



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZKRATOVÉ PROUDY VE STEJNOSMĚRNÝCH SYSTÉMECH

SHORT CIRCUIT CURRENTS IN DC SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Robin Kolařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Paar, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Robin Kolařík

ID: 192964

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Zkratové proudy ve stejnosměrných systémech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rozsah využívání stejnosměrných systémů
2. Technologie HVDC, MVDC a LVDC v přenosových a distribučních systémech
3. Normalizační dokumenty k výpočtu zkratových proudů v stejnosměrných soustavách
4. Praktické ukázky výpočtu zkratových proudů pro zvolené systémy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Martin Paar, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRACT

Bakalářská práce se zabývá analýzou zkratových proudů ve stejnosměrných systémech. V práci je představena možnost aplikace stejnosměrného rozvodu nízkého napětí v komerčních a průmyslových budovách. Druhá část práce je věnována vysokonapěťovému stejnosměrnému přenosu. Praktická část práce se zabývá výpočtem zkratových proudů jednotlivých prvků a následně zkratovými poměry ve stejnosměrné síti. V závěru práce jsou zhodnoceny výhody a nevýhody mezi střídavým a stejnosměrným napětím a vhodnost použití v daných oblastech.

KLÍČOVÁ SLOVA: Stejnosměrný proud; stejnosměrná síť; nízké napětí; vysoké napětí; stejnosměrný zkrat; přenosová síť; stejnosměrné napětí; distribuční síť; střídavá síť; zkratový proud;

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the analysis of short-circuit currents in DC systems. The thesis introduces the possibility of application of low voltage DC distribution in commercial and industrial buildings. The second part is focused to high voltage direct current transmission. The practical part deals with the calculation of short-circuit currents of individual elements and subsequently with short-circuit conditions in the DC network. At the end of the work are evaluated advantages and disadvantages between AC and DC voltage and suitability of use in given areas.

KEY WORDS: Direct current; DC network; low voltage; High Voltage; DC short circuit; transmission network; DC voltage; distribution network; AC network; short-circuit current;

Bibliografická citace:

KOLAŘÍK, Robin. *Zkratové proudy ve stejnosměrných systémech*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2019. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Paar, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma zkratové proudy v stejnosměrných systémech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 27. května 2019

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu. Ing. Martinu Paarovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a návrhy při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 27. května 2019

.....

podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 SROVNÁNÍ AC A DC PŘENOSOVÝCH SÍTÍ	14
3 LVDC	16
3.1 OBLASTI POUŽITÍ	16
3.1.1 DOMÁCNOSTI	16
3.1.2 ELEKTROMOBILITA	16
3.1.3 DATA CENTRA	17
3.1.4 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE	17
3.1.5 TRAKCE	17
3.2 PROJEKTY LVDC	17
3.2.1 GREEN VILLAGE	17
3.2.2 GREENHOUSE (SKLENÍK)	18
3.2.3 REZIDENTNÍ BUDOVA	19
3.2.4 FINSKO	19
4 MVDC	21
5 VYBRANÉ HVDC PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	22
5.1 JEDNOPÓLOVÉ USPOŘÁDÁNÍ NESYMETRICKÉ	22
5.2 JEDNOPÓLOVÉ USPOŘÁDÁNÍ SYMETRICKÉ	22
5.3 DVOUPÓLOVÉ USPOŘÁDÁNÍ	23
5.4 BACK TO BACK SYSTÉM	23
5.5 VYBAVENÍ TERMINÁLU PRO HVDC PŘENOS	24
5.5.1 SÍŤOVĚ KOMUTOVANÝ PROUDOVÝ ZDROJ (LCC)	24
5.5.2 PŘIROZENĚ KOMUTOVANÝ NAPĚŤOVÝ ZDROJ (VSC)	24
5.5.3 TRANSFORMÁTOR	25
5.5.4 REAKTOR	25
5.5.5 FILTRY	26
5.6 VYBRANÉ SYSTÉMY HVDC VE SVĚTĚ	26
5.6.1 ČÍNA	26
5.6.2 ARGENTINA-BRAZÍLIE	26
5.6.3 DÁNSKO-ŠVÉDSKO	26
5.7 ZKRATY V HVDC SYSTÉMECH	27
6 ZKRATOVÉ PROUDY V DC SÍTÍCH	31
6.1 MĚNIČ	33
6.2 KONDENZÁTOR	33
6.3 BATERIE	33
6.4 VYBRANÉ NORMALIZAČNÍ DOKUMENTY	34
7 SIMULACE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ SÍTĚ	35
7.1 MĚNIČ	35
7.1.1 NÁHRADNÍ ZKRATOVÁ IMPEDANCE SÍTĚ	36
7.1.2 NÁHRADNÍ ZKRATOVÁ IMPEDANCE TRANSFORMÁTORU	37

7.1.3 SÉRIOVÁ TLUMIVKA	38
7.1.4 VÝPOČET APROXIMAČNÍ FUNKCE ZKRATOVÉHO PROUDU MĚNIČE	38
7.2 BATERIE.....	40
7.2.1 VÝPOČET APROXIMAČNÍ FUNKCE ZKRATOVÉHO PROUDU BATERIE	41
7.2.2 ZMĚNA VZDÁLENOSTI K MÍSTU ZKRATU.....	43
7.3 KONDENZÁTOR	45
8 SIMULACE	48
8.1 PARAMETRY PRVKŮ SÍTĚ.....	49
8.2 ZKRAT V MÍSTĚ F1.....	50
8.3 ZKRAT V MÍSTĚ F2.....	52
8.4 ZKRAT V MÍSTĚ F3.....	54
9 ZÁVĚR.....	56
POUŽITÁ LITERATURA	58
SEZNAM PŘÍLOH.....	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 DC a AC srovnání nákladů v závislosti na délce vedení, [5]</i>	15
<i>Obrázek 2 Schéma projektu green village [1]</i>	18
<i>Obrázek 3 LVDC RULES, schéma LVDC distribuční sítě [34]</i>	20
<i>Obrázek 4 Schéma jednopólového nesymetrického uspořádání s návratem proudu zemí[6]</i>	22
<i>Obrázek 5 Schéma symetrického jednopólového uspořádání [6]</i>	22
<i>Obrázek 6 Schéma dvoupólového uspořádání [6]</i>	23
<i>Obrázek 7 Zkratový proud z VSC měniče [38]</i>	28
<i>Obrázek 8 Schéma VSC měnič[44]</i>	28
<i>Obrázek 9 Zkratový proud ve střídavé síti a) zkrat na svorkách měniče na začátku HVDC systému b) zkrat za měničem na konci HVDC systému [40]</i>	28
<i>Obrázek 10 průběh zkratového proudu v HVDC systému a v napájené střídavé síti[40]</i>	29
<i>Obrázek 11 Typická aproximace průběhu zkratového proudu [17]</i>	31
<i>Obrázek 12 Schéma zapojení usměrňovače</i>	35
<i>Obrázek 13 Impedanční schéma zapojení usměrňovače</i>	38
<i>Obrázek 14 Průběh aproximační funkce zkratového proudu z měniče</i>	40
<i>Obrázek 15 Náhradní impedanční schéma zapojení baterie</i>	41
<i>Obrázek 16 Průběh aproximační funkce zkratového proudu baterie</i>	42
<i>Obrázek 17 Náhradní impedanční schéma baterie s vedením</i>	43
<i>Obrázek 18 Průběh aproximační funkce zkratového proudu z baterie na konci vedení</i>	44
<i>Obrázek 19 Průběhy zkratové funkce při změně vnitřních parametrů baterie</i>	44
<i>Obrázek 20 Náhradní schéma zapojení kondenzátoru a vedení</i>	45
<i>Obrázek 21 Průběh aproximační funkce zkratového proudu kondenzátoru</i>	47
<i>Obrázek 22 vliv změn vnitřních parametrů do místa zkratu na průběh aproximační funkce zkratového proudu</i>	47
<i>Obrázek 23 Předloha simulační sítě</i>	48
<i>Obrázek 24 Schéma simulační sítě</i>	49
<i>Obrázek 25 Aproximační funkce zkratového proudu v místě zkratu F1</i>	51
<i>Obrázek 26 Schéma na výpočet korekčního činitele</i>	53
<i>Obrázek 27 Aproximační funkce dílčích a celkového zkratového proudu v místě zkratu F2</i>	54
<i>Obrázek 28 Průběh aproximační zkratové funkce v místě zkratu F3</i>	55
<i>Obrázek 29 Závislost průběhu zkratové funkce na změnách vlastností kondenzátoru</i>	55

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Parametry prvků sítě pro zapojení usměrňovače.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 2 Vypočtené parametry prvků sítě s usměrňovačem</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 3 Vypočtené hodnoty aproximační zkratové funkce měniče.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 4 Parametry olověné staniční akumulátorové baterie</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5 Vypočtené hodnoty aproximační zkratové funkce bateriového systému</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6 Parametry vedení a baterie</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 7 Vypočtené hodnoty aproximační funkce zkratového proudu baterie v místě zkratu F243</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8 Parametry kondenzátoru a vedení.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 9 Vypočtené hodnoty aproximační funkce zkratového proudu kondenzátoru.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 10 Parametry rozvodny Moravany.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 11 Parametry transformátorů instalované v obci Moravany.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 12 Parametry vedení simulační sítě</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 13 Hodnoty aproximační funkce zkratového proudu v místě zkratu F1 z dílčích zdrojů .50</i>	<i>50</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
AC	střídavý proud – Alternating current
DC	stejnoseměrný proud – Direct current
HVDC	vysoké stejnosměrné napětí – High voltage direct current
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem – Insulated Gate Bipolar Transistor
LCC	síťově komutovaný proudový zdroj – Line commutated converters
LE	vodič, zem – line, earth
LED	elektroluminiscenční dioda – Light emitting diode
LL	vodič, vodič – line, line
LLE	vodič, vodič, zem – line, line, earth
LV	nízké napětí – Low voltage
LVDC	nízké stejnosměrné napětí – Low voltage direct current
MB-MMC	polovodičový víceúrovňový modulární měnič – Half Bridge Modular Multi Lever Converter
MHD	městská hromadná doprava
MVDC	stejnoseměrné napětí o střední velikosti – Medium voltage direct current
UHVDC	ultra vysokonapěťový stejnosměrný přenos – Ultra High voltage direct current
UPS	zdroj nepřerušovaného napájení – Uninterruptible power supply
VSC	napěťově komutovaný napěťový zdroj – Voltage source converters

Symbol	Popis	Jednotka
C_{AC}	Kapacita ve střídavém obvodu	F
C_{DC}	Kapacita stejnosměrného obvodu	F
E_B	Napětí baterie	V
E_C	Napětí na kondenzátoru před začátkem zkratu	V
I_{kD}	Kvazistacionární zkratový proud	A
I_{rM}	Jmenovitý proud motoru	A
L_B	Indukčnost baterií	H
L_{BBr}	Indukčnost staniční akumulátorové baterie	H
L_{BL}	Indukčnost vedení do uzlu od baterií	H
L_{CBr}	Indukčnost kondenzátoru	H

L_{CL}	Indukčnost vedení k uzlu od kondenzátoru	H
L_{DBr}	Zkratová indukčnost sítě za měničem	H
L_{DL}	Indukčnost vedení k uzlu	H
L_F	Ekvivalentní nasycená induktance buzení při zkratu	H
L_M	Indukčnost kotvy motoru	H
L_{MBr}	Indukčnost motoru	H
L_{ML}	Indukčnost vedení do uzlu od motoru	H
L_{OF}	Ekvivalentní nasycená induktance buzení naprázdno	H
L_Y	Indukčnost společné větve	H
L_S	Indukčnost vyhlazovací tlumivky	H
M_r	Jmenovitý moment motoru	Nm
R_B	Rezistivita baterií	Ω
R_{BBr}	Rezistivita staniční akumulátorové baterie	Ω
R_{BL}	Rezistivita vedení do uzlu od baterií	Ω
R_C	Náhradní rezistivita kondenzátoru	Ω
R_{CBr}	Rezistivita kondenzátoru	Ω
R_{CL}	Rezistivita vedení k uzlu od kondenzátoru	Ω
$R_{N,DC}$	Zkratová rezistence sítě za měničem	Ω
R_{DL}	Rezistivita vedení k uzlu	Ω
R_M	Rezistivita kotvy motoru	Ω
R_{MBr}	Rezistivita motoru	Ω
R_{ML}	Rezistivita vedení do uzlu od motoru	Ω
$R_{N,AC}$	Rezistence sítě před měničem	Ω
R_R	Zkratová rezistence komutační tlumivky	Ω
R_T	Zkratová rezistence transformátoru	Ω
R_Y	Rezistivita společné větve	Ω
R_p	Rezistence vedení před měničem	Ω
R_S	Rezistivita vyhlazovací tlumivky	Ω
U_n	Jmenovité efektivní napětí	V
U_{nB}	Jmenovité napětí baterie	V
U_{rM}	Jmenovité napětí motoru	V
U_{rTHV}	Napětí na vyšší straně transformátoru	V
U_{rTLV}	Napětí na nižší straně transformátoru	V

$X_{N,AC}$	Zkratová reaktance sítě před měničem	Ω
X_R	Zkratová reaktance komutační tlumivky	Ω
X_T	Zkratová reaktance transformátoru	Ω
X_p	Zkratová reaktance vedení před měničem	Ω
i_{pD}	Nárazový zkratový proud	A
n_0	Otáčky naprázdno motoru	min^{-1}
n_m	Jmenovité otáčky motoru	min^{-1}
t_{pD}	Doba k dosažení vrcholové hodnoty	s
τ_F	Časová konstanta buzení motoru	s
τ_M	Časová konstanta kotvy motoru	s
I''_{ks}	Počáteční rázový zkratový proud	A
R_Q	Rezistivita sítě	Ω
t	Čas	s
X_Q	Zkratová reaktance sítě	Ω
Z_Q	Zkratová impedance sítě	Ω
τ_1	Časová konstanta náběhu	s
τ_2	Časová konstanta zániku	s
J	Moment setrvačnosti	kg.m^2

1 ÚVOD

Náplní práce je analyzovat využití stejnosměrných sítí na úrovni distribuční a přenosové soustavy a uvést možné postupy výpočtu zkratů ve stejnosměrných sítích. Z ekonomického hlediska je kladen velký důraz na snížení přenosových ztrát elektrické energie. Jednou z možností snížení přenosových ztrát je použít stejnosměrné napětí místo střídavého, to vyžaduje vybudování nových systémů přizpůsobených na stejnosměrné napětí nebo nahrazení střídavé sítě stejnosměrnou. Srovnání střídavých a stejnosměrných sítí a vhodnosti použití pro různé aplikace je předmětem mnoha studií. Jedním z cílů této bakalářské práce je popsat výsledky studií zabývajících se využitím stejnosměrné sítě na úrovni distribučních sítí a komerčního využití. [1]

Při použití stejnosměrného systému v rezidenčním objektu dojde ke snížení ztrát oproti střídavému napětí. Díky sníženým ztrátám lze zmenšit průřez vodičů, ušetřit měď a snížit investiční náklady do kabeláže. Nejnákladnější položkou stejnosměrného systému je měnič, jehož cena mnohdy převyšuje investiční náklady elektrických rozvodů.

Stejnosemřné systémy jsou rozlišovány podle napěťové hladiny na LVDC, MVDC, HVDC a UHVDC. Velmi často je stejnosměrný systém využíván pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti pomocí HVDC systému. Tento systém využívá stejnosměrné napětí o vysoké hodnotě a jeho hlavní předností oproti střídavé síti je absence kapacitní a induktivní složky proudu v ustáleném stavu. Absencí jalové složky proudu v ustáleném stavu jsou ztráty vedením mnohem nižší, než je tomu ve střídavé síti, ovšem pořizovací náklady stejnosměrné sítě jsou mnohem vyšší z důvodu nutnosti použití výkonových polovodičových prvků.

Historie přenosu výkonu stejnosměrným napětím o vysoké hodnotě se datuje do poloviny 20. století, kdy vznikla první komerční linka využívající HVDC technologii. První komerční linka využívající technologii HVDC byla spuštěna v roce 1954 ve Švédsku. Spojovala švédské pobřeží s ostrovem Gotland. Přenosová kapacita dosahovala maximální hodnoty 20 MW o napětí 100 kV a její délka činí 98 kilometrů pod hladinou moře. [20]

V roce 1997 uvedla společnost ABB na trh novou technologii měničů využívající IGBT tranzistory. Tato technologie umožňuje v porovnání s tyristory plně ovládat řízení výkonu a díky menší prostorové náročnosti je vhodná pro vyvedení výkonu například z větrných farem na moři. Dalším milníkem vývoje HVDC systému je zavedení technologie HVDC Ultra, který umožňuje přenos ultra vysokého stejnosměrného napětí. Systém využívající technologii UHVDC se od roku 2017 buduje v Číně, napětí systému je 1100 kV a přenos probíhá na vzdálenost větší než 3000 km. [2], [42]

Aby bylo možné zajistit stabilní dodávku elektrické energie a zabránit poškození systému, je nutné tyto systémy chránit proti přetížení a případným zkratovým proudům. Pro návrh jištění je klíčová znalost velikosti a průběhu zkratového proudu, touto problematikou se zabývá normalizační dokument ČSN EN 61660, který udává postup výpočtu velikosti a průběhu aproximační funkce zkratového proudu ve stejnosměrném systému. První část normalizačního dokumentu, ČSN EN 61660-1, byla vydána v roce 1997 a v České republice nabyla platnosti v roce 1999. Rozsah platnosti této normy vzhledem k technologickému rozvoji v oblasti stejnosměrného přenosu je značně omezen.

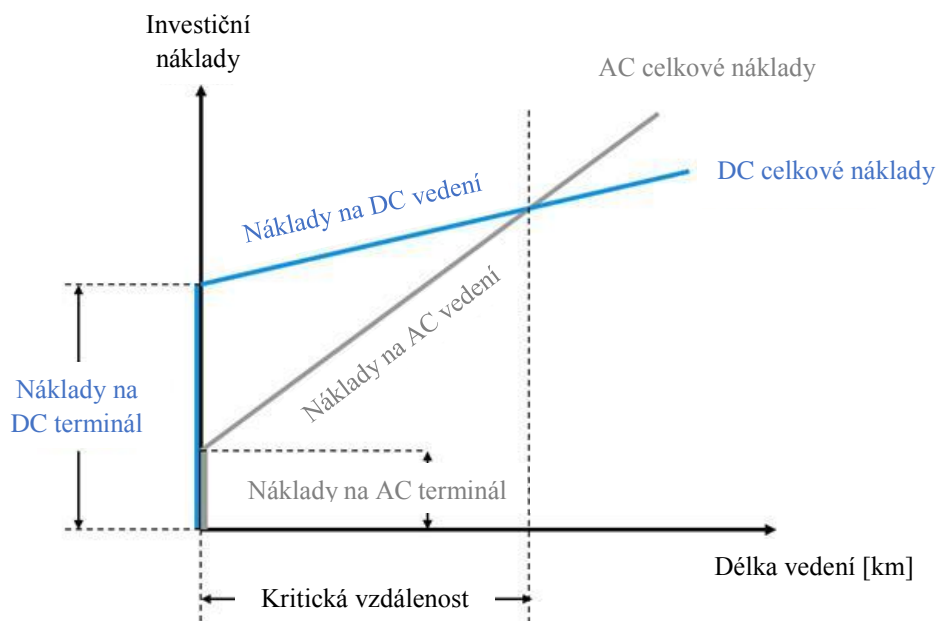
2 SROVNÁNÍ AC A DC PŘENOSOVÝCH SÍTÍ

V minulosti se zpočátku používal stejnosměrný proud. Přenos stejnosměrného proudu na větší vzdálenosti byl však velmi neefektivní z důvodu velkých přenosových ztrát, neboť neexistovala technologie, která by dokázala měnit hodnotu stejnosměrného napětí. Napětí, které vyráběl stejnosměrný generátor, se přímo přenášelo ke spotřebiteli bez změny velikosti. Přenos větších výkonů při malém napětí je velice neefektivní vlivem ztrát vedením, které způsobuje protékající proud. Po vynálezu transformátoru, který umožňuje jednoduchou a efektivní transformaci velikosti střídavého napětí, se pro přenos na velké vzdálenosti začalo používat střídavé napětí o vysoké hodnotě, to umožnilo přenášet velké výkony při menším proudu a tím snížit ztráty na vedení.

Základní výhodou stejnosměrného systému je absence parametrů střídavé sítě frekvence a fáze. To umožňuje snadnější řízení sítě a není potřeba udržet všechny generátory v synchronním režimu. U stejnosměrného napětí se tudíž v ustáleném stavu neuplatní kapacitní a induktivní složka proudu a ztráty vedením se sníží pouze na rezistivitu vedení. Stejnosměrnou přenosovou sítí je však velmi obtížné řídit, pokud je síť vedena s odbočkami, resp. pokud nejsou spojeny jen dva body. Z ekonomického hlediska je provozování stejnosměrné distribuční sítě s odbočkami neefektivní, neboť při nutnosti vystavět více konvertorových stanic se prudce zvýší náklady na výstavbu. Tento fakt předurčuje stejnosměrné sítě k distribuci elektrické energie na velké vzdálenosti z jednoho místa na druhé.

Při stejném jmenovitém efektivním napětí je možné zmenšit izolační vzdálenosti vodičů, umožňuje to zmenšit rozměry stožárů a izolátorů a snížit tak náklady na jejich výstavbu. Izolátory musí být projektovány na maximální vrcholovou hodnotu napětí, která je ve stejnosměrných sítích rovna efektivní hodnotě. Přenos výkonu stejnosměrnou sítí na malé vzdálenosti je v dnešní době neekonomické. Výstavba stejnosměrné sítě je finančně nákladnější než střídavá síť a projeví se zde ztráty v polovodičových prvcích, které jsou nezbytnou součástí konvertorových stanic.

V ustáleném stavu je nespornou výhodou stejnosměrného přenosu energie absence parametru kapacity, tento fakt umožňuje vést stejnosměrná vedení s vysokým napětím pod zemí na velké vzdálenosti. Kapacita vedení střídavého systému se musí kompenzovat tlumivkou, neboť velká kapacita vedení zapříčiňuje velké nabíjecí proudy. Čím delší kabelová trasa, tím větší indukčnost musí mít kompenzační tlumivka. Výstavba kabelového vedení je mnohonásobně dražší, než výstavba venkovního, ovšem kabelová instalace zabezpečuje ochranu proti okolním vlivům.



Obrázek 1 DC a AC srovnání nákladů v závislosti na délce vedení, [5]

Na obrázku 1 lze vidět srovnání AC a DC přenosových sítí v závislosti na délce vedení a nákladech na výstavbu a provoz. Náklady jsou také závislé na přenášeném výkonu. Střídavé sítě mají mnohem nižší náklady na výstavbu, avšak při přenosu na velké vzdálenosti se prudce zvyšují ztráty způsobené přenosem. Naopak stejnosměrný systém má velké pořizovací náklady, ale ztráty přenosem jsou velmi malé, při vedení 1000 km, se ztráty pohybují kolem 3 % [18]. Při určité délce vedení, která se nazývá „kritická vzdálenost“ dochází k vyrovnání nákladů na výstavbu a nákladů na provoz obou systémů, tato délka se obvykle pohybuje mezi 600-800 km. Při překročení kritické délky vedení je výhodnější výstavba stejnosměrné sítě, neboť ztráty ve střídavé síti převýší investiční a provozní náklady na síť stejnosměrnou. [5]

3 LVDC

LVDC (Low voltage direct current) je označení pro stejnosměrný systém, který využívá pro svůj provoz nebo přenos stejnosměrné napětí do hodnoty 1500 V. Jedná se o ekvivalent nízkého napětí v síti střídavé. Mezi hlavní výhodu LVDC sítě patří vyšší přenosová kapacita při použití stejné kabeláže jako u střídavé sítě. [1]

Ve střídavých systémech se nízké napětí považuje do hodnoty 1000 V efektivní hodnoty. Vrcholová hodnota střídavého napětí (peak) dosahuje velikosti $U_p = 1000 \cdot \sqrt{2}$, to je přibližně 1414,2 V. Pro jednoduchost je zvolila hodnota 1500 V jako horní hranice nízkého stejnosměrného napětí.

3.1 Oblasti použití

3.1.1 Domácnosti

V dnešní domácnosti v moderním světě lze nalézt spousty spotřebičů pracujících se stejnosměrným napětím, mnoho z nich denně používáme, například laptop, PC, audiotechnika, nabíječka na telefon, televize. Všechna tato zařízení střídavé napětí ze sítě usměrní, následně impulsním zdrojem přemění velikost napětí na požadovanou pracovní hodnotu, usměrní a vyhladí a teprve poté je toto napětí využíváno k chodu zařízení. V posledních letech dochází k masivnímu rozvoji LED technologie, díky nízké spotřebě elektrické energie postupně nahrazuje klasické žárovky. Tato LED technologie vyžaduje také stejnosměrné napětí, které se prvně usměrní a dále upraví na požadovanou hodnotu. S rozvojem polovodičových technologií roste i myšlenka opustit od střídavého napětí i na úrovni domácností.

3.1.2 Elektromobilita

S rozvojem elektromobility dochází k instalacím a vývoji rychlonabíjecích stanic. V rámci podpory elektromobility jsou stanice instalovány na parkoviště u obchodních center a poblíž velkých výrobních objektů. Vznikají také velké dobíjecí stanice podobné čerpacím stanicím. Elektromobil je možné nabíjet i v domácích podmínkách, avšak každá domácnost nemá k dispozici parkovací místo či garáž, kde by bylo možné auto nabíjet. Limitujícím faktorem pro domácí nabíjecí stanice je jejich výkon, za předpokladu standardní elektroinstalace v rodinném domě, je jednofázový zásuvkový obvod jištěn 16 A, i kdyby byla účinnost nabíječky 100 %, není možné nabíjet dlouhodobě vyšším nabíjecím výkonem než 3680 W.

S rozvojem výrobních technologií akumulátorů se zvyšuje i kapacita baterií, například baterie Tesly modelu S mohou mít kapacitu 100 kWh. Doba nabití akumulátoru touto nabíječkou se tedy pohybuje v řádech desítek hodin.

Standardní rychlonabíjecí stanice od firmy Tesla jsou schopny nabíjet 2 automobily zároveň s celkovým výkonem až 135 kW a maximálně 120 kW na jedno auto. Elektromobil Tesla model S s kapacitou baterií 100 kWh garantuje výrobce nabití na 80% kapacity za 45 minut a plné nabití za 80 minut. [43] Rozvoj elektromobility značně zatíží elektrická přenosová vedení, ovšem bude možné elektromobily částečně využívat jako akumulátor elektrické energie.

3.1.3 Data centra

V posledním desetiletí se datová centra napájená stejnosměrným systémem stala možnou alternativou. Z pilotních projektů uvedly společnosti využívající tato datová centra, že úspory energie dosahují přibližně 10-30 %, o 15 % se snížily náklady na výstavbu, zjednodušila se konstrukce a jsou kladeny menší požadavky na chlazení. Zvýšila se také spolehlivost. Nejnovější projekty pracují se stejnosměrným napětím 380 V. Nespornou výhodou napájení stejnosměrným napětím je fakt, že není potřeba kompenzovat účinník odběru, spínané zdroje, které napájí data centra a PC mají účinník odběru cca $\lambda=0,6$, tudíž je nezbytná kompenzace. Ke snížení investičních nákladů přispěl fakt, že záložní zdroje energie (UPS), pracující ve stejnosměrné síti (DC UPS) jsou o 10 % až 20 % levnější, než UPS pracující do střídavé sítě (AC UPS). [1]

3.1.4 Obnovitelné zdroje energie

Obnovitelné zdroje energie, například solární systémy produkují stejnosměrný proud, tudíž je nutné pomocí střídačů tento proud konvertovat na střídavý. Následně transportovat k odběrateli a zde je ve většině provedeno usměrnění. Tím dochází ke zbytečným ztrátám elektrické energie.

3.1.5 Trakce

Pro trakci v městské zástavbě se stejnosměrné napětí začalo používat především kvůli snadné regulaci stejnosměrných motorů. Pouhou změnou sériového odporu lze měnit otáčky stroje. Napěťová hladina pozemních městských trakcí je v České republice standardní 600 V, Pražské metro je napájeno 750 V stejnosměrného napětí. S rozvojem měničů se stejnosměrné motory pro pohon městské hromadné dopravy dnes již nepoužívají. Nahradili je asynchronní stroje, které jsou regulovány pomocí frekvenčních měničů. Například firma Škoda Transportation a.s. využívá k řízení asynchronních motorů mikroprocesorově řízené IGBT měniče, které umožňují také rekuperaci energie [33]. Napájení trakční sítě je realizováno ze střídavé sítě vysokého napětí (22/35 kV), pomocí impulsních měničů. Tyto měniče mohou být šesti, dvanácti nebo 24pulzní, podle potřebných parametrů sítě a především podle potřebného zvlnění napětí.

3.2 Projekty LVDC

Napěťová hladina použitá ve stejnosměrných sítích je předmětem mnoha výzkumů a studií. Studie z roku 2010 došla k závěru, že pro domácí aplikace je nejvhodnější napěťová hladina 48 V stejnosměrných a 400 V stejnosměrných pro komerční využití. Ovšem při použití 48 V v domácnostech vznikají velké ztráty vedením vlivem většího procházejícího proudu. Nízká napěťová hladina byla zvolena hlavně pro ochranu spotřebitelů.

V následujících kapitolách budou popsány projekty pro přechod různých typů objektů na stejnosměrnou síť. [1]

3.2.1 Green Village

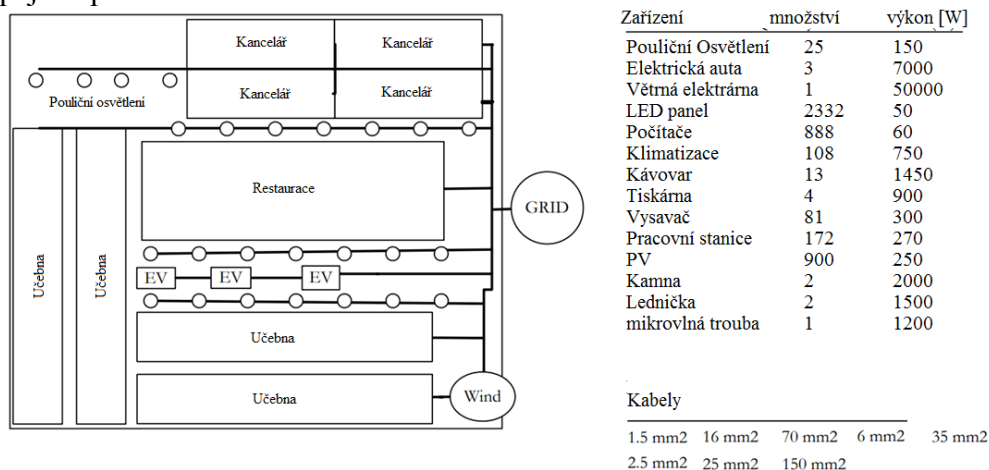
Jedná se o malé experimentální město v Holandsku, které se snaží realizovat živé prostředí, ve kterém se rozšiřují nejrůznější technologické inovace. Projekt plánuje také rozmístění kanceláří, restaurací, přednáškových místností a dalších, to vše bude napájeno z obnovitelných zdrojů. Jako páteřní síť bude použita DC síť.

Projekt počítá se všemi spotřebiči přizpůsobenými na stejnosměrný proud, kdy v budoucnu budou k dispozici spotřebiče s napájením přizpůsobeným na stejnosměrnou síť. Cena spotřebičů

na stejnosměrný proud zůstane zachována, jako současné spotřebiče na střídavý proud. Scénář, ve kterém by zůstaly zachovány AC spotřebiče připojené na DC síť se neuvažuje, neboť by nešlo o smysluplné srovnání a výsledný projekt by měl horší výsledky než systém používaný dnes.

Projekt vznikl v Holandsku, v Haagu na technické univerzitě TU Delft. Původní plán byl mnohem větší než vybudovaný projekt. Ve městě se nacházejí 3 typy budov:

- Kanceláře, zahrnují také konferenční místnosti a oddychové zóny
- Přednáškové místnosti, 24 místnosti pro 30 studentů, obsahující počítače, notebooky, klimatizaci a LED světla
- Restaurace, veškeré vybavení pracuje se stejnosměrným napětím, pouze lednička je napájena přes měnič.



Obrázek 2 Schéma projektu green village [1]

Na střeších všech budov je rozmístěno celkem 900 solárních panelů, které jsou připojeny k rozvodné síti. Každý ze tří typů budov má vlastní DC/DC měnič, který reguluje tok energie mezi budovou a distribuční sítí s účinností 98,5 %. Při simulaci bylo zjištěno, že požití stejnosměrného systému je jen o 0,2 % účinnější než střídavý systém. Původní odhady předpokládaly úsporu 1,5 %. Tento fakt zapříčinily ztráty ve stejnosměrných systémech. Tyto ztráty jsou způsobené především ztráty v měničích, které jsou ve stejnosměrných sítích nutnou součástí, neboť jiný druh budovy, vyžaduje jinou napěťovou hladinu. Na výslednou účinnost má vliv mnoho faktorů, například pokud solární a větrné elektrárny neprodukují elektrickou energii, je potřeba energii dodávat ze sítě přes MV/LV DC měnič a tudíž dochází k větším ztrátám. [1]

Celková investice do projektu byla o třetinu vyšší, než při použití střídavé sítě. Návratnost při použití stejnosměrné sítě je tudíž v dnešní době téměř nulová. Nejnákladnější položkou byl hlavní MV/LV DC měnič.

Pro snížení ztrát by bylo nutné snížit počet měničů, další možností by bylo zvýšit účinnost MV/LV DC měniče, neboť právě přes tento měnič teče veškerá energie.

3.2.2 Greenhouse (skleník)

Cílem projektu je realizace kompletního skleníku se stejnosměrným systémem rozvodu elektrické energie, který by byl v ideálních podmínkách zcela nezávislý na distribuční síti. Objekt by měl disponovat solární elektrárnou o výkonu 2 MW a kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla. Skleník je připojen k síti přes MV/LV DC měnič o výkonu 700 kW. Odporové ztráty v AC síti převažují nad ztrátami v měničích, což vede k úspoře 1,27 % elektrické energie při zachování

původní kabeláže. Pokud použijeme kabeláž s menším průřezem pro stejnosměrný systém, kdy napětí neklesne pod 5 %, ztráty se zvýší o 0,36 %, avšak spotřeba mědi se sníží o 65 %.

Přesto jsou pořizovací náklady stejnosměrného systému 2x vyšší, než při použití střídavého napětí. Pořizovací náklady na kabeláž klesnou, polovinu investičních nákladů tvoří DC/DC měnič, jehož cena je přibližně stejná, jako celkové investice do kabeláže. [1]

3.2.3 Rezidentní budova

Simulace šesti patrové budovy s kanceláři, kavárnami a přednáškovými aulami. Na budově se nachází solární panely, jejichž výkon je zanedbatelný s celkovou energetickou náročností budovy. Při ponechání standardní kabeláže pro střídavý systém, je stejnosměrný systém účinnější o 1,06 %, ovšem velmi záleží na typu zatížení, resp. jaké spotřebiče jsou v budově instalovány. Při použití vodičů s menším průřezem pro stejnosměrný systém klesla úspora energie o 0,79 %, avšak spotřeba mědi klesla o 54 %. Ovšem investice při použití stejnosměrného systému je více než 2x vyšší, než při použití střídavého napětí kvůli potřebnému DC/DC měnič, který napájí budou z distribuční sítě. [1]

3.2.4 Finsko

V roce 2015 byl zahájen projekt „LVDC RULES“, který se zabývá aplikací LVDC sítí v průmyslovém a distribučním měřítku. Cílem projektu je najít nejlepší způsob, jak využít dosavadní vědecké poznatky k aplikaci LVDC do distribučních sítí. Projekt je rozdělen do čtyř hlavních témat, která jsou: [34]

- Funkčnost a technologická řešení
- Dopad na distribuční sítě
- Využití obnovitelných zdrojů
- Standardizace a doporučené postupy

Pro maximální využití přenosové schopnosti sítě byla zvolena hodnota napětí 1500 V. V této aplikaci byla zvolena bipolární struktura ± 750 V s použitím nulového vodiče. Díky bipolární struktuře lze použít měniče s provozním napětím 750 V. Distribuční síť je provozována jako neuzemněná IT, avšak u koncového zákazníka je využita stávající síť TN-S. Použití sítě TN-S u koncového zákazníka vyžaduje galvanické oddělení mezi zákazníkem a distribuční sítí. Galvanické oddělení zajišťují DC/DC měniče, které zároveň snižují napětí ze 750 V na 400 V, které je následně u koncového zákazníka DC/AC měničem transformováno na standardní 230/400 V střídavých. Kvalitu dodávky elektrické energie zajišťuje především DC/AC měnič, v podstatě není kvalita stejnosměrného napětí v síti omezujícím faktorem. [34]

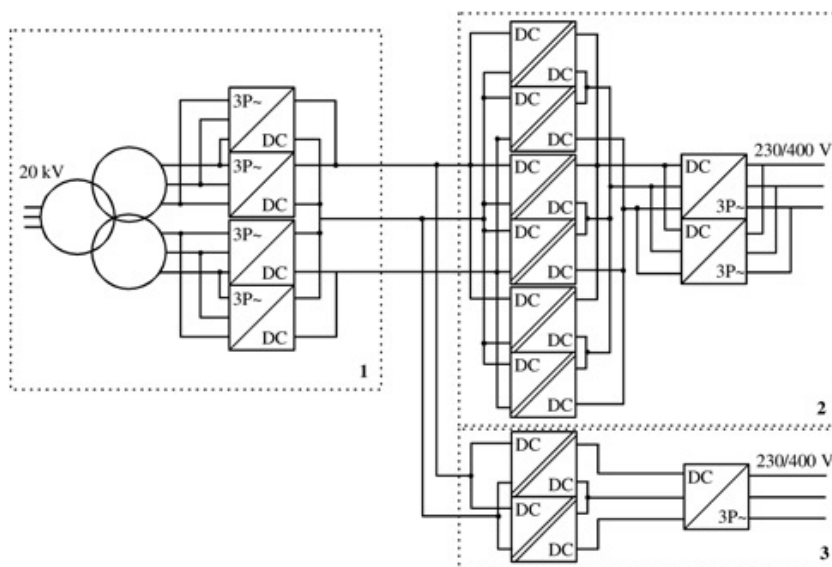
Ochrana proti zkratu je realizována stejnosměrnými jističi, které se naházejí za usměrňovači a před každým střídačem. Strana střídavého napětí je chráněna pojistkami, jističi a proudovými chrániči. Veškerá polovodičová zařízení musí být navržena s ohledem na možné zkratové proudy, které mohou dosáhnout hodnoty až 5x vyšší, než je jmenovitý proud jističe s vypínací charakteristikou B než dojde k jeho vypnutí. Při použití běžného hlavního jističe v domácnosti 3x25 A s vypínací charakteristikou B proud může dosáhnout až 125 A. [34]

Kromě požadavků na kvalitu dodávky elektrické energie je zapotřebí vzít v úvahu mechanické aspekty jednotlivých komponentů. Distribuční prvky střídavé sítě mají životnost 40 let a vyšší s pravidelnou údržbou. Je zřejmé, že přidáním výkonové polovodičové elektroniky se bude

zvyšovat náročnost a potřeba údržby. V běžných fotovoltaických aplikacích je LVDC převodník navržen k 15letému používání. Proto musí být výkonová elektronika vyměněna 2 – 3x za 40 let.

Vyvstává problém se zaručením dodávky elektrické energie a finanční náročnosti údržby. Proto se objevuje otázka, jaký program údržby a související projekty jsou vyžadovány za dobu životního cyklu výkonové elektroniky. [34]

Distribuční systém LVDC obsahuje minimálně jeden AC/DC měnič a několik jednotek DC/AC a DC/DC měničů. Pro snížení investičních nákladů jsou v celé instalaci použity DC/DC moduly se stejným jmenovitým výkonem. V obou typech modulů je umožněn obousměrný tok výkonu. [34]



Obrázek 3 LVDC RULES, schéma LVDC distribuční sítě [34]

Jednotka střídače se skládá z galvanicky oddělujícího DC/DC měniče a střídače DC/AC. Jednotka 3 na obrázku 3 je určena pro napájení jednoho odběratele s hlavním jističem 3x25 A s výkonem 17 kVA. Střídač je navržen tak, aby mohl dodávat třífázový výkon s fázovou nesymetrií a jednofázové zatížení. Modul 2 na obrázku 3 je využíván k dodávce vysokoenergetických zátěží (3x63 A) nebo skupině odběratelů s celkovým výkonem 50 kVA. [34]

Minimální zkratový proud, na který musí být modul DC/AC s výkonem 50 kVA dimenzován je alespoň 320 A po dobu 5 sekund. V případě modulu s výkonem 17 kVA musí modul vydržet 165 A po dobu 5 sekund. [34]

Moduly DC/DC měničů jsou navrženy pro provoz napětí v rozsahu 600-900 V se jmenovitým výkonem 10 kW. Výstupy modulů jsou zapojeny do série tak, aby vytvářely symetrické napájení ± 400 V a nulový vodič, který je připojen na vodič PEN v síti TN-S u koncového odběratele.

Jednotka usměrňovače část 1 na obrázku 3 je napájena ze střídavé sítě 20 kV prostřednictvím transformátoru o výkonu 100 kVA. Transformátor má dvě sekundární vinutí se sériově spojenými usměrňovacími jednotkami. Moduly AC/DC umožňují plnou kontrolu nad stejnosměrnou sítí. [34]

LVDC síť je nutné chránit proti přepětí, neboť prvky výkonové elektroniky jsou výrazně citlivější na přepětí než tradiční přístroje použité v klasické instalaci. Ochrana musí být zajištěna jak mezi vodiči, tak i proti zemi. Za normálního provozu nesmí být napětí v síti vyšší o 250 V nad jmenovitou hodnotou napětí. [34]

4 MVDC

MVDC (medium voltage direct current) je označení pro středně vysoké stejnosměrné napětí. Zařízení, která pracují pod označením MVDC pracují obvykle s napětím od 1,5 kV do 50 kV. Stejnosemřné napětí o hodnotě 3 kV je používáno pro trakci vlaků v části střední Evropy.[47] V České republice je stejnosměrná vlaková trakce využívána na severu a do budoucna se plánuje přejít na síť střídavou a sjednotit trakční vlakové napájení v ČR.

V distribuční soustavě se s využitím MVDC příliš nepočítá a jsou pouze experimentální studie. Uplatnění MVDC nachází na palubách velkých lodí, kde podle studií mohou ušetřit 7 % až 20 % paliva. Jednou z klíčových oblastí výzkumu a vývoje je výroba elektrické energie na palubě lodi. Při použití střídavé sítě na palubě lodi není možné měnit otáčky hnacích motorů, pokud je na hřídeli připojen generátor. Při změně otáček by došlo ke změně frekvence napětí. Při použití usměrňovače a stejnosměrného napájení, není nutné generátor udržovat v synchronních otáčkách a je tedy možné měnit otáčky hnacích motorů. Tato skutečnost otevírá prostor pro využití vysokootáčkových lodních motorů a optimalizaci výroby elektrické energie. Generátory mohou být konstruované jako vícefázové a s využitím multipulsních usměrňovačů dojde ke zvýšení kvality usměrňovaného napětí. Tyto technologie mají své výhody, ale buď jsou komerčně nedostupné, nebo příliš drahé.[22]

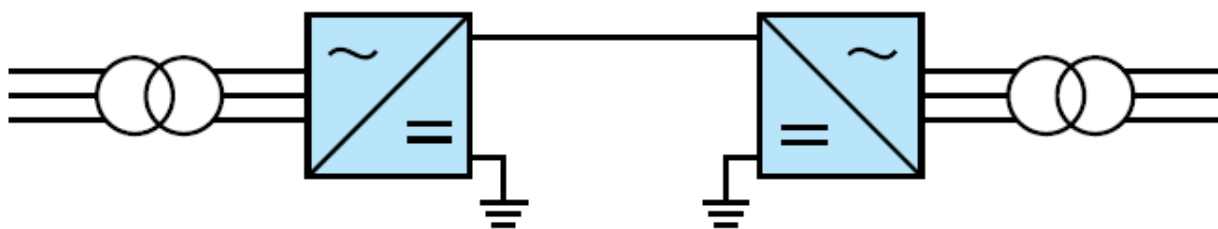
Velkou překážkou v oblasti lodního napájení je složitost systému stejnosměrného výkonového vypínače. Výkonové vypínače stejnosměrného proudu jsou velmi nákladné a obvykle vedou k velkým ztrátám. [22]

5 VYBRANÉ HVDC PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

Projekty využívající technologii HVDC využívají ke svému provozu napětí o vysoké hodnotě, jsou známy projekty, které pracují se stejnosměrným napětím ekvivalentním VVN a ZVN střídavého napětí. Pro stejnosměrný přenos elektrické energie se v současnosti využívá nejvíce bod, bod systém. Tento systém je založen na principu jednoho zdroje a jednoho odběratele, které jsou mezi sebou spojeny kabelem. Tento systém se využívá také pro spojení větrných farem umístěných na moři s pevninou nebo při potřebě přenést výkon na velké vzdálenosti. Typickým použitím je spojení dvou částí země podmořským kabelem [7].

5.1 Jednopolové uspořádání nesymetrické

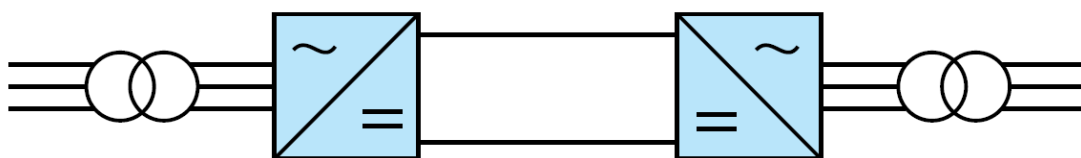
Pro přenos proudu je použit pouze jeden vodič, který spojuje koncové rozvodny. Využívá pouze kladnou složku usměrněného napětí, záporná složka je zpět přivedena přes zem, popřípadě mořem. Jednovodičového systému se nejčastěji využívá při přenosu přes moře, kdy je záporná složka proudu přivedena zpět přes vodu. Při nevhodném povrchu, je možné pro návrat proudu použít i druhý vodič pro zápornou složku, toto řešení ovšem zvyšuje náklady. Při použití jednoho vodiče vzniká ovšem problém chemické změny vlastností vody a koroze v okolí uzemnění. Uzemnění se provádí pomocí metalického vodiče ve vzdálenosti 15-55 km od terminálu stanice [18]. Tento systém uspořádání se v dnešní době příliš nepoužívá. [20], [41]



Obrázek 4 Schéma jednopolového nesymetrického uspořádání s návratem proudu zemí[6]

5.2 Jednopolové uspořádání symetrické

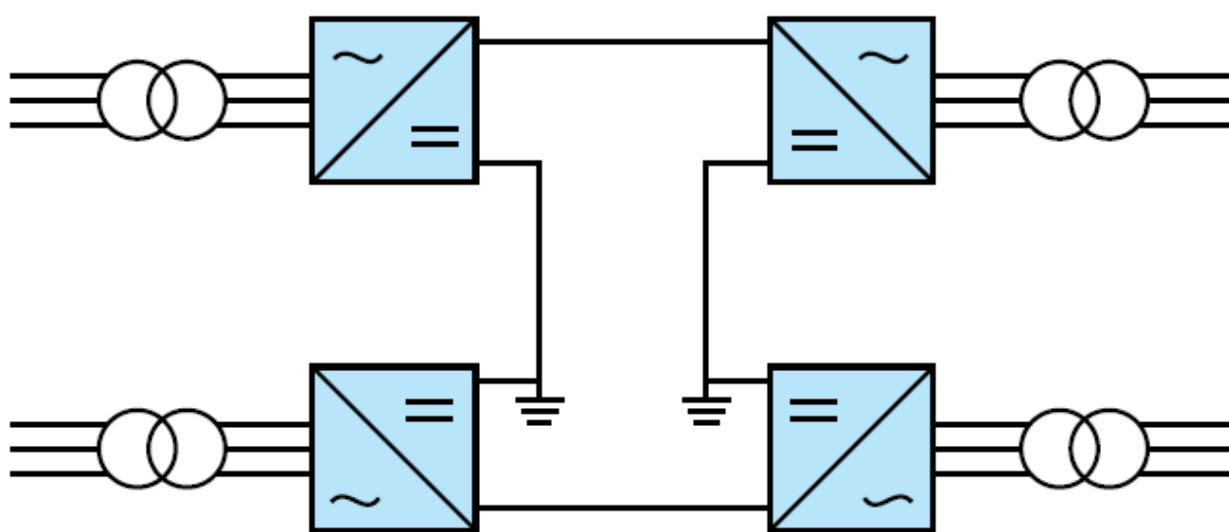
Oproti uspořádání nesymetrickému má výhodu v úplné izolovanosti systému, poruchy ve střídavé síti se nedostanou přes zemní vodič do stejnosměrné části sítě. Transformátory nejsou vystaveny stejnosměrné složce napětí, jako je to u nesymetrického uspořádání. Nevýhodou systému je potřeba druhého izolovaného vodiče, což zvyšuje pořizovací náklady [6]



Obrázek 5 Schéma symetrického jednopolového uspořádání [6]

5.3 Dvoupólové uspořádání

Neboli bipolární konfigurace, využívá na rozdíl od jednopólového uspořádání jak kladný, tak záporný potenciál, jedná se od dvou vodičové vedení, z nichž každý vodič má vůči zemi stejné napětí. Při uzemnění soustavy teče zemním vodičem jen velmi malý vyrovnávací proud, místo uzemnění terminály lze spojit terminály nulovým vodičem, ovšem za cenu vyšších nákladů z důvodu nutnosti třetího vodiče. Dvou vodičové uspořádání má oproti jednopólovému uspořádání nesporné výhody, především se jedná o vyšší spolehlivost a dvojnásobnou přenosovou kapacitu. Vyšší spolehlivost je zaručena větším počtem vodičů, v případě poruchy jednoho vodiče, případně poruchy v terminálu, je systém schopen zajistit díky druhému vodiči až 50 % maximální dodávky energie. Jako návratový vodič lze využít zem, nebo třetí vodič. V takovém případě se systém chová jako jednopólový. [20], [41]



Obrázek 6 Schéma dvoupólového uspořádání [6]

5.4 Back to back systém

Tento systém se využívá především tam, kde je nutné propojit sítě s rozdílnou frekvencí, nejedná se tedy o přenosovou soustavu na velké vzdálenosti, neboť celý systém je situován na jednom místě. Vstupní napětí sítě o jmenovité frekvenci je v místě terminálu transformováno na požadovanou úroveň pro HVDC systém, poté usměrněno a znovu pomocí střídače převedeno na požadovanou rozdílnou frekvenci. Napětí o požadované frekvenci je pomocí transformátoru opět transformováno na napětí přenosové soustavy. Tyto stanice pracují s nižším stejnosměrným napětím než přenosové HVDC systémy, neboť zde neprobíhá přenos na velké vzdálenosti ale pouze v řádech desítek metrů. Díky nižšímu napětí lze dosáhnout menších izolačních vzdáleností a ušetřit tak místo, nároky na izolátory, a především snížit nároky na polovodičové systémy, tím lze dosáhnout snížení nákladů na výstavbu. [20], [41]

5.5 Vybavení terminálu pro HVDC přenos

Základní a nejdražší části stejnosměrné sítě je konvertorový terminál. Základní části terminálu jsou transformátor a měnič.

5.5.1 Síťově komutovaný proudový zdroj (LCC)

Nejstarší technologie používaná v systému HVDC. V porovnání s ostatními typy měničů nabízí největší možný přenášený výkon a snížil ztráty zhruba na 0,7 %. Jsou centrální a nezbytnou součástí každé měřicího systému HVDC. Používají se pro šestipulsní usměrnění třífázové sítě. V běžných aplikacích HVDC se používají dvanáctipulsní měniče, jedná se o dva šestipulsní měniče zapojené do série, kdy každý je napájen vlastním transformátorem. Fázový posuv mezi vstupy měničů musí být 30 elektrických stupňů. Vytvoříme tak šestifázový systém, který umožňuje jednodušší vyhlazení usměrněného napětí, oproti použití třífázového systému. Posunutím fáze zamezíme také vzniku vyšších harmonických složek proudu na AC i DC straně.

Vzhledem k obrovským přenosovým výkonům bývají tyto měniče chlazeny kapalinou. Každý tyristor je umístěn v pouzdře, které slouží jako chladič a umožňuje optimální průchod chladicí kapaliny pro efektivní odvod tepla. S rostoucím požadovaným přenosovým výkonem rostou také požadavky na tyristory. Standardní tyristor používaný v HVDC systémech má blokovací napětí 8 kV a může propustit až 4 kA. Proud se snažíme při přenosech snížit, neboť nám způsobuje úbytky na vedení a ztráty přenosem, vyšší provozní náklady a sníženou účinnost. Proto není ve většině případů potřeba zapojovat tyristory paralelně, neboť tak vysokého proudu nedosáhneme. Napětí, pro přenos HVDC je v řádech stovek kilovoltů, proto je nutné tyristory zapojit sériově. Čím vyšší přenosové napětí, tím více tyristorů je potřeba zapojit do série. Každý z tyristorů zapojených do série pracuje s jiným potenciálem vůči zemi. Proto tyristory nemůžeme řídit pomocí drátů, musí být izolovány. Pro izolaci používám optické vlákno, spínání tyristorů pomocí optického signálu. [7]

Mezi základní výhody LCC měniče patří

- velká přenosová kapacita,
- odolný proti poruchám,
- jednoduché řízení
- možnost krátkodobého přetížení

Nevýhody:

- nutnost velkých filtrů
- vyžaduje konstantní kompenzaci
- obtížný provoz v multiterminálové síti
- prostorově náročná

5.5.2 Přirozeně komutovaný napěťový zdroj (VSC)

Technologie byla vyvinuta díky příchodu IGBT tranzistorů. VSC je založen na IGBT spínači, který umožňuje nezávislé řízení jak činného, tak jalového výkonu mezi měničem a střídavou sítí. Napěťový měnič je schopen volně manipulovat s výstupním napětím a libovolně sepnout či vypnout tranzistory. Využívá se pro připojení větrných elektráren na moři. [7]

Výhody:

- Nezávislé ovládání jalového a činného výkonu
- Nízký obsah harmonických, tudíž není potřeba velký filtr
- Schopnost startu ze tmy, určený pro větrné elektrárny na moři
- Použitelný pro síť s více odběry a zdroji

Nevýhody:

- Elektromagnetické rušení
- Nízký výkon kvůli malým proudům IGBT
- Nízká odolnost proti zkratovým proudům.

5.5.3 Transformátor

V přechodí kapitole bylo uvedeno, že v běžné praxi se používají dvanáctipulzní tyristorové měniče, neboli dva šestipulzní měniče v sérii. Pro napájení takového systému, je zapotřebí transformátor se třemi vnutými nebo 2 transformátory v zapojení Y/y0 a Y/d1 nebo Y/d5. Na primární vnutí zapojené do hvězdy je přivedeno střídavé napětí ze sítě, toto napětí je transformováno na požadovanou hodnotu pro stejnosměrný přenos na dvou dalších vnutích. Každé vnutí napájí jeden šestipulzní tyristorový měnič. Abychom zamezili vzniku vyšších harmonických a vytvořili šestifázový systém, je fázový posuv mezi sekundárními vnutými 30 nebo 120 elektrických stupňů. Tyto vyšší harmonické složky nám způsobují ztráty ve vnutích transformátoru, největší podíl harmonických mají 5-17 složka. Jedno sekundární vnutí je zapojené jako hvězda-hvězda s nulovým fázovým posunem (Yy0), druhé sekundární vnutí je zapojené do hvězda-trojúhelník s hodinovým úhlem 5 hodin nebo 1 hodina, neboli 150 nebo 30 elektrických stupňů. Transformátory bývají vybaveny odbočkami na straně sekundárních vnutích pro zajištění správné hodnoty napětí tyristorových regulátorů. Transformátory pro HVDC systémy jsou oproti konvenčnímu použití zatěžovány především vyššími harmonickými složkami a stejnosměrné magnetizací jádra. [41]

Transformátory bývají nejčastěji provedeny v následujících variantách

- Jednofázový, dvouvinutový transformátor
Tento transformátor se používá pro jednofázovou střídavou síť, která je přivedena na primární vnutí, a jedno sekundární vnutí napájí pulsní usměrňovač.
- Jednofázový, třívinutový transformátor
Použití také pro jednofázovou síť, ale může napájet pulsní měniče.
- Třífázový, dvouvinutový transformátor
Používá se pro třífázové síť, na sekundární straně může napájet pouze jeden šestipulzní usměrňovač
- Třífázový, třívinutový transformátor
Pro třífázové síť, může napájet dva šestipulzní měniče. Nejčastější využití pro velké přenosové výkony.

5.5.4 Reaktor

Neboli vyhlazovací tlumivky, vyhlazují stejnosměrný proud a omezují vznik přerušovaných proudů, které mohou způsobit přepětí v síti. Důležitou funkcí reaktorů je omezování strmosti nárůstu poruchového proudu. Čím větší indukčnost tím pomalejší je nárůst poruchového proudu. Potlačují vyšší harmonické složky a zabraňují rezonanci obvodu na určitých frekvencích.

5.5.5 Filtry

Střídavé filtry bývají umístěny na střídavé straně napětí, jedná se o laditelnou tlumivku a kondenzátor zapojené mezi vedení a zemi. Jejich hlavním úkolem je potlačovat vyšší harmonické složky průchozího proudu. LCC měniče vyžadují ke své funkci jalový výkon a způsobují rušení vyššími harmonickými složkami proudu. Jeden filtr může zahrnovat několik paralelních větví tvořené kondenzátorem a tlumivkou. Každá větev potlačuje určitou harmonickou složku proudu.[20][41]

Filtry stejnosměrného proudu jsou připojeny ke stejnosměrné straně napětí a jejich úkolem je odstranit vyšší harmonické složky proudu, které způsobují rušení.[20]

5.6 Vybrané systémy HVDC ve světě

5.6.1 Čína

Jedná se o projekt využívající technologii Ultra high voltage direct current (UHVDC), neboli ultra vysoké stejnosměrné napětí. Po svém uvedení do provozu se bude jednat o nejvýkonnější přenosový systém na světě využívající stejnosměrné napětí. Napěťová hladina přenosové soustavy bude dosahovat 1100 kV s přenosovým výkonem až 12 000 MW. Délka vedení přesáhne 3000 km. Jedná se o světový rekord ve všech oblastech, nejvyšší provozní napětí, největší výkon a nejdelší vzdálenost přenosu (3284 km). Tento projekt je v roce 2019 ve fázi budování na kterém spolupracují firmy ABB a Siemens. Firma ABB zajišťuje transformátory, které budou nejvýkonnější na světě s váhou 800 tun a délkou 32 metrů. Projekt vznikl na základě potřeby propojit východ a západ Číny, díky tomuto projektu dojde k nárůstu přenosové kapacity mezi těmito regiony o 50 %. [2]

5.6.2 Argentina-Brazílie

Jedná se o HVDC back to back systém, který vybudovala firma ABB. Stanice je umístěna v Brazílii v Garabi. Jedná se o způsob elektrického propojení dvou zemí s rozdílnou frekvencí sítě. Tento systém využívá LCC tyristorový měnič, který je dimenzován na 550 MW na každý blok, s napětím ± 70 kV a proudem 4 kA. Celkově má stanice 4 bloky a celkový přenosový výkon 2,2 GW. Pro vytvoření potřebného jalového výkonu, je zde připojený kondenzátor v sérii mezi transformátorem a měničem. Kondenzátor má na straně 50 Hz jalový výkon 32 MVar a na straně 60 Hz 54 MVar. Připojení střídavé sítě je pomocí vedení 500 kV na obou stranách. [3]

5.6.3 Dánsko-Švédsko

V roce 1965 bylo vybudováno první spojení elektrických soustav Dánska a Švédska. Projekt dostal název Konti-Skan, Pole 1. Využíval technologii HVDC s přenosovým výkonem až 250 MW, napěťovou hladinou 250 kV a proudem 1000 A. Spojení bylo realizováno jedнопólovým uspořádáním, tzn. jedním vodičem, zpáteční cesta proudu byla realizována přes zemi a moře pomocí „mořských elektrod“. Spojoval měničící stanici Vester Hassing v Dánsku a stanici Stenkullen ve Švédsku. V roce 1987 uveden do provozu nový přenosový systém HVDC s názvem Konti Skan Pole 2, který přenášel výkon 350 MW s napětím 285 kV a proudem 1230 A. Schéma bylo opět jedнопólové s použitím jednoho vodiče, byly využity již instalované mořské elektrody z projektu Konti Skan Pole 1. Ve stejném roce proběhla výměna kabelů KS Pole 1, nový kabel byl totožný s kabelem použitým v KS Pole 2.

Výměna kabelů proběhla z důvodu budoucího vylepšení projektu KS Pole 1, ke kterému došlo na konci roku 1990. Systém použitý v Pole1 se blížil k hranici životnosti a byl nátlak na jeho výměnu.

Hlavním problémem bylo použití rtuťových měničů, které vyžadují náročnou údržbu a jejich řízení je extrémně složité. Sítil tlak od ochránců přírody, neboť stanice obsahovaly 1,8 tuny rtuti ve významné přírodní oblasti. Poslední roky své životnosti musel systém fungovat v šestipulzním režimu, neboť jeden z transformátorů byl zničen požárem, následně bylo rozhodnuto provést úplnou výměnu systémů. V Dánsku byl nový Pole 1 vystavěn vedle původní stanice Pole1, ve Švédsku byla stanice vystavěna vedle stanice Pole 2. [4] [27]

Po uvedení do provozu Pole 2 a dokončení výměny zařízení v Pole 1 se změnilo i schéma zapojení, systémy začaly pracovat paralelně. Každý systém mohl přenášet 380 MW s napětím ± 285 kV. Bipolární zapojení umožnilo zredukovat proud vracející se přes moře na nulu a řízení obou systémů a tok výkonu se nyní mohlo provádět dálkově z řídicích center obou energetických společností. [27]

V roce 2017 vyhrála společnost ABB kontrakt na vylepšení systému řízení systému Konti Skan, který využívá systém řízení: AbilityTM based MACH^T. [4]

5.7 Zkratky v HVDC systémech

Zkratové proudy v HVDC systémech závisí především na parametrech a konfiguraci sítě. Amplituda zkratového proudu je dána především napěťovou hladinou sítě a zkratovou impedancí sítě, která závisí na parametrech vedení (odpor, indukčnost, kapacita). Dále průběh zkratu ovlivňují další zdroje připojené do sítě jako například měniče, usměrňovače, kondenzátory a střídavá síť, ke které jsou měniče připojeny. Rozlišují se dva základní typy linek, kabelové vedení umístěné v zemi a nadzemní vedení. Kabelová vedení jsou méně náchylné ke zkratům, ale mnohem nákladnější na výstavbu než nadzemní vedení. [7]

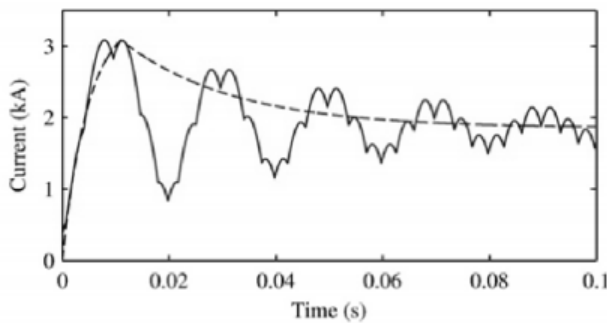
Dalším důležitým aspektem je topologie systému. HVDC systém využívá radiální topologii, v tomto případě existuje pouze jedna cesta proudu mezi zdrojem a poruchou. Proud může procházet pouze jednou cestou do místa poruchy z obou konců vedení na kterých jsou umístěny měnicí stanice. Do místa poruchy teče zkratový proud z obou konců vedení, kde se měnicí stanice chovají jako zdroje zkratového proudu. [7]

Rozlišujeme 3 typy zkratů: vodič – zem (LE), vodič – vodič (LL), vodič – vodič – zem (LLE). Zkrat LL a LLE jsou zkratky symetrické a jejich výpočet je totožný. Jističe se navrhují na nejhorsí možný stav, tudíž musí být zkratový proud určen pro všechny typy zkratů a jistič navržen na nejvyšší vypočtený proud. Pro monopolární uspořádání je možný pouze LE zkrat, neboť monopolární uspořádání využívá pouze jeden vodič pro přenos výkonu. U bipolární konfigurace mohou nastat všechny 3 případy zkratu. Nejnepriznivější poruchový stav je při LL zkratu, avšak jeho pravděpodobnost výskytu je malá oproti výskytu LE zkratu. [7]

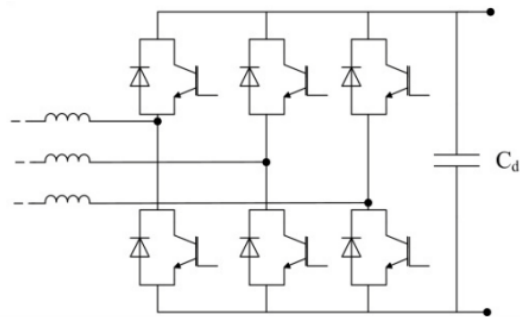
Postup výpočtu zkratových proudů v HVDC systémech závisí především na použité technologii řízení měnicí stanice a na typu použitých měničů. Společnosti, zabývající se výrobou a vývojem technologií HVDC mývají své vlastní interní normy a postupy na výpočet zkratových proudů. V odborných člancích bývají popisovány nejčastěji metody výpočtu pro LCC měniče a VSC měniče.

Poruchu v monopolárním systému HVDC využívající technologii měniče VSC popisuje článek Calculation of Short Circuit Currents in HVDC Systems [43]. V simulaci je uvažován měnič typu VSC využívající technologii IGBT. Při zkratu jsou IGBT tranzistory blokovány a zkratový proud prochází pouze přes diodový můstek měniče, v tomto stavu se měnič chová jako neřízený zdroj zkratového proudu.

Simulace průběhu zkratového proudu na stejnosměrné straně měniče byla zjišťována pomocí programu PSCAD a porovnána s výpočtem podle normy ČSN EN 61660-1[14]. Výsledný graf obou simulací je zobrazen na obrázku 7 Přerušovaná čára znázorňuje výsledný průběh zkratového proudu podle normy ČSN EN 61660 [14] a plná čára představuje výsledný průběh simulace zkratového proudu podle programu PSCAD [43].



Obrázek 7 Zkratový proud z VSC měniče [38]

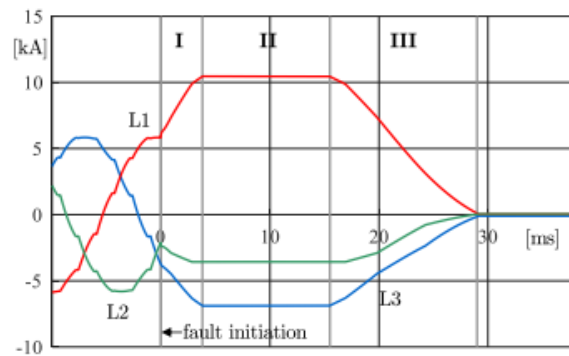
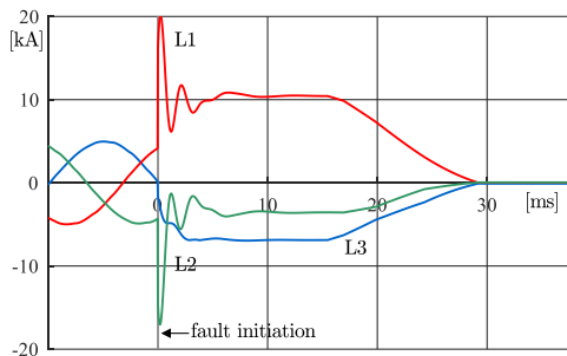


Obrázek 8 Schéma VSC měnič[43]

Podle výsledné simulace (Obrázek 7) lze usoudit, že z hlediska bezpečnosti je možné použít výpočet podle normy ČSN EN 61660-1 i pro měnič VSC využívající technologii IGBT.

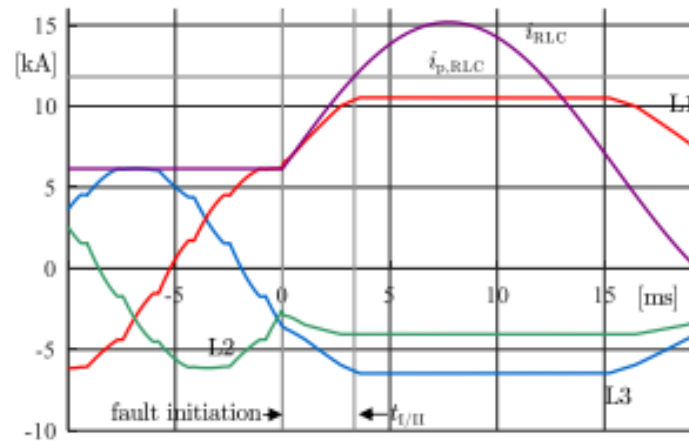
Vyšetření průběhu zkratového proudu na střídavé straně sítě se zabývá článek [40]. V simulaci je uvažován bipolární HVDC systém o napětí $U_{DC} = \pm 600 \text{ kV}$ a přenosové kapacitě $P_{rDC} = 2500 \text{ MW}$ využívající technologii měniče LCC. Systém HVDC je připojen na střídavou síť o napětí $U_{AC} = 380 \text{ kV}$ s rázovým zkratovým proudem $I''_{ks} = 50 \text{ kA}$.

V první části je vyšetřován průběh zkratového proudu v napájecí střídavé síti v případě, kdy dojde ke zkratu na svorkách měniče na stejnosměrné straně. Na obrázku 9 a) je zobrazen průběh zkratového proudu ve střídavé síti, která napájí systém HVDC, v případě, kdy dojde ke zkratu ve stejnosměrné části systému. Obrázek 9 b) zobrazuje průběh zkratového proudu ve střídavé síti, která je napájena ze stejnosměrného systému.



Obrázek 9 Zkratový proud ve střídavé síti a) zkrat na svorkách měniče na začátku HVDC systému b) zkrat za měničem na konci HVDC systému [40]

Na obrázku 10, je zobrazen průběh zkratového proudu stejnosměrným systémem HVDC v případě, kdy dojde k poruše ve střídavé síti, která je z daného systému napájena. Fialová křivka zobrazuje průběh proudu ve stejnosměrné síti a zbylé křivky znázorňují průběh zkratového proudu ve fázích střídavé sítě. [40]



Obrázek 10 průběh zkratového proudu v HVDC systému a v napájené střídavé síti [40]

Mějme jednoduchou radiální síť pouze se dvěma měničemi stanicemi. Pro zjednodušení budeme uvažovat poruchu vodič – zem. V okamžiku vzniku poruchy se vlna přechodného záporného napětí šíří od místa poruchy oběma směry. V době, kdy vlna dorazí na stejnosměrnou sběrnici připojenou k převodníku, napětí na sběrnici klesne, což má dva důsledky. První důsledek spočívá v tom, pokud je ke sběrnici připojena další část sítě, vlna se jí bude šířit dál a tím způsobí přepětí ve zdravé části sítě. Druhým důsledkem je fakt, že část vlny nebo celá vlna přechází do měniče a způsobuje vybíjení kondenzátorů tohoto měniče. Díky omezujícím reaktorům není strmost proudu vlivem vybíjení kondenzátorů tak vysoká, jako vybíjení kabelu samotného. Strmost proudu kabelem je dána pouze jeho zanedbatelnou indukčností. [7]

Při dosažení prahové hodnoty proudu měničem, jsou zablokovány řídicí signály tyristorů nebo tranzistorů, aby byl měnič chráněn před nadproudem. Ovšem při použití VSC měniče, se měnič vlivem diod připojených paralelně k IGBT tranzistorům začne chovat jako neřízený usměrňovač a poruchový proud proudí ze střídavé sítě přes neřízený měnič do místa poruchy. Velikost střídavého proudu je určena impedancí kabelu k místu poruchy, výkonem měniče a tvrdostí střídavé sítě. [7]

Lineární měniče jsou schopny omezit stejnosměrné poruchové proudy pomocí řídicího úhlu. Dvoustupňové a HB-MMC měniče obsahují antiparalelní diody v každé větvi, které umožňují průchod poruchového proudu ze strany střídavého napětí. Tento proud může vážně poškodit nebo zničit měnič. Ochranu zajistíme HVDC jističem nebo střídavým jističem na střídavé straně měniče. Ovšem pokud vybaví jistič na střídavé straně měniče, dojde k odpojení celé stejnosměrné sítě, to je z hlediska provozních požadavků nepřijatelné. Při použití HVDC jističe v bipolárním systému, může být zajištěna alespoň poloviční dodávka elektrické energie. Byly navrženy topologie měničů, aby byl přerušen střídavý proud do místa poruchy, avšak toto řešení vyžaduje až dvojnásobek výkonových zařízení a celkově zvyšuje náklady na provoz a ztráty v zařízení. [7]

Vypínání zkratového proudu ve stejnosměrné síti je náročnější, než v síti střídavé. U střídavého systému proud prochází přirozenou nulou a jeho proces vypínání je založen na této skutečnosti. U stejnosměrného napětí se zkrat snažíme vypnout už v době nárůstu proudu. Zkratové spouště tedy nereagují na velikost nadproudu, ale na jeho strmost. Tím lze dosáhnout vypnutí zkratového proudu dříve, než dosáhne své maximální hodnoty.

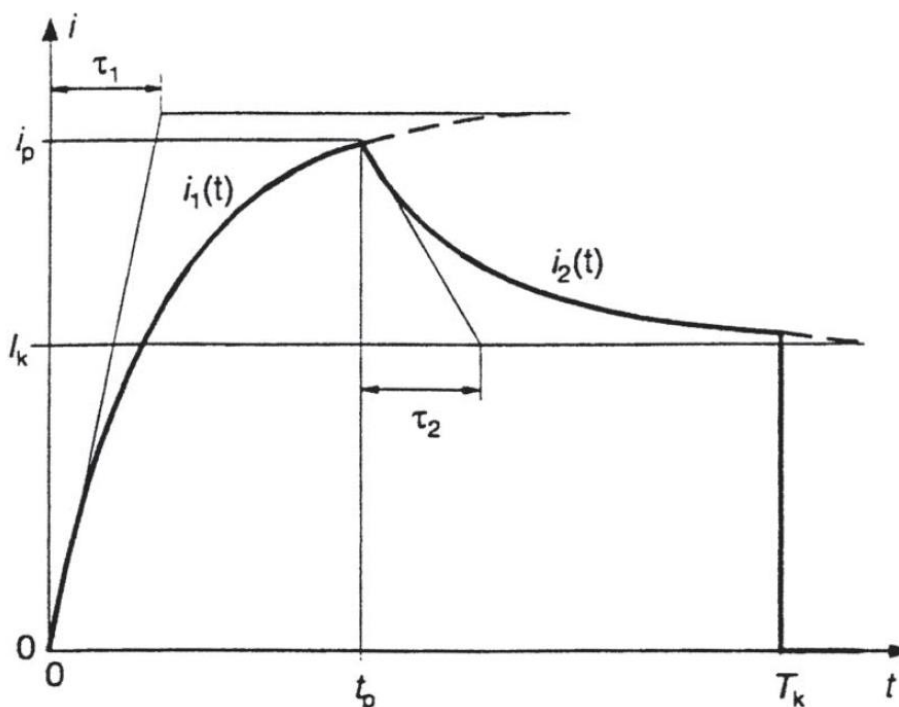
Pro usnadnění vypínání zkratových proudů bylo navrženo několik technik. Cílem těchto technik je usnadnění vypnutí zkratového proudu HVDC vypínačem, popřípadě hybridním HVDC vypínačem. Jednou z těchto metod je použití reaktorů na stejnosměrné straně. Tyto reaktory snižují strmost růstu zkratového proudu a tím poskytují více času vypínačům na účinné vypnutí zkratového proudu. Druhou technikou je použití supravodivých omezovačů proudu, které omezují špičkovou hodnotu zkratového proudu zvýšením odporu v trase proudu. Účinnost této metody není příliš vysoká a využití této metody je zatím stále v experimentální fázi. [7]

6 ZKRATOVÉ PROUDY V DC SÍTÍCH

Pro výpočty zkratových proudů v stejnosměrném systému (dále jen DC zkrat) využijeme znalosti z výpočtů zkratových proudů v systémech střídavých (dále jen AC zkrat). Velikost a průběh DC zkratu značně ovlivňuje střídavá síť, ke které je stejnosměrný systém připojen přes usměrňovač nebo střídač. Zkratové parametry střídavé sítě v bodě připojení měniče jsou nezbytnou částí výpočtu DC zkratů. Těmito parametry jsou: Zkratová impedance sítě (Z_Q), zkratová reaktance sítě (X_Q) a zkratová rezistence sítě (R_Q), počáteční rázový zkratový proud (I''_{ks}).

Dalšími faktory ovlivňující výsledný DC zkratový proud je samotný měnič, staniční akumulátorové baterie, solární panely, vyhlazovací kondenzátory a stejnosměrné motory. Definice základních pojmů pro výpočet:

- Zkrat: jedná se o náhodné nebo úmyslné spojení přes zanedbatelnou impedanci dvou a více obvodů
- Zkratový proud: nadproud při zkratu, který je důsledkem poruchy
- Dílčí zkratový proud: jedná se o zkratový proud v místě zkratu pouze z jednoho zdroje
- Počáteční rázový zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu
- Nárazový zkratový proud: maximální hodnota zkratového proudu
- Doba trvání zkratu: doba od vzniku zkratu do jeho vypnutí
- Doba potřebná k dosažení vrcholové hodnoty proudu.
- Zotavené napětí: napětí, které se objeví na kontaktech vypínače ihned po přerušení proudu.
- Časová konstanta náběhu
- Časová konstanta zániku



Obrázek 11 Typická aproximace průběhu zkratového proudu [17]

Z důvodu kolísání proudu a nelinearity zařízení připojených k síti je výpočet skutečného průběhu a velikosti zkratového proudu a zotaveného napětí velmi náročný. Tyto výpočty se realizují pomocí výpočtových programů a vyžadují znalost sítě v daném bodě zkratu. Pro přesnější výsledky je nezbytné stanovit parametry sítě měřením v daném bodě. Tato práce se bude zabývat výpočtem normalizovaných aproximačních funkcí, které nahrazují přibližný průběh zkratového proudu z hlediska bezpečnosti podle postupu z normy ČSN EN 61660.

Podmínky pro platnost výpočtu:

1. Rezistivita je konstantní
2. Řízení proudu usměrňovačem není účinné
3. Všechny diody pro potlačení částí vazby soustavy jsou zanedbány
4. Staniční akumulátorové baterie jsou plně nabitě

Metoda výpočtu je závislá na topologii sítě a místě zkratu, pokud máme v síti pouze jeden zdroj, počítáme s rezistivitou a indukčností v sérii se zdroje. Pokud do místa zkratu je připojeno hvězdicovitě více zdrojů, celkový zkratový proud se získá sečtením zkratových proudů ze všech zdrojů. Pokud ovšem je místo zkratu připojeno přes větve do místa připojení zdrojů, je nutné připočíst rezistivitu a indukčnost této větve a zkratové proudy se opraví korekčním činitelem a poté se dosadí do rovnic (6.1) až (6.3).

Výpočet aproximační funkce, obrázek 11:

$$\text{pro } 0 \leq t \leq t_p \quad i_1(t) = i_p \cdot \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad (6.1)$$

$$\text{pro } t_p \leq t \quad i_2(t) = i_p \cdot [(1 - p) \cdot e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p] \quad (6.2)$$

$$p = \frac{I_k}{i_p} \quad (6.3)$$

Kde: τ_1 časová konstanta náběhu

τ_2 časová konstanta zániku

6.1 Měníč

$$R_{N,AC} = R_{Q,p} + R_{T,p} + R_{R,p} \quad (6.4)$$

$$R_{N,DC} = R_s + R_{DL} + R_Y \quad (6.6)$$

$$X_{N,AC} = X_{Q,p} + X_{T,p} + X_{R,p} \quad (6.5)$$

$$L_{N,DC} = L_s + L_{DL} + L_Y \quad (6.7)$$

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot Z_n} \cdot \frac{U_{DC}}{U_{rTHV}} \quad (6.8)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_{N,AC}}{X_{N,AC}}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_{N,AC}}{X_{N,AC}}\right)^2 (1 + 0,667(R_{N,DC} + R_{N,AC}))^2}} \quad (6.9)$$

$$i_{pD} = K_D \cdot I_{kD} \quad (6.10)$$

$$\phi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_{N,AC}}{X_{N,DC}} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{R_{N,DC}}{R_{N,AC}}\right)} \quad (6.11)$$

$$K_D = \frac{i_{pD}}{I_{kD}} = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \phi_D\right) \cot \phi_D} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \left(\frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}}\right)\right) \quad (6.12)$$

$$t_{pD} = (3 \cdot K_D + 6) ms \quad \text{pro } \frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} \leq 1 \quad (6.13)$$

$$t_{pD} = \left[(3 \cdot K_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} - 1 \right) \right] ms \quad \text{pro } \frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} > 1 \quad (6.14)$$

$$\tau_{1D} = \left[2 + (K_D - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} \right) \right] ms \quad \text{pro } K_D > 1,05 \quad (6.15)$$

$$\tau_{1D} = \left[0,7 + \left[7 - \frac{R_{N,AC}}{X_{N,AC}} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} \right) \right] \cdot \left(0,1 + 0,2 \frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} \right) \right] ms \quad \text{pro } K_D < 1,05 \quad (6.16)$$

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_{N,AC}}{X_{N,AC}} \left(0,6 + 0,9 \frac{R_{N,DC}}{R_{N,AC}} \right)} ms \quad (6.17)$$

6.2 Kondenzátor

$$R_{Cr} = R_C + R_{CL} + R_Y \quad (6.18)$$

$$L_{Cr} = L_{CL} + L_Y \quad (6.19)$$

$$C_{DC} = 1,2 \cdot C_{AC} \quad (6.20)$$

$$I_{kC} = 0 \quad (6.21)$$

$$i_{pC} = K_C \cdot \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (6.22)$$

$$\tau_{1C} = K_{1C} \cdot t_{pC} \quad (6.23)$$

$$\tau_{2C} = K_{2C} \cdot R_{CBr} \cdot C \quad (6.24)$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 \cdot L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (6.25)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} \cdot C}} \quad (6.26)$$

6.3 Baterie

$$R_{BBr} = 0,9 \cdot R_B + R_{BL} + R_Y \quad (6.27)$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{BL} + L_Y \quad (6.28)$$

$$I_{kB} = \frac{0,95 \cdot E_B}{R_{BBr} + 0,1 \cdot R_B} \quad (6.29)$$

$$E_B = 1,05 \cdot U_{nB} \quad (6.30)$$

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (6.31)$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad (6.32)$$

$$T_B = 30 ms \quad (6.33)$$

$$\tau_2 = 100 ms \quad (6.34)$$

6.4 Vybrané normalizační dokumenty

Normalizační dokumenty uvedené v této kapitole se zabývají vybranými pravidly bezpečného a spolehlivého provozu stejnosměrných trakčních zařízení. Vybrané normy se zabývají projektováním a výstavbou trakčních systémů a napájecích stanic, dále specifikují postup návrhu a následné testování nadproudových ochran. Zde je uveden krátký přehled vybraných normalizačních dokumentů zabývajících se touto problematikou.

Bezpečností proti úrazu elektrickým proudem ve stejnosměrných systémech v drážních zařízeních se zabývá norma ČSN 50122-1 ED.2. Tato norma stanovuje požadavky na ochranná opatření vztahující se na elektrickou bezpečnost u pevných trakčních zařízení stejnosměrných a střídavých soustav a u ostatních zařízení, která mohou být ohrožena trakčními soustavami. V daném vydání jsou v normě uvedeny ustanovení o trolejových vedení trolejbusů a tramvají. [12]

Druhá část, norma ČSN 50122-2 stanovuje opatření proti účinkům bludných proudů, způsobených ve stejnosměrných trakčních soustavách. Bludné proudy mohou způsobovat korozi kovových částí systému trakčního vedení a tím výrazně snížit bezpečnost provozu trakčního systému. Norma je platná jak pro železnice, tak pro prostředky MHD jako tramvaje a trolejbusy. [11]

Vzájemnou interakci střídavé a stejnosměrné trakční sítě a mohou nastat nebezpečná napětí nebo proudy. Vzájemná interakce může vzniknout například při křížení nebo souběhu střídavých a stejnosměrných trakčních soustav. Požadavky na ochranná opatření vztahující se k vzájemné interakci trakčních soustav stanovuje norma ČSN EN 50122-3. [13]

Postup projektování trakčního vedení trolejbusových a tramvajových drah stanovuje norma ČSN 37 6754. V této normě jsou uvedeny zásady pro energetický výpočet měníren a trakčního vedení včetně výpočtu minimálního zkratového proudu pro nastavení nadproudové ochrany spouštěče napáječe. [10]

Projektování a stavbu měníren pro tramvajové a trolejbusové dráhy stanovuje norma ČSN 37 6750. Norma stanovuje zejména technické požadavky, včetně způsobů ochrany, provádění obsluhy a údržby z hlediska bezpečnosti, součástí normy je také postup zkoušení měníren. [9]

Jediný obsáhlý dokument zabývající se výpočtem stejnosměrných zkratů byl vydán v roce 1997 standard ČSN EN 61660 [14], který popisuje pouze zjednodušený postup výpočtu zkratového proudu. Není v něm uveden postup výpočtu pro trakční a přenosové systémy využívající technologii HVDC. Ve třetí části normy ČSN EN 61660 je uveden příklad výpočtu jednoduché sítě v ustáleném stavu, který lze použít jako návod, jak lze počítat složitější systémy. [15]

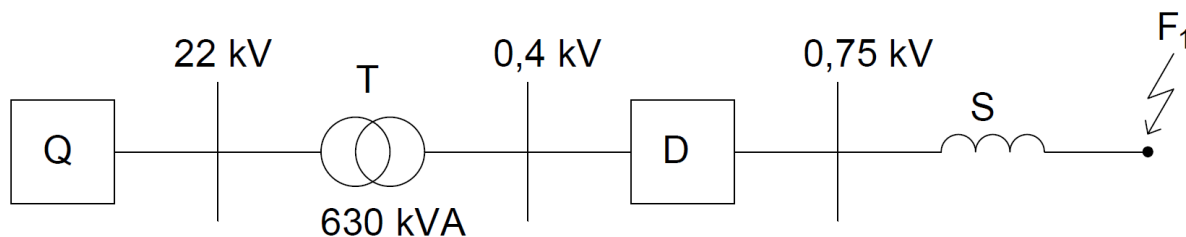
7 SIMULACE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ SÍTĚ

V předchozí kapitole je uveden postup z normy ČSN EN 61660 [14] pro výpočet velikosti a průběhu zkratového proudu. Pomocí výpočetního programu MATLAB bude provedeno grafické znázornění průběhů zkratového proudu v závislosti na době trvání zkratu. Jednotlivé grafické výstupy vycházejí z postupů výpočtu pro jednotlivé prvky sítě z kapitoly 5, neboť velmi důležitou informací o zkratovém proudu je jeho časový průběh, který hraje rozhodující roli při návrhu jištění. Jističí prvek musí být dimenzován na maximální možnou amplitudu zkratového proudu a přizpůsoben jeho předpokládanému průběhu. Ve složitější síti s více zdroji a odběry je přesné zjištění průběhu zkratového proudu velmi obtížné. Relativně přesné výsledky je možno získat počítačovou simulací, ale nejpřesnější výsledky získáme experimentálním měřením zkratového proudu přímo v daném bodě sítě. Provádět měření zkratových proudů v daných místech sítě je mnohdy velmi náročné až prakticky nemožné.

Při výpočtu je uvažován tzn. dokonalý (kovový) zkrat, v místě zkratu je uvažováno dokonalý styk vodičů, se zanedbatelným přechodovým odporem. Zkrat nastal ve stejnosměrné síti o napětí 750 V mezi kladným vodičem L+ a zemí. Dále pro výpočet příspěvku zkratového proudu ze střídavé sítě je uvažována konstantní velikost střídavé složky zkratového proudu, jedná se o tzn. vzdálený zkrat. Ve střídavé síti nejsou uvažovány korekční součinitele generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků, které slouží ke korekci vnitřních napětí zdrojů od ekvivalentního zdroje v místě zkratu a pro transformátory vybavené přepínatelnými odbočkami.

7.1 Měnič

Výpočet aproximační funkce zkratového proudu usměrňovače je závislý především na parametrech střídavé a stejnosměrné sítě, ke které je usměrňovač připojen. Norma ČSN EN 61660 byla vydána v roce 1997 a ve výpočtu není uvažováno řízení proudu usměrňovačem. Vnitřní vlastnosti usměrňovače nejsou tedy do výpočtu zahrnuty, což může zanechat značnou chybu ve výpočtu. V kapitole 5.5 jsou popsány základní rozdělení usměrňovačů, které mají odlišné vlastnosti jak při běžném provozu, tak při poruchovém stavu. Je tedy předpokládán nejhorší možný stav, kdy se řízený usměrňovač chová jako neřízený. Velikost a průběh aproximační funkce zkratového proudu je tedy závislá pouze na parametrech střídavé a stejnosměrné sítě.



Obrázek 12 Schéma zapojení usměrňovače

Pro výpočet aproximační funkce zkratového proudu bude uvažováno zapojení usměrňovače D podle výše uvedeného schématu (Obrázek 12). Jedná se o zkrat na výstupních přípojnicích z usměrňovací stanice.

Tabulka 1 Parametry prvků sítě pro zapojení usměrňovače

Sít'		Transformátor		Tlumivka	
U_{nQ}	22 kV	U_1	22 kV	L_S	30 μ H
f	50 Hz	U_2	0,4 kV	R_S	1 m Ω
I''_{ks}	20 kA	S_n	630 kVA		
C_{max}	1,1	P_k	4 kW		
R_Q/X_Q	0,3	u_k	5 %		

Náhradní zkratová impedance sítě, podle obrázku 12, se skládá z přepočtené náhradní impedance sítě 22 kV, náhradní impedance transformátoru a impedance tlumivky. Parametry jednotlivých prvků sítě potřebné pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 1. Aby bylo možno sestavit náhradní impedanční schéma sítě, je nutné vypočítat vnitřní zkratové impedance zařízení připojené do sítě.

7.1.1 Náhradní zkratová impedance sítě.

Významný vliv na průběh stejnosměrného zkratu představuje střídavá distribuční síť, ze které je stejnosměrná síť napájena. Detailní konfigurace střídavé sítě v místě připojení měniče však většinou není přesně známa a zjištění zkratového příspěvku takovéto sítě lze provést nahrazením střídavé sítě její zkratovou impedancí Z_Q a stanovením napětí ekvivalentního zdroje E . Pro stanovení náhradní zkratové impedance sítě je nutná podmínka výpočtu znalost velikosti počátečního rázového zkratového proudu I''_{ks} nebo počátečního rázového zkratového výkonu S''_{ks} .

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{ks}} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S''_{ks}} \tag{7.1}$$

Kde c je napěťový součinitel zahrnující odhad vnitřního napětí zdrojů za jejich subtranzitní reaktancí v okamžiku vzniku zkratu, U_{nQ} je jmenovité napětí sítě, I''_{ks} počáteční rázový zkratový proud a S''_{ks} je počáteční rázový zkratový výkon.

Modul náhradní zkratové impedance Z_Q je nutné přepočítat na vztažnou napěťovou hladinu v místě zkratu U_v . Tato napěťová hladina se volí jako jmenovitá efektivní hodnota napětí v místě zkratu. Přepočtená náhradní zkratová impedance sítě je rovna:

$$Z_{Q,p} = Z_Q \cdot \left(\frac{U_v}{U_{nQ}} \right)^2 \tag{7.2}$$

Protože obvykle nebývají bližší údaje o síti známy, vyjadřují se náhradní rezistence R_Q a reaktance X_Q sítě z modulu Z_Q pomocí normovaných koeficientů. U napáječů s jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení je možné ekvivalentní impedanci považovat za reaktanci $\overline{Z}_Q = j \cdot X_Q$ a síť se tedy bude představovat ryze imaginární část. V ostatních případech, kdy není známa přesná hodnota pro resistenci a reaktanci sítě, je možné dosadit $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$. Následně reaktance sítě X_Q bude rovna podle vzorce:

$$X_{Q,p} = \frac{Z_{Q,p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (7.3)$$

Resistenci sítě R_Q pro napáječ do 35 kV dopočítáme buď pomocí známého poměru sítě nebo normovaného poměru sítě $R_{Q,p} = 0,1 \cdot X_{Q,p}$. [8]

7.1.2 Náhradní zkratová impedance transformátoru

Modul přepočtené náhradní zkratové impedance transformátoru určíme ze štítkových hodnot transformátoru uvedené v tabulce 1. Jelikož se místo zkratu nachází na straně nižšího napětí, zvolíme za vztažné napětí hodnotu skutečného napětí na sekundární straně transformátoru. Do výpočtu zkratové impedance transformátoru Z_{TNN} dosazujeme reálné štítkové hodnoty transformátoru, nikoli jmenovité hodnoty napětí, na které je transformátor připojen. V tomto případě není jmenovité napětí sítě v místě zkratu rovno sekundárnímu napětí transformátoru a je nutné provést přepočet na vztažné napětí. Modul přepočtené náhradní zkratové impedance transformátoru přepočtené na stranu nižšího napětí $Z_{TNN,p}$ je roven

$$Z_{TNN,p} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{NN})^2}{S_{nT}} \cdot \left(\frac{U_v}{U_{NN}}\right)^2 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_v)^2}{S_{nT}} \quad (7.4)$$

Kde u_k je procentuální hodnota napětí nakrátko, S_{nT} je jmenovitý výkon transformátoru, U_{NN} je štítková hodnota napětí transformátoru na straně nižšího napětí a U_v je vztažná hodnota napětí, tzn. jmenovitá hodnota napětí sítě v místě zkratu.

Následně zjistíme rezistivitu vinutí transformátoru ze ztrát nakrátko a jmenovitého proudu transformátoru. Ztráty nakrátko jsou štítková hodnota transformátoru uvedená v procentech jmenovitého napětí transformátoru a jmenovitý proud vypočteme ze štítkové hodnoty napětí transformátoru U_{NN} a jmenovitého výkonu transformátoru S_{nT} . Pro třífázový transformátor platí

$$I_{2n} = \frac{S_{nT}}{\sqrt{3} \cdot U_{NN}} \quad (7.5)$$

Kde U_{NN} je štítková hodnota napětí transformátoru na straně nižšího napětí a S_{nT} je jmenovitý výkon transformátoru. Ztráty nakrátko jsou měřeny právě při jmenovitém proudu transformátorem a činný odpor vinutí lze dopočítat ze vztahu:

$$R_{TNN} = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot (I_{2n})^2} \quad (7.6)$$

Rezistivitu transformátoru je opět nutné přepočítat na vztažnou napěťovou hladinu

$$R_{TNN,p} = R_{TNN} \cdot \left(\frac{U_v}{U_{NN}}\right)^2 \quad (7.7)$$

Přepočtenou reaktanci vinutí transformátoru dopočítám pomocí aplikace Pythagorovy věty:

$$X_{TNN,p} = \sqrt{Z_{TNN,p}^2 - R_{TNN,p}^2} \quad (7.8)$$

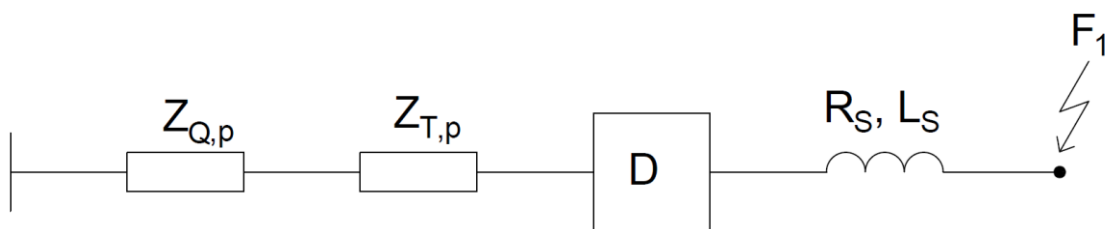
Při výpočtu počátečního rázového zkratového proudu je možné uvažovat nulovou rezistenci vinutí $R_T = 0$, a tedy $X_T \cong Z_T$. Rezistenci je však doporučeno uvažovat u transformátorů připojených do sítě nízkého a vysokého napětí [8].

7.1.3 Sériová tlumivka

Sériová tlumivka se zapojuje do série s podélnou impedancí vedení. Na vstupní střídavé se tlumivka používá jako filtračně kompenzační zařízení, které zabraňuje pronikání vyšších harmonických složek do střídavé sítě a eliminuje jalový výkon produkovaný měniči. Na stejnosměrné straně jsou v sérii s vedením zapojeny tlumivky, které vyhlazují stejnosměrný proud a v případě poruchy omezují velikost zkratového proudu. [37] Vlastnosti tlumivky jsou dány činným odporem tlumivky R_S a její indukčností L_S . Maximální proud tlumivkou je omezen činným odporem, neboť při překročení dovoleného proudu by došlo vlivem ztrát k oteplení vinutí nad povolenou mez. Strmost náběhu zkratového proudu je závislá na indukčnosti sítě, čím vyšší indukčnost sítě, tím je strmost náběhu zkratového proudu pomalejší a doba k dosažení maxima delší.

7.1.4 Výpočet aproximační funkce zkratového proudu měniče

Z vypočtených náhradních zkratových impedancí (Tabulka 2) vypočteme podle rovnice 6.4 a 6.5 celkovou rezistivitu $R_{N,AC}$ a reaktanci $X_{N,AC}$ na straně střídavé sítě, obdobně pro stejnosměrnou část sítě vypočteme celkovou rezistivitu $R_{N,DC}$ a celkovou indukčnost $L_{N,DC}$ podle rovnice 6.6 a 6.7.



Obrázek 13 Impedanční schéma zapojení usměrňovače

Při sestavování náhradního impedančního obvodu je nutné dbát na správný přepočet impedancí na vztažnou hladinu napětí. V tabulce níže, jsou uvedeny vypočtené hodnoty náhradních impedancí jednotlivých prvků.

Tabulka 2 Vypočtené parametry prvků sítě s usměrňovačem

Sít'	
$Z_{Q,p}$	0,812 mΩ
$X_{Q,p}$	0,777 mΩ
$R_{Q,p}$	0,233 mΩ

Transformátor	
$Z_{T,p}$	44,6 mΩ
$X_{T,p}$	44,3 mΩ
$R_{T,p}$	5,7 mΩ

Tlumivka	
R_S	1 mΩ
L_S	30 μH

Při znalosti reaktance $X_{Q,p}$ a frekvence f střídavé sítě vypočteme její indukčnost $L_{Q,p}$, indukčnosti střídavé sítě je nezbytná pro výpočet součinitele K_D (rovnice 6.12).

$$L_{Q,p} = \frac{X_{Q,p}}{2\pi f} \quad (7.9)$$

Výpočet kvazistacionárního proudu I_{kD} lze určit pomocí činitele λ_D (rovnice 6.9), který poté dosadíme do rovnice 6.8 pro výpočet I_{kD} . V následujícím kroku vypočteme vrcholovou hodnotu zkratového proudu, tzv. nárazový zkratový proud i_{pD} , jeho velikost je závislá na kvazistacionárním proudu, součiniteli K_D a úhlu ϕ_D .

Postup výpočtu je nutné začít zjištěním úhlu ϕ_D z rovnice 6.11, který následně dosadit do rovnice 6.12, ze které zjistíme velikost součinitele K_D . Součinitel K_D je poměr nárazového i_{pD} a kvazistacionárního I_{kD} zkratového proudu, při znalosti I_{kD} a součinitele K_D provedeme výpočet nárazového zkratového proudu i_{pD} podle rovnice 6.10.

Doba potřebná k dosažení vrcholové hodnoty t_p je čas od vzniku zkratu do okamžiku, kdy zkratový proud nabyde své maximální hodnoty tzn. od vzniku zkratu po dosažení hodnoty nárazového zkratového proudu i_{pD} . Výpočet doby t_p se liší podle poměru indukčnosti stejnosměrné sítě $L_{N,DC}$ a indukčnosti střídavé sítě $L_{N,AC}$ a je závislý na součiniteli K_D . Pokud indukčnost stejnosměrné sítě do místa zkratu, je menší nebo rovna indukčnosti střídavé sítě ze které je napájena, je poměr indukčností $\frac{L_{N,DC}}{L_{N,AC}} \leq 1$ a výpočet doby maxima t_p se provede podle rovnice 6.13. V opačném případě, kdy indukčnost stejnosměrné sítě do místa zkratu je větší než indukčnost napájecí střídavé sítě, je výpočet doby maxima t_p proveden podle rovnice 6.14.

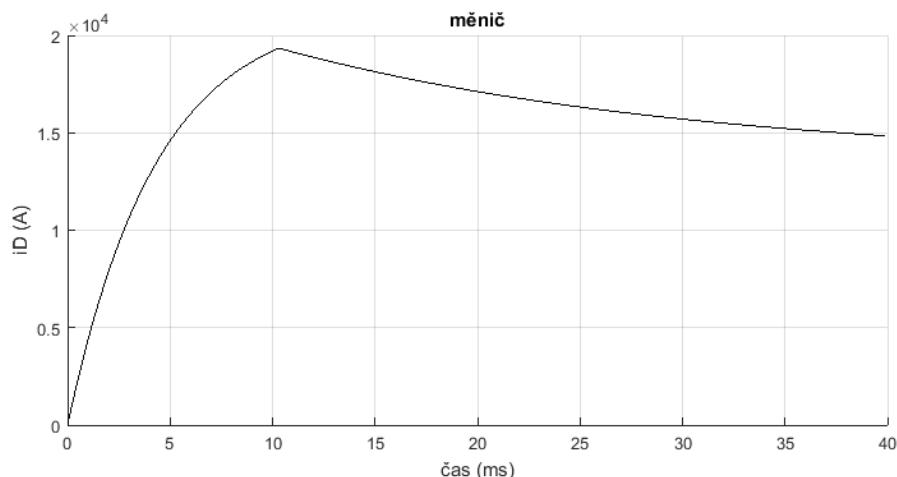
Časová konstanta náběhu τ_1 a její výpočet závisí na součiniteli K_D , indukčnosti stejnosměrné a střídavé sítě, rezistivitě a reaktanci střídavé sítě. Výpočet časové konstanty náběhu lze provést ze dvou rovnic v závislosti na velikosti součinitele K_D . Pokud je součinitel $K_D > 1,05$, výpočet bude proveden podle rovnice 6.15, pro všechny ostatní případy volíme výpočet podle rovnice 6.16. Časovou konstantu náběhu lze podle zjednodušující rovnice 6.19 určit jako jednu třetinu doby potřebné k dosažení maxima t_p . Tímto zjednodušením se dopustíme určité nepřesnosti ve prospěch bezpečnosti.

Časová konstanta zániku τ_2 definuje strmost poklesu aproximační funkce zkratového proudu po dosažení vrcholové hodnoty i_{pD} . Její výpočet je závislý rezistivitě a reaktanci sítí a rovnice 6.17 platí pouze pro frekvenci střídavé sítě 50 Hz.

Tabulka 3 Vypočtené hodnoty aproximační zkratové funkce měniče

Měnič	i_p	I_k	t_p	τ_1	τ_2
	(kA)	(kA)	(ms)	(ms)	(ms)
	19,34	13,48	10,3	4,34	20,29

Pro zobrazení průběhu aproximační funkce nebo zjištění velikosti zkratového proudu v daném časovém okamžiku použijeme rovnice 6.1, 6.2 a 6.3. Průběh aproximační funkce zkratového proudu pro daný případ je zobrazen na obrázku 14.



Obrázek 14 Průběh aproximační funkce zkratového proudu z měniče

Model výpočtu a výsledný průběh zkratové aproximační funkce v simulačním programu MATLAB/Simulink je uveden v příloze A, B a C

7.2 Baterie

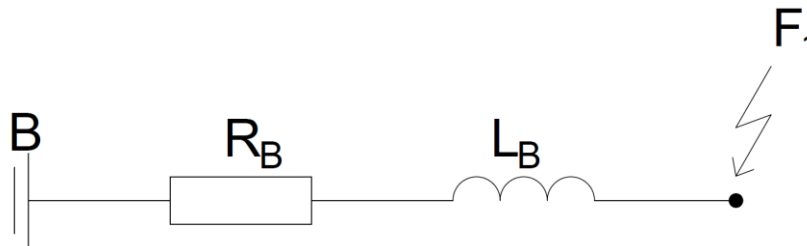
Staniční akumulátorové baterie poskytují především možnost uskladnění přebytečné elektrické energie v době nízké spotřeby a velmi rychlé dodání elektrické energie do sítě v době špičkové spotřeby. Při přebytku elektrické energie v síti mohou být baterie nabíjeny ze sítě za nižší cenu, například v noci. Naopak ve dne, v době velkého odběru elektrické energie poskytují možnost pokrytí špičkových odběrů. Ve střídavé síti, mohou staniční akumulátorové baterie kompenzovat jalový výkon v síti díky moderním měničům, které umožňují připojení baterií ke střídavé síti. Kompenzace jalového výkonu umožňuje zlepšovat účinnost sítě a snížit ztráty na vedení. [36]

Jednou z dalších možností využití staničních baterií je vyrovnání dodávaného výkonu do sítě z obnovitelných zdrojů. Například fotovoltaická elektrárna je závislá na svitu slunce, dodává do sítě pouze špičkové výkony a jedná se o velmi nestabilní zdroj elektrické energie. Staniční baterie by tyto špičky pokryly vlastní kapacitou, tzn. baterie by se v době výkonové špičky z FVE nabíjely. Do sítě by poté přes měnič dodávaly ustálený výkon dle aktuální potřeby a situace v síti. [36]

Z hlediska bezpečnosti představují bateriové systémy klíčový prvek. Výrazně přispívají ke snížení rizika blackoutů a jsou schopny zajistit provoz ostrovních systému při poruchových stavech. Mohou tak zajistit fungování strategických zařízení nebo nemocničního a záchranného systému apod. V případě blackoutu zajišťují napájení klíčových prvků sítě a jsou schopny zajistit start elektrárny ze tmy takzvaný „Black start“. [36]

Výpočet zkratového proudu Norma ČSN EN 61660 [14] stanovuje pouze pro olovené baterie s nominálním napětím 2 V na článek a se zanedbáním řízení zkratového proudu měničem. Olovené baterie se vyznačují svou jednoduchostí, a především možností dodat velký proud za velmi krátký časový okamžik. Parametry baterií potřebné pro výpočet jsou celkový vnitřní odpor staniční baterie R_B , celková indukčnost bateriového systému L_B a pracovní napětí U_{nB} .

Při uvažování zkratu přímo na svorkách baterie bez započtení vlivu měniče je velikost počátečního rázového zkratového proudu $I''_{ks,B}$ a nárazového zkratového proudu $i_{p,B}$ určeny pracovním napětím bateriového systému U_{nB} a vnitřním odporem R_B . Velikost časové konstanty náběhu τ_{1B} udává strmost nárůstu zkratového proudu a určena pomocí vnitřního odporu baterie R_B a vnitřní indukčnosti L_B . Její velikost se odečítá z grafu, který je uveden v normě [14] a odečtené hodnoty platí pouze pro olovené akumulátory. Velikost zkratového proudu lze zjistit pomocí Ohmova zákona, ale průběh a strmost nárůstu proudu je závislý na vnitřní indukci, která je odlišná pro jednotlivé technologie bateriového systému.



Obrázek 15 Náhradní impedanční schéma zapojení baterie

Vnitřní odpor oloveného akumulátoru je velmi malý, v řádu $1 \text{ m}\Omega$ a závisí na hustotě a teplotě elektrolytu. [19]. Velikost vnitřní indukčnosti každého článku olovené baterie se udává v rozmezí 10 až 100 nH /článek pro 100 Ah . [24]. V tabulce 4 jsou uvedeny základní potřebné parametry staniční akumulátorové baterie pro následný výpočet aproximační funkce zkratového proudu. Vnitřní rezistivita baterie R_B a vnitřní indukčnost baterie L_B jsou hodnoty uvedené pro celý bateriový systém. Pokud bychom měli k dispozici tyto údaje pro jednotlivé články baterie, je nutné také znát celkový počet článků baterie a způsob jejich zapojení v systému.

Tabulka 4 Parametry olovené staniční akumulátorové baterie

Baterie	
R_B	$45,5 \text{ m}\Omega$
L_B	$40 \text{ }\mu\text{H}$
U_{nB}	750 V

Při použití bateriového systému jiné technologie, lze vypočítat velikost zkratového proudu z Ohmova zákona z vnitřní rezistivity a napětí baterie, ovšem pro výpočet průběhu zkratového proudu takového akumulátoru již nelze s přesností využít postupu podle normy ČSN EN 61660 [14], [15].

7.2.1 Výpočet aproximační funkce zkratového proudu baterie

Na obrázku 15 je naznačena situace vzniku poruchy na výstupních svorkách baterie. Zkratový proud je tedy omezen pouze vnitřním odporem a představuje nejnebezpečnější místo vzniku zkratu pro bateriový systém. V prvním kroku je nutné zjistit celkovou rezistivitu a indukčnost do místa zkratu. V případě připojení baterie na síť, se rezistivita a indukčnost vedení mezi baterií a místem zkratu sčítá s vnitřní rezistivitou a indukčností baterie podle rovnice 6.27 a 6.28.

Kvazistacionární zkratový proud I_{kB} je závislý na aktuálním stavu baterie a lze vypočítat jeho velikost pro nabitou nebo vybitou baterii. Z hlediska bezpečnosti bude ve výpočtu uvažován nejhorší možný stav, kdy bude baterie plně nabitá. Vnitřní napětí baterie E_B bude tedy vyšší, než

jmenovité napětí baterie U_{nB} podle rovnice 6.30, vnitřní napětí baterie E_B poté dosadíme do rovnice 6.29 pro výpočet kvazistacionárního proudu baterie I_{kB} .

Pro zjištění hodnoty nárazového zkratového proudu i_{pB} použijeme základní vztah podle Ohmova zákona podle rovnice 6.33. Jedná se o podíl vnitřního napětí baterie E_B a celkové rezistivity baterie a vedení do místa zkratu.

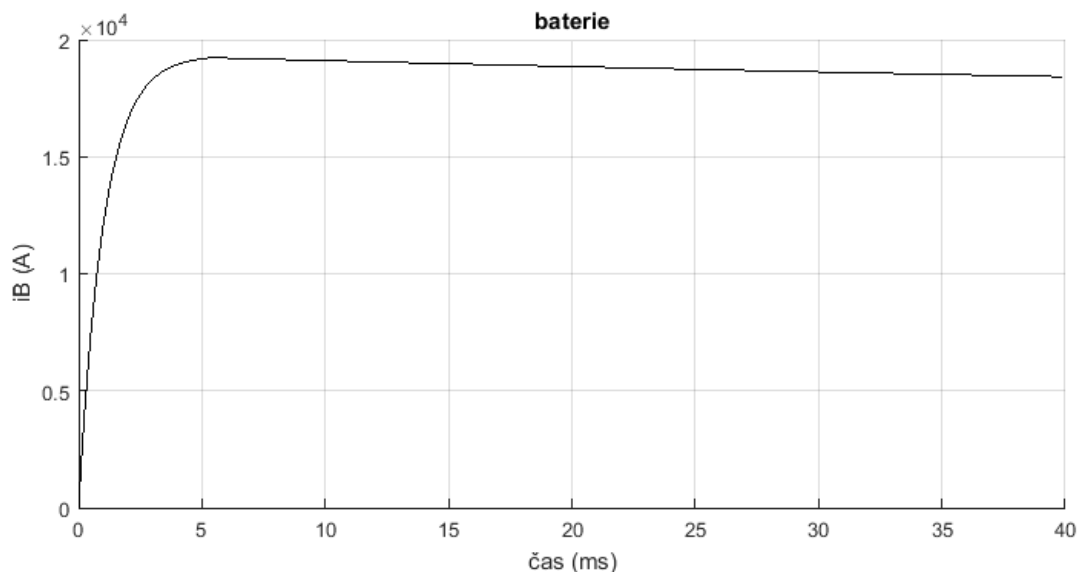
Časová konstanta náběhu τ_1 a doba náběhu maxima t_p jsou odečítány z grafu uvedeného v normě ČSN EN 61660-1 [14]. Pro odečet hodnot je nezbytné určit koeficient $\frac{1}{\delta}$ z rovnice 6.32. Pro automatizovaný výpočet v programu MATLAB byly z grafu odečítané hodnoty časové konstanty náběhu a doby dosažení maxima aproximovány funkcí pomocí polynomu 3. stupně v programu Excel. Vizualně bylo odečteno celkově 20 hodnot časových konstant náběhu τ_1 a jejich odpovídající hodnoty koeficientu $\frac{1}{\delta}$. Poté v programu Excel byly body proloženy polynomickou funkcí 3. stupně. Z rovnice této polynomické funkce program MATLAB následně vypočte hodnotu časové konstanty náběhu τ_1 z hodnoty koeficientu $\frac{1}{\delta}$. Pro výpočet doby náběhu maxima t_p byl použit totožný postup ke zjištění aproximační funkce jako u časové konstanty náběhu τ_1 .

Hodnota časové konstanty zániku τ_2 je podle normy ČSN EN 61660-1 stanovena na velikost 100 ms.

Vypočtené potřebné hodnoty aproximační funkce zkratového proudu jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 5). Průběh aproximační funkce zkratového proudu je zobrazen na obrázku 16, kdy v čase $t=0$ ms došlo k poruše a nastal zkrat.

Tabulka 5 Vypočtené hodnoty aproximační zkratové funkce bateriového systému

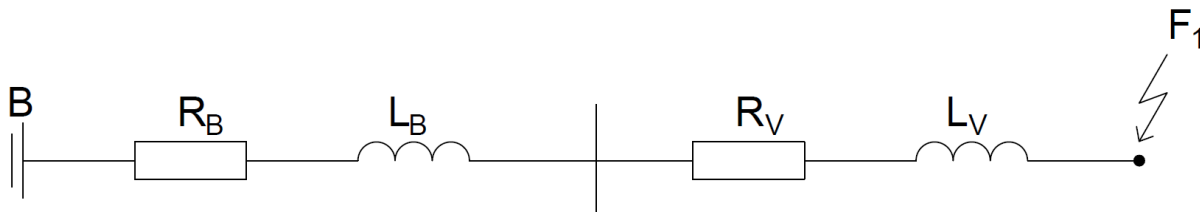
Baterie	i_p (kA)	I_k (kA)	t_p (ms)	τ_1 (ms)	τ_2 (ms)
	19,23	16,44	5,41	1,02	100



Obrázek 16 Průběh aproximační funkce zkratového proudu baterie

7.2.2 Změna vzdálenosti k místu zkratu

Uvažme nyní situaci, kdy je k baterii připojeno hliníkové vedení o délce $l_v = 100 \text{ m}$ a průřezu $S_v = 2 \times 150 \text{ mm}^2$, na konci vedení v místě F2 dojde ke kovovému zkratu mezi kladným vodičem a zemí.



Obrázek 17 Náhradní impedanční schéma baterie s vedením

Cílem simulace je demonstrovat vliv vzdálenosti místa zkratu od zdroje a sledovat průběh zkratové aproximační funkce. Vnitřní parametry baterie zůstávají zachovány a parametry vedení uvedené v tabulce 6 jsou převzaty z katalogu firmy NKT pro hliníkové vodiče pro uložení v zemi E-AY2Y 0,6/1 kV. [25]

Tabulka 6 Parametry vedení a baterie

Vedení		Baterie	
S_v	$2 \times 150 \text{ mm}^2$	R_B	$26 \text{ m}\Omega$
R_v	$20,6 \text{ m}\Omega$	L_B	$40 \text{ }\mu\text{H}$
L_v	$23 \text{ }\mu\text{H}$	U_{nB}	750 V
l_v	100 m		
t	$20 \text{ }^\circ\text{C}$		

Vypočtení rezistivity a indukčnosti vedení o délce 100 metrů. Parametry vedení R_k a L_k jsou katalogovými hodnotami pro kabel $2 \times 150 \text{ mm}^2$, E-AY2Y 0,6/1 kV firmy NKT. [25]

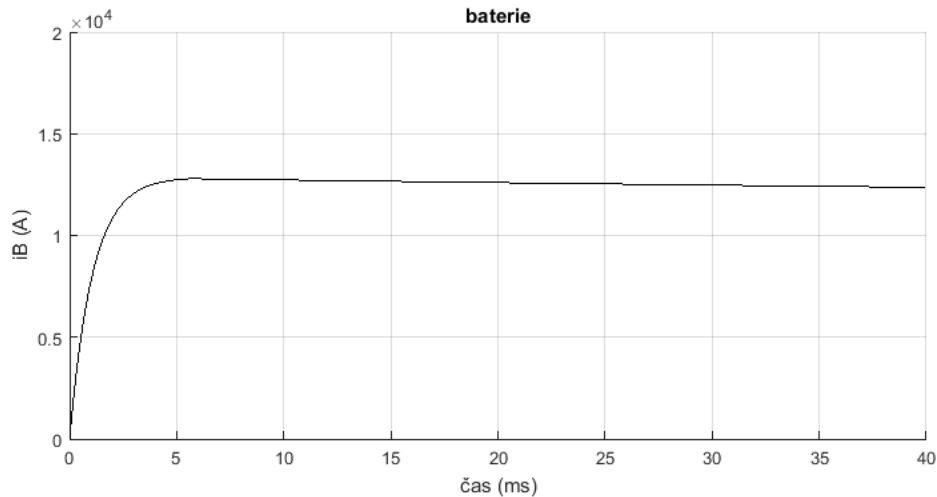
$$R_v = R_k \cdot l_v = 0,206 \cdot 0,1 = 20,6 \text{ m}\Omega \quad (7.10)$$

$$L_v = L_k \cdot l_v = 0,230 \cdot 0,1 = 23 \text{ }\mu\text{H} \quad (7.11)$$

Kde R_k je maximální rezistivita kabelu na délku 1 km a L_k je maximální indukčnost kabelu na délku 1 km. Parametry R_k a L_k jsou uvedeny pro teplotu okolí $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Celková rezistivita a indukčnost baterie a vedení do místa zkratu je vypočtena z rovnic 6.27 resp. 6.28.

Tabulka 7 Vypočtené hodnoty aproximační funkce zkratového proudu baterie v místě zkratu F2

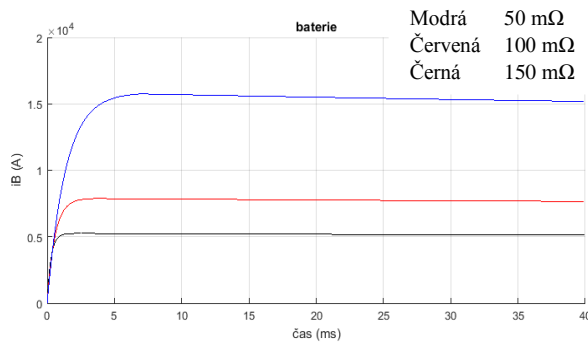
Baterie + vedení	i_p	I_k	t_p	τ_1	τ_2
	(kA)	(kA)	(ms)	(ms)	(ms)
	12,79	11,32	5,66	1,08	100



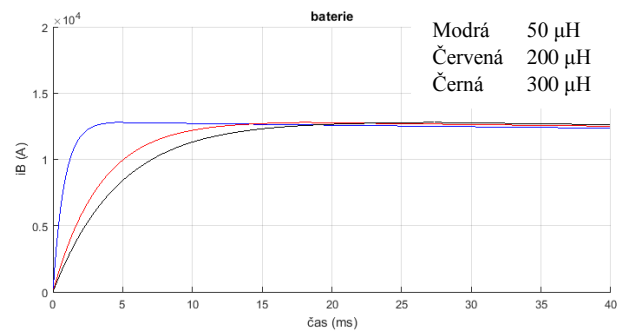
Obrázek 18 Průběh aproximační funkce zkratového proudu z baterie na konci vedení

Při vzniku zkratu na vedení ve vzdálenosti 100 metrů od baterie nedošlo k výrazné změně průběhu aproximační funkce, jak lze vyčíst z obrázků 16 a 18. Doba dosažení maxima t_p , časová konstanta náběhu τ_1 zůstaly v obou případech téměř totožné. Výrazně se ovšem snížila hodnota nárazového i_{pB} a kvazistacionárního I_{kB} zkratového proudu vlivem zvýšení rezistivity a vedení mezi místem zkratu a baterií.

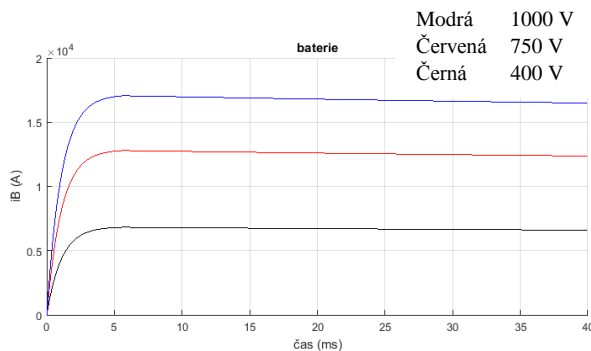
Uvažme nyní situaci z prvního případu, tedy vznik zkratu na svorkách baterie (schéma z obrázku 15) a postupně měňme jednotlivé parametry mezi baterií a místem zkratu tak, aby bylo možné pozorovat vliv jejich změny na výsledný průběh aproximační funkce zkratového proudu. V případě změny jednoho parametru, zůstávají ostatní parametry nezměněny.



a) Vliv změny rezistivity



b) Vliv změny indukčnosti



c) Vliv změny napětí v síti a baterii

Obrázek 19 Průběhy zkratové funkce při změně vnitřních parametrů baterie

Se zvýšením rezistivity mezi baterií a místem zkratu prudce klesá maximální hodnota zkratového proudu, ale strmost zůstává nezměněna. Naopak při zvýšení indukčnosti strmost nárůstu zkratového proudu klesá a svého maxima dosáhne zkratový proud za delší čas. Se změnou indukčnosti se velikost zkratového proudu nemění. Při zvýšení napětí baterie dochází jak k nárůstu velikosti zkratového proudu, tak ke zvýšení jeho strmosti. Pro jištění bateriového systému je tedy nutné vzít do úvahy všechny faktory.

7.3 Kondenzátor

Kondenzátor je prvek, v němž se akumuluje energie elektrického pole. Jeho parametrem je kapacita C , jednotkou kapacity je Farad (F). Pro proud kondenzátorem platí vztah:

$$i_c = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (7.12)$$

Ve stejnosměrném obvodu při konstantním napětí neprotéká ideálním kondenzátorem žádný proud. Při zvýšení napětí se začne kondenzátor nabíjet nabíjecím proudem, který může dosahovat značných hodnot a kondenzátor se chová se téměř jako zkrat. Při poruše v síti, kdy dochází ke snížení napětí, se kondenzátor vybíjí a chová se jako zdroj zkratového proudu. Strmost nárůstu vybíjecího proudu z kondenzátoru je závislá na rezistivitě a indukčnosti mezi kondenzátorem a místem zkratu a na kapacitě kondenzátoru. Při rychlém poklesu napětí dochází k velmi rychlému vybití kondenzátoru, který se chová jako zdroj impulsního proudu, nikoli jako dlouhodobý zdroj zkratového proudu, jako například baterie nebo měnič.



Obrázek 20 Náhradní schéma zapojení kondenzátoru a vedení

Kde R_C představuje vnitřní odpor kondenzátoru, L_C vnitřní indukčnost kondenzátoru, R_V rezistivitu vedení a L_V indukčnost vedení. Délka a vlastnosti vedení jsou ponechány totožné s přechozím modelem baterie a náhradní parametry kondenzátoru jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Parametry kondenzátoru a vedení

Kondenzátor		Vedení	
R_C	1 mΩ	S_V	2x150 mm ²
L_C	4 μH	R_V	20,6 mΩ
C_{DC}	96 μF	L_V	23 μH
U_{NC}	750 V	l_V	100 m
		t	20 °C

Podle rovnic 6.18 a 6.19 zjistíme celkovou rezistivitu indukčnost vedení a kondenzátoru do místa zkratu. Pokud známe kapacitu kondenzátoru ve střídavém obvodu C_{AC} , je nutné ji přepočítat

na kapacitu ve stejnosměrném obvodu C_{DC} podle rovnice 6.20. Kvazistacionární proud I_{kc} je v případě kondenzátorů roven nule $I_{kc} = 0 \text{ A}$.

Výpočet nárazového zkratového proudu i_{pc} je poměrně náročný, pokud nemáme k dispozici graf z normy, ze které lze odečíst konstanta K_C . Rovnice 6.22 pro výpočet nárazového zkratového proudu vychází z Ohmova zákona a korekcí konstantou K_C . Postup výpočtu korekční konstanty K_C je závislý na hodnotách činitelů $\frac{1}{\delta}$ a ω_0 z rovnice 6.25 a 6.26.

Pokud $\delta > \omega_0$

$$\omega_D = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (7.13)$$

$$t_{pc} = \frac{1}{2 \cdot \omega_D} \cdot \ln\left(\frac{\delta + \omega_D}{\delta - \omega_D}\right) \quad (7.14)$$

$$K_C = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_D} \cdot e^{-\delta \cdot t_{pc}} \cdot \sinh(\omega_D \cdot t_{pc}) \quad (7.15)$$

Pokud $\delta < \omega_0$

$$\omega_D = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (7.16)$$

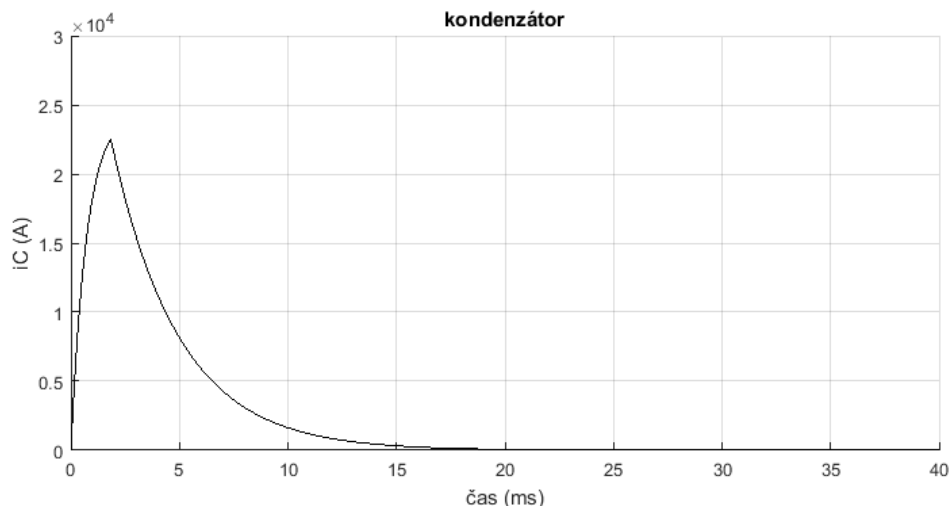
$$t_{pc} = \frac{1}{\omega_D} \cdot \arctan\left(\frac{\omega_D}{\delta}\right) \quad (7.17)$$

$$K_C = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_D} \cdot e^{-\delta \cdot t_{pc}} \cdot \sin(\omega_D \cdot t_{pc}) \quad (7.18)$$

Kde t_{pc} je doba dosažení maxima. Náběhová konstanta τ_1 je určena velikostí doby náběhu maxima t_{pc} a korekčním činitelem K_{1C} z rovnice 6.23. Korekční činitel K_{1C} lze odečíst z grafu v normě a je závislý na $\frac{1}{\delta}$ a ω_0 . Jeho přesný výpočet není v normě ČSN EN 61660 uveden, ovšem je možné provést zjednodušení, kdy $\tau_1 = \frac{1}{3} \cdot t_{pc}$ a dosáhnout s určitou nepřesností výsledku na straně bezpečnosti. Časová konstanta zániku τ_2 je určena rovnicí 6.24 a závisí také na činiteli K_{2C} , který se opět odečítá z grafu z normy ČSN EN 61660-1 a z vypočtených koeficientů $\frac{1}{\delta}$ a ω_0 . Vypočtené hodnoty aproximační funkce zkratového proudu pro kondenzátor jsou uvedeny níže, viz. Tabulka 9. Výsledný průběh aproximační funkce zkratového proudu je zobrazen na obrázku 21.

Tabulka 9 Vypočtené hodnoty aproximační funkce zkratového proudu kondenzátoru

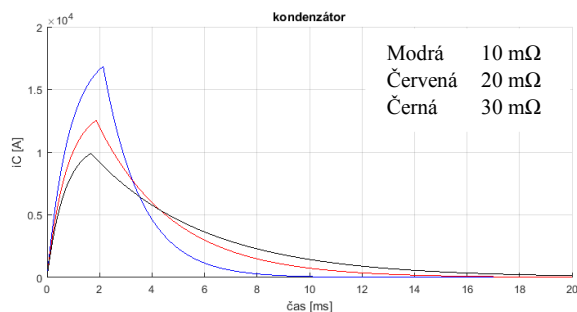
Kondenzátor	i_p	I_k	t_p	τ_1	τ_2
+	(kA)	(kA)	(ms)	(ms)	(ms)
vedení	22,55	0	1,83	0,73	3,11



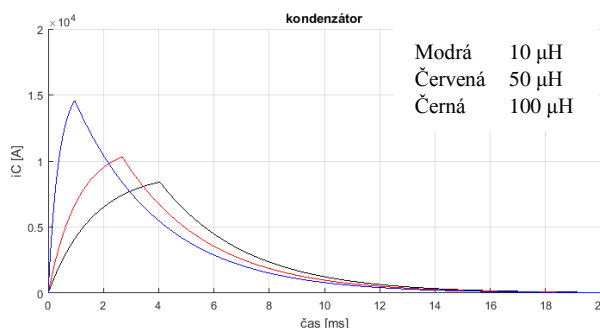
Obrázek 21 Průběh aproximační funkce zkratového proudu kondenzátoru.

Z obrázku 21 je patrné, že kondenzátor v případě poruchy dodá ve velmi krátkém okamžiku proudový impuls, jehož velikost je ovlivněna především kapacitou kondenzátoru a rezistivitou mezi kondenzátorem a místem zkratu. V následujícím modelu uvažme změny jednotlivých parametrů sítě a vliv změn na výsledný průběh aproximační funkce.

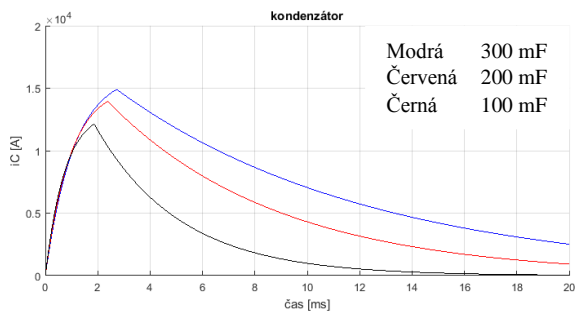
Při snížení činného odporu mezi kondenzátorem a zkratem, dochází k nárůstu nárazového zkratového proudu i_p , strmost nárůstu proudu se zvětšuje a dochází k rychlejšímu vybíjení kondenzátoru. Grafy na obrázku 21 odpovídají napětí kondenzátoru $U_{NC} = 400 V$.



a) Vliv změny rezistivity



b) Vliv změny indukčnosti

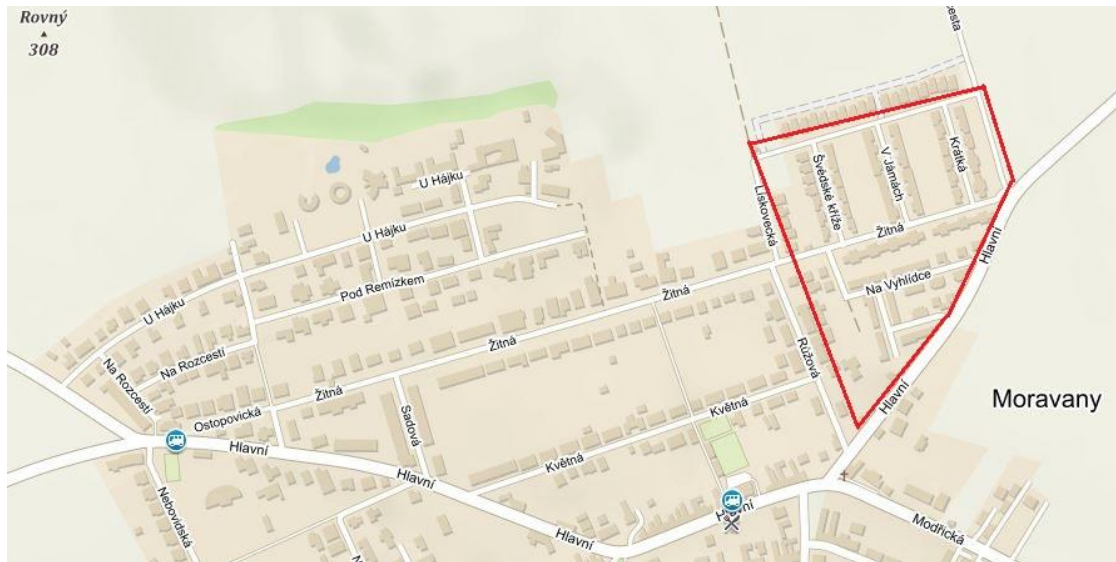


c) Vliv změny kapacity

Obrázek 22 vliv změn vnitřních parametrů do místa zkratu na průběh aproximační funkce zkratového proudu.

8 SIMULACE

Jako předloha simulační sítě byla použita část sítě v příměstské zástavbě Moravany u Brna, kde napájení zajišťuje transformátor o výkonu 630 kVA. Pro názornost příkladu byla simulační síť odlišena od skutečné situace, avšak délky rozvodných kabelů zůstaly zachovány a pro výpočet parametrů střídavé sítě jsou použity skutečné vnitřní parametry transformátoru.



Obrázek 23 Předloha simulační sítě.

Obec Moravany u Brna je napájena z transformační stanice 110/22 kV, která disponuje jedním transformátorem 110/22 kV o jmenovitém instalovaném výkonu 40 MVA. Do budoucna je připravena i plocha pro další transformátor o stejném výkonu. Provozovatelem je společnost E-ON Distribuce a.s. Rozvodná stanice je umístěna přibližně 1,5 km severo-východně od obce Moravany a napájení obce zajišťují dvě linky 22 kV. [21]

Tabulka 10 Parametry rozvodny Moravany

Parametr	Hodnota
Soustava	3~50 Hz, 110 kV / TT
Jmenovité napětí	110 kV
Nejvyšší provozní napětí	123 kV
Jmenovitý zkr. vypínací proud	20 kA
Zkratová odolnost	min. 5 MVA

Technické parametry měniče vycházejí z katalogových hodnot měničů firmy SIEMENS o jmenovitém výkonu 800 kVA. Tento měnič je napájen z klasické třífázové sítě o napětí $U_{AC} = 400 V$, které usměrňuje na stejnosměrné napětí o nominální hodnotě $U_{DC} = 750 V$. Umožňuje také obousměrný tok výkonu a je schopen poskytnout jalový výkon až do velikosti jmenovitého zdánlivého výkonu. [16]

8.1 Parametry prvků sítě

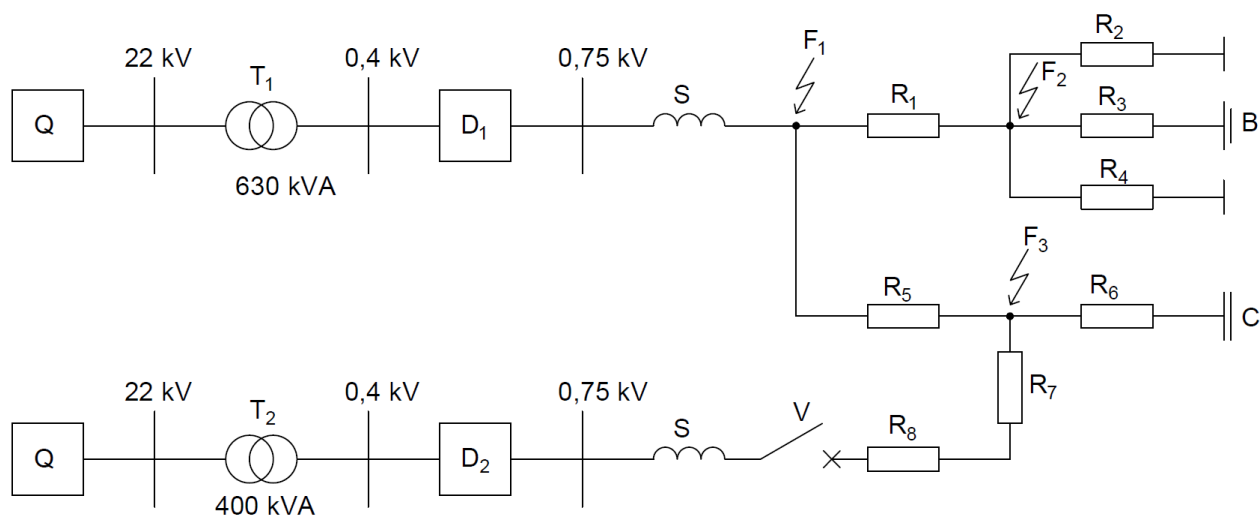
V obci Moravany je instalováno 8 transformátorů 22/0,4 kV o celkovém instalovaném výkonu 4,2 MVA, které jsou připojeny na linky 22 kV VN1275 a VN1375.

Tabulka 11 Parametry transformátorů instalované v obci Moravany

Parametry instalovaných transformátorů v obci Moravany			
Počet	5 ks	2 ks	1 ks
Jmenovitý výkon	630 kVA	400 kVA	250 kVA
Jmenovité napětí – primární vinutí	22 kV	22 kV	22 kV
Jmenovité napětí – sekundární vinutí	0,4 kV	0,4 kV	0,4 kV
Maximální proud – primární vinutí	16,5 A	10,5 A	6,6 A
Maximální proud – sekundární vinutí	909 A	577 A	360 A
Ztráty naprázdno	0,69 kW	0,44 kW	0,28 kW
Proud naprázdno	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Ztráty nakrátko	6,3 kW	4 kW	2,5 kW
Napětí nakrátko	5 %	5 %	5 %

Maximální zkratový proud ze střídavé sítě byl zvolen $I_{ks} = 20 \text{ kA}$, tato hodnota nárazového zkratového proudu odpovídá jmenovitému zkratovému vypínacímu proudu z rozvodny 110/22 kV Moravany. Dále v je simulaci předpoklad umístění tyristorového měniče v těsné blízkosti transformátoru 22/0,4 kV. Tyristorový měnič zajišťuje konverzi napětí ze střídavého na stejnosměrný, a zároveň umožňuje oboustranný tok výkonu. Za měničem je připojena tlumivka, která slouží k vyhlazení stejnosměrného napětí a ke snížení strmosti nárůstu zkratového proudu.

V síti se nachází také baterie, která slouží k pokrytí špičkové spotřeby a může sloužit jako záložní zdroj pro případ přerušení dodávky elektrické energie ze sítě.



Obrázek 24 Schéma simulační sítě

Vedení k jednotlivým odběrným místům je provedeno kabelovým vedením uloženým v zemi. Jedná se o hliníkové vedení složené ze dvou vodičů, průřezy jednotlivých vedení neodpovídají reálnému provedení sítě. Průřezy byly voleny na základě odhadu vytíženosti sítě a zvolením páteřního vedení. Jednotlivé parametry vedení jsou vypočteny na základě katalogových údajů od výrobce NKT. [25]

Tabulka 12 Parametry vedení simulační sítě

typ kabelu	označení	délka	průřez	indukčnost	rezistivita
		[m]	[mm ²]	[μ H]	[m Ω]
NAYY_2x240	R1	60	240	13,80	7,63
NAYY_2x150	R2	150	150	34,50	30,50
NAYY_2x150	R3	250	150	57,50	50,84
NAYY_2x120	R4	350	120	80,50	88,96
NAYY_2x240	R5	60	240	13,80	7,63
NAYY_2x150	R6	200	150	46,00	40,67
NAYY_2x150	R7	150	150	34,50	30,50
NAYY_2x150	R8	100	150	23,00	20,33

8.2 Zkrat v místě F1

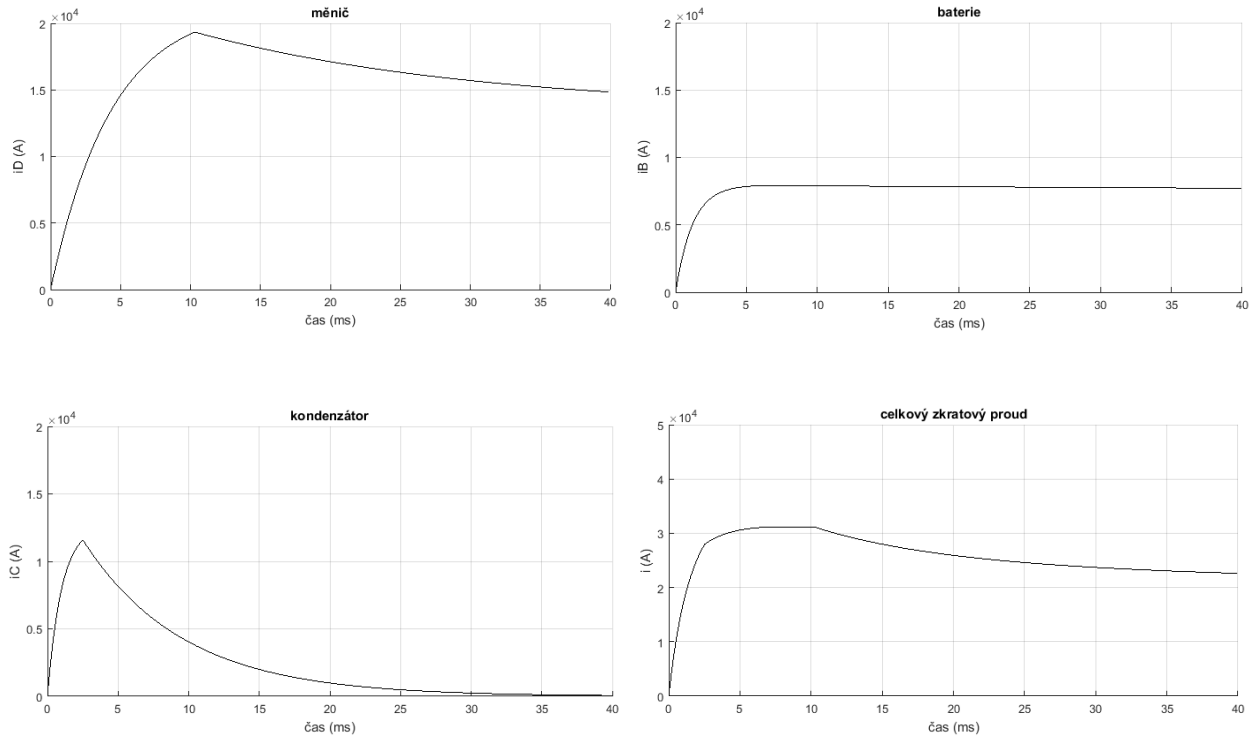
Zkrat v místě F1 simuluje zkrat na výstupních svorkách měniče, jedná se o nejnebezpečnější zkrat, co se velikosti zkratového proudu týče. Vypínač V je v poloze vypnuto, do místa zkratu F1 jsou tedy zdroje zkratového proudu připojeny hvězdicově přes samostatné větve, není tedy nutná korekce společnou větví, jak tomu bude v místech zkratu F2 a F3. Výsledný zkratový proud je roven součtu všech dílčích zkratových proudů od zdrojů a je omezen vnitřními parametry a vedením mezi zdrojem a místem zkratu.

Měnič bývá největším zdrojem zkratového proudu, jeho výsledná velikost závisí na vlastnostech střídavé sítě, parametrech transformátoru a parametrech stejnosměrného vedení mezi měničem a místem zkratu. Při výpočtu zkratových příspěvků z měniče, baterie a kondenzátoru budeme postupovat podle kapitoly 6.4. Při výpočtu zkratového příspěvku z měniče se mezi místem zkratu a měničem nachází pouze tlumivka S, ostatní část sítě se při výpočtu neuplatní. Rezistivita a indukčnost stejnosměrné sítě budou tedy rovny parametrům tlumivky. Baterie B je k místu zkratu připojena přes vedení R1 a R3, výsledná rezistivita a indukčnost se budou rovnat součtu rezistivity a indukčnosti vedení R1, R2 a baterie podle rovnice 6.27 a 6.28. Stejný postup uplatníme i pro kondenzátor C.

Tabulka 13 Hodnoty aproximační funkce zkratového proudu v místě zkratu F1 z dílčích zdrojů

	i_p	I_k	t_p	τ_1	τ_2
	(kA)	(kA)	(ms)	(ms)	(ms)
Měnič	19,34	13,48	10,3	4,34	20,29
Baterie	7,19	7,19	6,16	1,19	100
Kondenzátor	11,57	0	2,51	1	7,1

Průběhy aproximačních zkratových funkcí z jednotlivých zdrojů do místa zkratu F1 jsou uvedeny na obrázcích níže. Při sestavování grafu aproximační funkce zkratového proudu nebo při nutnosti zjistit hodnotu proudu v daném časovém okamžiku, je nezbytné dbát na správný časový interval, ve kterém zjišťujeme hodnotu zkratového proudu. Průběh aproximační funkce z jednoho zdroje je popsán dvěma rovnicemi $i_1(t)$ 6.1 a $i_2(t)$ 6.2, které dělí časový okamžik doby dosažení maxima t_p . Na časovém intervalu $0 \leq t \leq t_p$ platí rovnice 6.1 pro $i_1(t)$, kde t je čas, ve kterém zjišťujeme velikost zkratového proudu, následující časový interval $t \geq t_p$ platí rovnice $i_2(t)$ 6.2.



Obrázek 25 Aproximační funkce zkratového proudu v místě zkratu F1

Je velmi důležité si uvědomit, že pokud je nutné zjistit nárazový zkratový proud i_p celkového zkratového proudu, nelze sečíst jednotlivé nárazové zkratové proudy z dílčích zdrojů. Nárazový zkratový proud i_p z každého dílčího zdroje dosáhne své hodnoty v různých časových okamžicích t_p , jak je patrné z obrázku 25 a časový okamžik t_p je dělicí čas pro použití rovnic na výpočet aproximační funkce zkratového proudu z určitého zdroje. Při výpočtu celkového zkratového proudu je nutné si časovou osu rozdělit na určitý počet intervalů, podle počtu připojených zdrojů do místa zkratu. Dělicí časové okamžiky těchto intervalů jsou právě doby potřebné k dosažení maxima t_p jednotlivých dílčích zdrojů podle jejich velikosti. Podle hodnot t_p z tabulky 13 sestavíme dané časové intervaly k_i .

$$\begin{aligned}
 k_1 &\in \langle 0, t_{pC} \rangle & k_2 &\in \langle t_{pC}, t_{pB} \rangle & k_3 &\in \langle t_{pB}, t_{pD} \rangle & k_4 &\in \langle t_{pD}, 40 \text{ ms} \rangle \\
 k_1 &\in \langle 0; 2,51 \rangle \text{ ms} & k_2 &\in \langle 2,51; 6,16 \rangle \text{ ms} & k_3 &\in \langle 6,16; 10,3 \rangle \text{ ms} & k_4 &\in \langle 10,3; 40 \rangle \text{ ms}
 \end{aligned}$$

Na intervalu k_1 se průběh aproximační funkce vypočte jako součet všech dílčích zkratových proudů $i_1(t)$ podle rovnice 6.1.

$$i_{celk,k1}(t) = i_{1D}(t) + i_{1B}(t) + i_{1C}(t)$$

Na intervalu k_2 , již hodnota aproximační funkce z kondenzátoru nenabývá hodnot $i_{1C}(t)$ podle rovnice 6.1, ale zkratový proud již s rostoucím časem klesá a jeho hodnota odpovídá rovnici pro $i_{2C}(t)$ (6.2). Tento fakt, je nutné zohlednit při výpočtu celkové aproximační funkce zkratového proudu ze všech zdrojů. Na intervalu k_2 se stále zvyšuje hodnota zkratového proudu z baterie a měniče a platí rovnice pro $i_1(t)$, ovšem z kondenzátoru už zkratový proud klesá jeho hodnota pro časový interval K_2 odpovídá rovnici $i_{2C}(t)$.

$$i_{celk,k2}(t) = i_{1D}(t) + i_{1B}(t) + i_{2C}(t)$$

Obdobně pro časový interval k_3 a k_4

$$i_{celk,k3}(t) = i_{1D}(t) + i_{2B}(t) + i_{2C}(t)$$

$$i_{celk,k4}(t) = i_{2D}(t) + i_{2B}(t) + i_{2C}(t)$$

Uvedený postup platí pro velikosti dob maxima $t_{pC} < t_{pB} < t_{pD}$. Konečná hodnota intervalu k_4 byla zvolena 40 ms. Tuto hodnotu můžeme zvolit podle doby, po jakou chceme průběh zkratového proudu sledovat nebo podle doby vybavení ochran.

8.3 Zkrat v místě F2

Výpočet zkratové aproximační funkce je obdobný jako v kapitole 8.2. Je ovšem nutné výsledné dílčí zkratové proudy vynásobit korekčním činitelem σ_k . Tento korekční činitel σ_k zahrnuje vliv společné větve ze dvou a více zdrojů do místa zkratu. Vypínač V je stále v poloze vypnuto a měnič D_2 je odpojen. Podle obrázku 24 je baterie B připojena do místa zkratu přímo, před vedení R3, výsledný dílčí zkratový proud z baterie není korekcí ovlivněn. Měnič D a kondenzátor jsou do místa zkratu F2 připojeny přes společnou větev R1, v tomto případě je nutný výpočet korekčního činitele σ_k jak pro měnič, tak pro kondenzátor.

Jedním z možných postupů, jak zjistit velikost korekčního činitele σ , je využít předepsaného výpočtu z normy ČSN EN 61660-1[14].

Další možnost zjištění korekčního činitele σ_k je využití náhradního zkratového schématu, kdy zdroje zkratového proudu (kondenzátor, baterie, měnič) jsou nahrazeny jejich odpory a v místě zkratu je připojen fiktivní napěťový zdroj. Korekční činitel σ_k udává poměr velikosti zkratového proudu nekorigovaného i_{nekor} a skutečného i_{kor}

$$\sigma_k = \frac{i_{kor}}{i_{nekor}} \quad (8.1)$$

kde i_{nekor} je proud, který by protékal místem zkratu, pokud by byl připojen pouze daný zdroj zkratového proudu, pro který je korekční činitel počítán a všechny ostatní zdroje jsou odpojeny.

Skutečný proud i_{kor} protékající místem zkratu z daného zdroje zkratového proudu, je možné vypočítat z náhradního zkratového schématu postupným zjednodušováním. V náhradním zkratovém schématu se jedná o proud, který protéká náhradním rezistorem daného zdroje. Náhradní zkratová schémata pro výpočet korekčního činitele σ_{kD} pro měnič jsou uvedeny na obrázku 26. Nekorigovaný příspěvek zkratového proudu z měniče do místa zkratu se vypočte podle následující rovnice (8.2)

$$I_{D,nekor} = \frac{U_{DC}}{R_Y + R_{D,c}} \quad (8.2)$$

Kde U_{DC} je napětí v místě zkratu, R_Y je rezistence společné větve a $R_{D,c}$ je celková rezistivita mezi společnou větví a měničem. Rovnice (8.2) vychází ze schématu na obrázku 26 a).

Náhradní rezistivita $R_{D,c}$ lze odvodit z rovnice (8.2), neboť $i_{D,nekor}$ je považován za kvazistacionární proud nekorigovaného zkratového příspěvku. [14]

$$R_{D,c} = \frac{U_{DC}}{I_{kD}} - R_Y \quad (8.3)$$

Pro určení korigovaného zkratového proudu z měniče vyjdeme ze schématu na obrázku 24 b). Kde I_C představuje v dané situaci příspěvek zkratového proudu do místa zkratu z měniče a dalších zdrojů zkratového proudu R_{resj} . Zkratový příspěvek z měniče $I_{D,kor}$ je možno určit z celkového zkratového příspěvku I_C a poměrem rezistivity kondenzátoru a měniče

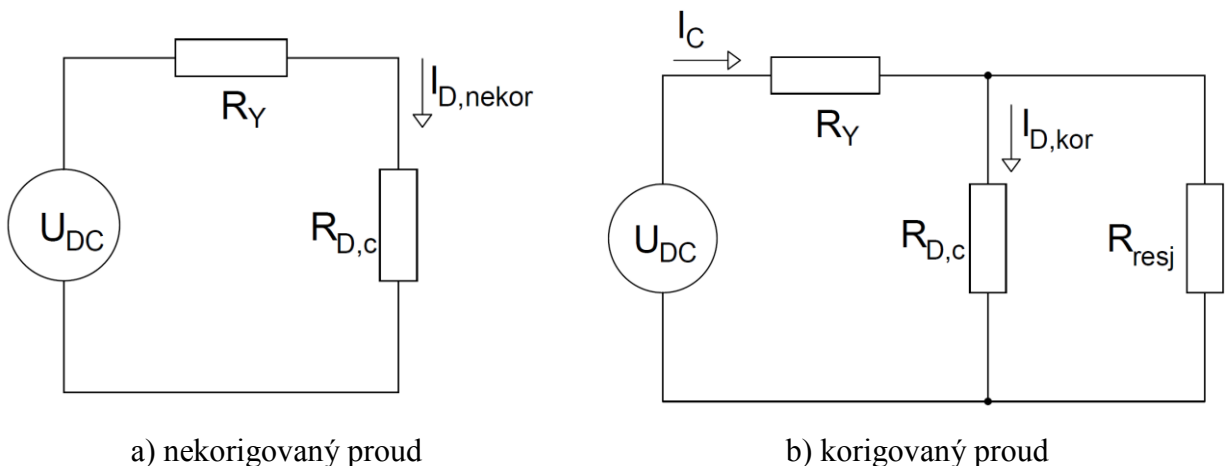
$$I_C = \frac{U_{DC}}{\frac{R_{D,c} \cdot R_{resj}}{R_{D,c} + R_{resj}} + R_Y} \quad (8.4)$$

$$I_{D,kor} = \frac{R_{resj}}{R_{D,c} + R_{resj}} \cdot I_C \quad (8.5)$$

Rezistivita R_{resj} představuje celkovou rezistivitu ostatních zdrojů zkratového proudu, jejichž zkratové proudy protékají do místa zkratu přes společnou větev. Pokud by společnou větví procházely zkratové proudy z baterie a motoru, výsledná rezistivita R_{resj} se určí výpočtem pro paralelní spojení vnitřních rezistivit motoru a baterie. V místě zkratu F2 je přes společnou větev připojen pouze kondenzátor a měnič, podle normy ČSN EN 61660 [14] se při výpočtu R_{resj} neuplatňuje rezistivita kondenzátorové větve. V případě, kdy společnou větví prochází pouze kondenzátor a další zdroj zkratového proudu „X“, platí pro výpočet korekčního činitele pro zdroj X je rezistivita: $R_{resX} = 1$.

Pro ověření správnosti postupu lze rovnice pro výpočet korigovaného a nekorigovaného proudu (8.2) a (8.5) dosadit do rovnice pro výpočet korekčního činitele (8.1) a provést ověření s normou ČSN EN 61660.

$$\sigma_{kD} = \frac{i_{kor}}{i_{nekor}} = \frac{R_{resj}}{R_{D,c} + R_{resj}} \cdot \frac{U_{DC}}{\frac{R_{D,c} \cdot R_{resj}}{R_{D,c} + R_{resj}} + R_Y} \cdot \frac{R_Y + R_{D,c}}{U_{DC}} = \frac{R_{resj} \cdot (R_Y + R_{D,c})}{R_{D,c} \cdot R_{resj} + R_Y \cdot R_{D,c} + R_Y \cdot R_{resj}} \quad (8.6)$$



Obrázek 26 Schéma na výpočet korekčního činitele

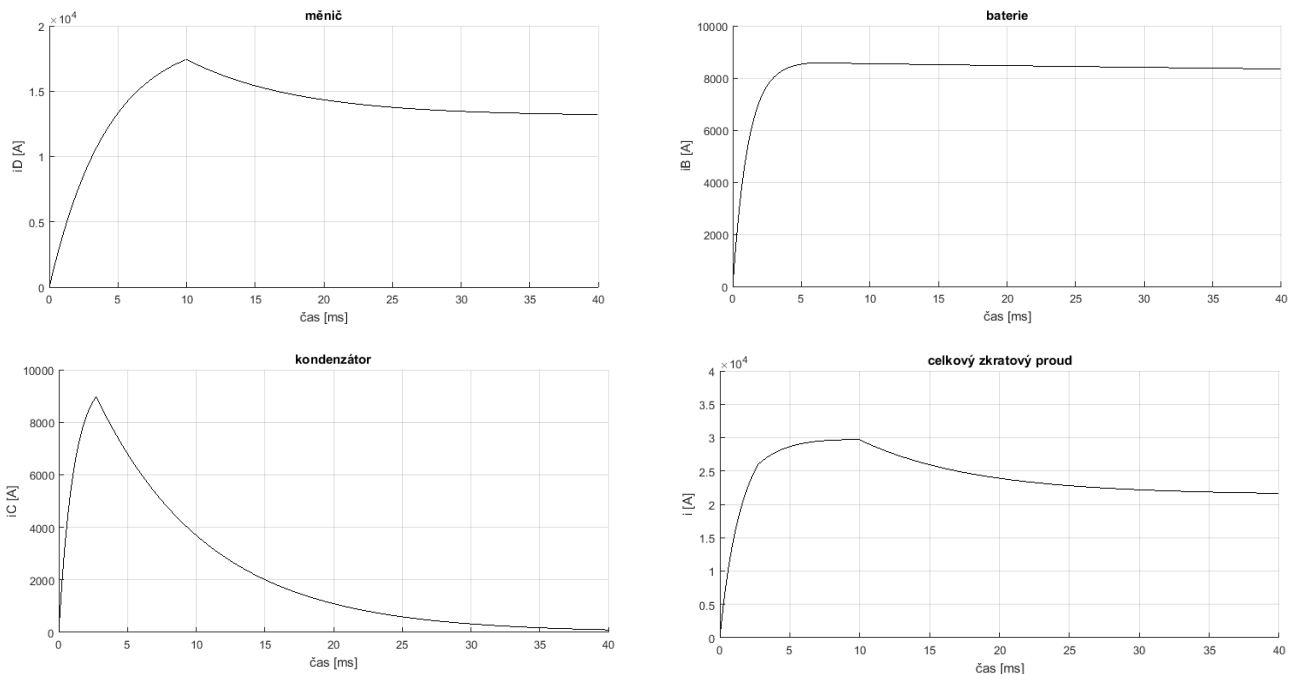
Výsledná rovnice pro korekční činitel σ_{kD} se shoduje s rovnicí uvedenou pro daný případ v normě ČSN 61660 [14]. Uvedeným postupem je možné analyzovat i složitější sítě s více zdroji nebo pokud je potřeba provést korekci pro více větví. Ve složitějších systémech bývá výpočet i_{kor} metodou postupného zjednodušování náročný a zdlouhavý.

$$i_{pD,kor} = \sigma_{kD} \cdot i_{pD} \quad (8.7)$$

$$I_{kD,kor} = \sigma_{kD} \cdot I_{kD} \quad (8.8)$$

Korigované hodnoty zkratových proudů dosadíme do rovnic (6.1), (6.2), (6.3), pro výpočet hodnoty zkratové aproximační funkce v daném časovém okamžiku a sestavíme průběh zkratové aproximační funkce podle postupu uvedeného v kapitole 8.2. Časové konstanty τ_1, τ_2 ani doba náběhu maxima t_p nejsou korekcí ovlivněny.

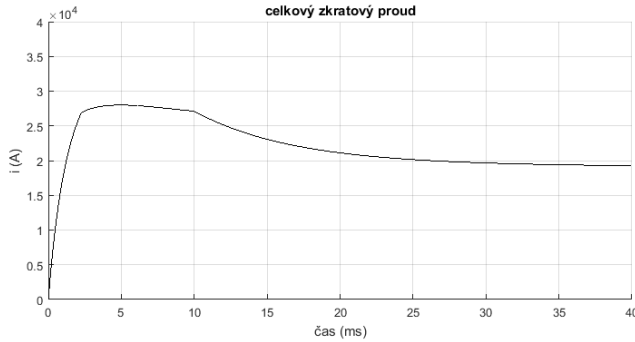
Dílčí zkratové proudy a celkový zkratový proud v místě zkratu F2 jsou uvedeny na obrázcích níže (Obrázek 27)



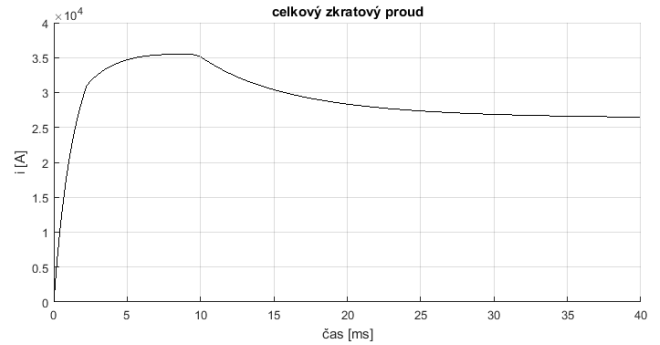
Obrázek 27 Aproximační funkce dílčích a celkového zkratového proudu v místě zkratu F2

8.4 Zkrat v místě F3

Vyšetření průběhu zkratové aproximační funkce v místě zkratu F3 využijeme dosavadních postupů z předchozích kapitol. Zkrat nastal v těsné blízkosti kondenzátoru C a lze tedy předpokládat, že vliv zkratového příspěvku z kondenzátoru bude mít značný vliv na výsledný průběh zkratové aproximační funkce. Vypínačem V následně připojíme měnič D₂, cílem je zjistit změnu průběhu zkratové aproximační funkce v případě připojení dalšího zdroje zkratového proudu do systému. Měnič D₂ je napájen přes transformátor T₂ z totožné sítě jako měnič D₁. Parametry transformátoru T₂ jsou uvedeny v tabulce výše (Tabulka 11).



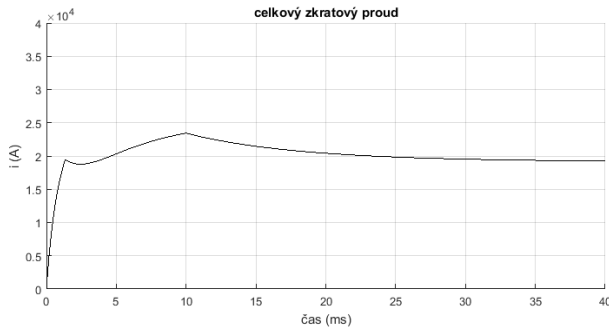
a) Měnič D₂ odpojen



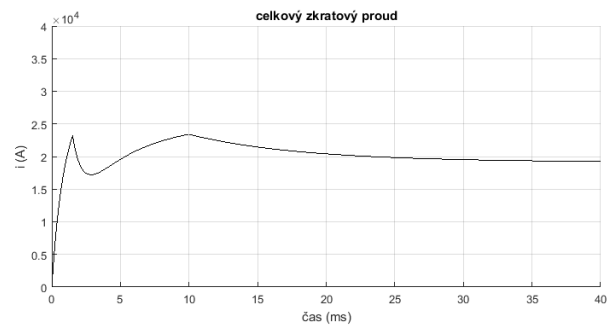
b) Měnič D₂ připojen

Obrázek 28 Průběh aproximační zkratové funkce v místě zkratu F3

Následující simulace se zabývá změnou vnitřních parametrů kondenzátoru a vliv těchto změn na výsledný průběh zkratové funkce systému. V kapitole 7.3 jsou uvedeny změny parametrů kondenzátoru pouze pro samotný kondenzátor, nyní uvažme vliv vnitřních parametrů kondenzátoru na celkové chování systému v případě zkratu. Se snižující se kapacitou klesá i amplituda zkratového proudu a doba vybíjení kondenzátoru. Zásadní vliv na vybíjení kondenzátoru má také rezistivita kondenzátoru a vedení, které je spojeno se zkratem. Uvažme nyní situaci, kdy je měnič D₂ odpojen a zkrat nastal v místě F3, na obrázku níže jsou zobrazeny výsledné průběhy zkratového proudu při změně vnitřních parametrů kondenzátoru C.



a) $C = 24 \mu F$



b) $R_{Cr} = 20 m\Omega, C = 24 \mu F$

Obrázek 29 Závislost průběhu zkratové funkce na změnách vlastností kondenzátoru

Pokud je kondenzátor v blízkosti zkratu, nelze zanedbat jeho zkratový příspěvek. Rázový zkratový proud z kondenzátoru může dosahovat značných hodnot za velmi krátký čas, pro návrh ochranných prvků sítě je nutné tyto vlastnosti zohlednit.

9 ZÁVĚR

V první části práce jsou uvedeny výhody a nevýhody stejnosměrného a střídavého napětí. Hlavní výhodou stejnosměrného systému v ustáleném stavu je absence kapacitní a induktivní složky proudu. V praxi se tato výhoda projeví u stejnosměrného napětí menšími ztrátami na vedení. Zásadní nevýhodou stejnosměrného systému je nutnost použití výkonových polovodičových prvků v případě potřeby změny velikosti napětí. Polovodičové součástky zvyšují cenu projektu a vyžadují náročnější údržbu než běžné prvky střídavé soustavy. Délka vedení bývá hlavním argumentem pro výběr střídavé nebo stejnosměrné sítě.

Následující část práce je věnována stejnosměrným systémům nízkého napětí. Instalovat stejnosměrný systém do rezidenčních budov je v současné době neekonomické řešení. Některé projekty byly v praxi realizované, například v Nizozemsku v Haagu, ale návratnost investice do stejnosměrné sítě na úrovni rezidenčních budov a distribuční sítě je v současné době kvůli vysoké ceně výkonových polovodičových prvků téměř nulová a realizované projekty jsou využívány většinou ke studijním účelům.

Další kapitola je věnována popisu HVDC systému v poruchovém stavu. Výsledky průběhu zkratového proudu simulované v programu PSCAD jsou následně porovnány s výpočtem podle normy ČSN EN 61660. Články, zabývající se touto problematikou, by mohly posloužit jako základ pro rozšíření normy ČSN EN 61660.

V praktické části práce jsou uvedeny postupy pro výpočet zkratové aproximační funkce prvků stejnosměrné sítě. Tyto postupy vycházejí z normy z roku 1997 a umožňují sestavit náhradní předpokládaný zjednodušený průběh zkratového proudu. Přesnější průběh zkratového proudu lze získat experimentálním měřením v daném místě systému.

Výpočty a následné vykreslení grafů funkcí byly prováděny v programu MATLAB. Vzhledem k určitým podmínkám platnosti rovnic byl výpočet částečně automatizován tak, aby vyhodnotil správný postup výpočtu při změně vstupních parametrů.

V kapitole 7 jsou popsány konkrétní postupy výpočtu zkratové aproximační funkce jednotlivých prvků sítě podle normy ČSN EN 61660-1. Při výpočtu byl uvažován dokonalý zemní zkrat mezi kladným vodičem a zemí. Zároveň pro zjednodušení výpočtu je uvažována konstantní rezistivita při teplotě okolí 20 °C a je zanedbán vliv oteplení vodiče průchodem proudu. Z výsledků simulací bateriového systému vyplývá, že rezistivita má hlavní vliv na velikost zkratového proudu a indukčnost na strmost nárůstu zkratového proudu. V případě kondenzátoru je velikost zkratového proudu závislá také na indukčnosti a kapacitě systému.

V příloze A je uveden model postupu výpočtu aproximační zkratové funkce v programu MATLAB/Simulink. Cílem bylo navrzení názorného příkladu výpočtu zkratových proudů ve stejnosměrných systémech pro studijní účely. Součástí příkladu je výpočet průběhu zkratové aproximační funkce a její následné grafické zobrazení. Výsledné parametry a průběh zkratové aproximační funkce vypočtené v programu MATLAB/Simulink se shodují s výsledky zjištěnými v kapitole 7.1.4.

Norma ČSN EN 61660 udává postupy výpočtu platné pouze pro LCC měnič a olovené akumulátory, je tedy vhodné normu aktualizovat o postup výpočtu měniče využívající rozdílnou technologii a uvést standardizující výpočet pro jiné typy akumulátorů.

V následující části byl analyzován průběh zkratové funkce v závislosti na místě poruchy. V simulační síti s napětím 750 V byly zvoleny tři místa poruchy, výpočty zkratových poměrů jsou provedeny podle postupu z předchozí kapitoly. Dále je názorně popsán možný výpočet korekčního činitele, který upravuje velikost jednotlivých zkratových příspěvků v případě jejich spojení společnou větví do místa zkratu. Tento korekční činitel lze také určit podle rovnice uvedené v normě ČSN EN 61660-3 nebo ČSN EN 61660-1. Ovšem při postupu výpočtu korekčního činitele je nezbytné ke každé síti přistupovat individuálně, nelze použít jednotný vzorec pro výpočet obecné sítě.

Hlavním účelem práce bylo celkové zhodnocení možného využití stejnosměrného napětí v různých oblastech přenosu elektrické energie a návrh příkladu výpočtu zkratových poměrů ve stejnosměrném systému pro studijní. Ze zjištěných výsledků vyplývá pro stejnosměrný systém největší potenciál v oblasti HVDC přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti a propojení střídavých sítí rozdílného kmitočtu. Postup výpočtu zkratových poměrů v síti podle normy ČSN EN 61660 je značně závislý na topologii. Do budoucna by bylo vhodné částečně automatizovat výpočet zkratových poměrů a provést aktualizaci normy o postup výpočtu pro systémy využívající modernější technologie.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] A. VARGAS EVANS, M. *Why Low Voltage Direct Current Grids? A case-study assessment of using direct current in low voltage distribution* [online]. TU Delft, 2013 [cit. 2018-11-13].
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.915.6322&rep=rep1&type=pdf>. Skripta. Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology.
- [2] ABB wins orders of over \$300 million for world's first 1,100 kV UHVDC power link in China. *ABB* [online]. 2016 [cit. 2018-12-02].
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/f0f2535bc7672244c1257ff50025264b.aspx>.
- [3] ABB. Brazil-Argentina HVDC Interconnection. *ABB* [online]. [cit. 2019-01-02].
<https://new.abb.com/systems/hvdc/references/brazil-argentina-hvdc-interconnection>.
- [4] ABB. Konti-Skan: Konti-Skan HVDC link was the first interconnection between Sweden and the western grid in Denmark. *ABB* [online]. 2017 [cit. 2018-12-01].
<https://new.abb.com/systems/hvdc/references/konti-skan>.
- [5] ABB. *Why HVDC: Economic and environmental advantages*. *ABB* [online]. [cit. 2018-11-21].: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>.
- [6] ABB. *HVDC Light®: It's time to connect* [online]. Sweden: ABB, 2013 [cit. 2018-11-03].
<https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/hvdc-light.pdf>.
- [7] BELDA, N., C. PLET, C. SPALLAROSA a K. TAHATA. *HVDC Network Fault Analysis* [online]. 5.1. PROMOTioN, 2016 [cit. 2018-12-02].
https://www.promotionoffshore.net/fileadmin/PDFs/D5.1_PROMOTioN_Deliverable_5.1_HVDC_Network_Fault_Analysis.pdf.
- [8] BLAŽEK, V. a P. SKALA. *Distribuce elektrické energie*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně.
- [9] ČSN 37 6750. 1974. Trakční měnírny pro tramvajové a trolejbusové dráhy.
- [10] ČSN 37 6754. 1997. Projektování trakčního vedení tramvajových a trolejbusových drah.
- [11] ČSN EN 50122- 2. 2001. Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Část 2: Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů, způsobených DC trakčními proudovými soustavami.
- [12] ČSN EN 50122-1 ED.2. 2011. Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Část 1: Ochranná opatření vztahující se na elektrickou bezpečnost a uzemňování.
- [13] ČSN EN 50122-3. 2011. Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemnění a zpětný obvod – Část 3: Vzájemná interakce mezi AC a DC trakčními soustavami.
- [14] ČSN EN 61660-1. 1999. Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 1: Výpočet zkratových proudů
- [15] ČSN EN 61660-3. 2002. Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách - Část 3: Příklady výpočtů.
- [16] Datasheet měničů 800kVA: Siemens Power Converter System Měnič 800VA. SIEMENS.

- [17] DES, J.C. *Arc-Flash Hazard Calculations in LV and MV DC Systems—Part I: Short-Circuit Calculations*. IEEE: Transactions on Industry Applications [online]. 2014, pp. 1687 – 1697, [cit. 2018-11-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6661345>. DOI: 10.1109/TIA.2013.2288416. ISSN 1939-9367.
- [18] Different types of HVDC links. *Circuit Globe* [online]. 2017 [cit. 2018-11-22]. <https://circuitglobe.com/different-types-hvdc-links.html>.
- [19] HAMMERBAUER, J. *Olověné akumulátory* [online]. [cit. 2019-04-09]. <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>.
- [20] HVDC-stejnosměrný přenos elektrické energie. *O energetice* [online]. 2017, 16.srpen.2017 [cit. 2018-10-11]. <http://oenergetice.cz/technologie/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>.
- [21] CHROMÍK, A. Vyvedení výkonu z rozvodny 110/22 kV Moravany u Brna. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2013, 105 stran.
- [22] JAVAID, U., F. FREIJEDO, D. DUJIC a W. VAN DER MERWE. MVDC Supply Technologies for Marine Electrical Distribution Systems. *CPSS* [online]. 2018, pp. 65 - 76 [cit. 2019-01-09]. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2018.00007. ISSN 2475-742X. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/8362589>.
- [23] JOSEFSSON, J., U. RIECHERT, C. PLET, S. MEBRAHTU-MELAKE a A. HASSANPOOR. *Performance Demonstration of HVDC substation equipment: Demonstration der Eignung und Leistungsfähigkeit von HGÜ Schaltanlagen* [online]. Stuttgart, Germany, 2015, pp. 1-14 [cit. 2018-12-01]. https://library.e.abb.com/public/7b73a374d8894ce4b7cea9c0741d88d3/Hochspannungssymposium_2018_PROMOTioN.pdf.
- [24] JOSSEN, A. Fundamentals of battery dynamics. *Journal of Power Sources*. 2006, pp. 530-538.
- [25] *Katalog: Instalační kabely s Al jádrem* [online]. NKT [cit. 2019-04-12]. https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/EAY2Y+DS+CZ+EN.pdf
- [26] KENZELMANN, Stephan. *Modular DC/DC Converter for DC Distribution and Collection Networks*. Lausanne, 2012. Dizertační práce. École polytechnique fédérale de Lausanne - Faculté Sciences et Technique de l'Ingénieur: Laboratoire Électronique Industrielle.
- [27] KIRBY, N.M., N.M MACLEOD, C HORWILL a D.R. CRITCHLEY. Konti–Skan HVDC Refurbishment and Life Extension Methods for other HVDC Projects. IEEE: Xplore digital library [online]. USA, 2008, pp. 1-5 [cit. 2018-10-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4596694>. DOI: 10.1109/PES.2008.4596694. ISSN 1932-5517.
- [28] LAI, X., K. DENG, Q. GAO, X. ZHA a F. LIU. *A Short-circuit Current Calculation Method for Low-Voltage DC Microgrid* [online]. Shanghai, China: School of Electrical Engineering Wuhan University, 2015 [cit. 2018-12-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7037883>. ISBN 978-1-4799-6768-1.
- [29] *LVDC: electricity for the 21st century* [online]. 1. Geneva: IEC, 2017 [cit. 2018-11-10]. https://www.iec.ch/technologyreport/pdf/IEC_TR-LVDC.pdf. ISBN 978-2-8322-4610-8.
- [30] LVDC: the better way. *IEC* [online]. Geneva, 2017, 16 [cit. 2018-11-10]. https://www.iec.ch/about/brochures/pdf/energy/iec_lvdc_the_better_way_en_lr.pdf.

- [31] MIČKA, D. *Model HVDC spojky pro laboratorní výuku*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.
- [32] NILSSON, Daniel. *DC Distribution Systems: THESIS FOR THE DEGREE OF LICENTIATE OF ENGINEERING*. Göteborg, Sweden, 2005. Studie. Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering.
- [33] *Nízkopodlažní tramvaje* [online]. ŠKODA transportation [cit. 2018-12-02]. <https://www.skoda.cz/data/catalog/6/45/471.pdf>.
- [34] NUUTINEN, P, T. KAIPIA, J. KARPPANEN, et al. LVDC rules – technical specifications for public LVDC distribution network. *CIREN - Open Access Proceedings Journal* [online]. 2017, pp. 293 - 296 [cit. 2019-01-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8315709>. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0519. ISSN 2515-0855.
- [35] PAAR, M. *Speciality z oblasti rozvodu a přenosu*. 2018. Prezentace. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [36] PANÁŠ, M. *Zkušenosti a podpora rozvoje bateriových systémů a elektromobility: Prezentace*. Siemens, 2017. <https://new.siemens.com/cz/cs/products/energy/medium-voltage/solutions/siestorage.html>.
- [37] PANKRÁC, V. Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 2). *Elektro revue* [online]. Katedra elektromagnetického pole ČVUT v Praze, 2010, [cit. 2019-04-09]. <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice/>. ISSN 1213-1539.
- [38] PEI, W., W. DENG, X. ZHANG, H. QU a K. SHENG. Potential of Using Multiterminal LVDC to Improve Plug-In Electric Vehicle Integration in an Existing Distribution Network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. China, 2015, pp. 3101 – 3111 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6980453>. DOI: 10.1109/TIE.2014.2379219. ISSN 1557-9948.
- [39] RUDERVALL, R. a R. SHARMA. *High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper* [online]. Washington, D.C. USA: Energy Week, 2000 [cit. 2018-11-01]. <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/hamerly1/docs/energyweek00.pdf>.
- [40] SACIAK, A., A. WASSERRAB a G. BALZER. *SHORT-CIRCUIT CALCULATION IN AC NETWORKS IN CASE OF HVDC STATIONS WITH LINE-COMMUTATED CONVERTERS (LCC)* [online]. Darmstadt, Germany: 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), 2018 [cit. 2019-05-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8515446>. ISBN 978-9-0758-1528-3.
- [41] SIEMENS. *High Voltage Direct Current Transmission: Proven Technology for Power Exchange* [online]. Germany, 2011 [cit. 2018-12-01]. https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/powertransmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf.
- [42] *Technologie ABB, které změnilý svět. Část první: HVDC* [online]. ABB [cit. 2019-05-21]. <http://www.abb.cz/cawp/seitp202/a17c0e2d65105853c12575de00417af7.aspx>

-
- [43] *Tesla Supercharger Technology* [online]. [cit. 2019-05-26].
<https://www.tesla.com/supercharger>
- [44] WASSERRAB, A. a G. BALZER. Calculation of Short Circuit Currents in HVDC Systems. *Power Engineering Conference: 46th International Universities' Power Engineering Conference* [online]. Germany, 2011, pp. 1-6 [cit. 2019-05-16].
<https://ieeexplore-ieeeorg.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6125639>.
- [45] Y. Cho, J. Kim, J. Cho and J. Kim, "Design and construction of LVDC distribution site," *CIREN Workshop 2016*, Helsinki, 2016, pp. 1-4.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7861231>. doi: 10.1049/cp.2016.0629
- [46] *Zákon o technických požadavcích na výrobky*. Praha, ročník 1997, částka 6, číslo 22.
<http://zakony.centrum.cz/zakon-o-technicky-pozadavcich-na-vyrobky/cast-1-hlava-2-paragraf-4a?full=1>.
- [47] Železniční napájecí soustava. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08].
https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nap%C3%A1jec%C3%AD_soustava

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Model výpočtu parametrů zkratové aproximační funkce měniče podle kapitoly 7.1 v programu MATLAB/Simulink.

Příloha B: Model výpočtu průběhu zkratové aproximační funkce měniče podle kapitoly 7.1 v programu MATLAB/Simulink.

Příloha C: Výsledný průběh zkratové aproximační funkce měniče podle kapitoly 7.1 v programu MATLAB/Simulink.