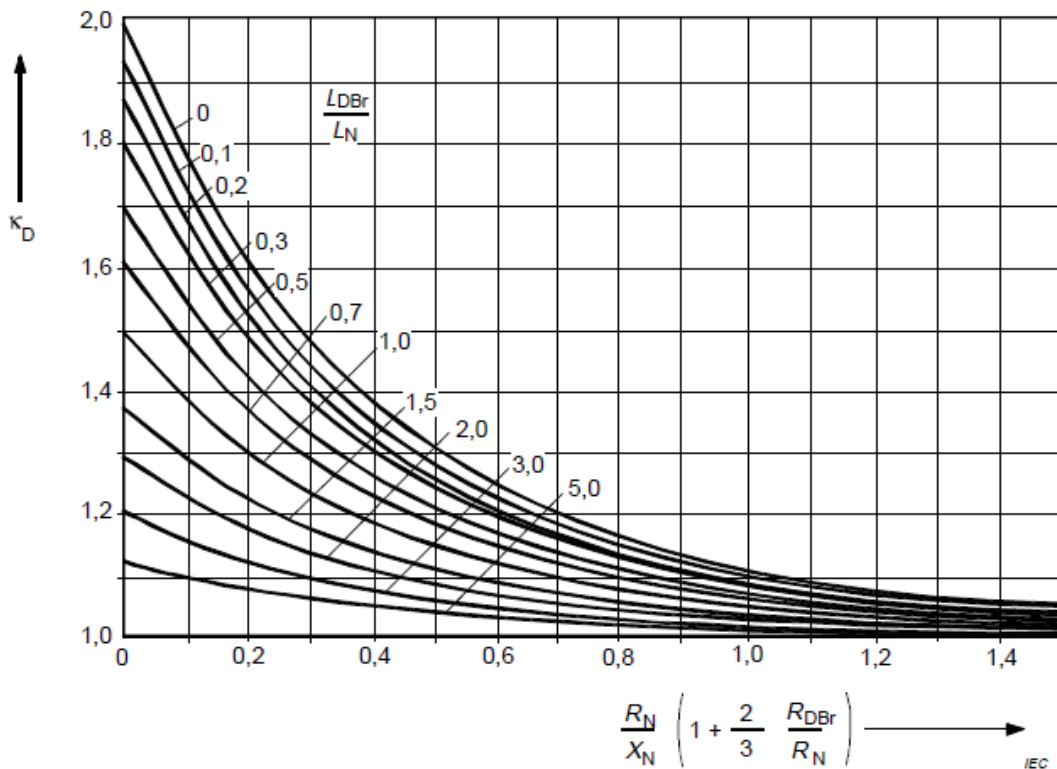
Nárazový zkratový proud:

$$i_{pD} = \kappa_D \cdot I_{kD} \quad [\text{kA}] \quad (103)$$

Faktor κ_D závisí na:

$$\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \propto \frac{L_{DBr}}{L_N} \quad (104)$$

Tento faktor lze vyjádřit pomocí obr. 24.



Obr. 24 Faktor κ_D pro určení nárazového zkratového proudu i_{pD} . [2]

Doba nárůstu:

Když $\kappa_D \geq 1,05$ bude doba nárůstu definována takto:

$$t_{pD} = (3 \cdot \kappa_D + 6) \quad [\text{ms}] \quad \text{když} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad (105)$$

$$t_{pD} = \left[(3 \cdot \kappa_D + 6) + 4 \cdot \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ [ms]} \quad \text{když } \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad (106)$$

Časová konstanta nárůstu τ_{1D} :

Když $f_n = 50 \text{ Hz}$ bude časová konstanta definována takto:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ [ms]} \quad \text{když } \kappa_D \geq 1,05 \quad (107)$$

$$\tau_{1D} = \left[0,7 + \left[7 - \frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \cdot \left(0,1 + 0,2 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ [ms]} \quad \text{když } \kappa_D < 1,05 \quad (108)$$

Časová konstanta klesání τ_{2D} :

Když $f_n = 50 \text{ Hz}$ bude časová konstanta definována takto:

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \text{ [ms]} \quad (109)$$

Pro určení parametrů usměřovače lze používat matematické rovnice místo grafického vyjádření. Tyto rovnice jsou uvedené dále:

Průměrná hodnota faktoru λ_D pro výpočet kvazi ustáleného stavu zkratového proudu:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N} \right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)^2}} \quad (110)$$

Faktor κ_D lze určit takto:

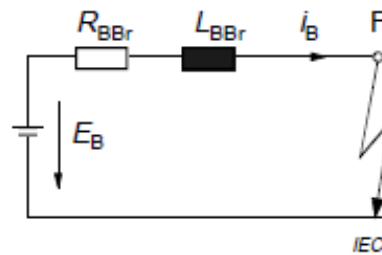
$$\kappa_D = \frac{i_{pD}}{I_{kD}} = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \varphi_D\right)} \cdot \sin \varphi_D \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \quad (111)$$

Kde φ_D je:

$$\varphi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} \quad (112)$$

6.2.3. Baterie

Náhradní schéma baterie je na obr. 25.



Obr. 25 Náhradní schéma chemické baterie a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]

$$R_{BBr} = 0,9 \cdot R_B + R_{BL} + R_Y \quad [\Omega] \quad (113)$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{BL} + L_Y \quad [\Omega] \quad (114)$$

Kde:

R_B, L_B – odpor a indukčnost baterie při zkratu, pro nabitou baterii dle výrobce. Je-li R_B neznámý pro vybitou baterii, tak se R_B pro nabitou baterii musí vynásobit faktorem 1,7.

Pokud indukčnost článku baterie s přípojovacím kabelem je neznámá, může se používat hodnota L rovno $0,2 \mu\text{H}$ (pro článek baterie).

R_{BL}, L_{BL} – odpor a indukčnost přípojovacího vedení baterie.

R_Y, L_Y – odpor a indukčnost společné větve (sítě), pokud existuje. [2]

Kvazi-ustálený zkratový proud:

$$I_{kB} = \frac{0,95 \cdot E_B}{R_{BBr} + 0,1 \cdot R_B} \quad [\text{kA}] \quad (115)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad [\text{kA}] \quad (116)$$

Doba nárůstu a časová konstanta nárůstu τ_{1B} :

Oba parametry jsou závislé na poměru $\frac{1}{\delta}$, které se taky mohou vyjádřit pomocí obr. 26.

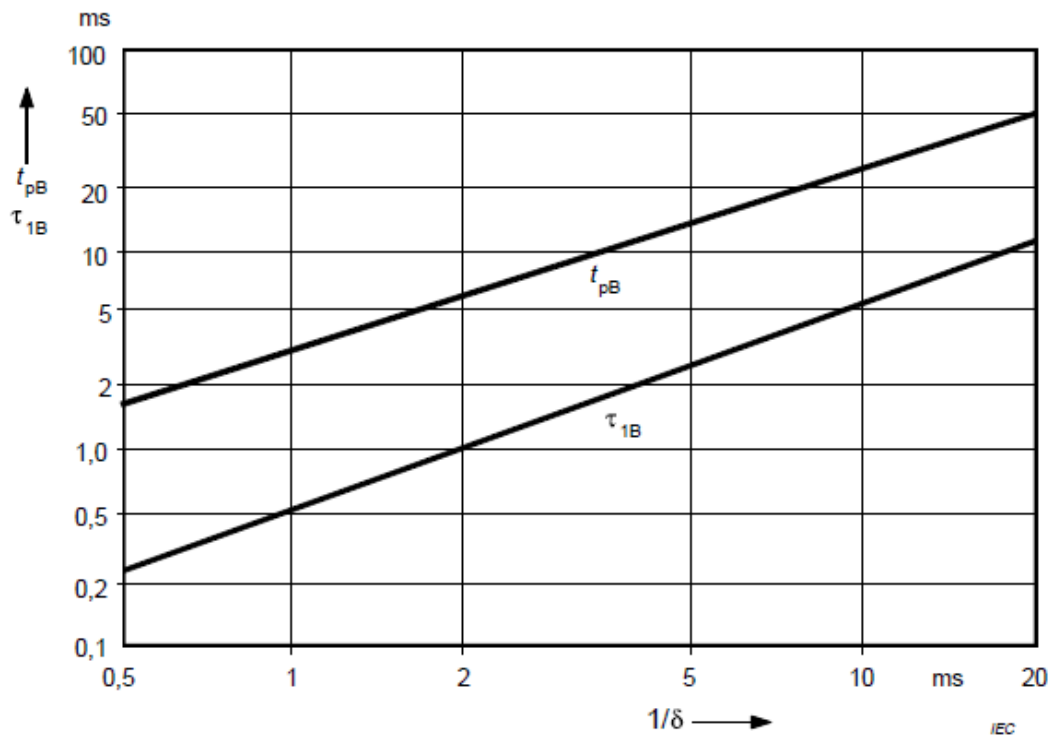
Kde:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad [\text{ms}] \quad (117)$$

Časová konstanta je $T_B = 30 \text{ ms}$.

Časová konstanta klesání τ_{2B} :

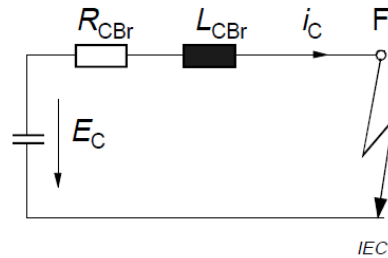
Uvažuje se časová konstanta čas $\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$.



Obr. 26 Doba nárůstu t_{pB} a časová konstanta τ_{1B} pro výpočet zkratů. [2]

6.2.4. Kondenzátor

Náhradní schéma kondenzátoru je na obr. 27.



Obr. 27 Náhradní schéma kondenzátoru a zkratové parametry pro výpočet zkratů. [2]

$$R_{CBr} = R_C + R_{CL} + R_Y \quad [\Omega] \quad (118)$$

$$L_{CBr} = L_{CL} + L_Y \quad [\Omega] \quad (119)$$

Kde:

R_C – ekvivalentní sériový stejnosměrný odpor kondenzátoru dle výrobce. Je-li tato hodnota neznámá, pak se může použít maximální hodnota R_{ac} .

R_{CL} , L_{CL} – odpor a indukčnost připojovacího vedení kondenzátoru.

R_Y , L_Y – odpor a indukčnost společné větve (sítě), pokud existuje. [2]

Pro kvazi-ustálený zkratový proud platí, že $I_{kC} = 0$.

Nárazový zkratový proud:

$$i_{pC} = \kappa_C \cdot \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad [\text{kA}] \quad (120)$$

Kde:

κ_C – faktor pro výpočet nárazového zkratového proudu.

E_C – napětí na kondenzátoru před vzniku zkratu. [2]

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Faktor κ_C závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 28.

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 \cdot L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad [\text{ms}] \quad (121)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} \cdot C}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (122)$$

Je-li $L_{CBr} = 0$, pak bude $\kappa_C = 1$. [2]

Doba nárůstu:

Doba nárůstu závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 29.

Je-li $L_{CBr} = 0$, pak bude $t_{pC} = 0$. [2]

Časová konstanta nárůstu τ_{1C} :

$$\tau_{1C} = k_{1C} \cdot t_{pC} \quad [\text{ms}] \quad (123)$$

Kde k_{1C} závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 30.

Časová konstanta klesání τ_{2C} :

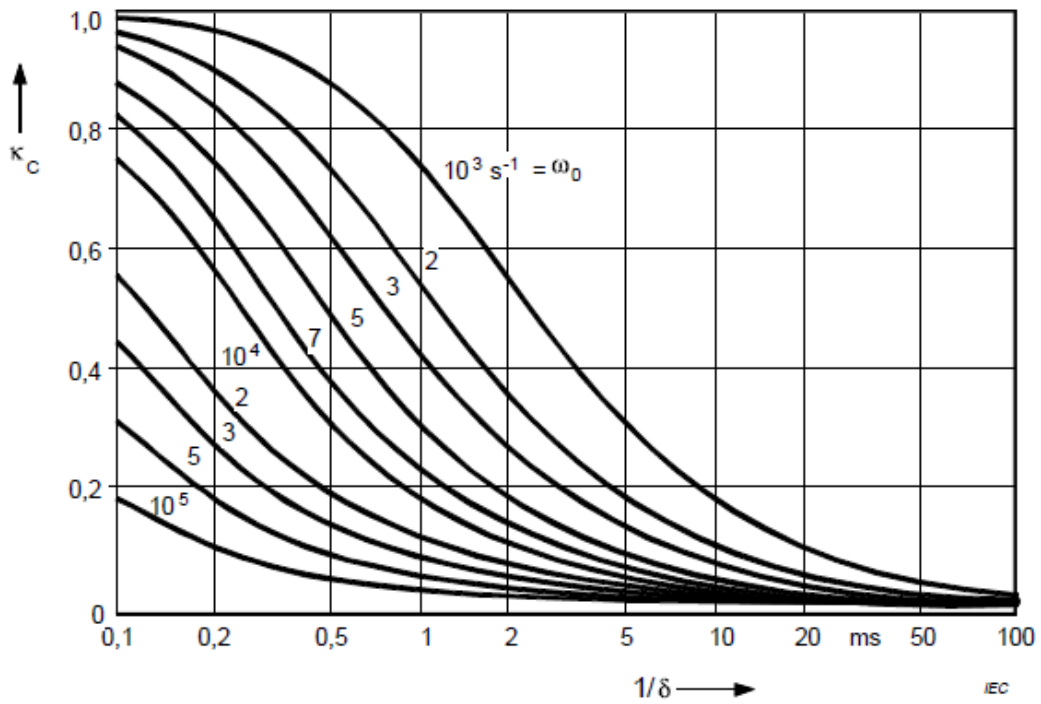
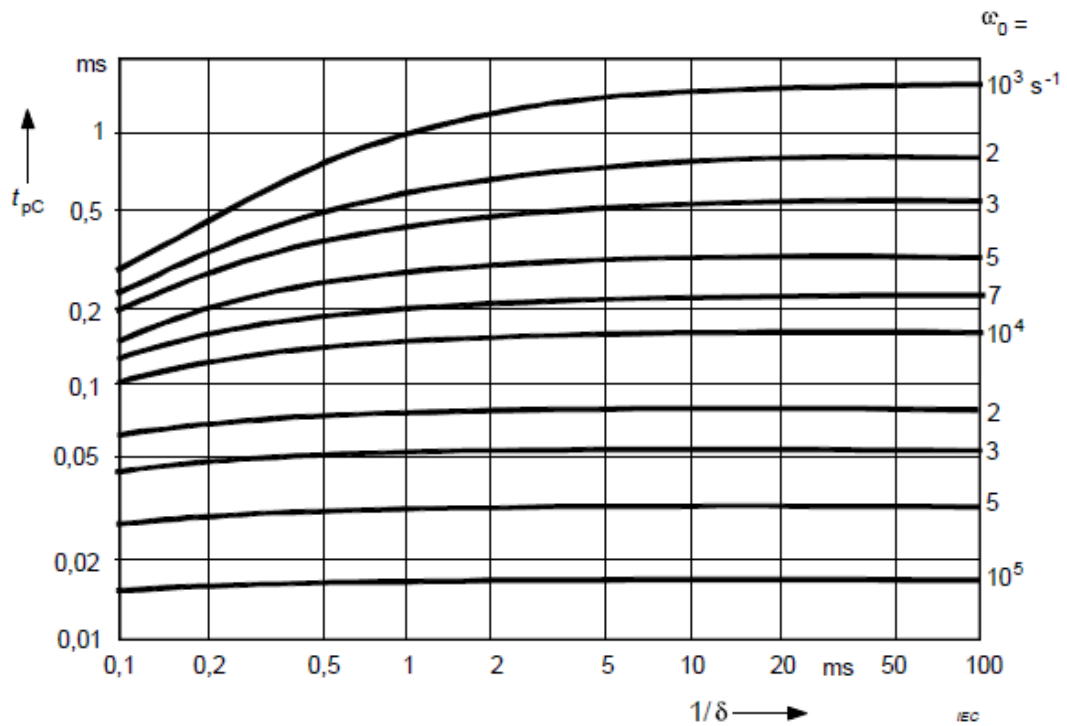
$$\tau_{2C} = k_{2C} \cdot R_{CBr} \cdot C \quad [\text{ms}] \quad (124)$$

Kde k_{2C} závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 31.

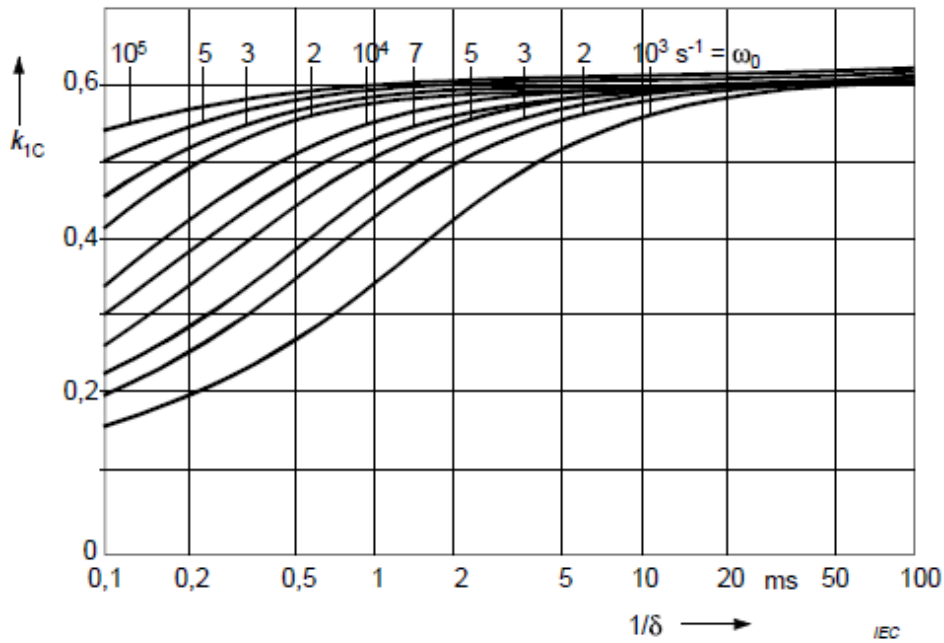
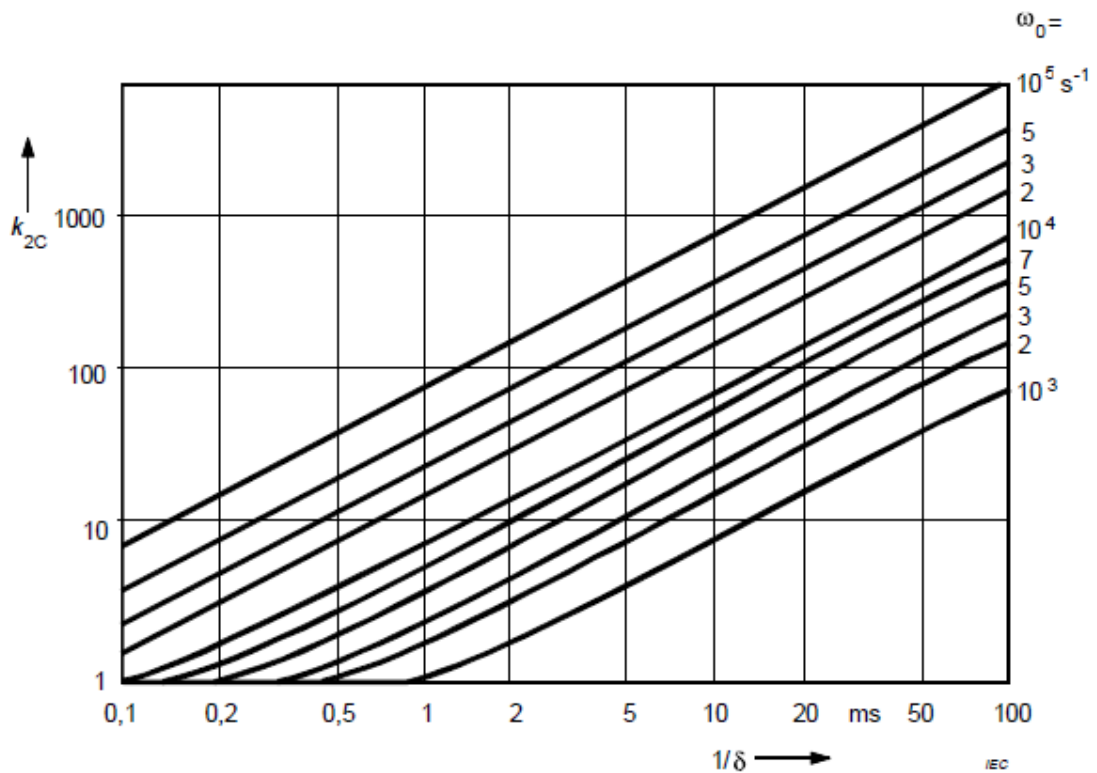
Je-li $L_{CBr} = 0$, pak bude $k_{2C} = 1$. [2]

Hodnota C je tzv. DC kapacitance. Pokud tato hodnota je neznámá, může se použít hodnota AC kapacitance, když je frekvence sítě 100 Hz.

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Obr. 28 Faktor κ_C pro výpočet nárazového zkratového proudu. [2]Obr. 29 doba nárůstu t_{PC} pro výpočet zkratů. [2]

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Obr. 30 Faktor k_{1C} pro vyjádření časové konstanty τ_{1C} . [2]Obr. 31 Faktor k_{2C} pro vyjádření časové konstanty τ_{2C} . [2]

Stejně jako u usměrňovače, pro určení parametry kondenzátoru, lze taky používat matematické rovnice místo grafického vyjádření, tyto rovnice jsou uvedené dále.

Faktor κ_C , doba nárůstu t_{pC} a úhlová frekvence kondenzátoru ω_d se mohou určit takto:

a) Pro $\delta > \omega_o$

$$\kappa_C = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_d} \cdot e^{-\delta \cdot t_{pC}} \cdot \sinh(\omega_d \cdot t_{pC}) \quad (125)$$

Kde doba nárůstu je:

$$t_{pC} = \frac{1}{2 \cdot \omega_d} \cdot \ln \frac{\delta + \omega_d}{\delta - \omega_d} \quad [\text{ms}] \quad (126)$$

A úhlová frekvence je:

$$\omega_d = \sqrt{\delta^2 - \omega_o^2} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (127)$$

b) Pro $\delta < \omega_o$

$$\kappa_C = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_d} \cdot e^{-\delta \cdot t_{pC}} \cdot \sin(\omega_d \cdot t_{pC}) \quad (128)$$

Kde doba nárůstu je:

$$t_{pC} = \frac{1}{\omega_d} \cdot \arctan\left(\frac{\omega_d}{\delta}\right) \quad [\text{ms}] \quad (129)$$

A úhlová frekvence je:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (130)$$

c) Pro $\delta = \omega_o$

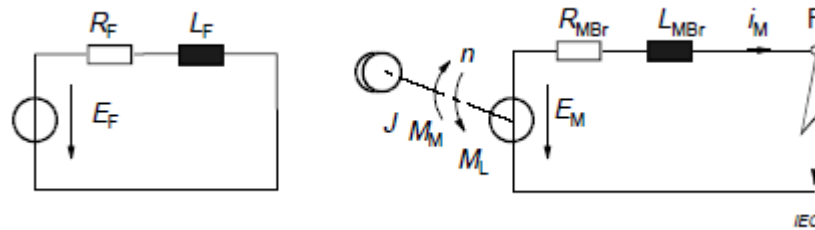
$$\kappa_C = \frac{2}{e} = 0,736 \quad (131)$$

Kde doba nárůstu je:

$$t_{pC} = \frac{1}{\delta} \quad [\text{ms}] \quad (132)$$

6.2.5. Stejnosměrný motor s cizím buzením (SSMCB)

Náhradní schéma stejnosměrného motoru je na obr. 32.



Obr. 32 Náhradní schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením a zkratové parametry motoru pro výpočet zkratových proudů. [2]

$$R_{MBr} = R_M + R_{ML} + R_Y \quad [\Omega] \quad (133)$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{ML} + L_Y \quad [\Omega] \quad (134)$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} \quad [\text{ms}] \quad (135)$$

Kde:

R_M, L_M – odpor a indukčnost statoru včetně kartáčů.

R_{ML}, L_{ML} – odpor a indukčnost připojovacího vedení motoru.

R_Y, L_Y – odpor a indukčnost společné větve (sítě), pokud existuje.

τ_M – časová konstanta obvodu kotvy až do místa zkratu.

Pokud je několik stejnosměrných motorů s cizím buzením připojeno k stejnosměrnému systému, pak s každým z nich je třeba zacházet jako se samostatnou větví sítě. [2]

Kvazi-ustálený zkratový proud:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \cdot \left(\frac{U_{rM} - R_M \cdot I_{rM}}{R_{MBr}} \right) \quad [\text{kA}] \quad \text{když } n = n_n = \text{konst.} \quad (136)$$

$$I_{kM} = 0 \quad \text{když } n \rightarrow 0 \quad (137)$$

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Kde:

L_F – ekvivalentní nasycená indukčnost obvodu pole při zkratu.

L_{OF} – ekvivalentní nenasycená indukčnost obvodu pole bez zátěže.

U_{RM} – jmenovité napětí motoru.

I_{RM} – jmenovitý proud motoru.

n_n – jmenovité otáčky motoru. [2]

Nárazový zkratový proud:

$$i_{pM} = \kappa_M \cdot \left(\frac{U_{rM} - R_M \cdot I_{rM}}{R_{MBr}} \right) \quad [\text{kA}] \quad (138)$$

Pro jmenovitou rychlost nebo menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} \geq 10 \cdot \tau_F$, bude faktor $\kappa = 1$.

$$\tau_{mech} = \frac{2\pi \cdot n_o \cdot J \cdot R_{MBr} \cdot I_{rM}}{M_r \cdot U_{rM}} \quad [\text{ms}] \quad (139)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} \quad [\text{ms}] \quad (140)$$

Kde:

τ_{mech} – časová konstanta mechanická.

τ_F – časová konstanta obvodu pole.

J – moment setrvačnosti rotoru.

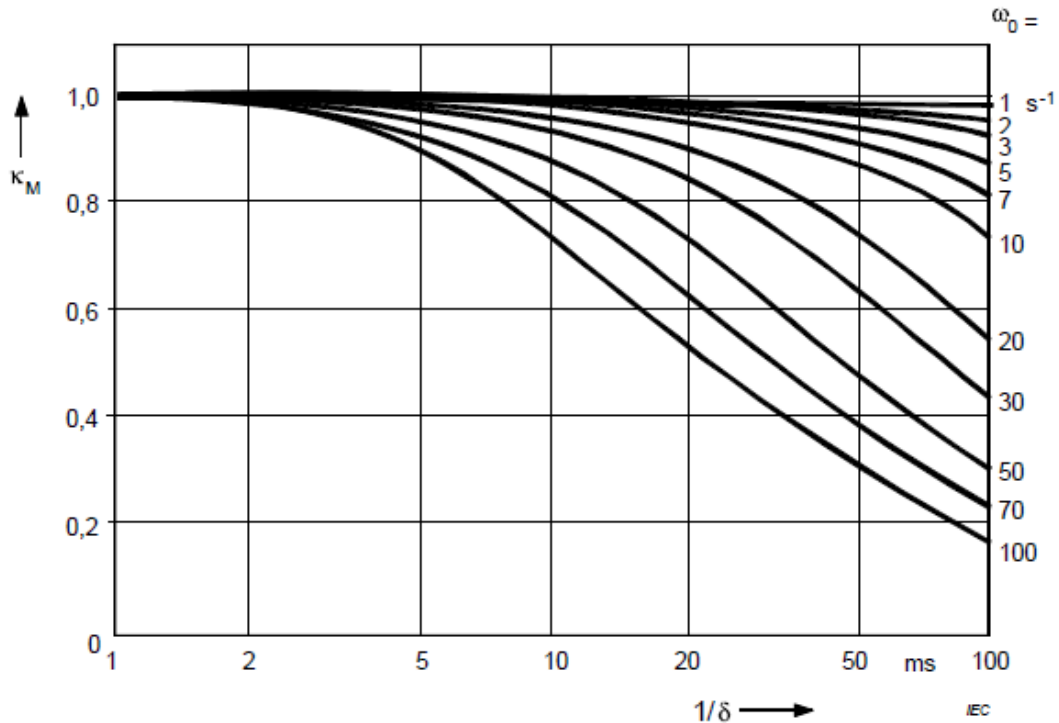
n_o – otáčky motoru naprázdno.

M_r – jmenovitý moment motoru. [2]

Pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \cdot \tau_F$, faktor κ_M bude závislý na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 33.

$$\frac{1}{\delta} = 2 \cdot \tau_M \quad [\text{ms}] \quad (141)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mech} \cdot \tau_M} \cdot \left(1 - \frac{R_M \cdot I_{rM}}{U_{rM}}\right)} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (142)$$



Obr. 33 Faktor κ_M pro vyjádření nárazového zkratového proudu i_{pM} s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]

Doba nárůstu a časová konstanta nárůstu τ_{1M} :

a) Pro jmenovitou rychlost nebo menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} \geq 10 \cdot \tau_F$:

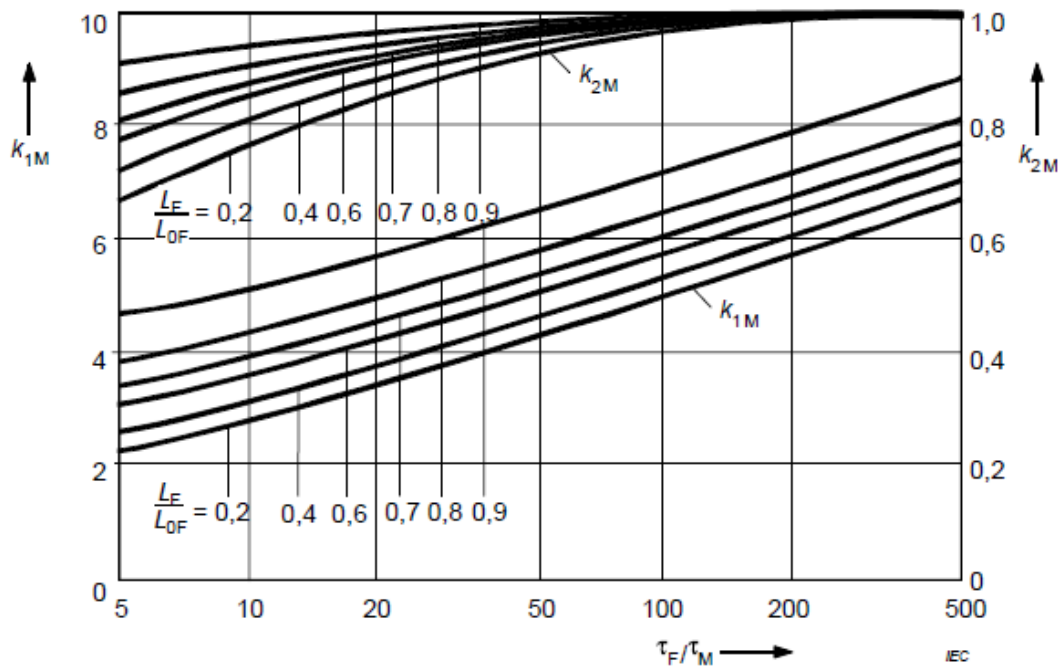
$$t_{pM} = k_{1M} \cdot \tau_M \quad [\text{ms}] \quad (143)$$

$$\tau_{1M} = k_{2M} \cdot \tau_M \quad [\text{ms}] \quad (144)$$

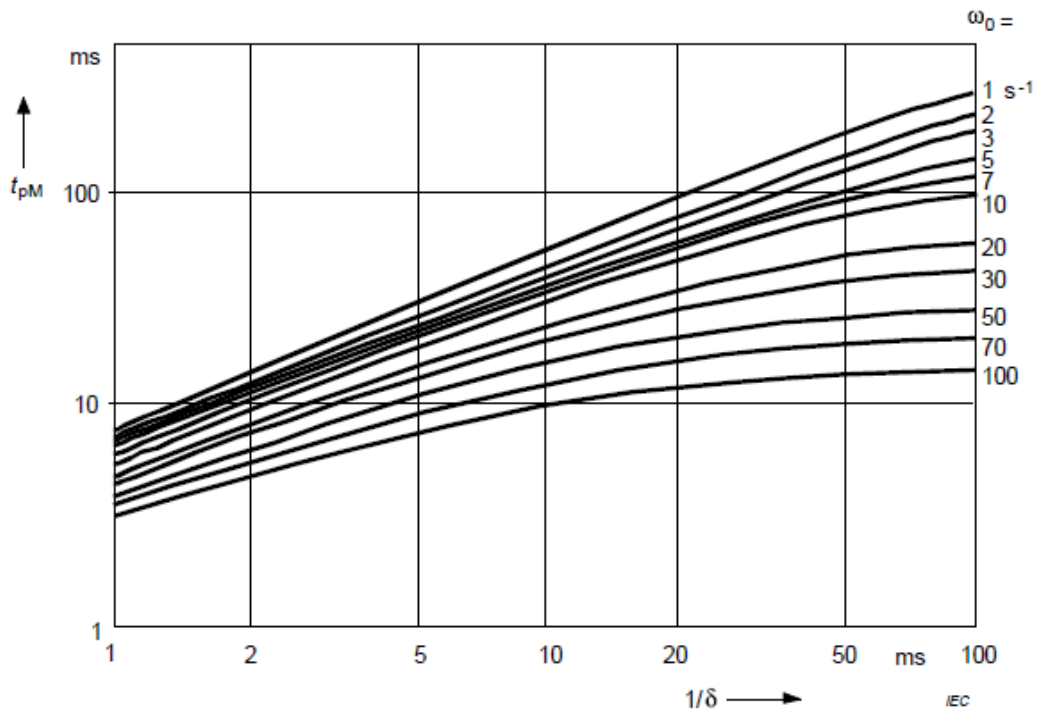
Faktory k_{1M} a k_{2M} , jsou závislé na poměru τ_F/τ_M a L_F/L_{OF} , a můžou se vyjádřit pomocí obr. 34.

b) Pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \cdot \tau_F$, doba nárůstu t_{pM} bude závislá na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_o , a může se vyjádřit pomocí obr. 35. Hodnoty pro $\frac{1}{\delta}$ a ω_o jsou určeny na rovnicích (141) a (142).

Výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1



Obr. 34 Faktory k_{1M} a k_{2M} pro určení doba nárůstu t_{pM} a časové konstanty nárůstu τ_{IM} pro jmenovitou rychlost a menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} \geq 10 \tau_F$. [2]

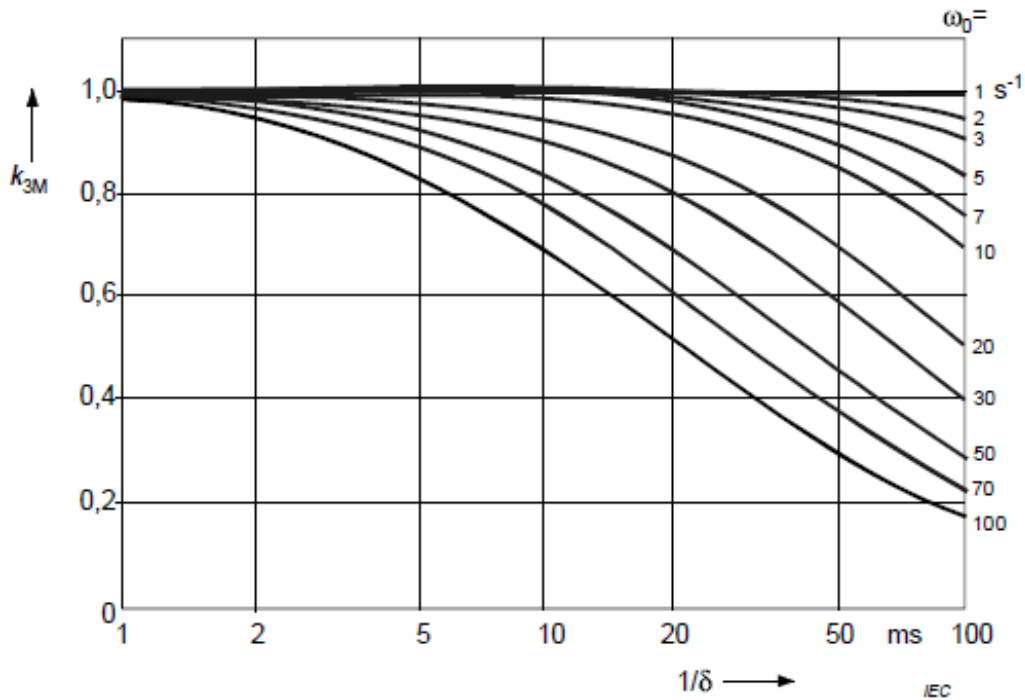


Obr. 35 Doba nárůstu t_{pM} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]

Časová konstanta nárůstu τ_{1M} :

$$\tau_{1M} = k_{3M} \cdot \tau_M \quad [\text{ms}] \quad (145)$$

Kde k_{3M} závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_0 , a může se vyjádřit pomocí obr. 36.



Obr. 36 Faktor k_{3M} pro určení τ_{1M} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]

Časová konstanta klesání τ_{2M} :

a) Pro jmenovitou rychlost nebo menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} \geq 10 \cdot \tau_F$:

$$\tau_{2M} = \tau_F \quad \text{když } n = n_n = \text{konst.} \quad (146)$$

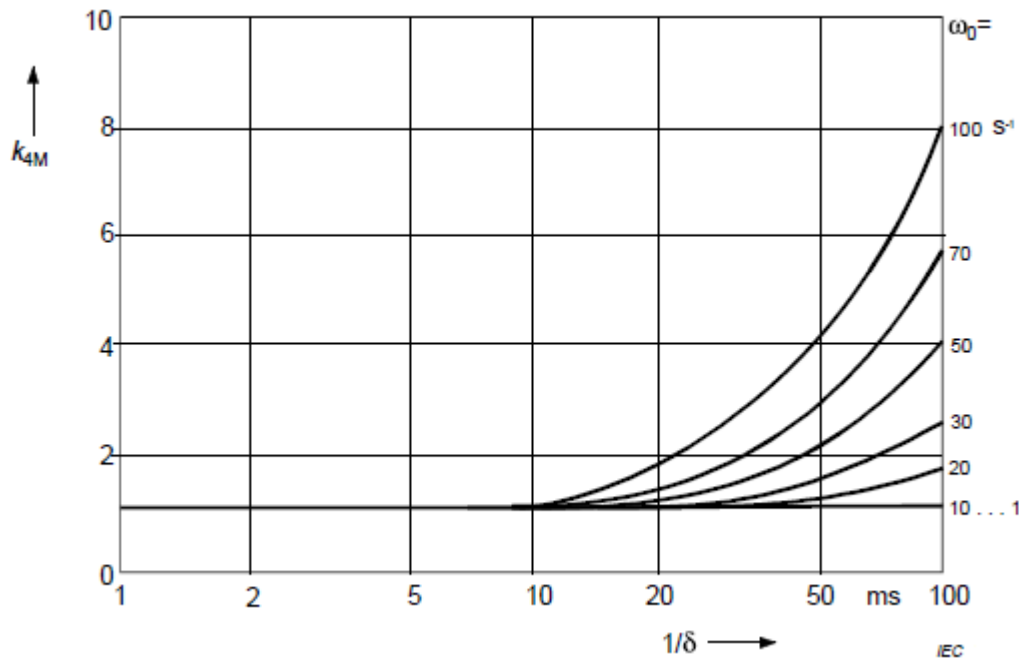
$$\tau_{2M} = \frac{L_{OF}}{L_F} \cdot k_{4M} \cdot \tau_{mech} \quad \text{když } n \rightarrow 0 \text{ pro } \tau_{mech} \geq 10 \cdot \tau_F \quad (147)$$

Kde k_{4M} závisí na poměru $\frac{1}{\delta}$ a na úhlové frekvenci ω_0 , a může se vyjádřit pomocí obr. 37. Časová konstanta τ_{mech} je určena na rovnici (139).

b) Pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \cdot \tau_F$:

$$\tau_{2M} = k_{4M} \cdot \tau_{mech} \quad [\text{ms}] \quad (148)$$

Kde k_{4M} lze vyjádřit pomocí obr. 37.



Obr. 37 Faktor k_{4M} pro určení τ_{2M} pro menší rychlosti s časovou konstantou $\tau_{mech} < 10 \tau_F$. [2]

7. Výpočet korekce celkových zkratových proudů

Výpočet celkového zkratového proudu je různý v závislosti na lokaci, kde zkrat vznikl. Pro případ, kde zkrat vzniká v lokaci F1 tzv. bez společné větve ($R_V=0$, $L_V=0$), tak bude celkový zkratový proud roven součtu hodnot jednotlivých zkratkových proudů odpovídajících zařízení, které jsou připojeny do sítě. V případě, že zkrat vzniká v lokaci F2, tak se musí provést korekce z hlediska celkového zkratového proudu z důvodu, že se tam přidá společná větev a tím se změní výsledné hodnoty. Korekční faktory se počítají zvlášť pro jednotlivá zařízení. Korigované proudy se pak počítají následujícím způsobem.

$$i_{kcorj} = \sigma_j \cdot i_{kj} \quad [\text{kA}] \quad (149 \text{ a})$$

$$i_{pcorj} = \sigma_j \cdot i_{pj} \quad [\text{kA}] \quad (149 \text{ b})$$

Výpočet korekce celkových zkratových proudů

Korekční faktor σ_j pro všechna zařízení:

$$\sigma_j = \frac{R_{resj} \cdot (R_{ij} + R_Y)}{R_{resj} \cdot R_{ij} + R_{ij} \cdot R_Y + R_{resj} \cdot R_Y} \quad [-] \quad (150)$$

Při korekci zkratových proudů, časové konstanty a doby nárůstu zůstávají beze změn.

Odpory pro výpočet korigovaných proudů jsou získány z tabulky 7.

Tab. 7 Vyjádření odporů pro výpočet korigovaných zkratových proudů. [2]

Zařízení j	kapitola	R_{ij}	R_{resj}
Usměrňovač (D)	6.2.1	$R_{iD} = \frac{U_n}{I_{kD}} - R_Y$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Baterie (B)	6.2.2	$R_{iB} = R_B + R_{BL}$	$R_{resB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Kondenzátor (C)	6.2.3	$R_{iC} = R_C + R_{CL}$	$R_{resC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Motor (M)	6.2.4	$R_{iM} = R_M + R_{ML}$	$R_{resM} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}}$

Kde:

U_n – napětí v místě zkratu před vzniku zkratu.

R_Y – odpor společné větve (společnou síť).

R_{ij} – odpor mezi zařízením a přípojnici.

R_{resj} – ekvivalentní odpor paralelních odporů větví od ostatních zdrojů až do společné větve, přičemž tyto zdroje přispívají ke kvazi zkratovému proudu tekoucímu skrz společnou větev.

Odpor R_{iC} z kondenzátoru až do společné větve se neuvažuje.

Odpor R_{iM} z motoru až do společné větve může být uvažován pouze do té doby, kdy zkratový proud motoru bude větší než nula.

Je-li konfigurace sítě jiná, než je schéma uvedené na obr. 15, je potřeba to promítnout do výpočtu korekčních faktorů. Pokud je stejná, tak průběh I_k se získává tzv. superpozicí příspěvků od jednotlivých zdrojů zkratového proudu do místa poruchy.

8. Praktické výpočty 3f zkratů ve stejnosměrných sítích dle IEC 61660-1

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly předchozí rovnice jsou používány pro výpočet zkratů ve stejnosměrných sítích. Následující případy obsahují běžné spotřebiče, které jsou obvykle připojené ve stejnosměrných sítích, a to jsou chemické baterie, kondenzátorové baterie, stejnosměrné motory s cizím buzením a usměrňovače, který má za účel měnit kmitočet napájecí sítě tak, aby získal na jeho výstupu stejnosměrné napětí a proud pro napájení ostatních spotřebičů.

V této kapitole se budou řešit jenom výpočty jednotlivých zařízení bez jejich zapojovacích schémat, pouze výpočty a grafy. Tato schémata jsou uvedena v předchozí kapitole. Postupy pro výpočet zkratových proudů ve stejnosměrné síti jsou uvedeny dále:

8.1. Usměrňovač

Náhradní schéma usměrňovače je na obr. 22 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Vstupní parametry usměrňovače.

Vstupní parametry		
Usměrňovač		
U_n	13.5	kV
R_N	0.328	Ω
X_N	0.389	Ω
f	50	Hz
U_{rLV}	0.4	kV
U_{rMV}	13.5	kV
R_s	0.635	mΩ
L_s	0.050	μH

Výpočty:

$c = 1,1$ dle tab. 1

$$L_N = \frac{X_N}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,389}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,24 \text{ mH} \quad (151)$$

$$Z_N = \sqrt{R_N^2 + X_N^2} = \sqrt{0,328^2 + 0,389^2} = 0,509 \text{ } \Omega \quad (152)$$

Parametry připojovacího kabelu:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{54} \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad l = 0 \text{ m}, \quad S = 16 \text{ mm}^2, \quad a = 4 \text{ m}, \quad r = 0,002 \text{ m}. \quad (153)$$

$$R_{DL} = 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S} = 2 \cdot \frac{0,0185 \cdot 0}{16} = 0 \Omega \quad (154)$$

$$L'_{DL} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{4}{0,002} \right) = 3,09 \text{ mH/m} \quad (155)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 0 \Omega, L_Y = 0 \text{ H}. \quad (156)$$

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y = 0,635 \cdot 10^{-3} + 0 + 0 = 0,635 \text{ m}\Omega \quad (157)$$

$$L_{DBr} = L_S + L'_{DL} \cdot l + L_Y = 0,050 \cdot 10^{-6} + 3,09 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 0 = 0,050 \mu\text{H} \quad (158)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,33}{0,36}\right)^2}{1 + \left(\frac{0,33}{0,39}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,33}\right)^2}} = 0,99946 \quad (159)$$

$$\varphi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} = \arctan \frac{1}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,3}\right)} = 0,87019 \quad (160)$$

$$\kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \varphi_D\right) \cot \varphi_D} \cdot \sin \varphi_D \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{L_{DBr}}{L_N}\right) \rightarrow \quad (161)$$

$$\rightarrow \kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + 0,87019\right) \cot 0,87019} \cdot \sin 0,87019 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{5 \cdot 10^{-8}}{1,239 \cdot 10^{-3}}\right) = 1,15174$$

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 0,99946 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1,1 \cdot 13,5}{\sqrt{3} \cdot 0,509} \cdot \frac{0,4}{13,5} = 0,674 \text{ kA} \quad (162)$$

$$i_{pD} = \kappa_D \cdot I_{kD} = 1,15174 \cdot 0,674 = 0,776 \text{ kA} \quad (163)$$

$$t_{pD} = (3 \cdot \kappa_D + 6) = (3 \cdot 1,15174 + 6) = 9,46 \text{ ms} \quad (164)$$

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] = \left[2 + (1,152 - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-8}}{1,24 \cdot 10^{-3}} \right) \right] \rightarrow$$

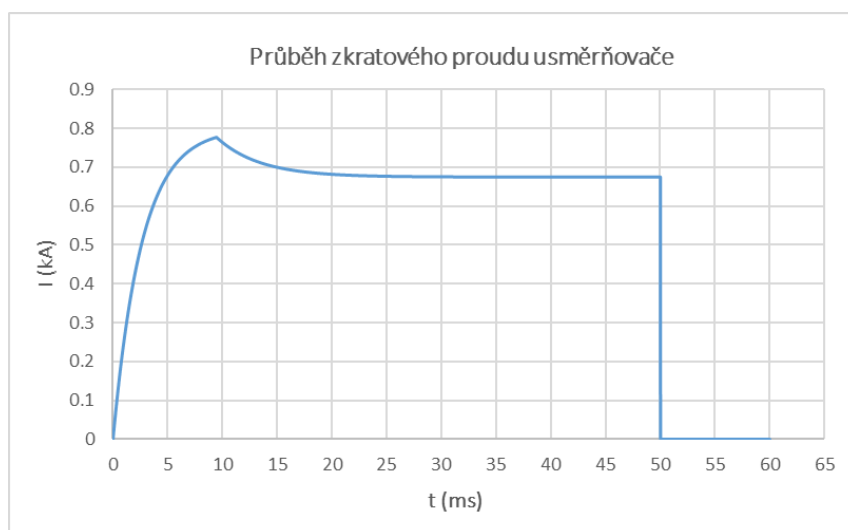
$$\rightarrow \tau_{1D} = 2,63 \text{ ms} \quad (165)$$

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} = \frac{2}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,33} \right)} = 3,95 \text{ ms} \quad (166)$$

$$T_{kD} = 50 \text{ ms} \quad (167)$$

$$p_D = \frac{I_{kD}}{i_{pD}} = \frac{0,674}{0,776} = 0,87 \quad (168)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 38).



Obr. 38 Průběh stejnosměrného zkratového proudu tekoucího přes usměrňovač.

8.2. Baterie

Náhradní schéma je na obr. 25, konfigurace baterie je v tabulce 9 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 9 Konfigurace jednotlivých článků baterie.

Konfigurace baterie					
Složení	Počet	Hodnota		Rc (mΩ)	Lc (μH)
Články	1	2	V	0,13	0,2
Sériových článků	10	20	V	1,3	2
Moduly	20	400	V	26	40
Moduly paralelně	2	400	V	13,00	20,00

Tab. 10 Vstupní parametry baterie.

Vstupní parametry		
Baterie		
U_{nB}	400	VDC
R_B	13.00	mΩ
L_B	20.00	μH
Foc	1.05	(0,9-1,05)

Výpočty:

$$E_B = 1,05 \cdot U_{nB} = 1,05 \cdot 400 = 420 \text{ V} \quad (169)$$

Parametry připojovacího kabelu:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{54} \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad l = 0 \text{ m}, \quad S = 1,5 \text{ mm}^2, \quad a = 0,15 \text{ m}, \quad r = 0,001 \text{ m}. \quad (170)$$

$$R_{BL} = 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S} = 2 \cdot \frac{0,0185 \cdot 0}{1,5} = 0 \Omega \quad (171)$$

$$L'_{BL} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0,15}{0,001} \right) = 2,25 \mu\text{H/m} \quad (172)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 0 \Omega, L_Y = 0 \text{ H.} \quad (173)$$

$$R_{BBr} = 0,9 \cdot R_B + R_{BL} + R_Y = 0,9 \cdot 13 \cdot 10^{-3} + 0 + 0 = 11,70 \text{ m}\Omega \quad (174)$$

$$L_{BBr} = L_B + L'_{BL} \cdot l + L_Y = 20 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0 + 0 = 20 \text{ }\mu\text{H} \quad (175)$$

$$I_{kB} = \frac{0,95 \cdot E_B}{R_{BBr} + 0,1 \cdot R_B} = \frac{0,95 \cdot 420}{11,7 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 13 \cdot 10^{-3}} = 30,69 \text{ kA} \quad (176)$$

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{420}{11,7 \cdot 10^{-3}} = 35,9 \text{ kA} \quad (177)$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{11,7 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{30 \cdot 10^{-3}}} = 3,23 \text{ ms} \quad (178)$$

Dle obr. 26 jsou doba nárůstu a doba nárůstu umístěny v intervalech mezi 0,5 až 20 ms pro $1/\delta$. Hodnoty mimo tuto oblast nejsou definované a je potřeba zaokrouhlovat na tyto intervaly.

$$t_{pB} = 3,15 \cdot \left(\frac{1}{\delta}\right)^{0,92084} = 3,15 \cdot (3,23)^{0,92084} = 9,28 \text{ ms} \quad (179)$$

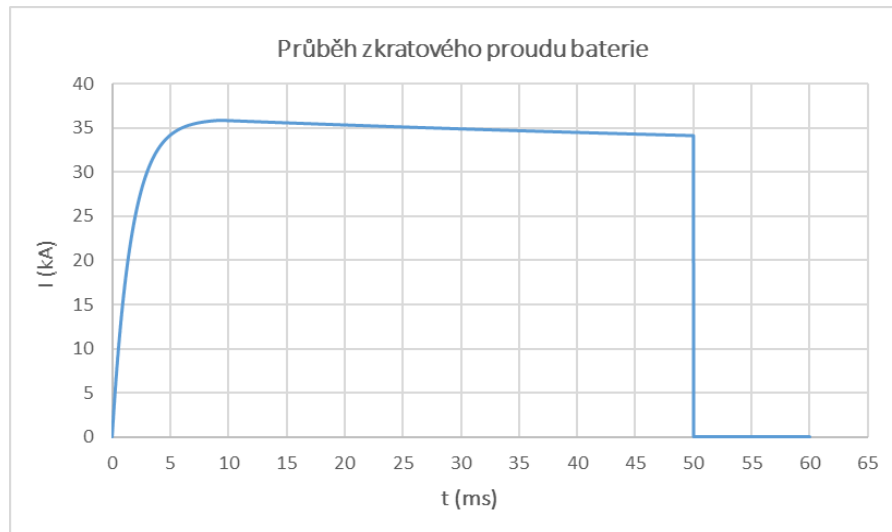
$$\tau_{1B} = 0,4933 \cdot \left(\frac{1}{\delta}\right)^{1,0426} = 0,4933 \cdot (3,23)^{1,0426} = 1,68 \text{ ms} \quad (180)$$

Postup k získání rovnic (179) a (180) je uveden v příloze (viz [2]). Tyto vzorce jsem si pokusil najít detailním studiem a analýzou grafu v normě IEC 61660-1.

$$T_{kB} = 50 \text{ ms} \quad (181)$$

$$p_B = \frac{I_{kB}}{i_{pB}} = \frac{30,69}{35,90} = 0,85 \quad (182)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 39).



Obr. 39 Průběh stejnosměrného zkratového proudu baterie.

8.3. Kondenzátor

Náhradní schéma kondenzátoru je na obr. 27 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11 Vstupní parametry kondenzátoru.

Vstupní parametry		
Kondenzátor		
E_c	400.0	VDC
R_c	0.2	m Ω
L_c	10	nH
C	2.65	mF

Výpočty:

Parametry připojovacího kabelu:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{54} \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad l = 0 \text{ m}, \quad S = 4 \text{ mm}^2, \quad a = 0,1 \text{ m}, \quad r = 0,001 \text{ m}. \quad (183)$$

$$R_{CL} = 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S} = 2 \cdot \frac{0,0185 \cdot 0}{4} = 0 \Omega \quad (184)$$

$$L'_{CL} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0,1}{0,001} \right) = 1,89 \mu\text{H/m} \quad (185)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 0 \Omega, L_Y = 0 \text{ H} \quad (186)$$

$$R_{CBr} = R_C + R_{CL} + R_Y = 0,2 \cdot 10^{-3} + 0 + 0 = 0,2 \text{ m}\Omega \quad (187)$$

$$L_{CBr} = L_C + L'_{CL} \cdot l + L_Y = 10 \cdot 10^{-9} + 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot 0 + 0 = 10 \text{ nH} \quad (188)$$

$$I_{kC} = 0 \text{ kA} \rightarrow p_C = 0 \quad (189)$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 \cdot L_{CBr}}{R_{CBr}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 0,1 \text{ ms} \quad (190)$$

$$\delta = 10000 \text{ s}^{-1} \quad (191)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{10 \cdot 10^{-9} \cdot 2,65 \cdot 10^{-3}}} = 194 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (192)$$

Pro $\delta < \omega_o$

$$\kappa_C = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_d} \cdot e^{-\delta \cdot t_{pC}} \cdot \sin(\omega_d \cdot t_{pC}) \rightarrow \quad (193)$$

$$\rightarrow \kappa_C = \frac{2 \cdot 10000}{194 \cdot 10^3} \cdot e^{-10000 \cdot 7,83 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin(194 \cdot 10^3 \cdot 7,83 \cdot 10^{-6}) = 0,0952$$

$$t_{pC} = \frac{1}{\omega_d} \cdot \arctan\left(\frac{\omega_d}{\delta}\right) = \frac{1}{194 \cdot 10^3} \cdot \arctan\left(\frac{194 \cdot 10^3}{10000}\right) = 7,83 \mu\text{s} \quad (194)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} = \sqrt{(194 \cdot 10^3)^2 - 10000^2} = 194 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (195)$$

$$i_{pC} = \kappa_C \cdot \frac{E_C}{R_{CBr}} = 0,0952 \cdot \frac{400}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 190,4 \text{ kA} \quad (196)$$

Zvolené hodnoty dle grafy uvedeny na obr. 30 a 31:

$$k_{1C} = 0,55 \quad (197)$$

$$k_{2C} = 9 \quad (198)$$

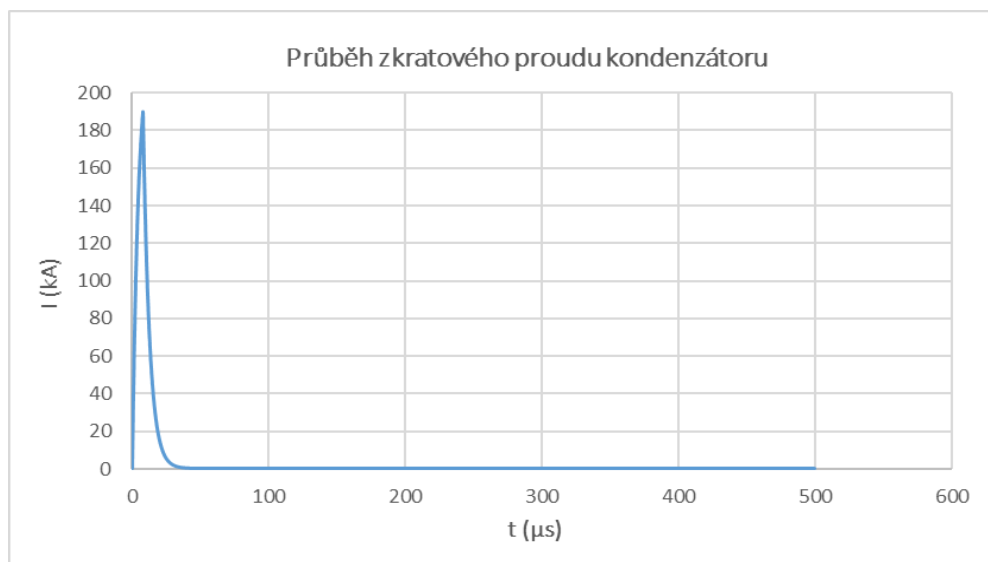
Časové konstanty budou:

$$\tau_{1C} = k_{1C} \cdot t_{pC} = 0,55 \cdot 7,83 \cdot 10^{-6} = 4,31 \text{ } \mu\text{s} \quad (199)$$

$$\tau_{2C} = k_{2C} \cdot R_{CBr} \cdot C = 9 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,65 \cdot 10^{-3} = 4,77 \text{ } \mu\text{s} \quad (200)$$

$$T_{kC} = 50 \text{ ms} \quad (201)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 40).



Obr. 40 Průběh stejnosměrného zkratového proudu kondenzátoru.

8.4. Stejnosměrný motor s cizím buzením

Náhradní schéma SSCM je na obr. 32 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12 Vstupní parametry stejnosměrného motoru.

Vstupní parametry					
Stejnosměrný motor s cizím buzením					
U_{rM}	400	VDC	R_F	240	Ω
P_M	18.2	kW	L_F	120	H
η	0.86	-	L_{oF}	240	H
R_M	0.832	Ω	n_n	1610	rpm
L_M	10.2	mH	n_o	2500	rpm
I_{rM}	53.00	A	J	0.085	kgm ²

Výpočty:

Parametry připojovacího kabelu:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{54} \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad l = 0 \text{ m}, \quad S = 10 \text{ mm}^2, \quad a = 0,1 \text{ m}, \quad r = 0,002 \text{ m}. \quad (202)$$

$$R_{ML} = 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S} = 2 \cdot \frac{0,0185 \cdot 0}{10} = 0 \Omega \quad (203)$$

$$L'_{ML} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0,1}{0,002} \right) = 1,71 \mu\text{H/m} \quad (204)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 0 \Omega, L_Y = 0 \text{ H} \quad (205)$$

$$R_{MBr} = R_M + R_{ML} + R_Y = 0,832 + 0 + 0 = 0,832 \Omega \quad (206)$$

$$L_{MBr} = L_M + L'_{ML} \cdot l + L_Y = 10,2 \cdot 10^{-3} + 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot 0 + 0 = 10,2 \text{ mH} \quad (207)$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} = \frac{10,2 \cdot 10^{-3}}{0,832} = 12,26 \text{ ms} \quad (208)$$

➤ V případě že $n_n = \text{konst.}$

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \cdot \left(\frac{U_{rM} - R_M \cdot I_{rM}}{R_{MBr}} \right) = \frac{120}{240} \cdot \left(\frac{400 - 0,832 \cdot 53}{0,832} \right) = 0,214 \text{ kA} \quad (209)$$

$$\omega_n = n_n \cdot \frac{\pi}{30} = 1610 \cdot \frac{\pi}{30} = 168,6 \text{ s}^{-1} \quad (210)$$

$$M_{rM} = \frac{P_M}{\omega_n} = \frac{18200}{168,6} = 108 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (211)$$

$$\frac{1}{\delta} = 2 \cdot \tau_M = 2 \cdot 12,26 = 24,52 \text{ ms} \quad (212)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} = \frac{120}{240} = 500 \text{ ms} \quad (213)$$

$$\tau_{mech} = \frac{2\pi \cdot n_o \cdot J \cdot R_{MBr} \cdot I_{rM}}{M_r \cdot U_{rM}} = \frac{2\pi \cdot \frac{2500}{60} \cdot 0,085 \cdot 0,832 \cdot 53}{108 \cdot 400} = 22,73 \text{ ms} \quad (214)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mech} \cdot \tau_M} \cdot \left(1 - \frac{R_M \cdot I_{rM}}{U_{rM}} \right)} \rightarrow \quad (215)$$

$$\rightarrow \omega_o = \sqrt{\frac{1}{22,73 \cdot 10^{-3} \cdot 12,26 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{0,832 \cdot 53}{400} \right)} = 56,51 \text{ s}^{-1}$$

$k_M = 0,65$ dle grafu uvedeno na obr. 33.

$$i_{pM} = k_M \cdot \left(\frac{U_{rM} - R_M \cdot I_{rM}}{R_{MBr}} \right) = 0,65 \cdot \left(\frac{400 - 0,832 \cdot 53}{0,832} \right) = 0,278 \text{ kA} \quad (216)$$

$$\frac{\tau_F}{\tau_M} = \frac{500}{12,26} = 40,78 \quad (217)$$

$$\frac{L_F}{L_{OF}} = \frac{120}{240} = 0,5 \quad (218)$$

Zvolené parametry dle grafy uvedeny na obr. 35, 36 a 37:

$$k_{3M} = 0,62 \quad (219)$$

$$k_{4M} = 1,3 \quad (220)$$

$$t_{pM} = 20 \quad (221)$$

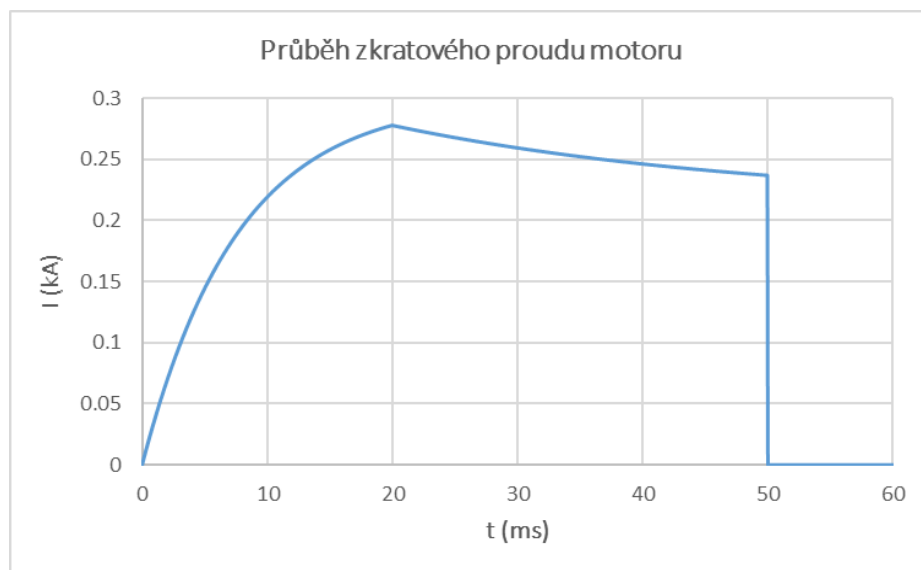
$$\tau_{1M} = 0,62 \cdot 12,26 = 7,60 \text{ ms} \quad (222)$$

$$\tau_{2M} = 1,3 \cdot 22,73 = 29,54 \text{ ms} \quad (223)$$

$$p_M = \frac{I_{kM}}{i_{pM}} = \frac{0,21}{0,28} = 0,77 \quad (224)$$

$$T_{kM} = 50 \text{ ms} \quad (225)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 41).



Obr. 41 Průběh stejnosměrného zkratového proudu stejnosměrného motoru při $I_{kM} \neq 0$.

➤ V případě že $n_n \rightarrow 0$.

$$I_{kM} = 0 \text{ kA} \quad (226)$$

$$\omega_n = n_n \cdot \frac{\pi}{30} = 1610 \cdot \frac{\pi}{30} = 168,6 \text{ s}^{-1} \quad (227)$$

$$M_{rM} = \frac{P_M}{\omega_n} = \frac{18200}{168,6} = 108 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (228)$$

$$\frac{1}{\delta} = 2 \cdot \tau_M = 2 \cdot 12,26 = 24,52 \text{ ms} \quad (229)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} = \frac{120}{240} = 500 \text{ ms} \quad (230)$$

$$\tau_{mech} = \frac{2\pi \cdot n_o \cdot J \cdot R_{MBr} \cdot I_{rM}}{M_r \cdot U_{rM}} = \frac{2\pi \cdot \frac{2500}{60} \cdot 0,085 \cdot 0,832 \cdot 53}{108 \cdot 400} = 22,73 \text{ ms} \quad (231)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mech} \cdot \tau_M} \cdot \left(1 - \frac{R_M \cdot I_{rM}}{U_{rM}}\right)} \rightarrow \quad (232)$$

$$\rightarrow \omega_o = \sqrt{\frac{1}{22,73 \cdot 10^{-3} \cdot 12,26 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{0,832 \cdot 53}{400}\right)} = 56,51 \text{ s}^{-1}$$

$k_M = 0,65$ dle grafu uvedeno na obr. 33.

$$i_{pM} = \kappa_M \cdot \left(\frac{U_{rM} - R_M \cdot I_{rM}}{R_{MBr}}\right) = 0,65 \cdot \left(\frac{400 - 0,832 \cdot 53}{0,832}\right) = 0,278 \text{ kA} \quad (233)$$

$$\frac{\tau_F}{\tau_M} = \frac{500}{12,26} = 40,78 \quad (234)$$

$$\frac{L_F}{L_{OF}} = \frac{120}{240} = 0,5 \quad (235)$$

Zvolené parametry dle grafy uvedeny na obr. 35, 36 a 37:

$$k_{3M} = 0,62 \quad (236)$$

$$k_{4M} = 1,3 \quad (237)$$

$$t_{pM} = 20 \quad (238)$$

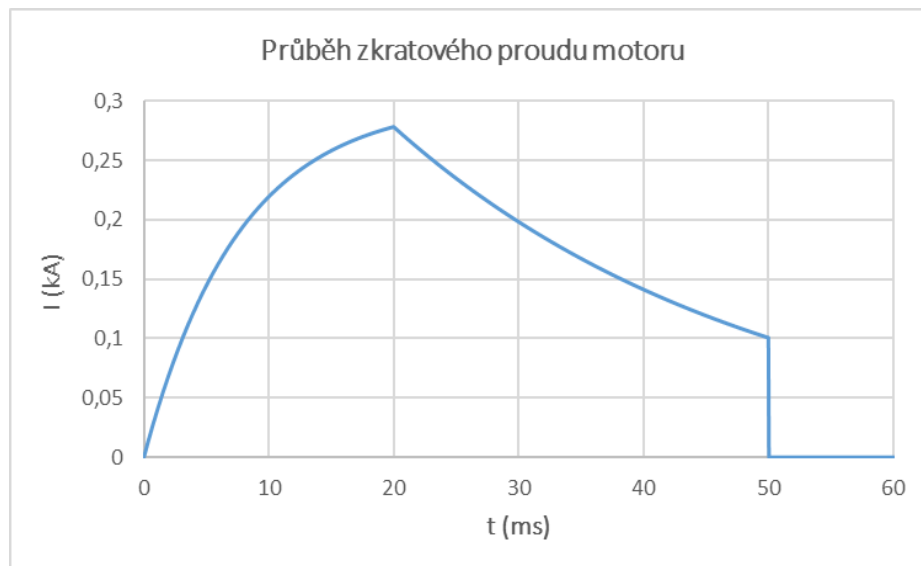
$$\tau_{1M} = 0,62 \cdot 12,26 = 7,60 \text{ ms} \quad (239)$$

$$\tau_{2M} = 1,3 \cdot 22,73 = 29,54 \text{ ms} \quad (240)$$

$$p_M = \frac{I_{kM}}{i_{pM}} = \frac{0}{0,28} = 0 \quad (241)$$

$$T_{kM} = 50 \text{ ms} \quad (242)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 42).



Obr. 42 Průběh stejnosměrného zkratového proudu stejnosměrného motoru při $I_{kM} = 0$.

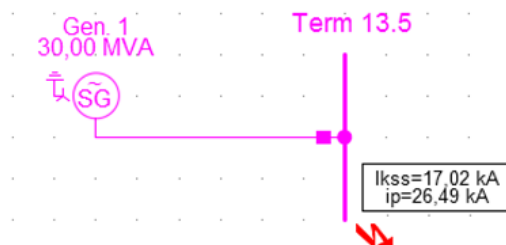
9. Praktické výpočty 3f zkratů ve střídavých sítích pomocí DigSILENTu

V této kapitole bude uvedeno metodika výpočtu zkratů pomocí modelovacího programu. Následující obrázky zahrnují jednotlivé případy, které byly řešené na začátku dle norma IEC 60909-0.

9.1. První případ

Schéma přímého připojení turbogenerátoru do sítě a s výslednými zkratovými proudy je na obr. 43. Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 2.

3f Synchronní generátor

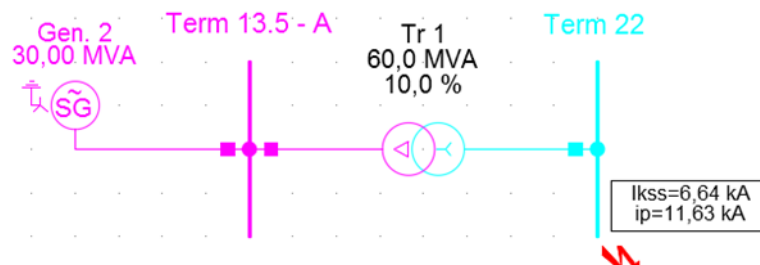


Obr. 43 Schéma připojení generátoru s výslednými zkratovými proudy.

9.2. Druhý případ

Schéma připojení generátoru s transformátorem a s výslednými zkratovými proudy je na obr. 44. Jejich vstupní parametry jsou uvedené v tabulce 3.

Generátor – Transformátor

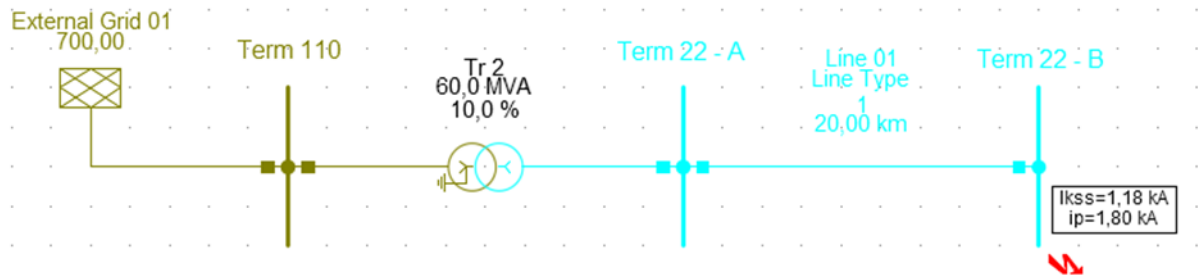


Obr. 44 Schéma připojení generátoru s transformátorem, s výslednými zkratovými proudy.

9.3. Třetí případ

Schéma připojení nadřazené soustavy do sítě přes snižovací transformátor s výslednými zkratovými proudy je na obr. 45 (viz níže). Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

Soustava – Transformátor – Vedení

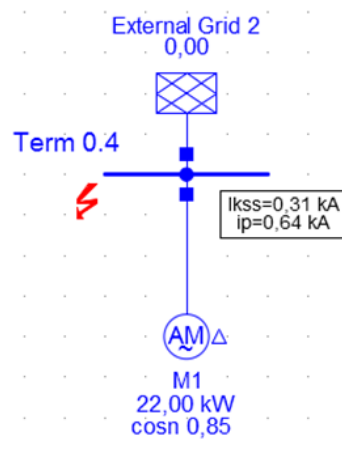


Obr. 45 Schéma připojení soustavu s transformátorem, s výslednými zkratovými proudy.

9.4. Čtvrtý případ

Schéma přímého připojení asynchronního motoru s připojovacím kabelem a s výslednými zkratovými proudy je na obr. 46. Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

3f Asynchronní motor

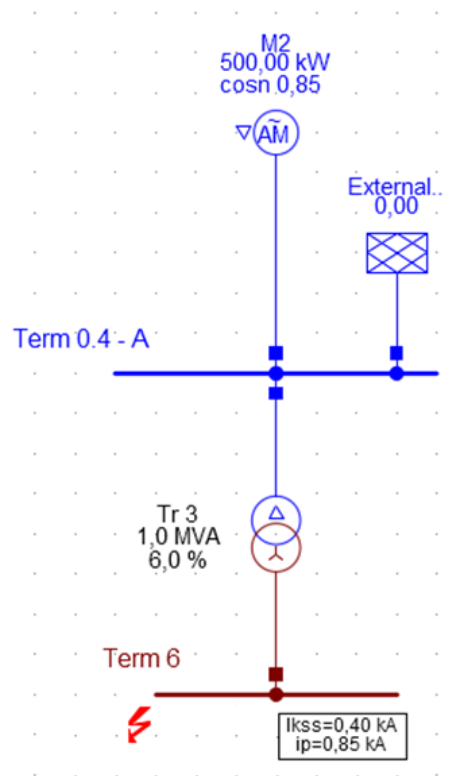


Obr. 46 Schéma přímého připojení motoru do sítě s výslednými zkratovými proudy.

9.5. Pátý případ

Schéma připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor s výslednými zkratovými proudy je na obr. 47 (viz níže). Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.

Motor – Transformátor



Obr. 47 Přímé připojení asynchronního motoru do sítě přes transformátor, s výslednými zkratovými proudy.

U těch dvou posledních případů jsou zahrnuté externí sítě z důvodu potřebného napájecího zdroje, to znamená, že každá síť se chová jako napěťový zdroj a nezpůsobuje žádný přídatný zkratový proud, tzv. mají zadaný nulový zkratový výkon a tím neovlivní výsledky zkratových proudů.

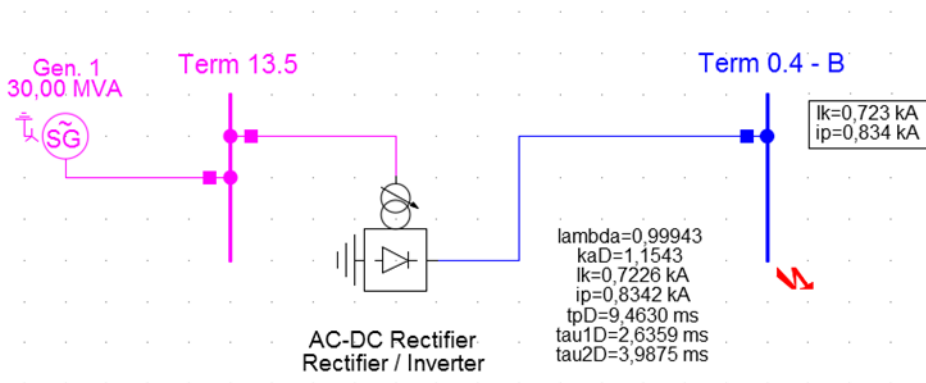
10. Praktické výpočty 3f zkratů ve stejnosměrných sítích pomocí DigSILENTu

Stejně jako v předchozí kapitole, budou zahrnuty výpočty pro jednotlivé případy, které byly spočítané na začátku. U stejnosměrných sítí je typické používání stejnosměrných motorů, kondenzátorů, chemických baterií a usměrňovačů pro spojení střídavé a stejnosměrné sítě.

Z hlediska napájení stejnosměrné sítě se pro tyto případy bude uvažovat napájení přímo přes generátor z důvodu, že předchozí výpočty byly spočítané při tomto napájení. Ve skutečnosti jsou stejnosměrné sítě napájené z 35, 22, 10, 6, 3 a 1 kV, ale mohou být napájené z jiné hladiny napětí, ale jen ve výjimečných případech.

10.1. Usměrňovač

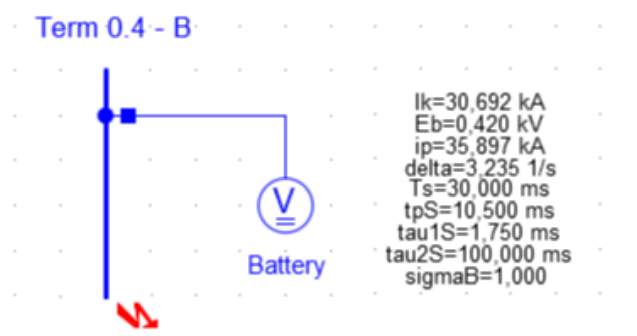
Schéma připojení usměrňovače s výslednými parametry je na obr. 48. Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 8.



Obr. 48 Schéma připojení usměrňovače s výslednými parametry.

10.2. Baterie

Schéma připojení baterie s výslednými parametry je na obr. 49, konfigurace baterie je v tabulce 9 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 10.

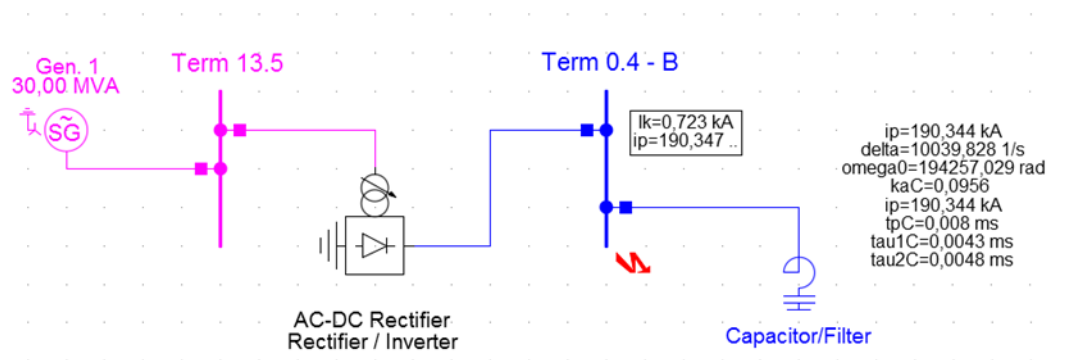


Obr. 49 Schéma připojení baterie s výslednými parametry.

Při výpočtu časové konstanty τ_1 a doby náběhu t_p se musí používat hodnoty z grafu, to znamená, že DIGSILENT odhaduje hodnoty, které nejsou zcela správné, a proto výsledné hodnoty jsou jiné než hodnoty, které byly spočítané. Pro přesnější výpočet se používají rovnice, které jsou uvedené v předchozí kapitole (výpočet baterie).

10.3. Kondenzátor

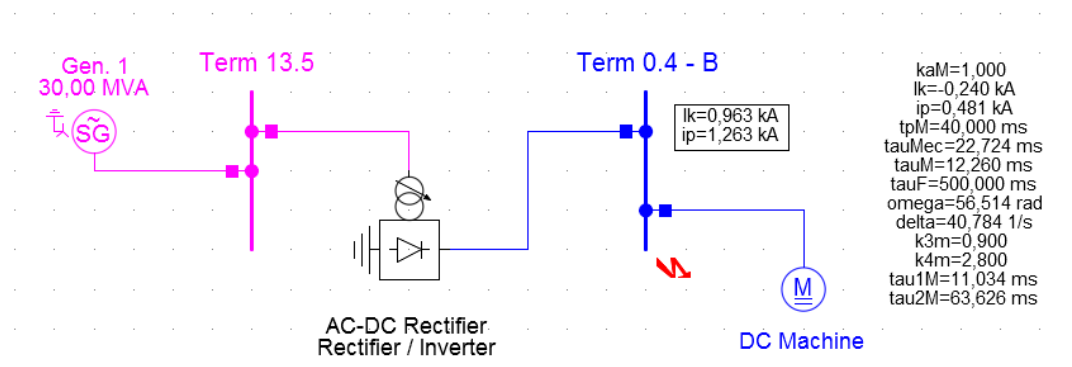
Schéma připojení kondenzátoru s výslednými parametry je na obr. 50. Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 11.



Obr. 50 Schéma připojení kondenzátoru s výslednými parametry.

10.4. Stejnosměrný motor s cizím buzením

Schéma připojení SSMCB s výslednými parametry je na obr. 51 a vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 12.



Obr. 51 Schéma připojení motoru s výslednými parametry.

Při výpočtu parametrů stejnosměrného motoru jsou zadané podmínky (viz kapitola 8.4), které ukazují, jaká metodika se musí používat v případě, že hodnota pro k_M je rovna jedné nebo nule. Dle výpočtů, správná hodnota by měla být pro $n_n = \text{konst.}$ rovno 0,65 (tzv. hodnota vyjádřena z grafu). DIGSILENT počítá naopak, to znamená, že výsledek je rovno jedné. Tím je zřejmé, že spočítaná hodnota podle softwaru je špatně. Stejně jako u baterie, hodnoty k_{3M} a k_{4M} nejsou správné a tím vychází nesprávně výsledné hodnoty pro τ_1 , τ_2 a t_{PM} . Přesnější vyjádření je, že tyto hodnoty nelze realizovat z důvodu, že nejsou dostupná data pro vytvoření matematických rovnic jako u zmíněné baterie. Při výpočtu stejnosměrného zkratového proudu kondenzátoru je důležité uvažovat veškeré odpory, které jsou na cestě od zdroje do místa zkratu, z důvodu, že každý odpor (bez ohledu na jeho velikost) je potřebný, k tomu, aby snižoval co nejvíc velikost zkratového proudu.

11. Výpočet korekce celkových zkratových proudů dle IEC 61660-1

Jsou-li připojeny baterie, kondenzátor a motor ke stejným přípojnícím, které jsou zároveň napájeny usměrňovačem, bude celkový zkratový proud na lokaci F1 roven součtu všech ekvivalentních zkratových proudů jednotlivých zařízení. Pro nárazové zkratové proudy, platí stejný způsob řešení. V tomto případě, není potřeba počítat korekční faktory z důvodu, že není připojena žádná společná větev, tzn. že korekční faktory jsou rovny jedné (viz obr. 20).

Vyjádření:

$$i(t) = \sum_{j=1}^m \left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{pj} \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1j}}}}{t_{pj}} \quad \text{kdy } 0 \leq t \leq t_{pj} \\ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1j}}} \\ \dot{i}_{pj} \left[(1 - \rho_j) e^{-\frac{(t-t_{pj})}{\tau_{2j}}} + \rho_j \right] \quad \text{kdy } t_{pj} \leq t \leq T_K \end{array} \right. \quad (243)$$

$$\dot{i}_{pj} = \frac{I_{kj}}{l_{pj}} \quad (244)$$

Pokud je připojena společná větev a nastane zkrat v lokaci F2 při stejné konfiguraci sítě, bude potřeba korigovat celkové zkratové proudy korekčními faktory. Pro vyjádření korekčních faktorů, je nutné počítat nejdřív částečné odpory uvedené v tabulce 7. Výpočty jsou uvedeny dále:

Parametry společné sítě:

$$R_k = 0,268 \, \Omega/\text{km}, \quad L_k = 0,22 \, \text{mH}/\text{km}, \quad l_k = 0,02 \, \text{km} \quad (245)$$

$$R_Y = 2 \cdot R_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,268 \cdot 0,02 = 10,72 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (246)$$

$$L_Y = 2 \cdot L_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ H} \quad (247)$$

Částečné odpory:

$$R_{iD} = \frac{U_n}{I_{kD}} - R_Y = \frac{13,5}{0,66752} - 10,72 \cdot 10^{-3} = 20,214 \ \Omega \quad (248)$$

$$R_{iB} = R_B + R_{BL} = 0,013 + 0 = 0,013 \ \Omega \quad (249)$$

$$R_{iC} = R_C + R_{CL} = 0,0002 + 0 = 0,0002 \ \Omega \quad (250)$$

$$R_{iM} = R_M + R_{ML} = 0,832 + 0 = 0,832 \ \Omega \quad (251)$$

$$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,013} + \frac{1}{0,832}} = 0,013 \ \Omega \quad (252)$$

$$R_{resB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}} = \frac{1}{\frac{1}{20,214} + \frac{1}{0,832}} = 0,799 \ \Omega \quad (253)$$

$$R_{resC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}} = \frac{1}{\frac{1}{20,214} + \frac{1}{0,013} + \frac{1}{0,832}} = 0,013 \ \Omega \quad (254)$$

$$R_{resM} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}} = 0,832 \ \Omega \quad (255)$$

Korekční faktory:

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \frac{R_{resD} \cdot (R_{iD} - R_Y)}{R_{resD} \cdot R_{iD} + R_{iD} \cdot R_Y + R_{resD} \cdot R_Y} = \\ &= \frac{0,013 \cdot (20,214 + 10,72 \cdot 10^{-3})}{0,013 \cdot 20,214 + 20,214 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3} + 0,013 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3}} = 0,544 \end{aligned} \quad (256)$$

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{R_{resB} \cdot (R_{iB} - R_Y)}{R_{resB} \cdot R_{iB} + R_{iB} \cdot R_Y + R_{resB} \cdot R_Y} = \\ &= \frac{0,799 \cdot (0,013 + 10,72 \cdot 10^{-3})}{0,799 \cdot 0,013 + 0,013 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3} + 0,799 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3}} = 0,993 \end{aligned} \quad (257)$$

Výpočet korekce celkových zkratových proudů dle IEC 61660-1

$$\begin{aligned}\sigma_C &= \frac{R_{resC} \cdot (R_{iC} - R_Y)}{R_{resC} \cdot R_{iC} + R_{iC} \cdot R_Y + R_{resC} \cdot R_Y} = \\ &= \frac{0,013 \cdot (0,0002 + 10,72 \cdot 10^{-3})}{0,013 \cdot 0,0002 + 0,0002 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3} + 0,013 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3}} = 0,985\end{aligned}\quad (258)$$

$$\begin{aligned}\sigma_M &= \frac{R_{resM} \cdot (R_{iM} - R_Y)}{R_{resM} \cdot R_{iM} + R_{iM} \cdot R_Y + R_{resM} \cdot R_Y} = \\ &= \frac{0,013 \cdot (0,832 + 10,72 \cdot 10^{-3})}{0,013 \cdot 0,832 + 0,832 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3} + 0,013 \cdot 10,72 \cdot 10^{-3}} = 0,551\end{aligned}\quad (259)$$

Nekorigované zkratové proudy:

$$I_{kD} = 0,667 \text{ kA}, \quad I_{pD} = 0,765 \text{ kA} \quad (260)$$

$$I_{kB} = 16,82 \text{ kA}, \quad I_{pB} = 18,73 \text{ kA} \quad (261)$$

$$I_{kC} = 0 \text{ kA}, \quad I_{pC} = 6,03 \text{ kA} \quad (262)$$

$$I_{kM} = 0,211 \text{ kA}, \quad I_{pM} = 0,275 \text{ kA} \quad (263)$$

Korigované zkratové proudy:

$$I_{kDcor} = I_{kD} \cdot \sigma_D = 0,667 \cdot 0,544 = 0,363 \text{ kA} \quad (264)$$

$$I_{pDcor} = I_{pD} \cdot \sigma_D = 0,765 \cdot 0,544 = 0,416 \text{ kA} \quad (265)$$

$$I_{kBcor} = I_{kB} \cdot \sigma_B = 16,82 \cdot 0,993 = 16,698 \text{ kA} \quad (266)$$

$$I_{pBcor} = I_{pB} \cdot \sigma_B = 18,73 \cdot 0,993 = 18,597 \text{ kA} \quad (267)$$

$$I_{kCcor} = I_{kC} \cdot \sigma_C = 0 \cdot 0,985 = 0 \text{ kA} \quad (268)$$

$$I_{pCcor} = I_{pC} \cdot \sigma_C = 6,03 \cdot 0,985 = 5,938 \text{ kA} \quad (269)$$

Výpočet korekce celkových zkratových proudů dle IEC 61660-1

$$I_{kMcor} = I_{kM} \cdot \sigma_M = 0,211 \cdot 0,551 = 0,116 \text{ kA} \quad (270)$$

$$I_{pMcor} = I_{pM} \cdot \sigma_M = 0,275 \cdot 0,551 = 0,151 \text{ kA} \quad (271)$$

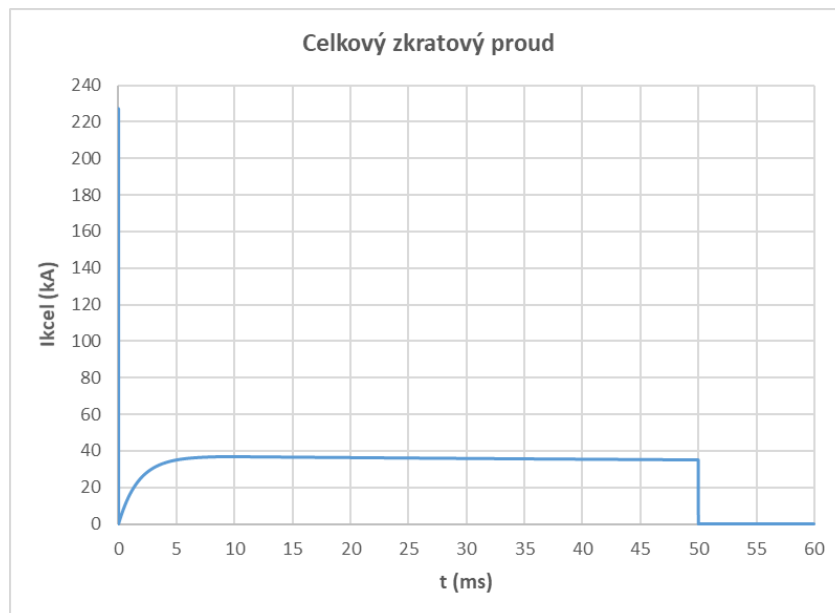
Celkové zkratové proudy:

Celkové zkratové proudy se vyjadřují stejným způsobem jak při vzniku zkratu v lokaci F1, tak při vzniku zkratu v lokaci F2 (viz rovnice 243 a 244). To znamená, že pokud se přidá společná větev, hodnoty celkových zkratových proudů budou menší, a to z důvodu, že se mění celkový odpor R_{jBr} a celková indukčnost L_{jBr} jednotlivých zařízení.

Grafické znázornění výsledných zkratových proudů se provádí součtem korigovaných zkratových proudů jednotlivých zařízení a jejich časových hodnot. Rovnice pro kreslení grafů jsou uvedeny v kapitole 6 pod číslem 90, 91 a 92. Graf celkového zkratového proudu při vzniku zkratu v lokaci F1 je znázorněn na obr. 52 a výsledky výpočtů jsou v tabulce 13. V případě vzniku zkratu v lokaci F2, je graf znázorněn na obr. 53 a výsledky výpočtů jsou v tabulce 14 (viz níže).

Tab. 13 Výsledné zkratové proudy v lokaci F1.

Celkové zkratové proudy					
Název	Hodnota	jednotka	Název	Hodnota	jednotka
I_{kDcor}	0.674	kA	I_{pDcor}	0.776	kA
I_{kBcor}	30.692	kA	I_{pBcor}	35.897	kA
I_{kCcor}	0.000	kA	I_{pCcor}	190.402	kA
I_{kMcor}	0.214	kA	I_{pMcor}	0.278	kA

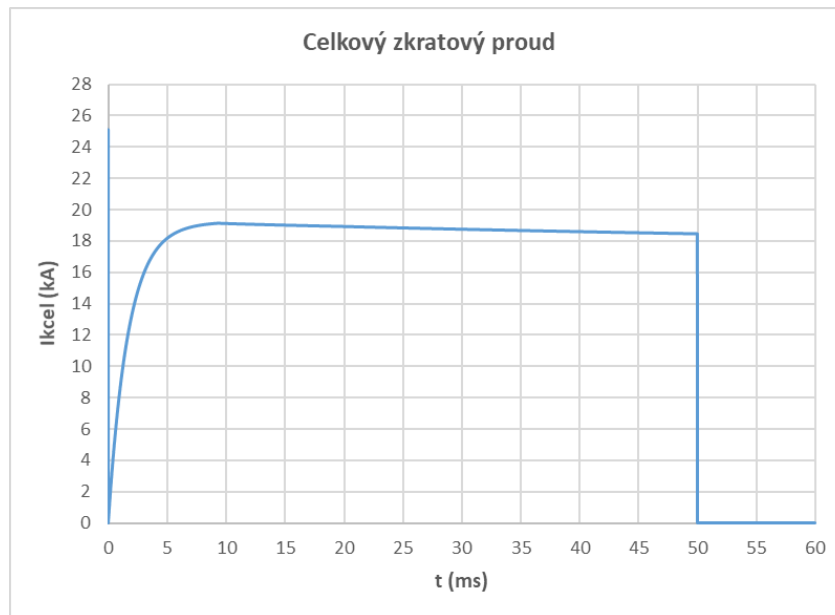


Obr. 52 Celkový zkratový proud v lokaci F1.

Výpočet korekce celkových zkratových proudů dle IEC 61660-1

Tab. 14 Výsledné zkratové proudy v lokaci F2.

Celkové zkratové proudy					
Název	Hodnota	jednotka	Název	Hodnota	jednotka
I_{kDcor}	0.363	kA	I_{pDcor}	0.416	kA
I_{kBcor}	16.698	kA	I_{pBcor}	18.597	kA
I_{kCcor}	0.000	kA	I_{pCcor}	5.938	kA
I_{kMcor}	0.116	kA	I_{pMcor}	0.151	kA



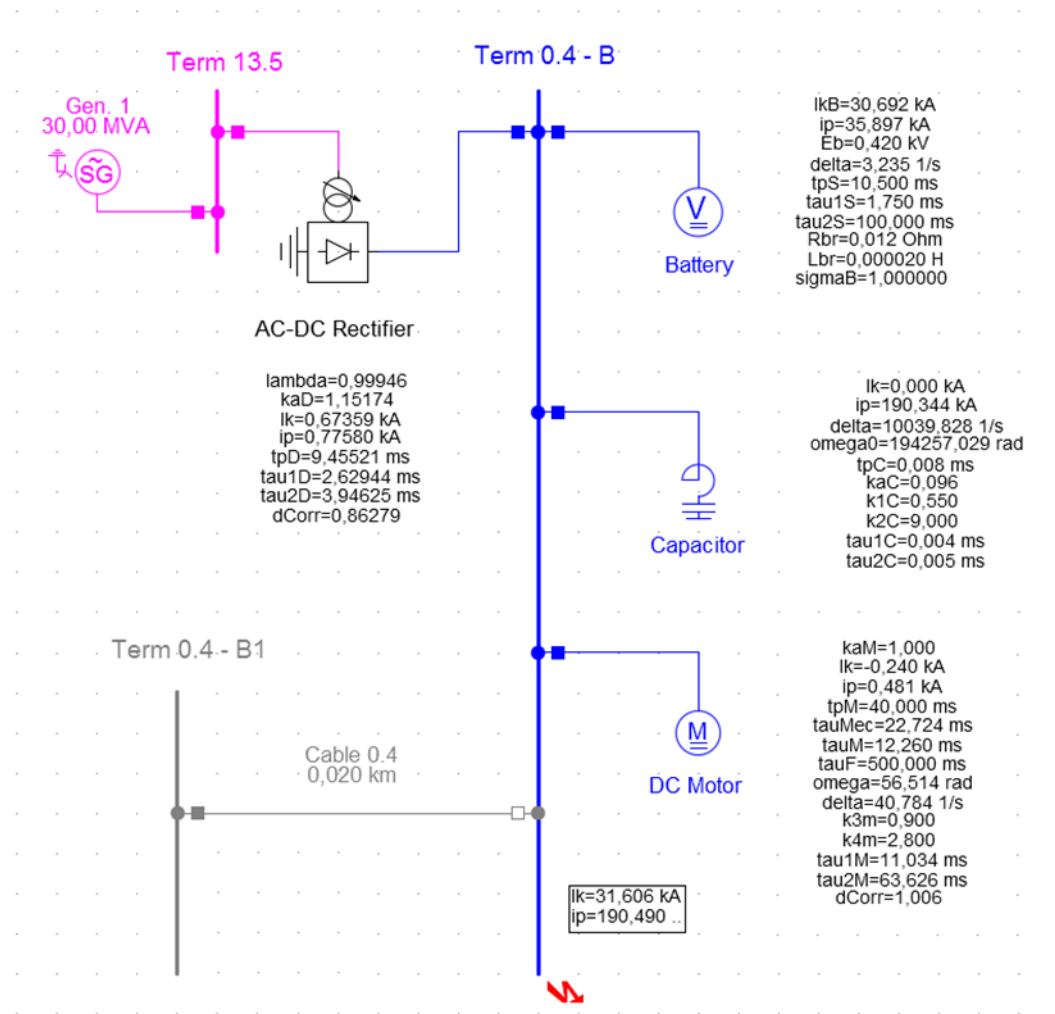
Obr. 53 Celkový zkratový proud v lokaci F2.

Cílem této kapitoly bylo ukázat správný postup pro výpočet korigovaných zkratových proudů. Pro výpočet se společnou větví (R_Y , L_Y), se postupuje stejným způsobem jako v kapitole 8 a pak se pokračuje korekcí. Z toho důvodu není nutné počítat ostatní parametry jako časové konstanty s novými hodnotami.

Okamžitá hodnota zkratového proudu $i_k(t)$ při vypnutí zkratu může být větší nebo rovna hodnotě ustáleného zkratového proudu I_k . To je z toho důvodu, že $i_k(t)$ závisí na době trvání zkratu T_k či působení ochranného systému.

12. Výpočet celkových zkratových proudů pomocí DigSILENTu

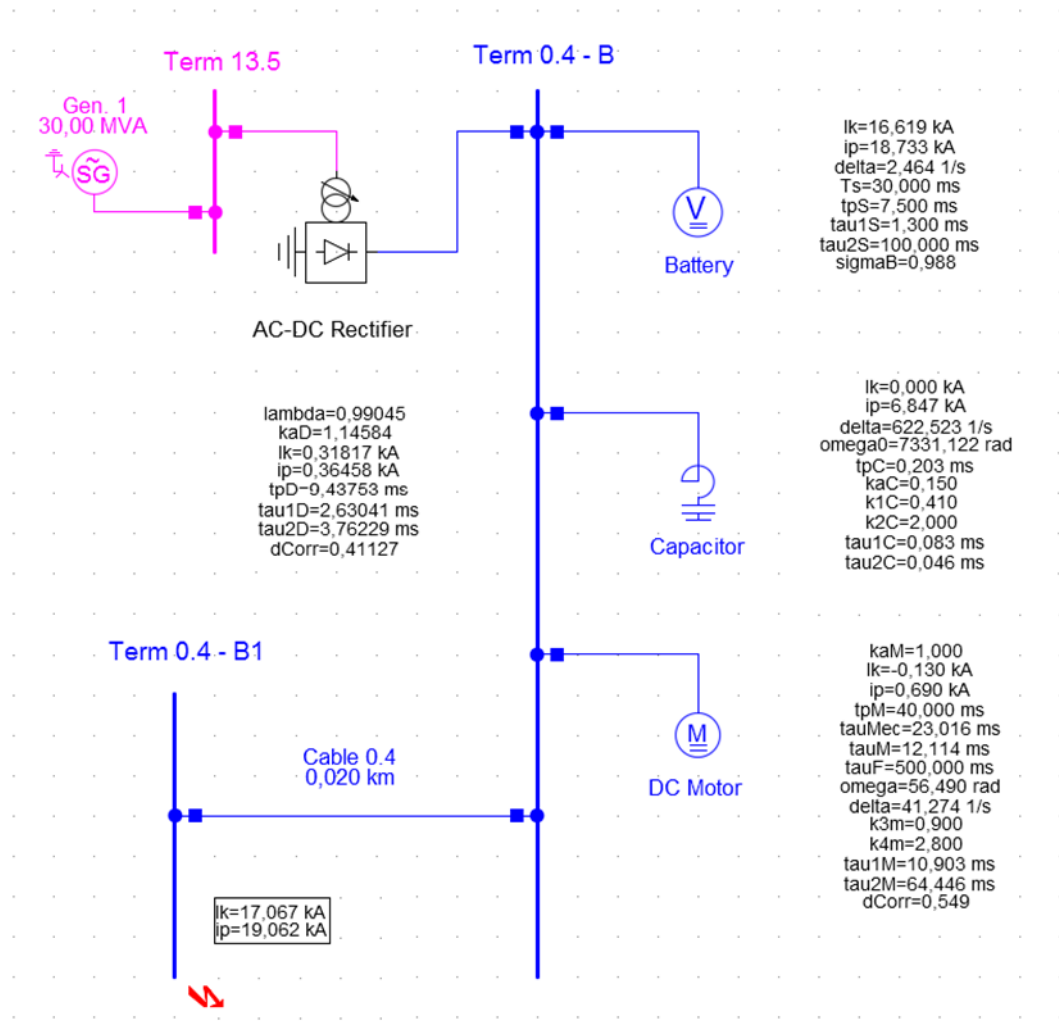
Výpočet celkového zkratového proudu v lokacích F1 a F2 pomocí DigSILENT PowerFactory s výsledky, které jsou uvedeny na obr. 54 pro lokaci F1 a na obr. 55 pro lokaci F2. Zařízení, která jsou připojena ke stejné přípojnici, jsou uvedena v předchozích kapitolách.



Obr. 54 Výsledný zkratový proud v lokaci F1.

V tomto případě jsou patrné nějaké chyby při kombinovaném připojení zařízení. Pokud vznikne zkrat v lokaci F1, korekční faktory každého zařízení mají být rovno jedné. V obrázku je vidět, že korekční faktor pro motor je větší než jedna a obráceně, korekční faktor usměrňovače vyjde menší než jedna, což jsou chybné výsledky.

Výpočet celkových zkratových proudů pomocí DigSILENTu



Obr. 55 Výsledný zkratový proud v lokaci F2.

V tomto případě lze vidět, že výsledné hodnoty se liší od hodnoty, které byly spočítané v předchozí kapitole, kromě opakující se chyby u některých výpočtů pro stejnosměrný motor.

13. Vyhodnocení při použití DigSILENT PowerFactory

Při výpočtech zkratových proudů v DigSILENTu bylo řečeno, že pokud se nějaká hodnota musí vyjádřit pomocí grafu, tak software má nastaven jinou metodiku, která není dostatečně přesná a vychází chybné výsledky než ty, které jsou prezentovány u všech zařízení. Při výpočtech zkratových proudů v různých scénářích jsou patrné různé chyby v závislosti na konfiguraci sítě a na hodnotách získaných z grafů. V kapitole 12 jsou uvedeny korekční faktory jako $dCorr$, ale pro tu baterii je uveden jako σ_B , což není správný název a u kondenzátoru, korekční faktor ani není možné uvést ve schématu sítě. Z důvodu, že tento software neobsahuje žádný výpočetní list, nelze porovnat či opravit možné chyby, které se vyskytují při výpočtech a také nelze vykreslit výsledný průběh zkratového proudu.

14. Porovnání výsledků při výpočtu zkratových proudů pomocí matematického řešení a pomocí DigSILENT PowerFactory

Pro praktický přehled výsledných hodnot při výpočtu zkratových proudů jsou uvedené dvě tabulky, kde budou prezentované rozdíly mezi nimi. V případě střídavé sítě, jsou uvedeny jenom hodnoty 3f souměrného zkratového proudu a jeho počátečního rázového zkratového proudu, zatímco, v případě stejnosměrné sítě jsou uvedeny nejen hodnoty zkratového proudu a nárazového zkratového proudu, ale také λ_D , k_D , doba nárůstu a časové konstanty. Výsledné hodnoty střídavé sítě jsou uvedeny v tabulce 15 a výsledné hodnoty stejnosměrné sítě v tabulkách 16a a 16b.

Tab. 15 Výsledné výpočty zkratových proudů ve střídavé síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.

Střídavá síť							
Metodika výpočtu		Pomocí Excelu			Pomocí DigSILENT		
Označení	Popis	Hodnoty proudů			Hodnoty proudů		
G	Generátor	$I_k^{(3)}$	17.02	kA	$I_k^{(3)}$	17.02	kA
		i_p	26.49	kA	i_p	26.49	kA
G + T	Generátor Transformátor	$I_k^{(3)}$	6.83	kA	$I_k^{(3)}$	6.64	kA
		i_p	11.87	kA	i_p	11.63	kA
S+T+V	Síť, Transformátor vedení	$I_k^{(3)}$	1.18	kA	$I_k^{(3)}$	1.18	kA
		i_p	1.80	kA	i_p	1.80	kA
M	Motor	$I_k^{(3)}$	0.31	kA	$I_k^{(3)}$	0.31	kA
		i_p	0.64	kA	i_p	0.64	kA
M+T	Motor transformátor	$I_k^{(3)}$	0.40	kA	$I_k^{(3)}$	0.40	kA
		i_p	0.85	kA	i_p	0.85	kA

Tab. 16a Výsledné výpočty zkratových proudů ve stejnosměrné síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.

Stejnosemerna síť							
Metodika výpočtu		Pomocí Excelu			Pomocí DigSILENT		
Označení	Popis	Výsledné hodnoty			Výsledné hodnoty		
D	Usměňovač	λ	0.9995	-	λ	0.9995	-
		k_D	1.1517	-	k_D	1.1517	-
		I_k	0.6736	kA	I_k	0.6736	kA
		i_p	0.7758	kA	i_p	0.7758	kA
		t_p	9.4552	ms	t_p	9.4552	ms
		τ_1	2.6294	ms	τ_1	2.6294	ms
		τ_2	3.9463	ms	τ_2	3.9463	ms
B	Baterie	E_B	0.420	kV	E_B	0.420	kV
		I_k	30.692	kA	I_k	30.692	kA
		i_p	35.897	kA	i_p	35.897	kA
		$1/\delta$	3.235	s-1	$1/\delta$	3.235	s-1
		τ_2	100	ms	τ_2	100	ms
		t_p	9.28	ms	t_p	10.50	ms
		τ_1	1.68	ms	τ_1	1.75	ms

Porovnání výsledků při výpočtů zkratových proudů pomocí matematického řešení a pomocí DigSILENT PowerFactory

Tab. 16b Výsledné výpočty zkratových proudů ve stejnosměrné síti dle Excelu a dle softwaru DigSILENT PowerFactory.

Stejnoseměrná síť							
Metodika výpočtu		Pomocí Excelu			Pomocí DigSILENT		
Označení	Popis	Výsledné hodnoty			Výsledné hodnoty		
C	Kondenzátor	I_k	0	kA	I_k	0	kA
		i_p	190.402	kA	i_p	190.344	kA
		δ	10000.000	-	δ	10039.828	s-1
		ω	194257.17	s-1	ω	194257.03	rad
		k_C	0.0952	-	k_C	0.0956	-
		t_p	0.0008	ms	t_p	0.0008	ms
		τ_1	0.0043	ms	τ_1	0.0043	ms
		τ_2	0.0048	ms	τ_2	0.0048	ms
M	Motor CB	k_M	0.65	-	k_M	1.00	-
		I_k	0.21	kA	I_k	0.24	kA
		i_p	0.28	kA	i_p	0.48	kA
		t_p	20.00	ms	t_p	40.00	ms
		τ_{mech}	22.73	ms	τ_{mech}	22.72	ms
		τ_F	12.26	ms	τ_F	12.26	ms
		ω	56.514	rad	ω	56.514	rad
		δ	40.783	s-1	δ	40.784	s-1
		k_3	0.62	-	k_3	0.90	-
		k_4	1.30	-	k_4	2.80	-
		τ_1	7.60	ms	τ_1	11.03	ms
		τ_2	29.54	ms	τ_2	63.63	ms

Z tabulky lze vidět, že jsou rozdíly (červeně označené) mezi výslednými hodnotami počítané v Excelu a výsledné hodnoty, které uvádí DigSILENT. V případě generátoru připojeného do sítě přes transformátor (viz tab. 15) vychází jiné hodnoty z důvodu, že DigSILENT spočítá zkratové proudy jenom s korekčním faktorem K_G , a neuvažuje korekční faktor transformátoru K_T , proto ty hodnoty vychází jinak.

Pro baterii jsou používány rovnice pro přesnější výpočet, a DigSILENT „odečítá“ hodnoty z grafu, což může způsobit rozdílné výsledky. V případě kondenzátoru, DigSILENT neuvažuje zcela správně výstupní parametry pro výpočet zkratu a tyto chyby jsou způsobené zaokrouhlováním vstupních hodnot.

Zvláštní případ je u stejnosměrného motoru, kde DigSILENT nebere v úvahu, že koeficient k_M závisí na hodnotě τ_{mech} a τ_F , a zadává jinou hodnotu, která neodpovídá správnému výsledku. Zkratové proudy počítá při 1 A, ale pro výpočet ostatních veličin používá hodnoty jmenovitého proudu (53 A), a stejně jako u baterie, při „odečtení“ hodnoty z grafu může dojít ke špatnému výsledku, a tím vychází různé i časové konstanty z důvodu, že jsou závislé na koeficientu k_3 a k_4 .

15. Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti dle IEC 60909-0 a IEC 61660-1

V této kapitole se bude řešit kompletní výpočet kombinované AC–DC sítě. Metodika výpočtu zkratových proudů na přípojnici A (bez společné větve, viz obr. 56) a na přípojnici B (se společnou větví, viz obr. 57). Tato síť bude obsahovat stejná zařízení používaná v kapitolách 4.1 a 8.1. Připojení: generátor přes vedení do přípojnice A, následuje usměrňovač a kabel. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab. 17 Vstupní parametry AC–DC sítě.

Generátor			Usměrňovač			Vedení 22 kV		
U_n	13.5	kV	U_n	13.5	kV	R_k	0.27	Ω/km
S_n	30	MVA	R_N	0.328	Ω	X_k	0.12	Ω/km
X''_d	6	%	X_N	0.389	Ω	l_k	0.02	km
r_s	5	%	f	50	Hz			
$\cos\phi$	0.8	-	U_{rLV}	0.4	kV	Kabel 0,4 kV		
			U_{rMV}	13.5	kV	l_k	0.01	km
			R_s	0.635	m Ω	R_k	0.268	Ω/km
			L_s	0.050	μH	L_k	0.22	mH/km

Hodnoty R_k a L_k stejnosměrného kabelu jsou pro jednu cestu (proto se pak násobí dvěma).

Výpočty bez kabelu:

$$R_G = \frac{r_s}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,304 \Omega \quad (272)$$

$$X_G = \frac{X''_d}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{13,5^2}{30} = 0,365 \Omega \quad (273)$$

$$Z_G = \sqrt{R_G^2 + X_G^2} = \sqrt{0,30^2 + 0,36^2} = 0,47 \Omega \quad (274)$$

$$c_{max} = 1,10 \text{ dle tab. 1}$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x''_d \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} = \frac{13,5}{13,5} \cdot \frac{1,1}{1 + \frac{6}{100} \cdot \sqrt{1 - 0,8^2}} = 1,06 \quad (275)$$

$$R_V = R_k \cdot l_k = 0,27 \cdot 0,02 = 0,0054 \Omega \quad (276)$$

$$X_V = X_k \cdot l_k = 0,12 \cdot 0,02 = 0,0023 \Omega \quad (277)$$

$$R_N = R_G \cdot K_G + R_V = 0,304 \cdot 1,06 + 0,0054 = 0,328 \Omega \quad (278)$$

$$X_N = X_G \cdot K_G + X_V = 0,365 \cdot 1,06 + 0,0023 = 0,389 \Omega \quad (279)$$

$$L_N = \frac{X_N}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,389}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,24 \text{ mH} \quad (280)$$

$$Z_N = \sqrt{R_N^2 + X_N^2} = \sqrt{0,328^2 + 0,389^2} = 0,509 \Omega \quad (281)$$

Parametry připojovacího kabelu:

$$R_{DL} = 2 \cdot R_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,268 \cdot 0 = 0 \Omega \quad (282)$$

$$L_{DL} = 2 \cdot L_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0 = 0 \text{ mH} \quad (283)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 0 \Omega, L_Y = 0 \text{ H.} \quad (284)$$

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y = 0,635 \cdot 10^{-3} + 0 + 0 = 0,635 \text{ m}\Omega \quad (285)$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{DL} \cdot l + L_Y = 0,050 \cdot 10^{-6} + 0 + 0 = 0,050 \mu\text{H} \quad (286)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,33}{0,36}\right)^2}{1 + \left(\frac{0,33}{0,39}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,33}\right)^2}} = 0,99946 \quad (287)$$

Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti dle IEC 60909-0 a IEC 61660-1

$$\varphi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} = \arctan \frac{1}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,3}\right)} = 0,87019 \quad (288)$$

$$\kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \varphi_D\right) \cot \varphi_D} \cdot \sin \varphi_D \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{L_{DBr}}{L_N}\right) \rightarrow \quad (289)$$

$$\rightarrow \kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + 0,87019\right) \cot 0,87019} \cdot \sin 0,87019 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{5 \cdot 10^{-8}}{1,239 \cdot 10^{-3}}\right) = 1,15174$$

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 0,99946 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1,1 \cdot 13,5}{\sqrt{3} \cdot 0,509} \cdot \frac{0,4}{13,5} = 0,674 \text{ kA} \quad (290)$$

$$i_{pD} = \kappa_D \cdot I_{kD} = 1,15174 \cdot 0,674 = 0,776 \text{ kA} \quad (291)$$

$$t_{pD} = (3 \cdot \kappa_D + 6) = (3 \cdot 1,15174 + 6) = 9,46 \text{ ms} \quad (292)$$

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N}\right)\right] = \left[2 + (1,152 - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-8}}{1,24 \cdot 10^{-3}}\right)\right] \rightarrow \quad (293)$$

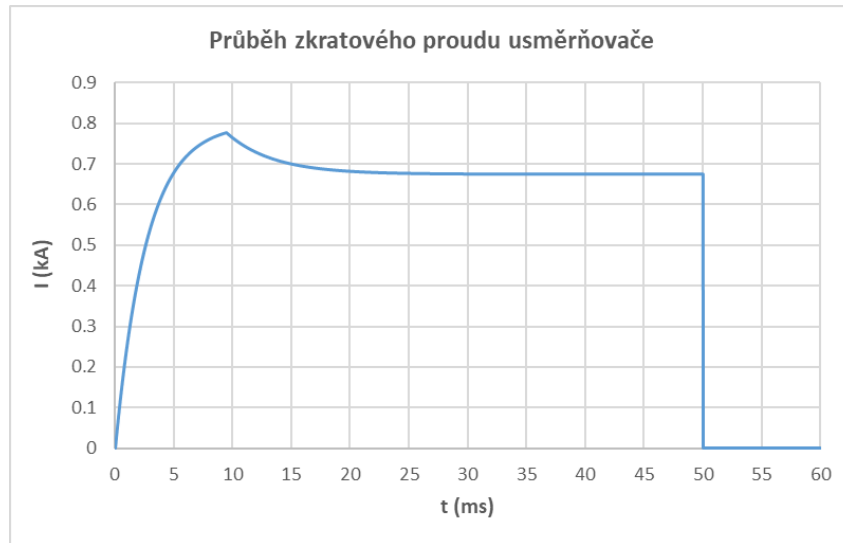
$$\rightarrow \tau_{1D} = 2,63 \text{ ms}$$

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} = \frac{2}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{6,35 \cdot 10^{-4}}{0,33}\right)} = 3,95 \text{ ms} \quad (294)$$

$$T_{kD} = 50 \text{ ms} \quad (295)$$

$$p_D = \frac{I_{kD}}{i_{pD}} = \frac{0,674}{0,776} = 0,87 \quad (296)$$

Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 56).



Obr. 56 Průběh zkratového proudu usměrňovače při zkratu na přípojnici A.

Výpočty s kabelem:

Parametry připojovacího kabelu:

$$R_{DL} = 2 \cdot R_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,268 \cdot 0 = 0 \Omega \quad (297)$$

$$L_{DL} = 2 \cdot L_k \cdot l_k = 2 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0 = 0 \text{ mH} \quad (298)$$

Parametry společná síť:

$$R_Y = 5,36 \cdot 10^{-3} \Omega, \quad L_Y = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ H.} \quad (299)$$

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y = 0,635 \cdot 10^{-3} + 0 + 5,36 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ m}\Omega \quad (300)$$

$$L_{DBr} = L_S + L'_{DL} \cdot l + L_Y = 0,050 \cdot 10^{-6} + 3,09 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 4,4 \cdot 10^{-6} = 4,45 \mu\text{H} \quad (301)$$

$$\lambda_D = \frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)^2}} = \frac{1 + \left(\frac{0,33}{0,36}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,33}{0,39}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,33}\right)^2}} = 0,99495 \quad (302)$$

$$\varphi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} = \arctan \frac{1}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,3}\right)} = 0,86485 \quad (303)$$

$$\kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \varphi_D\right) \cot \varphi_D} \cdot \sin \varphi_D \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{L_{DBr}}{L_N}\right) \rightarrow \quad (304)$$

$$\rightarrow \kappa_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + 0,86485\right) \cot 0,86485} \cdot \sin 0,86485 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{4,45 \cdot 10^{-6}}{1,239 \cdot 10^{-3}}\right) = 1,14876$$

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 0,99495 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1,1 \cdot 13,5}{\sqrt{3} \cdot 0,509} \cdot \frac{0,4}{13,5} = 0,671 \text{ kA} \quad (305)$$

$$i_{pD} = \kappa_D \cdot I_{kD} = 1,14876 \cdot 0,671 = 0,770 \text{ kA} \quad (306)$$

$$t_{pD} = (3 \cdot \kappa_D + 6) = (3 \cdot 1,14876 + 6) = 9,45 \text{ ms} \quad (307)$$

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N}\right)\right] = \left[2 + (1,149 - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{4,45 \cdot 10^{-6}}{1,24 \cdot 10^{-3}}\right)\right] \rightarrow \quad (308)$$

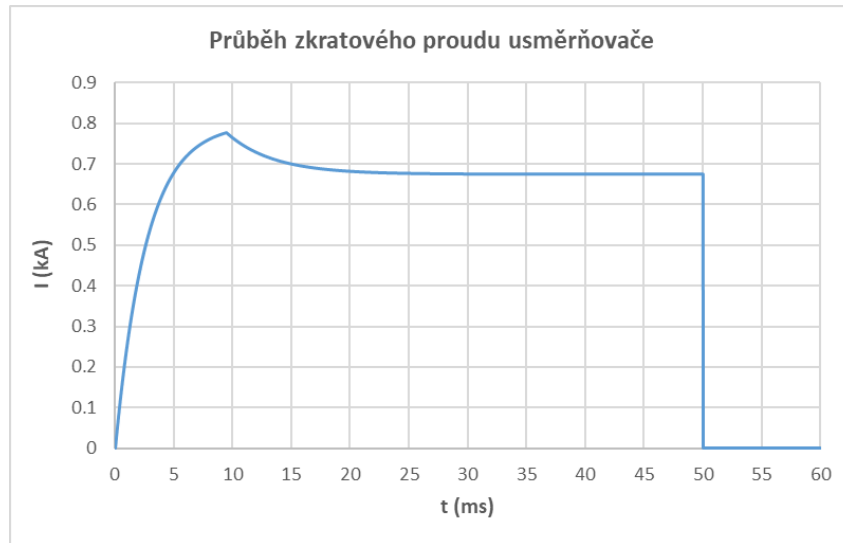
$$\rightarrow \tau_{1D} = 2,63 \text{ ms}$$

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)} = \frac{2}{\frac{0,33}{0,39} \cdot \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,33}\right)} = 3,85 \text{ ms} \quad (309)$$

$$T_{kD} = 50 \text{ ms} \quad (310)$$

$$p_D = \frac{I_{kD}}{i_{pD}} = \frac{0,671}{0,770} = 0,87 \quad (311)$$

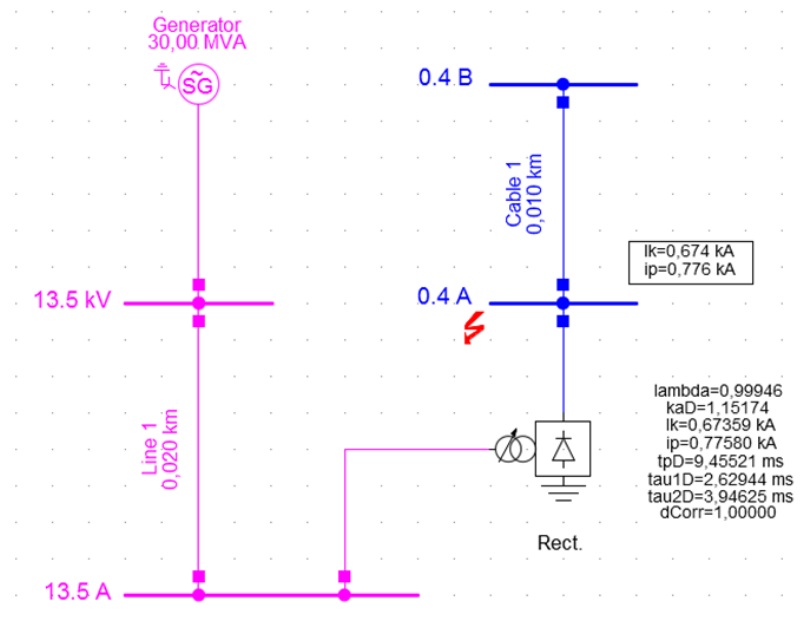
Pomocí rovnice (90), (91) a (92) lze získat výsledný průběh zkratového proudu (viz obr. 57).



Obr. 57 Průběh zkratového proudu usměrňovače při zkratu na přípojnici B.

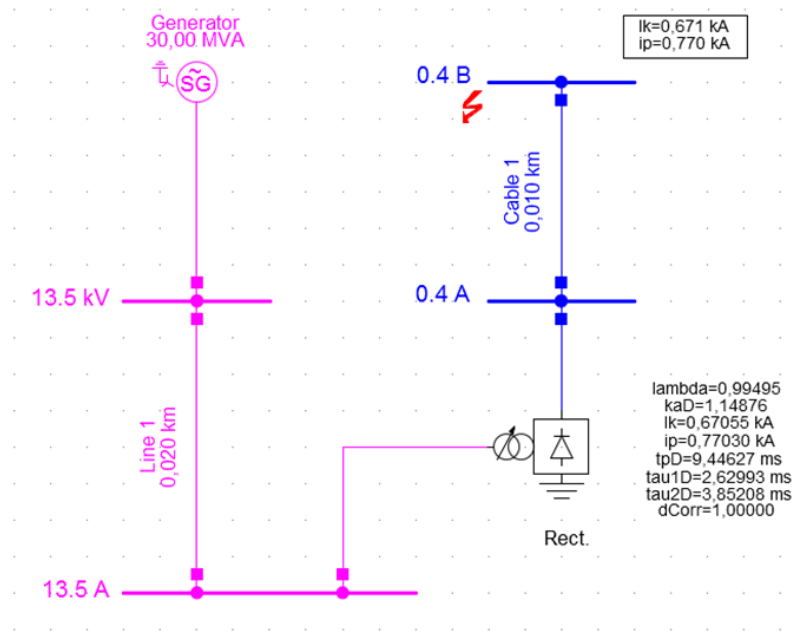
16. Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti pomocí DigSILENTu

Výpočet celkového zkratového proudu pomocí DigSILENT PowerFactory s výslednými parametry, je uveden na obr. 58 pro přípojnici A, a na obr. 59 pro přípojnici B. Konfigurace sítě a vstupní parametry jsou stejné jako v předchozí kapitole.



Obr. 58 Výsledky stejnosměrného zkratového proudu na přípojnici A.

Výpočet zkratových proudů v AC–DC síti pomocí DigSILENTu



Obr. 59 Výsledky stejnosměrného zkratového proudu na přípojnici B.

V této kapitole, lze pozorovat, že bez kombinace s jinými zařízení výsledné hodnoty z Excelu a z DigSILENTu vycházejí totožné. V předchozích kapitolách byly uvedeny různé konfigurace sítí s různými zařízeními, a pro jednoduché scénáře, kromě malé odchylky při výpočtech s DigSILENTem, jsou výsledné hodnoty prakticky stejné jako hodnoty spočítané v Excelu. Pouze v případech, kde konfigurace sítě obsahuje různá zařízení připojená do jedné přípojnice, vychází jiné hodnoty v DigSILENTu, které jsou způsobené chybou uvnitř softwaru.

17. Závěr

Diplomová práce byla prováděna za účelem analýzy chování elektrických sítí při poruchových stavech na základě matematického řešení podle normy IEC 60909-0 a IEC 61660-1, a pomocí modelovacího softwaru DigSILENT PowerFactory. V první části se vyskytují střídavé sítě. Tyto sítě jsou nejrozšířenější a nejpoužívanější z hlediska přenosu a distribuce elektrické energie, a proto jsou více studovány, abychom měli znalosti pro návrh selektivity a dimenzování elektrických přístrojů sloužících pro chránění jednotlivých úseků jako jsou např. vypínače. Taky jsou tyto sítě více citlivé z hlediska připojení zdrojů a zařízení či zátěže do tvrdé sítě. Všechny střídavé sítě mají zachovat konstantní hodnotu frekvence, která je pro celou Evropu 50 Hz. Každá jiná hodnota pod nebo nad tuto nastavenou hodnotu může ovlivňovat charakter sítě či může síť vypadnout ze synchronismu, který má za následek zničení zařízení, která jsou připojena v dané síti. Proto střídavá síť je mnohem komplikovanější než stejnosměrná síť a také velikost zkratových proudů u střídavých sítích může být větší. Velkou výhodou je, že elektrické veličiny napětí a proudu mají harmonický průběh, a je možné vypnout tyto zkraty při průchodu nulou a není potřeba složitých systémů pro zhasnutí oblouku či odpojení jakéhokoli úseku sítě.

Ve druhé části se vyskytují stejnosměrné sítě. Tyto sítě jsou více používané pro elektrické trakce či stejnosměrné pohony nebo také pro přenos energie (například na ostrovy) jako jsou u HVDC sítí. Výhodou těchto sítí je, že elektrické veličiny nemají harmonický průběh, to znamená, že připojení zařízení a zdrojů do tvrdé sítě je snadnější a není třeba investovat do obtížných systémů pro kontrolu či sledování charakteru dané sítě. Nevýhody jsou, že při zkratu propustí některá zařízení velké nárazové proudy, které mohou způsobit mechanické poškození nebo destrukci vypínacích mechanismů nebo také selhání ochranných systémů. Tyto zkratové proudy mohou být dostatečně velké a mohou mít doby nárůstu s velkou strmostí, jako je to v případě kondenzátorové baterie. Z hlediska selektivity pojistky se musí vzít v úvahu, že doba nárůstu zkratového proudu je mnohem kratší než doba působení nejrychlejší pojistky, tzn. že největší hodnota proudu se projeví skrz zařízení a zdroje, které jsou na cestě poruchového proudu a dojde ke škodlivým důsledkům. Proto je důležité omezovat co nejvíce velikost poruchových proudů, aby se zabránilo nebezpečným účinkům (tzv. silovým a tepelným). Pro omezení zkratového proudu se navrhuje a používají tzv. zkratové odporníky, které uměle zvýší odpor v cestě zkratového proudu a tím ho omezí. Nevýhoda odporníků je, že v provozním stavu způsobují zvýšené výkonové ztráty a úbytky napětí (podobně jako u reaktorů u AC sítí).

Poslední část obsahuje porovnání metodiky výpočtu zkratových proudů. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulkách jak pro střídavé, tak pro stejnosměrné sítě. V porovnání s modelovacím programem DIGSILENT PowerFactory jsou patrné nějaké chyby – jako špatně vyjádřené hodnoty v případě, že je potřeba používat grafy. V tomto softwaru jsou nastavené hodnoty a některé neodpovídají normě. Při výpočtu pomocí matematického řešení některé hodnoty neležely v daném rozsahu grafů v normě IEC 61660-1, a proto se zaokrouhlovalo na tu nejbližší hodnotu tak, aby to odpovídalo této normě. Vstupní hodnoty, které byly používány pro analýzu jednotlivých případů, jsou skutečné hodnoty, které se vzaly z katalogů a od skutečných zařízení, které jsou používány v praxi, například transformátory, generátory a motory. Výsledné průběhy zkratových proudů pro jednotlivá stejnosměrná zařízení jsou shodné s průběhy, které jsou uvedeny v normě IEC 61660-1. Při výpočtu stejnosměrných zkratů je důležité uvažovat všechny odpory, které jsou na cestě poruchového proudu, bez ohledu na jejich velikosti (např. odpor pojistky), a také veškeré vodiče s malou délkou. Tyto odpory mohou pomáhat ke snížení velikosti zkratového proudu a k přesnějšímu výpočtu stejnosměrných zkratových proudů.

Analýza elektrických sítí se střídavými a stejnosměrnými zkratovými proudy byla provedena za účelem vyhodnocení fungování softwaru DIGSILENT PowerFactory. Výsledky získané výpočtovým programem se liší s výpočty provedenými v Excelu v několika složitých scénářích. Tyto chyby jsou způsobeny získáním nepřesných údajů, když jsou vyjádřené pomocí grafů z normy IEC 61660-1. Výsledky jsou také ovlivněny zaokrouhlením vstupních parametrů v softwaru. Tyto podmínky představují neschopnost získat přesné výsledky. Kromě těchto odchylek, výpočty provedené s DigSILENTu odpovídají výpočtům stanoveným v normách. Díky tomuto výpočetnímu nástroji je možné provádět více scénářů s různými kombinacemi připojení elektrického zařízení.

Seznam použité literatury

- [1] IEC 60909-0. *International Standard – Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents*. Publikování v 2016-01, ed. 2.0. [cit. 2020-02-21]
- [2] IEC 61660-1. *International Standard – Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations. Part 1: Calculation of short-circuit currents*. Publikování v 1997-06. [cit. 2020-02-21]
- [3] Dr. Ing. Jiří Gurecký. *Elektroenergetika II – Zkratky v elektrizační soustavě*. Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB – TU Ostrava, 2016.
- [4] Dr. Ing. Zdeněk Medvec. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách – Návod do cvičení*. Ostrava, 1. Vyd. 2002 - ISBN 80-7878-856-9.
- [5] Dr. Ing. Zdeněk Medvec. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách – Výpočet zkratových proudů a dimenzování zařízení*. Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB – TU Ostrava, 2015.
- [6] Ing. Břetislav Stacho. *Network studies – Short Circuit calculation presentation*. ABB a.s. CZOPC Ostrava, 2018.
- [7] Elektroenergetika – *Zkratové proudy I*. [online]. URL: <http://www.elektro-energetika.cz/teorie_a_praxe/prezentace/RV_prezentace_zkratove_proudy_I.pdf> [cit. 2020-02-21]
- [8] LSK D.C. Motors – *Technical catalogue en*. [online]. URL: <www.nidec-netherlands.nl/media/2777-dc-motoren-lsk-technical-catalogue-en-iss201712-e-3805.pdf> [cit. 2020-02-21]

Seznam příloh

- [1] Excel – *Výpočet zkratových proudů ve střídavých a stejnosměrných sítích.*
- [2] Excel – *Výpočet pro vyjádření časové konstanty a doby nárůstu zkratového proudu baterie.*
- [3] Excel (tool) – *Calculator of short-circuit currents when fed from multiple sources.*
- [4] DigSILENT PowerFactory – *Výpočet zkratových proudů ve střídavých a stejnosměrných sítích.*
- [5] DigSILENT PowerFactory – *Calculator of short-circuit currents when fed from multiple sources.*