Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Bakalářská práce

Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání

Autor práce:
Josef Musil

Vedoucí práce:
Ing. Vladimír Vajnar

Plzeň 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Josef MUSIL**
Osobní číslo:	**E14B0046P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektrotechnika a energetika**
Název tématu:	**Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Popište princip přenosu výkonu po vedeních HVDC s důrazem na provozní ztráty, možnosti řízení toků výkonu a technicko-ekonomické limity.
2. Prozkoumejte současný stav v návrhu, konstrukci a provozu sítí HVDC.
3. Stanovte zásadní problémy spojené s vypínáním stejnosměrného proudu na úrovních vysokého napětí a možnosti jejich eliminace novými trendy v technice HVDC vypínačů.
4. Zhodnoťte funkčnost moderních HVDC vypínačů a navrhněte zadání následující práce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Bárta, Vostracký a kol., Spínací přistroje velmi vysokého napětí, SNTL, 1983.**
2. **Publikace z databáze IEEE Xplore Digital Library.**
3. **Publikace CIGRE.**
4. **Podpůrné materiály výrobců (ABB, Siemens, atd.)**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Vajnar**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání. Cílem této práce bylo popsat princip přenosu výkonu po vedení HVDC a stanovit vypínání stejnosměrného proudu na úrovních vysokého napětí. V této práci byl kladen důraz na zpracování funkčnosti moderních hybridních HVDC vypínačů. Čtenář zde bude obeznámen se současnými nejdelšími vybudovanými aplikacemi ve světě. Součástí této práce jsou veškeré detailní informace týkající se měničových stanic, stožárů, izolátorů a vodičů používaných v tomto typu přenosu. Nakonec je zde obsaženo porovnání jednotlivých typů stejnosměrných vypínačů.

Klíčová slova

Provozní ztráty, ekonomické limity, stožáry, konstrukce, hybridní vypínač, spínání, komutační spínač, ultra rychlý vypínač, svodič přepětí, HVDC, měnič, DC, AC.

Abstract

Musil, Josef . *Operation of HVDC grids with emphasis on the switching phenomena* [*Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání*]. Pilsen, 2017. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Ing. Vladimír Vajnar

---

The bachelor thesis is focused on the operation of HVDC grids with emphasis on the switching phenomena. The aim of this work is to described the principle of power transmission of HVDC lines and to determine the breaking process of DC current at high voltage levels. In this work, emphasis is also put on the processing of the functionality of modern hybrid HVDC breakers. The reader will be familiar with the most specific applications in the world. This work includes all the detailed information regarding the inverter stations, towers, insulators and conductors used in this type of transmission. Finally, there is a comparison of the different types of HVDC circuit breakers.

Keywords

Operating losses, economic limits, tower, construction, hybrid breaker, switching, load commutation switch, ultrafast disconnector, surge arrester, HVDC, invertor, DC, AC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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. Souhlasím s umístěním bakalářské práce v knihovně a s jejím dalším užitím v různých předmětech nebo k vlastní potřebě jednotlivým zájemcům.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5. června 2017 Josef Musil

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Vajnarovi za jeho přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek **vii**

Seznam obrázků **ix**

Seznam tabulek **x**

Úvod **1**

1 Přenos výkonu HVDC **2**
1.1 DC vs AC . . . 2
1.1.1 Vyhodnocení přenosových nákladů . . . 2
1.1.2 Stabilita přenosu . . . 3
1.1.3 Řízení napětí . . . 3
1.1.4 Kompenzace linky . . . 4
1.1.5 Problémy spojení AC sítí . . . 4
1.1.6 Zemní impedance . . . 4
1.1.7 Problémy DC přenosu . . . 4
1.1.8 Výhody a nevýhody stejnosměrného přenosu . . . 5
1.2 Porovnání ztrát stejnosměrného a střídavého přenosu . . . 6
1.3 Provozní ztráty HVDC systému . . . 8
1.4 HVDC systémy . . . 10
1.4.1 HVDC Classic . . . 10
1.4.2 HVDC Light . . . 10
1.4.3 HVDC Ultra . . . 11
1.5 Přenos HVDC ve světě . . . 11
1.5.1 Francie – Španělsko . . . 11
1.5.2 Německo – Švédsko . . . 12
1.5.3 Austrálie – Tasmánie . . . 12
1.5.4 Xiangjiaba–Shanghai . . . 12
1.6 Přenos HVDC sítí s nejdelším instalovaným výkonem . . . 13
1.6.1 Nejdelší podzemní HVDC přenos . . . 13
1.6.2 Nejdelší nadzemní HVDC přenos . . . 13
1.6.3 Nejdelší podmořský HVDC přenos . . . 14

2 Konstrukce a zařízení HVDC sítí **16**
2.1 Konstrukce HVDC systémů . . . 16
2.1.1 Stožáry . . . 16
2.1.2 Vodiče HVDC . . . 17
2.2 HVDC konfigurace . . . 19
2.2.1 Monopolární systém . . . 19
2.2.2 Bipolární systém . . . 20

2.2.3 Multiterminální systém . . . 20
2.2.4 Back-to-back systém . . . 21
2.2.5 Filtry . . . 22
2.2.6 Vyhlazovací tlumivky . . . 22
2.3 Typy měničů a zařízení spojené s přenosem . . . 22
2.3.1 LCC vs VSC . . . 23

3 Spínání a vypínání stejnosměrného proudu na úrovních VVN 24
3.1 Zapínání obvodu napájeného stejnosměrným napětím . . . 24
3.2 Zhášení elektrického oblouku v obvodu stejnosměrného proudu . . . 25
3.3 Rychlovypínače . . . 29
3.4 HVDC vypínače . . . 31
3.4.1 Elektromechanický vypínač . . . 31
3.4.2 Polovodičový vypínač . . . 32

4 Hybridní vypínače HVDC 34
4.1 Hybridní HVDC vypínač ABB . . . 34
4.1.1 Princip hybridního HVDC vypínače ABB . . . 34
4.2 Hybridní HVDC vypínač Alstom . . . 36
4.2.1 Princip hybridního HVDC vypínače Alstom . . . 36
4.3 Porovnání HDCCB ABB a ALSTOM . . . 39
4.4 Porovnání technologií vypínačů . . . 40
4.4.1 Vypínací čas . . . 41
4.4.2 Výkonové ztráty . . . 41
4.4.3 Napěťová a proudová zatížitelnost . . . 41

5 Závěr 42

6 Literatura 44

Seznam použitých symbolů a zkratek

HVDC	High Voltage Direct Current, Vysokonapěťový stejnosměrný proud
DC	Direct Current, Stejnosměrný proud
AC	Alternating Current, Střídavý proud
SVC	Static Var Compensator, Statický kompenzátor
STATCOM	Static Synchronous Compensator, Statický synchronní kompenzátor
HVAC	High Voltage Alternating Current, Vysokonapěťový střídavý proud
CO2	Oxid uhličitý
Q	Jalový výkon, ($kVAr$)
P	Činný výkon (MW)
S	Zdánlivý výkon (MVA)
UHVDC ..	Ultra High Voltage Direct Current, Ultra vysokonapěťový stejnosměrný proud
LCC	Line Commutate Converter, Zdroj proudu
VSC	Voltage Source Converter, Napěťový zdroj
CSC	Current Source Converter, Zdroj proudu
INELFE ..	Interconnexion électrique France-Espagne, Elektrické propojení Francie a Španělska
MW	Jednotka činného výkonu
kV	Jednotka elektrického napětí
kA	Jednotka elektrického proudu
ms	Jednotka času
Hz	Jednotka frekvence
km	Jednotka vzdálenosti
SCFF	Self-Contained Fluid-Filled, Kabely naplněné tekutinou
SCOF	Self-Contained Oil-Filled, Kabely naplněné olejem
HPFF	High-Pressure Fluid-Filled, Vysokotlaké kabely naplněné tekutinou
HPOF	High-Pressure Oil-Filled, Vysokotlaké kabely naplněné olejem
HPGF	High-Pressure Gas-Filled, Vysokotlaké kabely naplněné plynem
GC	Gas-Compression, Kabely naplněné kompresí plynu
MI	Mass-Impregnated, Typ HVDC kabelu
PILC	Paper-Insulated Lead-Covered, Silový kabel s papírovou izolací pokrytou olovem
PPL	Paper Polypropylene Laminate, Izolace z laminovaného papír-polypropylenu
EPR	Ethylene Propylene Rubber, Kaučuk složený z etylenu a propylenu
XLPE	Cross-Linked Polyethylene, Zesítěný polyetylén
PE	Polyethylene, Polyetylen
MRTB	Metallic Return Transfer Breaker, Metalický vypínač v bipolárním systému
T_n	Doba vzniku zkratu, Doba nastavení (ms)
T_v	Vlastní doba vypínače (ms)
T_a	Doba hoření oblouku (ms)

I_n	Jmenovitý proud (A)
IGCT ..	Insulated Gate Commutated Thyristor, Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou
IGBT ..	Insulated Gate Bipolar Transistor, Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
GTO ...	Gate Turn Off, Tyristory vypínané hradlem
MOV ..	Metal-Oxide Varistor, Metaloxidový varistor
HDCCB	Hybrid Direct Current Circuit Breakers, Hybridní vypínač stejnosměrného proudu
LCS	Load Commutation Switch, Komutační spínač
RCD ...	Residual DC Current Breaker, Reziduální stejnosměrný vypínač
PPT ...	Pulse-Power Thyristors, Pulzní výkonové tyristory
MVDC .	Medium Voltage Direct Current, Stejnosměrný proud při vysokém napětí
TR	Converter transformer, Měničový transformátor
C	Shunt capacitor groups, Kapacitory k maření elektrické energie
PLC ...	Power-line carrier, Filtr HVDC systému
u_L	Napětí na indukčnosti (V)
u_R	Napětí na odporu (V)
R	Elektrický odpor (Ω)
L	Indukčnost (H)
U	Elektrické napětí (V)
τ	Časová konstanta obvodu (ms)
λ	Kořen charakteristické rovnice
i_L	Proud procházející RL obvodem (A)
i'	Ustálená složka proudu (A)
i''	Přechodná složka proudu (A)
W_m	Elektromagnetická energie (J)
W_e	Elektrostatická energie (J)
U_m	Maximální přepětí (V)
Δu	Úbytek napětí (V)
E	Intenzita elektrického pole (V/m)
U_k	Úbytek napětí na kontaktech (V)
i_b	Proud procházející bočníkem (A)
R_0	Odpor oblouku (Ω)
$I_0^{'}$	Přerušení proudu mezi kontakty (A)
p	Odporová charakteristika
ΔP_{DC} .	Ztráty DC vedení (W)
U_{DC} ...	Stejnosměrné napětí (V)
ΔP_{1f} ..	Ztráty jednofázového střídavého vedení (W)
ΔP_{3ff} .	Ztráty třífázového střídavého vedení při fázovém napětí (W)
ΔP_{3fs} ..	Ztráty třífázového střídavého vedení při sdruženém napětí (W)
U_{AC} ...	Střídavé napětí (V)
U_f	Fázové napětí (V)
U_s	Sdružené napětí (V)

Seznam obrázků

1.1 Porovnání AC a DC vedení z hlediska ztrát a investičních nákladů na délce přenosového vedení [3] . . . 3
1.2 Základní zapojení HVDC přenosu, bipolární systém. [33] . . . 10
1.3 Svodič přepětí 1100kV [26] . . . 11
1.4 Přenos pomocí podzemních kabelů [16] . . . 13
1.5 Přenos pomocí nadzemních kabelů [16] . . . 14
1.6 Přenos pomocí podmořských kabelů [16] . . . 14

2.1 Struktura kabelu SCFF [12] . . . 18
2.2 Struktura MI kabelu [12] . . . 18
2.3 Struktura extrudovaného kabelu [12] . . . 19
2.4 Monopolární HVDC systém [13] . . . 20
2.5 Bipolární HVDC systém [13] . . . 20
2.6 Multiterminální HVDC systém [13] . . . 21
2.7 Back to back HVDC systém [13] . . . 21
2.8 Typy měničů v HVDC systémech [30] . . . 23

3.1 Jednoduchý indukční obvod [8] . . . 24
3.2 Časový průběh přechodného proudu obvodu napájeného stejnosměrným napětím [8] . . . 25
3.3 Stejnosměrný obvod s elektrickým obloukem [34] . . . 26
3.4 Určení podmínky zhášení stejnosměrného oblouku metodou grafické integrace [34] . . . 27
3.5 Zhášení stejnosměrného oblouku [34] . . . 28
3.6 Určení voltamperové charakteristiky [34] . . . 29
3.7 Průběh proudu a napětí na kontaktech stejnosměrného rychlovypínače při vypínání [8] 30
3.8 Elektromechanický vypínač [6] . . . 32
3.9 Polovodičový vypínač [6] . . . 32

4.1 Postup vypínání poruchového proudu hybridním ABB vypínačem [5] . . . 35
4.2 Časový průběh vypínacího procesu HVDC vypínače ABB [5] . . . 36
4.3 Postup vypínání poruchového proudu hybridním Alstom vypínačem [5] . . . 38
4.4 Časový průběh vypínacího procesu HVDC vypínače Alstom [5] . . . 39
4.5 Časový průběh vypínacího procesu hybridních HVDC vypínačů [5] . . . 40

Seznam tabulek

1.1 Procentuální porovnání ztrát zařízení umístěných v konvertorových stanicích [31] . . . 9

2.1 Porovnání stožáru podle jmenovitého napětí [14] 16

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na technologii HVDC systému spojenou s různými problémy přenosu elektrické energie. Tato práce byla vybrána z důvodu prohloubení informací týkajících se přenosu HVDC. Tato problematika v České republice nemá žádné zastoupení. Bakalářská práce, pojednávající o tomto způsobu přenosu, může být do budoucna užitečným podkladem, či zajímavou učební pomůckou pro školní předměty v oblasti energetiky. V různých částech Evropy je problematika stejnosměrného přenosu velmi probírána, poněvadž se tento způsob přenosu rychlým způsobem rozvíjí, zároveň se začínají v Evropě budovat výstavby HVDC přenosu na relativně dlouhé vzdálenosti. V této práci jsou uvedeny informace ze zahraničních zdrojů HVDC přenosu. Tato práce byla autorem sepsána do této výsledné podoby po prozkoumání a porozumění několika odborných článků z anglického jazyka. V této práci je možné shledat veškeré odkazy na použitou literaturu, z nichž bylo po celou dobu psaní bakalářské práce čerpáno. V elektronické podobě bakalářské práce se zde nachází odkazy na autora, vedoucího práce a na jednotlivé webové stránky Západočeské univerzity v Plzni.

Text této bakalářské práce je rozdělen do čtyř hlavních částí skládajících se z mnoha detailních podkapitol. První kapitola zabývající se základními vlastnostmi stejnosměrného přenosu je porovnávána se střídavým přenosem elektrické energie, dále jsou zde informace o provozu přenosu HVDC systémů a aplikacích vybudovaných ve světě.

Druhá část této práce je zaměřena na konstrukci systému s detailně popsanými komponenty pro správný způsob přenosu elektrické energie. Pro názornost jsou zde obsaženy dva hlavní typy měničů s přehledným porovnáním. Poslední informace, které je možno v této kapitole získat, jsou ukryty v HVDC konfiguraci.

Ve třetí kapitole bylo nutné uvést hlavní problematiku této práce spočívající ve vypínání stejnosměrného proudu. Tato kapitola věnuje svůj čas také různým typům vypínačů stejnosměrného proudu.

Ve čtvrté části jsou autorem popsány principy hybridních vypínačů dvou světových společností ABB a Alstom. Pro představu jsou zde rovněž obsaženy obrázky s jednotlivými postupy vypínaného stejnosměrného proudu a v poslední podkapitole se nachází porovnání jednotlivých typů vypínačů.

1 Přenos výkonu HVDC

Přenos výkonu pomocí HVDC sítí je v dnešní době velmi využíván v širokém spektru možných přenosových typů soustav napětových hladin. HVDC je realizován pomocí měnírny, ve které AC napětí převedeme na DC a dále je přenos elektrických veličin veden pomocí vodičů systému HVDC, které mohou být různě umístěny podle požadovaných okolních vlastností, poté se přenesené stejnosměrné veličiny pomocí měničů (střídačů) přemění zpět na střídavé. Možné způsoby uložení vodičů budou upřesněny v následujících kapitolách této práce. HVDC systém je vysoce účinnou alternativou pro přenos velkého množství elektrické energie na velké vzdálenosti s možností řízení toku elektrické energie. Ve srovnání se střídavým proudem je stejnosměrný systém levnější a ztrácí méně elektrické energie. Elektřina může být transportována v obou směrech. [3]

Hodnoty stejnosměrného napětí jsou v řádech tisíce voltů realizovány po celém světě s velkou výhodou, tato výhoda spočívá v omezení ztrát elektrické energie. Čím vyšší je napětí, tím nižší jsou ztráty při přenosu, a tím více elektřiny můžeme po vedení přenášet. Mezi výhody přenosu stejnosměrných veličin patří především o 30-50% nižší provozní ztráty ve srovnání se stejnými hodnotami střídavého vedení. Při přenosu výkonu 2500 MW na 800 km vedení lze porovnat provozní ztráty obou typů vedení. Ztráty při běžném použití AC 400 kV nabývají 9,4%, při použití systému HVDC 500 kV dosahují ztráty 6% a při použití napěťové hladiny 800 kV lze tyto ztráty snížit až na 2,6%. Tento přenos také zajišťuje při stejné šířce kabelového vedení o 30 až 40% lepší propustnost elektrické energie ve srovnání s běžnými střídavými vedeními. Z ekonomických hledisek pro úseky o délce asi 600 km a více se používají vedení využívající přenos HVDC technologie. [28]

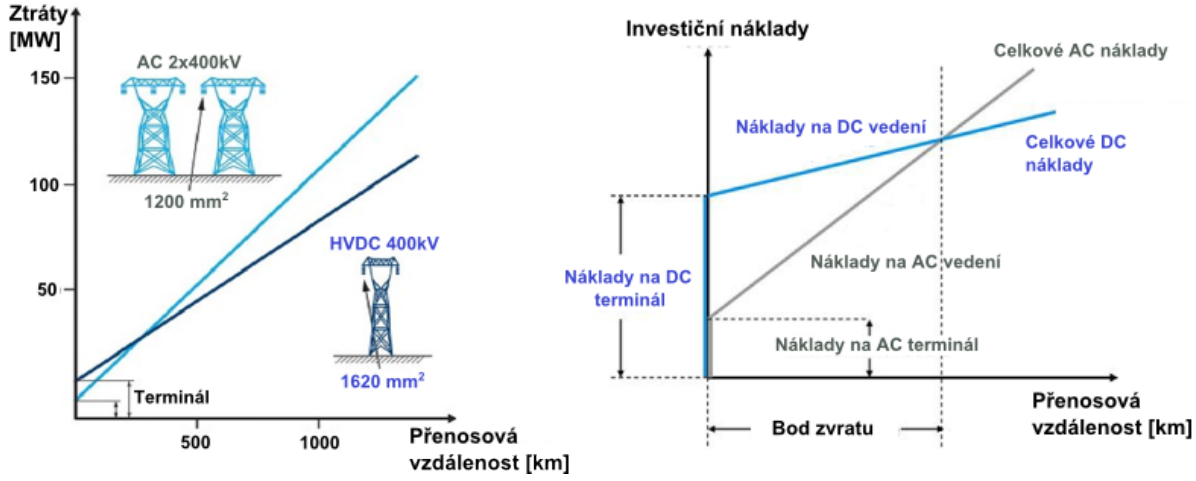
1.1 DC vs AC

V této úvodní kapitole budou porovnány dva druhy světového přenosu elektrické energie. Nejvíce využívaný typ přenosu elektrické energie ve světě je přenos střídavý, kterému se v posledních několika desetiletí přibližuje použití přenosu stejnosměrného, který má silnou škálu výhod.

1.1.1 Vyhodnocení přenosových nákladů

Náklady na přenosové vedení je složeno z kapitálových počátečních investic nutných pro správný chod vnitřní infrastruktury. Důležité je do počátečních investic zahrnout ceny stožárů, vodičů, izolátorů, koncových zařízení na obou stranách linek a samozřejmě také ostatní zařízení potřebné pro správný přenos elektrické energie. Mezi důležitý aspekt porovnání DC a AC vedení je počet vodičů, které má stejnosměrné vedení menší. Stejnosměrný přenos přenáší elektrickou energii pomocí dvou vodičů skládajících se z kladné a záporné polarity vůči zemi. Střídavý přenos potřebuje pro stejný přenos elektrické energie tři vodiče. Z tohoto důvodu je pro vyšší danou úroveň výkonu vhodné použít DC linku, která vyžaduje řádově menší, levnější a konstrukčně jednodušší stožáry spojené s nižšími náklady na vodiče a izolátory. V případě realizace DC linky o stejné přenosové kapacitě, kterou bychom požadovali u linky AC, můžeme zjistit, že se dostaneme na menší provozní ztráty. Konkrétní hodnota ztrát stejnosměrného přenosu činí 2/3 ztrát střídavých, při čemž se lze dostat i na vyšší rozdíl jed-

notlivých přenosů. Absence skin efektu u stejnosměrného vedení je velmi příznivá, protože nedochází k vytlačování proudu na povrch jako v případě střídavého vedení, proud je v DC vedení rovnoměrně rozložen po celém průřezu a dielektrické ztráty v případě silových kabelů jsou pro DC také mnohem menší v porovnání se AC přenosem. Účinky korónou u DC vodičů nabývají nižších hodnot než u vodičů střídavých. Stejnosměrné linky sice nevyžadují kompenzaci jalového výkonu, ale koncové náklady se zvyšují v důsledku přítomnosti měničů a filtrů. Střídavé vedení má tendenci být úspornější než DC vedení do takzvané "breakeven distatance", v mnoha případech uváděno jako "critical distance", což je vzdálenost, kdy se jednotlivá vedení protínají v grafu 1.1, tuto vzdálenost představuje v grafu bod zvratu, po této hodnotě už je vhodnější použít DC přenos. Zvrat vzdálenosti se může pohybovat mezi 400 – 700 km nadzemního vedení. V případě kabelového systému je tato vzdálenost v rozmezí 25 až 50 km. Stejnosměrný DC přenos má vzhledem ke své rychlé ovladatelnosti plnou kontrolu nad přenosem elektrické energie, čímž získává schopnost zvýšit přechodnou a dynamickou stabilitu v připojených střídavých sítích a v případě poruchy může omezit proudy v DC linkách.



Obrázek 1.1: Porovnání AC a DC vedení z hlediska ztrát a investičních nákladů na délce přenosového vedení [3]

1.1.2 Stabilita přenosu

Přenos energie v případě střídavého vedení je závislý na rozdílu úhlů napěťových fázorů obou konců linek. Pro danou úroveň přenosového výkonu se tento úhel zvyšuje s rostoucí délkou vedení. Přenos elektrické energie střídavého vedení je nepřímo úměrný přenosové vzdálenosti, zatímco stejnosměrný přenos není ovlivněn délkou vedení.

1.1.3 Řízení napětí

Řízení napětí ve střídavých linkách je komplikováno vlivem napájení a poklesem napětí. Průběh napětí se u střídavého vedení mění s velikostí zatížení. Udržování konstantního napětí na obou koncích linek vyžaduje regulaci jalového výkonu v důsledku vyššího zatížení. Ačkoliv DC měnírny vyžadují jalový výkon vztahující se k přenášenému výkonu, samotné stejnosměrné vedení nevyžaduje žádný jalový výkon.

1.1.4 Kompenzace linky

Kompenzace linky je nutná pro dálkový střídavý přenos elektrických parametrů z důvodu správné stability systému. Zvýšení přenosu výkonu a zajištění kontroly řízení napětí je možné pomocí kompenzačních tlumivek, sériových kondenzátorů, systému SVC a v neposlední řadě také pomocí systému STATCOM. V případě použití stejnosměrných sítí není v takové míře kompenzace nutná.

1.1.5 Problémy spojení AC sítí

Propojení dvou střídavých napájecích systémů vyžaduje automatické regulátory obou systémů. Koordinované řízení přenosových parametrů vzájemně propojených systémů může být problematické vzhledem k přítomnosti velkých energetických oscilací, které mohou vést k častému vypínání systému, zvýšení hladin poruch a samozřejmě k přenosu poruch z jednoho systému na druhý. Rychlá ovladatelnost toku energie v DC linkách eliminuje všechny výše uvedené problémy, kromě toho je asynchronní propojení dvou energetických systémů možné dosáhnout jen v případě použití stejnosměrných vedení.

1.1.6 Zemní impedance

U střídavého přenosu nemůže být zemnící proud (nulová složka) v ustáleném stavu povolen v důsledku vysoké velikosti zemní impedance. Problém by nebyl jen v neefektivním přenosu elektrické energie, ale také by mohlo dojít k telefonickému rušení. Zemní impedance je pro DC linky zanedbatelná a dokonce může pracovat při použití pouze jednoho vodiče v monopolárním systému se zemním návratem (ground return), který bude detailněji popsán v příslušné kapitole. Tento typ systému je problematický, pokud se zde nachází podzemní kovové konstrukce (potrubí), které podléhají korozi v důsledku procházejícího DC proudu. Je důležité uvést, že i v případě použití monopolárního systému pracuje DC měnírna s vyváženým napětím a proudy. Do doby odstranění závady lze provozovat jednopólový DC přenos, zatímco v AC přenosu není možný při poruše jednofázový provoz ani žádný nesymetrický provoz a musí dojít k okamžitému odpojení poškozené oblasti vedení.

1.1.7 Problémy DC přenosu

Aplikace DC přenosu je limitováno těmito faktory:

- Vysoké náklady na měničová zařízení
- Nemožnost použití transformátorů pro změnu napětové úrovně
- Generování harmonických průběhů
- Požadavek na jalový výkon
- Složitost kontrol provozu

V průběhu několika let došlo k významnému pokroku v DC oblasti, což umožnilo odstranit výše uvedené nevýhody. Mezi tyto pokroky v stejnosměrné technologii patří:

- Zvýšené parametry tyristorových buněk tvořící ventil
- Modulární konstrukce tyristorových ventilů
- Dvanáctipulzní (a vyšší) provoz měničů

- Použití nucené komutace
- Aplikace digitální elektroniky a optických vláken pro řízení měničů [2]

1.1.8 Výhody a nevýhody stejnosměrného přenosu

Technické a ekonomické výhody zahrnují následující informace :

- Odpadá jalový výkon, v porovnání se střídavým proudem se zde nenachází parametry frekvence a fáze
- Není nutné v stejnosměrném systému udržovat všechny zařízení, nebo-li zdroje v synchronismu
- Vyšší stabilita přenosového systému - u 2 pólových konfigurací můžeme při poruše provozovat vedení s poloviční kapacitou
- HVDC systémy mají menší ztráty než HVAC na velké vzdálenosti, pro konkrétní představu bývají tyto ztráty na vzdálenost 1000 km přibližně 3%
- HVDC je ekonomicky úspornější než HVAC pro delší přenos elektrické energie, ve většině případů je uváděna vzdálenost mezi 400–700km
- V důsledku ekologických nároků, které v mnoha případech komplikují výstavbu nadzemních vedení, můžeme použít dlouhá podzemní kabelová vedení i přesto, že mají mnohonásobně vyšší pořizovací cenu
- V stejnosměrném vedení nám k přenosu elektrické energie postačí pouze dva vodiče, popřípadě jeden v aplikaci zemního návratu proudu tzv. ground return
- Možnost kontroly směru a hodnoty přenášeného výkonu
- Nižší ztráty korónou a nižší rádiové rušení
- Směr toku elektrické energie je možné měnit velmi rychle
- Velké výkonové systémy HVDC (5000-6400MW) se používají pro přístup ke vzdáleným vodním zdrojům elektrické energie, k obnovitelným zdrojům energie bez emisí CO2
- Vodiče pro HVDC systémy nemají žádný technický limit vzdálenosti, na který mohou být instalovány, můžeme zajistit menší izolační vzdálenosti než u střídavých proudů při stejné efektivní hodnotě
- Není zde potřeba kompenzačních stanic jalového výkonu v porovnání se střídavým
- V HVDC systému je výkon udržován téměř na konstantní hodnotě nezávisle na vzdálenosti přenášeného výkonu, v systému HVAC přenosová kapacita klesá se vzdáleností v důsledku indukčních účinků reaktance
- V případě použití systému s různými hodnotami frekvence na koncích vedení je nevyhnutelně nutné použít systém HVDC
- Přenos energie pomocí pobřežních kabelů na krátké vzdálenosti je nutné realizovat pomocí systému HVDC, v kterém nejsou ovlivněny kapacitní ani induktivní parametry, systém HVAC není vhodný v tomto typu použít z důvodu jeho vysoké dielektrické kapacity
- DC vedení a kabely jsou levnější než AC
- Stožáry DC jsou užší, jednodušší a levnější ve srovnání s AC linkami

- HVDC systém může přenášet 5x více energie než stejné linky systému HVAC

  [1], [3], [4]

Mezi technické a ekonomické nevýhody lze zahrnout tyto informace:

- Nevýhody HVDC jsou v procesu konverze, spínání, řízení, dostupnosti a údržby
- Obtížná změna napětí, v střídavém systému zajištuje transformátor jednoduchou a ekonomickou změnu napětí, náklady na transformátory jsou mnohem nižší v porovnání s polovodičovými měniči
- HVDC systém má nižší dostupnost než střídavé systémy
- Požadované měnírny jsou drahé a mají omezenou kapacitu přetížení
- U kratších vedení mohou být ztráty elektrické energie vyšší než v AC systémech z důvodu ztrát v měnírnách
- Technologie HVDC jsou méně standardizovány než AC systémy a jejich technologie se mění rychleji
- Na vysoké napětí DC je obtížnější vybudovat jistič z důvodu velkých sil při vypínání proudu k nule, může dojít k jiskření, opotřebení kontaktů by mohlo znemožnit spolehlivý proces spínání
- Stejnosměrný přenos je nejvhodnější použít pro přímý dálkový přenos dvou míst, v případě další odbočky je nutné vybudovat novou měnírnu, tím rostou celkové náklady na přenos

  [1], [3]

1.2 Porovnání ztrát stejnosměrného a střídavého přenosu

Výkonové ztráty na vedení jsou výhradně způsobeny odporem vodiče, kterým prochází proud. Aby bylo porovnání stejnosměrného i střídavého vedení realizovatelné, musí se vzít v potaz efektivní hodnoty střídavého přenosu. Pro ilustraci stanovíme fakt, že máme stejný přenášený výkon při shodném DC a AC napětí, přičemž hodnota AC napětí je efektivní pro stanovenou odporovou zátěž. Vezmeme-li v úvahu unipolární DC systém, výkonové ztráty jsou dány vztahem:

$$\Delta P_{DC} = 2 \cdot R \cdot I_{DC}^2 = 2 \cdot R \cdot \frac{P^2}{U_{DC}^2} \tag{1.1}$$

Kde P je činný výkon, R představuje odpor vodiče,(skin efekt je u stejnosměrného proudu možno zanedbat) a U_{DC} je stejnosměrné napětí. V jednofázových či třífázových střídavých systémech je nutné zohlednit i účiník $cos\varphi$, jehož velikost udává, jak velkou část zdánlivého výkonu střídavého proudu obsahuje činný výkon. Poté je možné uvést následující vztah pro jednofázovou síť:

$$\Delta P_{1f} = 2 \cdot R \cdot I_{1f}^2 = 2 \cdot R \cdot \frac{P^2}{U_{1f}^2 \cdot cos^2\varphi} \tag{1.2}$$

Pro 3f síť lze uvést tři vztahy pro výkonové ztráty. Pro fázové napětí platí vztah:

$$\Delta P_{3ff} = 3 \cdot R \cdot (\frac{P}{3 \cdot U_f \cdot cos\varphi})^2 = R \cdot \frac{P^2}{3 \cdot U_f^2 \cdot cos^2\varphi} \tag{1.3}$$

Pro sdružené napětí platí vztah:

$$\Delta P_{3fs} = 3 \cdot R \cdot (\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot cos\varphi})^2 = R \cdot \frac{P^2}{U_s^2 \cdot cos^2\varphi} \tag{1.4}$$

Pokud napětí U_{AC} stanovíme tímto způsobem $U_{AC} = \sqrt{3} \cdot U_s = 3 \cdot U_f$, je možnost napsat obecný vztah pro výkonové ztráty:

$$\Delta P_{3f} = 3 \cdot R \cdot I_{3f}^2 = 3 \cdot R \cdot \frac{P^2}{U_{AC}^2 \cdot cos^2\varphi} \tag{1.5}$$

Vložíme-li do poměru jednotlivé výkonové ztráty, získáváme závěr, že při porovnání stejnosměrného napětí ΔP_{DC} a jednofázového střídavého napětí ΔP_{1f} je výsledek poměru ztrát ovlivněn účiníkem sítě, jež je v ideálním případě roven jedné (P=S), v tomto stavu by poměry ztrát při stejném přenosovém napětí obou vedení byli shodné, tento stav pravděpodobně nenastane, poněvadž je nutno do střídavého přenosu zahrnout jalový výkon Q, který je nutný pro vytvoření magnetického pole jednotlivých zařízení. Při poměru obou ztrát tedy získáváme následující vztah:

$$\frac{\Delta P_{DC}}{\Delta P_{1f}} = \frac{U_{1f}^2 \cdot cos^2\varphi}{U_{DC}^2} \tag{1.6}$$

Při porovnání ztrát ΔP_{DC} a ΔP_{3f} je možnost docílit tří různých vzorců, přičemž všechny dávají stejné výsledky. Jako v předchozím případě je výsledek ovlivněn především účiníkem sítě a poté také určitou konstantou, která je závislá na napětí, které do vztahu dosazujeme. Pro získání rovnice (1.7) je nutné stanovit shodnost odporů obou vedení. Pro všechny tyto úvahy také bereme v potaz, že přenášíme ve střídavém i stejnosměrném vedení stejný výkon, poté je možné napsat tyto vztahy:

$$\frac{\Delta P_{DC}}{\Delta P_{3f}} = 6 \cdot \frac{U_f^2 \cdot cos^2\varphi}{U_{DC}^2} = 2 \cdot \frac{U_s^2 \cdot cos^2\varphi}{U_{DC}^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{AC}^2 \cdot cos^2\varphi}{U_{DC}^2} \tag{1.7}$$

Z těchto uvedených vzorců vyplývá, že provozní ztráty jsou závislé na napětí a mění se v závislosti na zvolené úrovni DC napětí. V rovnici (1.6) je hodnota DC napětí rovna efektivní hodnotě AC napětí, čímž zaručíme stejný přenášený výkon pro stejné zatížení, ale dochází k nerovnoměrnému namáhání dielektrika. Ve skutečnosti dochází k maximálnímu namáhání dielektrika, je-li hodnota DC napětí rovna špičkové hodnotě AC průběhu.

Z úpravy rovnic (1.1) a (1.5) je možné stanovit poměr určující kolikrát má být stejnosměrný proud větší než střídavý, abychom zachovali stejné ztráty na vedení. Důležitý aspekt umožňující odvození poměru spočívá v rovnosti přenosového výkonu, oba systémy musí mít také stejné hodnoty odporů,

poté získáme rovnice:

$$1 = 3 \cdot I_{3f}^2 \tag{1.8}$$

$$1 = 2 \cdot I_{DC}^2 \tag{1.9}$$

a postupnou úpravou je možné získat vztah:

$$\frac{I_{3f}}{I_{DC}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \doteq 0.82 \tag{1.10}$$

z odvozeného vztahu (1.10) je patrné, že stejnosměrný proud I_{DC} může být 1,22 větší než střídavý proud a systém bude mít stejné ztráty na vedení.

Pokud se zaměříme na porovnání ztrát stejnosměrného vedení a třífázového střídavého vedení je možné získat vztah:

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{2}{3} \doteq 0.66 \tag{1.11}$$

Tento výše uvedený vztah je možné zapsat, když jsou hodnoty odporů AC a DC vedení stejné a po vedení přenášíme stejnou hodnotu proudu. Stejnosměrné vedení nabývá při stejném procházejícím proudu 0,66 ztrát střídavých.

1.3 Provozní ztráty HVDC systému

Provozní ztráty HVDC systému vznikají v nejvyšší míře především v měničových stanicích, na přenosovém vedení a v neposlední řadě na ostatních zařízeních spojených s tímto přenosem. Ztráty HVDC přenosu jsou způsobeny průchodem proudu a připojeného napětí. Ztráty spojené s napětím jsou převážně složeny ze ztrát korónou a ztrát vytvořených na izolátorech. Tyto ztráty na izolátorech jsou obvykle z důvodu malého množství zanedbány. Na vedení HVDC, jež má určitý odpor, vznikají průchodem proudu také ztráty. Velikost ztrát korónou je určena nejen konstrukčními parametry linky, jako je průřez vodiče nebo prostor mezi nimi, ale také povětrnostními podmínkami a stavem povrchu vodiče. Ztráty korónou lze spočítat zkušební statistickou metodou nebo metodou analýzy výpočtu. S naměřenou hodnotou proudu korony a DC napětí kladných a záporných polarit by bylo možné spočítat ztráty korónou pomocí zkušební statické metody:

$$\Delta P_c = U_{d1} \cdot I_1 + U_{d2} \cdot I_2 \tag{1.12}$$

Kde ΔP_c představuje celkové ztráty korónou bipolární DC přenosové linky, U_{d1} ,U_{d2} znázorňuje kladné a záporné DC napětí, I_1 ,I_2 popisuje kladné a záporné korónové proudy.
Ztráty přenosového vedení lze spočítat podle vzorce:

$$\Delta P_d = R_d \cdot I_d^2 \tag{1.13}$$

Kde ΔP_d zobrazuje ztráty na vedení způsobené průchodem proudu, I_d je procházející stejnosměrný proud, R_d je odpor stejnosměrného vedení. Odpor R_d se určuje podle konfigurace DC systému. Ztráty způsobené harmonickými proudy na stejnosměrné lince jsou obvykle zanedbány.

Celkové ztráty měnicích stanic jsou dány součtem všech ztrát zařízení. Konvertorové stanice obsahují měniče, transformátory, AC filtry, skupiny "šuntovacích" kondenzátorů, DC tlumivky, DC filtry, kontrolní systémy RI (Radio Interference) zařízení, PLC filtry, jež omezují rušení, které by se mohlo šířit do střídavé sítě a další pomocná zařízení pro správný chod systému.

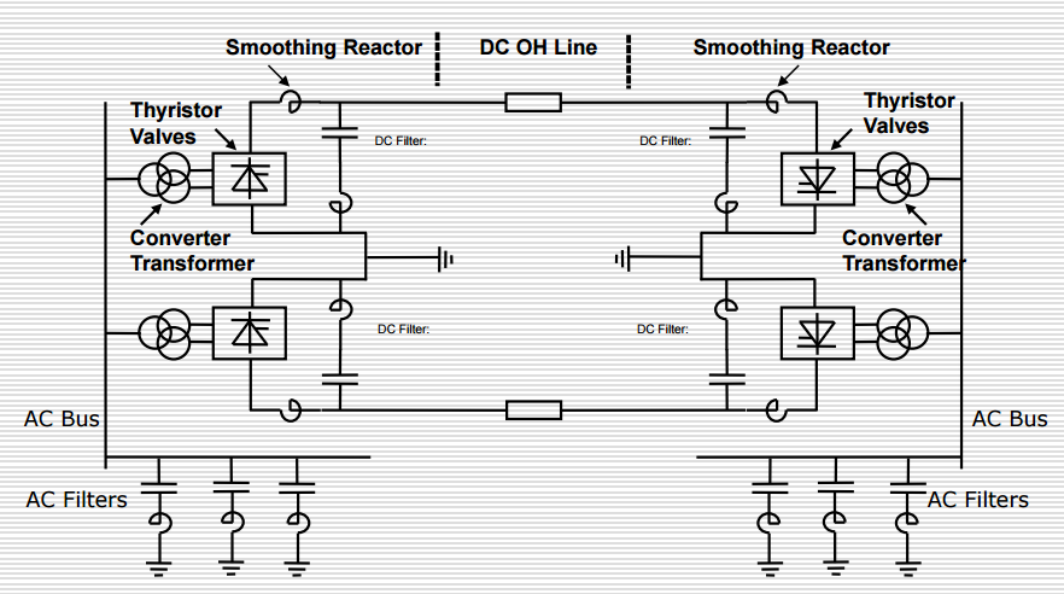
Norma IEC 61803 *Determination of power losses in high-voltage direct current(HVDC) converter stations* uvádí metodu výpočtu každého zařízení v detailním popisu.[32]

Z vycházející studie o ztrátách HVDC systému provedeného roku 2007 lze získat výsledky procentuálních ztrát v této podobě:

Zařízení	**Ventil**	**TR**	**C**	**AC filtr**	**DC tlumivka**	**DC filtr**	**PLC filtr**
Usměrňovač%	35,44	52,49	0,32	4,83	6,50	0,08	0,33
Střídač%	35,57	51,42	0,42	4,52	7,59	0,10	0,39

Tabulka 1.1: Procentuální porovnání ztrát zařízení umístěných v konvertorových stanicích [31]

- Ztráty jednotlivých zařízení v konvertorových stanicích jsou způsobeny průchodem proudu, s rostoucím proudem rostou i ztráty, což představuje rovnice 1.13.
- Ztráty konvertorového transformátoru jsou složeny z fixních a variabilních ztrát. Fixní ztráty transformátoru nesouvisí se zatížením a nemění svoji hodnotu se změnou provozních parametrů. Variabilní ztráty souvisí s přenosovým výkonem. Celkové ztráty konvertorového transformátoru klesají s poklesem přenášeného výkonu v aplikacích bipolární konfigurace.
- Ztráty každého zařízení umístěného ve stanici pro změnu elektrických parametrů klesají se snížením přenosového výkonu bipolární konfigurace, s poklesem DC napětí naopak tyto provozní ztráty zvyšují svoji hodnotu.
- Konvertorové transformátory a měniče představující usměrňovač a střídač způsobují hlavní ztráty HVDC systému. [31]



Obrázek 1.2: Základní zapojení HVDC přenosu, bipolární systém. [33]

1.4 HVDC systémy

Systémy HVDC technologie lze rozdělit do tří hlavních skupin:

- HVDC Classic
- HVDC Light
- HVDC Ultra

1.4.1 HVDC Classic

HVDC Classic je jednou ze tří používaných HVDC technologií na světě. Základem této technologie jsou výkonové tyristorové polovodiče. Tento typ technologie se používá především pro přenos velkého objemu elektrické energie na dlouhé vzdálenosti a pro propojení samostatných rozvodných sítí, kde konvenční AC metody nejsou vhodné. Přenos HVDC Classic má typický jmenovitý výkon mezi 100 a 8000 MW. Využívá nadzemního vedení pro vzdálenosti větší než 600 km nebo podmořských kabelů od 50 do 100 km a lze jej použít také pro kombinaci kabelů a nadzemního vedení. Pomocí podmořských kabelů je tato technologie využita pro propojení Norska s Nizozemskem. HVDC Classic je nejekonomičtějším způsobem jak přenášet elektrickou energii na dlouhé vzdálenosti. V porovnání s AC vedením můžeme přenášet v tomto typu přenosu třikrát vyšší výkon. [23]

1.4.2 HVDC Light

V roce 1997 společnost ABB uvedla další technologii stejnosměrného přenosu s názvem HVDC Light. Tato technologie umožňuje přenos výkonu od 50 MW do 2500 MW s využitím IGBT tranzistorů, které v porovnání s tyristory nabízí plně ovladatelné polovodičové řízení výkonu. Prvním projektem a jedním z největších zakázek ABB HVDC Light v historii se v roce 2013 při napětí ±200 kV stalo propojení Irska s Anglií. Důležitým pokrokem v této technologii bylo snížení ztrát z počátečních 3,7 procent na hodnotu menší než je jedno procento. HVDC Light je využíváno k přenosu elektrické energie na velké

vzdálenosti nadzemním vedením nebo ekologickými podzemními nebo podmořskými kabely. Uplatnění tohoto systému je možné shledat především v oblasti propojení přenosových sítí a napojení větrných farem nebo plošin pro těžbu ropy a plynu nacházejících se na moři k energetickým systémům na pobřeží. Díky schopnosti řízení jalového výkonu v technologii HVDC Light můžeme zvýšit přenosovou kapacitu AC sítí okolních terminálů. Tato technologie je vybavena bezolejovou polymerní izolací extrudovaných kabelů, lze také využít MI kabely, které budou popsány v druhé kapitole. HVDC Light nabízí stejné výhody jako tradiční HVDC systémy, ale také poskytuje bezpečnější řízení výkonu a umožňuje rychlé obnovení přenosu v případě výpadku proudu. Z důvodu schopnosti stabilizace střídavé sítě je tato technologie ideální pro větrné parky, relativní kompaktnost měníren HVDC Light ve srovnání s měnírny HVDC Classic jsou klíčovým faktorem pro použití této technologie pro přenos elektrické energie z větrných elektráren. [23]

1.4.3 HVDC Ultra

Třetí skupinou technologie je HVDC Ultra, která v posledních letech zaznamenala velký technologický pokrok. Zvýšený zájem pro přepravu většího množství čisté a obnovitelné elektrické energie ze vzdálených vodních elektráren způsobil vývoj v oblasti HVDC z ±600 kV na ±800 kV (UHVDC). UHVDC systém s napětím ±800 kV je velmi ekonomicky výhodný pro přenosové soustavy dosahující výkonů v rozmezí od 5000 do 8000 MW na vzdálenost 1000 – 1500 km nebo vyšších. [25]

Koncem roku 2012 společnost ABB vyvinula nový ±1100 kV DC systém se zařízeními umístěnými až 26 metrů nad zemí. Kapacitní filtry jsou ve výšce 26 m, bypass přepínače leží ve výšce od 14m do 16m, svodiče přepětí se nachází ve výšce 16 metrů nad zemí a vazební kondenzátory jsou umístěny v 18 metrech. Tento typ systému by mohl přenést přibližně 10000 MW elektrické energie ve vzdálenosti několika tisíců kilometrů s minimálními přenosovými ztrátami. Zařízení pro UHVDC musí být schopno snášet úroveň velmi vysokého napětí a musí udržovat vysoký stupeň elektrické izolace. Všechny komponenty UHVDC musí být navrženy a testovány pro spínací impulsy větší než 2,1 MV a pro bleskové impulzy větší než 2,5 MV. Úrovně těchto svodičů byly optimalizovány a navrženy tak, aby dostatečně zabezpečovaly provozní rozpětí s ohledem na tuto úroveň napětí. To bylo možné díky pečlivé konstrukci zařízení, které zaručují vynikající tepelné vlastnosti za použití vysoce kvalitního ZnO varistoru zobrazeného na obrázku 1.3. [26]

Obrázek 1.3: Svodič přepětí 1100kV [26]

1.5 Přenos HVDC ve světě

1.5.1 Francie – Španělsko

Projekt s názvem INELFE využívající HVDC Plus od společnosti Siemens propojuje francouzský Baixas ležící západně od Perpignan se španělským městem Santa Llogaia. INELFE je prvním světovým systémem VSC HVDC o přenášeném jmenovitém výkonu 2x1000 MW s minimálními přenosovými ztrátami na vzdálenost 65 km pomocí podzemních kabelů a tunelem dlouhým 8 km vedoucím přes Pyreneje. Tento projekt ukazuje jedinečnou schopnost technologie VSC splnit

speciální technické požadavky. Nezávislá výměna jalového výkonu pro každou síť je možná, rovněž je zde schopnost black-startu, která umožňuje HVDC systému restartovat "zhroucenou" síť. Hladina DC napětí je v tomto přenosu ±320 kV připojená na obou koncích přes měnírny na AC síť o hodnotě napětí 400 kV při 50 Hz. [22]

1.5.2 Německo – Švédsko

Jedním z nejdelších podmořských kabelů na světě je elektrické vedení HVDC spojující 262 km vzdálená města Herrenwyk v Německu s Krusebergem na jihu Švédska. Uvedení do provozu se datuje v roce 1994 s jmenovitým výkonem 600 MW při napětí ±450 kV. Spojení Švédska s Německem umožňuje sdružit obě energetické vedení za účelem doplnění a optimalizaci stávajících kapacit v obou sítích. Délka DC podmořského kabelu je 250 km, která je ještě doplněna nadzemním vedením dlouhým 12 km. Na oba konce linek je připojeno AC napětí 400 kV. Podmořské kabely jsou vyrobené z mědi o průřezu 1600 mm^2. Celková váha podmořských kabelů dosahuje přibližně 13 000 tun s zhruba 55 kg/m. [21]

1.5.3 Austrálie – Tasmánie

Basslink byl uveden do provozu v roce 2006 a jedná se o vůbec první propojení mezi státy Tasmánie a Victoria, ležící v jihovýchodní Austrálii. Pro oba státy je toto vedení ekonomicky velmi výhodné, Tasmánie je zcela závislá na výrobě elektrické energie z vodních elektráren. Basslink umožňuje import elektrické energie základního zatížení z Viktoriánských uhelných elektráren, čímž dojde ke zlepšení spolehlivosti dodávky elektrické energie v období sucha, Viktoria je také schopna zlepšit dodávku špičkového zatížení díky zelené energie z Tasmánie. Přenosový systém je navržen a zrealizován jako monopolární konfigurace se zemním návratem. Jmenovitý výkon činí 500 MW s možným přetížením po dobu osmi hodin na hodnotu 626 MW. Tento typ přenosu používá podmořské kabely dlouhé 295 km o hodnotě stejnosměrného napětí ±400 kV s použitými tyristory s jmenovitým napětím 8 kV. Na tento projekt je připojeno ve Viktorii AC napětí o hodnotě 500 kV při 50 Hz, v Tasmánii činí AC připojené napětí 220 kV při shodné frekvenci 50 Hz. [22]

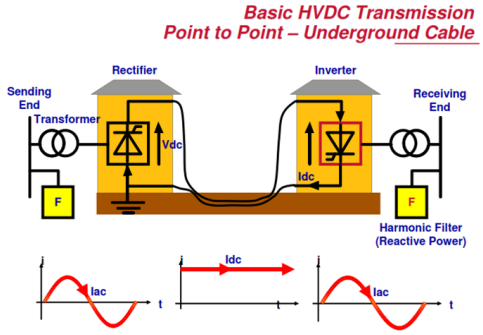
1.5.4 Xiangjiaba–Shanghai

Červenec roku 2010 datuje uvedení do provozu prvního UHVDC systému o napětí ±800 kV s jmenovitým výkonem 6400 MW. Přenášený výkon může dosahovat hodnoty až 7200 MW se zajištěním elektrického proudu z vodní elektrárny Xiangjiaba, nacházející se v jihozápadní Číně, který je pomocí nadzemního vedení přenášen do 1980 km vzdáleného průmyslového a obchodního centra v Šanghaji. Tento přenos představuje zásadní průlom v technologii přenosu elektrické energie. Systémové napětí ±800 kV je o 33% vyšší, než je napětí používané pro přenos ±600 kV Itaipu v Brazílii, které bylo doposud nejvyšším přenosovým napětím HVDC na světě. Jmenovitý přenášený výkon je také rekordní při napětí ±800 kV, přičemž se hodnota ztrát sníží na 7%, u použitého napětí ±500 kV by ztráty činily 10%. Na obou koncích linek je hodnota připojeného AC napětí 525 kV. Na základě průměrné spotřeby jednoho obyvatele v Číně by tento výkon měl vyhovovat potřebám asi 31 miliónů lidí. Vyvinuté nové tyristory (PCT-fázově řízené tyristory) jsou pro tuto technologii s průměrem 6 palců dimenzovány na stejnosměrný proud 4000A, přičemž jeho napětí činí 8,5 kV. Díky využití vodní energie, která je šetrná k životnímu prostředí, se ušetří až 44 miliónů tun CO2 ve srovnání s místním napájecím zdrojem energetického mixu. [19], [20], [23]

1.6 Přenos HVDC sítí s nejdelším instalovaným výkonem

1.6.1 Nejdelší podzemní HVDC přenos

Nejdelší podzemní systém pro přenos elektrické energie byl ještě donedávna Murraylink, který byl uveden do provozu v roce 2002 spojující region Riverland v Jižní Austrálii s regionem Sunraysia ve Victorii. Konvertorové měnírny jsou připojené v Red Cliffs ve Victorii na střídavé napětí 220 kV a v Jižní Austrálii v Berri na napětí AC 132 kV. Murraylink dlouhý 2x180 km je schopný přenášet výkon 220 MW o napětí ±150 kV HVDC Light a je založen na principu bipolárního propojovacího vedení zajišťující dostatek elektřiny pro 200 000 domácností. Projekt Murraylink získal několik australských ocenění v oblasti životního prostředí a také v oblasti dokonalých inženýrských prací. Spolehlivost sítě se zajistí díky možnosti řízení napětí. Hlavním důvodem pro volbu HVDC Light je regulovatelná přípojka pro obchodování elektrické energie se snadným přístupem k podzemním kabelům s možností propojení jednotlivých sítí. [17]



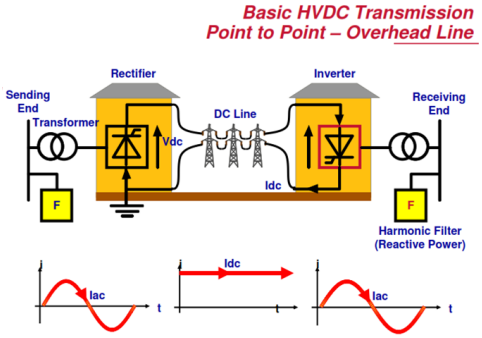
Obrázek 1.4: Přenos pomocí podzemních kabelů [16]

V roce 2015 se nejdelším podzemním systémem na světě stal South West Link ve Švédsku s výkonem 2x660MW o napětí ±300 kV s celkovou délkou kabelu 800 km na trase dlouhé 192 km propojující Barkeryd ve středním Švédsku s Hurvou na jihu. South West Link je jedním z nejdůležitějších investic ve Švédsku a jedná se o jedinečný projekt, pokud jde o rozsah i technické provedení. Důvodem výstavby tohoto projektu bylo přesunutí většího množství elektrické energie do jižní části Švédska s důrazem na zlepšení spolehlivosti rozvodné sítě, projekt je realizován také z důvodu přenosu výkonu mezi Norskem a Švédskem. Řešení tohoto přenosu se skládá ze dvou paralelních sad HVDC Light, který opět jako systém Murraylink pracuje v bipolárním režimu. Je zde možnost okamžité změny toku elektrické energie bez přerušení a mezi velké výhody patří schopnost black-startu. [18]

1.6.2 Nejdelší nadzemní HVDC přenos

Nejdelší provozované nadzemní HVDC vedení na světě se nachází v Brazílii. Vedení dlouhé 2375 kilometrů o výkonu 6300 MW při napětí ±600 kV spojuje Porto Velho s Araraquara. Tento typ HVDC systému byl uveden do provozu mezi lety 2013 a 2014 a je postaven z důvodu exportu elektrické energie ze dvou nových vodních elektráren na řece Madeiře v Amazonské kotlině poblíž Porto Velho do vzdálených zátěžových center v Sao Paulo v jihovýchodní Brazílii. 800 MW back-to-back stanice je také součástí systému. Společnost ABB bude zároveň v tomto systému poskytovat dvě měnírny 3150 MW HVDC. Třetí jednotka 800 MW systému back-to-back přenáší energii do okolní střídavé sítě v se-

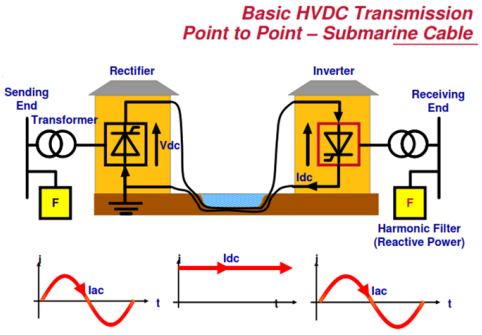
verozápadní části Brazílie. Brazilský energetický systém je z 95% tvořen vodními elektrárnami. Hlavní zátěžová centra se nachází v pobřežních oblastech, zejména v největším a nejbohatším městě Brazílie v Sao Paulu. [15]



Obrázek 1.5: Přenos pomocí nadzemních kabelů [16]

1.6.3 Nejdelší podmořský HVDC přenos

Nejdelším zrealizovaným podmořským projektem na světě je NorNed, jehož příprava byla započata v roce 1994 a jeho stavba byla zahájena v roce 2006 s uvedením do provozu v květnu roku 2008. Kabel propojuje nizozemskou rozvodnou síť v Eemshavenu (AC-380kV) s norskou sítí Feda (AC-300kV). S délkou 580 km je v současné době tento podmořský kabel nejdelším na světě. Nizozemská mřížka, nebo-li přenosová síť, je integrována do regionální synchronní oblasti UCTE, zatímco norská síť je součástí severské regionální synchronní oblasti. Kabely s váhou 47000 tun jsou navrženy pro přenos výkonu 700 MW o napětí ±450 kV DC. Jedná se o bipolární symetrickou monopólní linku. Celkové náklady této výstavby činí 600 miliónů euro. V Nizozemsku je spotřeba energie vyšší během dne a prostřednictvím kabelů je přenášena za nízkou cenu z Norska. V Norsku se elektrická energie vyrábí ve vodních elektrárnách, což je ekonomicky levnější než vyrobená energie v plynových elektrárnách v Nizozemsku. V noci je tok elektrické energie opačný, protože Norsko spotřebovává více energie v noci než během dne.



Obrázek 1.6: Přenos pomocí podmořských kabelů [16]

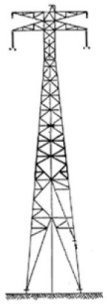
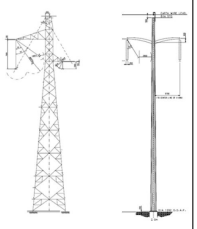
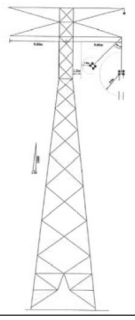
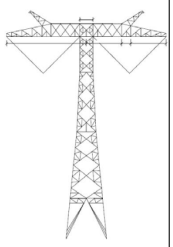
Nizozemsko v noci exportuje vyrobenou elektřinu prostřednictvím podmořských kabelů v paroplynových elektrárnách do Norska, čímž umožňuje norské nádrže naplnit pro denní použití. Odhaduje se, že propojovací systém pomáhá ušetřit za rok asi 1,7 miliónů tun oxidu uhličitého. Z důvodu minimalizace počtu spojů byl kabelu vyroben v délkách 75 km typu twin-core a 154 km ve variantě single-core

kabelu. Kabel umístěný v moři byl certifikován pro přenos 800 MW při ±500 kV a mechanický test byl proveden pro hloubku 500 m, i když maximální hloubka, v nichž se vodič nachází mezi Nizozemskem a Norskem, dosahuje pouze 410 m. Kabel je umístěn přímo v mořském dnu, aby se zabránilo nebo alespoň minimalizovalo riziko potenciálního externího nárazu. Vzhledem k použití vysokého napětí činí vypočtené ztráty kabelu pouze 3,7% při výkonu 600 MW a 5% pro 700 MW. Vzhledem k tomu, že se poptávka po elektrické energii mění během dne velmi rychle, maximální rychlost náběhu byla stanovena na 20 MW/min z důvodu dodržení přenosové stability. Kabel systému NorNed slouží stejně jako většina MI kabelů pro provoz při maximální teplotě 50-55 °C. Očekávaná životnost kabelů se odhaduje na více než 40 let. [12]

2 Konstrukce a zařízení HVDC sítí

2.1 Konstrukce HVDC systémů

2.1.1 Stožáry

Jmenovité DC napětí					
Popis	**Jednotky**	**± 300 kV**	**± 400 kV**	**± 500 kV**	**± 800 kV**
Vhodný jmenovitý výkon	MW	600-1,000	1,000-2,000	1,500-3,000	3,000-7,500
DC systém konfigurace	-	Monopolár/ Bipolár	Monopolár/ Bipolár	Monopolár/ Bipolár	Monopolár/ Bipolár
Počet vodičů na pól	svazek	2x/3x/4x	2x/3x/4x/6x	4x/6x/8x	6x/8x
Ekonomická přenosová vzdálenost	km	300-750	500-1,000	700-1,500	1,500-5,000
Požadovaná územní velikost	m	40	45-50	55-70	85-90
Minimální šířka základny	m	8.50	10.00–11.00	11.00–13.00	16.00
Typické zavěšení stožárů (stožáry nejsou ve stejném měřítku)	-				
Rozsah výšek stožárů	m	25-40	příhradová věž 36-51/ 49.18-48.18	31-51	39-93
Typické izolátory	-	Cap&Pin/ Porcelán/ Kompozitní materiál	Cap&Pin/ Porcelán/ Kompozitní materiál	Cap&Pin/ Porcelán/ Kompozitní materiál	Cap&Pin/ Porcelán
Proveditelná délka zavěšených izolátorů	m	4.34 Porcelán, Cap&Pin/ 3.6 Kompozitní materiál	5.06 Kompozitní materiál/ 6.18 Porcelán	7.33 Kompozitní materiál	12.94 Cap&Pin

Tabulka 2.1: Porovnání stožáru podle jmenovitého napětí [14]

2.1.2 Vodiče HVDC

Struktura kabelu musí zajistit vysokou účinnost přenosu elektrické energie, dobrou izolaci a magnetické stínění společně se silnou mechanickou odolností. Rozdíly můžeme najít v použitých materiálech a jejich uspořádání v závislosti na výrobci a okolních podmínkách. Složení kabelů obsahuje sadu vrstev kolem vodiče, zejména měď zajišťující vedení elektrického proudu, ale také další potřebné materiály pro správnou funkci HVDC kabelů, popsaných na níže uvedených jednotlivých obrázcích. Vodiče musí být izolovány proti externímu kontaktu (proti kotvě lodi, živočichům, žijícím na souši i pod mořskou hladinou, a dalším okolním ohrožujícím vlastnostem) po celé délce kabelu.

Existují tři hlavní řešení izolace vodičů, které jsou v dnešní době široce používány:

- Kabely naplněné tekutinou
  - SCFF/SCOF (self-contained fluid-filled / self-contained oil-filled)
  - HPFF/HPOF (high-pressure fluid-filled / high-pressure oil-filled)
  - HPGF (high-pressure gas filled) and GC (gas compression)
- Kabely s papírovou izolací (lapovaná izolace)
  - MI (mass-impregnated) or PILC (paper-insulated lead-covered); skládá se z masově impregnovaného papíru s vysoce viskózní izolační sloučeninou
  - PPL (papírový polypropylenový laminát)
- Extrudované kabely
  - EPR (ethylen-propylen kaučuk)
  - PE (polyethylen)
  - XLPE (zesítěný polyetylen); skládá se ze síťové molekulární struktury vhodné pro vysoké teploty

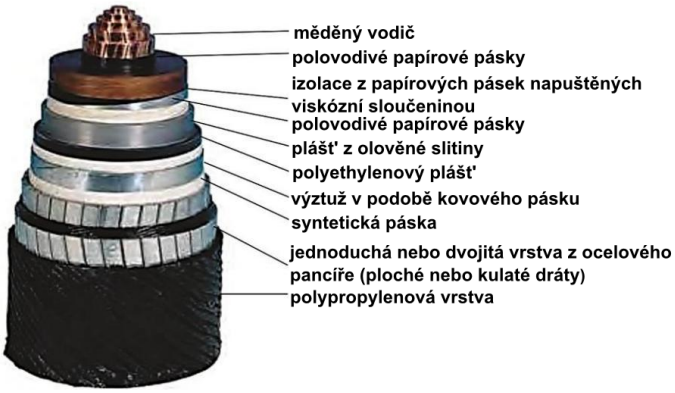
Kabely naplněné tekutinou

SCFF kabel zobrazený na obrázku 2.1 je používaný ve velmi vysokém napětí, obvykle až do 500 kV. Tyto kabely jsou vhodné pro aplikace na krátké vzdálenosti a tam, kde nejsou žádná hydraulická omezení. Jejich průměr je v rozpětí mezi 110 a 160 mm a jejich váha se pohybuje v rozmezí 40-80 kg/m. Obsah těchto vodičů může dosahovat velikosti 3000 mm^2. [12]

Obrázek 2.1: Struktura kabelu SCFF [12]

MI kabel

MI kabel je znázorněn na obrázku 2.2. V provozu je využíván už více než 40 let z důvodu jeho vysoké spolehlivosti a lze jej považovat za nejvíce používaný kabel v oblasti elektrického přenosu. Používají se pro napětí do 500 kV a mohou přenášet výkon až 1000 MW, v bipolárním provozu tedy 2000 MW, maximální pracovní teplota může dosahovat hodnoty 55 °C. S novým typem kabelové izolace PPL může bezpečně pracovat při teplotě 85 °C a napětí do 600 kV. Obsah vodiče může být až 2500 mm^2, jeho vnější průměr je v rozmezí 110 a 140 mm s váhou kabelu od 30 do 60 kg/m, což tento kabel činí lehčí v porovnání s předchozím typem. Zajímavostí je, že společnost ABB po celém světě dodala více než 1700 km MI kabelů. [12], [24]



Obrázek 2.2: Struktura MI kabelu [12]

Extrudované kabely

Extrudovaný kabel znázorněný na obrázku 2.3 se používá pro napětí do 300 kV, ale s rostoucím technologickým vylepšením se tato hodnota v budoucnu zvýší. Tento typ kabelu je v praxi například spojen se zdrojem měniče VSC, který umožňuje obrátit tok energie bez obrácení polarity. Testy prokázaly, že v této době je pro typ měniče VSC s extrudovanými kabely přenositelný výkon až 800 MW. Nevýhodou tohoto typu jsou problémy s nerovnoměrným rozdělením nábojů, které mohou migrovat uvnitř izolace v důsledku působení elektrického pole. V případě rychlého přepólování může dojít k vysokému lokali-

zovanému namáhání, které vede k rychlejšímu stárnutí izolace. Extrudované kabely nachází výhodu v jejich hmotnosti, která se pohybuje v rozmezí 20-35 kg/m, a díky průměru 90-120 mm jsou považovány za konkurenceschopné s ostatními používanými typy kabelů. [12]

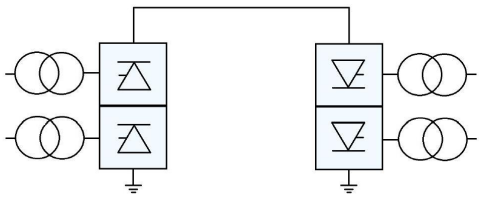
Obrázek 2.3: Struktura extrudovaného kabelu [12]

2.2 HVDC konfigurace

2.2.1 Monopolární systém

Monopolární konfigurace, nebo-li jednopólové spojení, se skládá z jednoho vodiče propojujícího měnírny elektrických veličin, které jsou obě příslušně uzemněny nebo využívají takzvaného metalického spojení obou měníren s následným uzemněním. Nicméně použitím zpětné cesty "Ground-return" přes moře nebo použitím zemních vodičů nastávají otázky týkající se problematiky koroze, protože v místě uzemnění dochází ke korozi na kovových předmětech vlivem změny chemického prostředí. V některých oblastech nastává problém, že vodiče nejsou dostatečně vodivé pro zemní nebo podmořský přenos z důvodu kabelových přechodů ve sladkovodních vodách, nebo v oblastech s vysokou hodnotou zemního odporu. V takových případech se proto používají kabely nízkého napětí pro zpětný přenos nebo systém Metallic-return, který si lze v obrázku 2.4 představit spodním spojením obou měníren s následným jednoduchým místním uzemněním. [13]

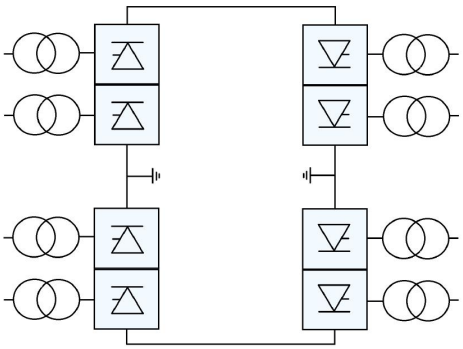
Monopolární HVDC systém s Ground-return se skládá z jednoho nebo více šestipulsních konvertorových jednotek zapojených v sérii umístěných na obou koncích vedení v takzvaných měnírnách. Tento systém může být cenově výhodným řešením pro přenos HVDC systému a lze ho považovat i za první etapu bipolárního systému. [29]



Obrázek 2.4: Monopolární HVDC systém [13]

2.2.2 Bipolární systém

Tento systém HVDC konfigurace se skládá ze dvou pólů, jeden s kladnou polaritou a druhý se zápornou polaritou, přičemž na obou koncích jsou mezi sebou měniče uzemněny, což lze spatřit na obrázku 2.5. V ustáleném bezporuchovém stavu proud teče ve smyčce, čímž dochází k tomu, že žádný proud nemůže projít do země, a tudíž nenastávají důvody pro vznik koroze. V případě poruchy na jednom z pólů lze tento systém provozovat jako monopolární systém s uzemněním. Množství přenášeného výkonu v bipolárním uspořádání je dvakrát vyšší než u monopolárního systému. Reverzní tok elektrické energie může být proveden změnou polarity obou pólů. [13]



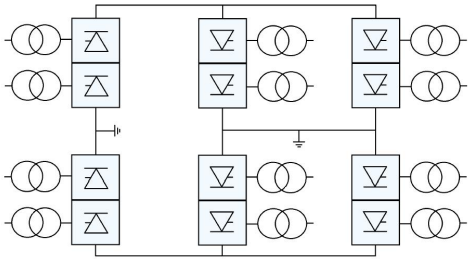
Obrázek 2.5: Bipolární HVDC systém [13]

Bipolární systém se skládá z jednoho nebo více dvanácti-pulsních konvertorových jednotek zapojených v sérii nebo paralelně. V případě výpadku jednoho pólu je možné systém provozovat po dobu nutnou k zajištění stabilní dodávky elektrické energie, tento případ provozu s jedním vodičem je však nežádoucí z důvodu zemního proudu. Přenos proudu pomocí jednoho vodiče v poruchovém stavu bipolárního systému bez nutnosti přerušení vyžaduje metalický zpětný převodový vypínač (MRTB) a další speciální rozvaděče v uzemnění jednoho terminálu. V případě dovoleného krátkého přerušení toku elektrické energie není vypínač nutný. Pokud jeden pól nemůže být provozován při plném zatížení, je zde možnost provozovat oba póly bipolárního systému po určitou dobu s různými elektrickými proudy. Tento případ by v praxi neměl nastat. V případě lehkého poškození izolace DC linky může být jeden nebo oba póly nepřetržitě provozovány při sníženém napětí. [29]

2.2.3 Multiterminální systém

Multiterminální systém je označován za HVDC systém skládající se ze tří nebo více měničových stanic, což lze vidět na obrázku 2.6. Cíl multiterminální konfigurace spočívá v úspoře nákladů a snížení ztrát celkového přenosu. Tento systém poskytuje vylepšení spolehlivosti a funkčnosti HVDC vedení. Činnost

multiterminálního systému nachází uplatnění ve spojení s větrnými farmami, ropnými oblastmi nebo plynovými soupravami. [13]

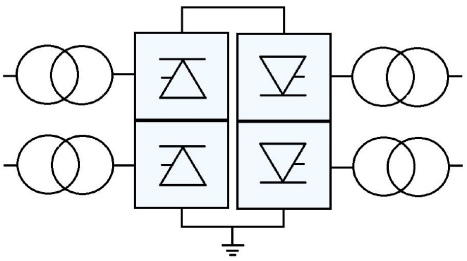


Obrázek 2.6: Multiterminální HVDC systém [13]

2.2.4 Back-to-back systém

Back-to-back HVDC linky jsou speciálním případem spojení monopolárního systému. Tento typ přenosu se používá především v místech, kde není možné realizovat přenosové vedení, čímž dochází k tomu, že jsou konvertory umístěny na stejném místě. Z ekonomických důvodů je každý konvertor obvykle tvořen dvanáctipulsní měničovou jednotkou s možností umístění ve stejné budově. Řídící systém, chladící zařízení a pomocné systémy mohou být integrovány do společné konfigurace obou měničů. V tomto případě systému nejsou vyžadovány stejnosměrné filtry ani elektrodové linky, nulový vodič je proveden uvnitř ventilové haly. Alstom grid vyvinula řešení pro systém Back-to-back HVDC, který nevyžaduje vyhlazovací tlumivky a díky tomu zde nemusí být žádný vnější stejnosměrný izolační materiál. Popisovaný Alstom grid využívá dvě odlišné konfigurace Back-to-back systému, jeden typ systému lze vidět na obrázku 2.7. V tomto případě systému je uzemnění provedeno mezi dvěma konvertory měnící elektrické veličiny, druhý případ si lze představit v obrázku s uzemněním mezi dvěma měniči na levé straně. V Almost grid jsou oba horní transformátory v zapojení Y/y a spodní transformátory v zapojení Y/d, respektive D/y. Back-to-back HVDC systém je realizován pro nižší hodnoty jmenovitého DC napětí a jmenovitý proud tyristoru je dimenzován na vysoké hodnoty v porovnání s HVDC nadzemním či kabelovým vedením. Cena tyristorového ventilu je závislá na napětí, s rostoucím napětím je nutný větší počet tyristorů. [29]

Back-to-back HVDC systém se používá pro propojení asynchronních AC vedení a pro spojení dvou systémů s rozdílnou frekvencí. V této topologii je přenosová energie limitována poměrnou kapacitou připojených střídavých systémů. [13]



Obrázek 2.7: Back to back HVDC systém [13]

2.2.5 Filtry

Harmonické napětí, které se vyskytuje na stejnosměrné straně měnírny způsobí střídavé proudy, jež jsou superponovány na stejnosměrný proud v přenosové lince. Tyto střídavé proudy vyšších frekvencí mohou způsobit rušení v sousedním telefonním systému navzdory omezení vyhlazovacími tlumivkami. DC filtrační obvody připojené paralelně k pólům stanice jsou účinným nástrojem pro boj s těmito problémy. Konfigurace DC filtrů jsou podobné filtrům na střídavé straně HVDC stanice. Protože 12 pulzní LCC měniče potřebují velké množství jalového výkonu (až 60 % přeměněného činného výkonu) je nutné filtrovat vyšší harmonické průběhy proudů, které díky tomuto vznikají. Filtry stejnosměrného proudu mají za úkol odstranit vyšší harmonické složky způsobující rušení. [11] [1]

2.2.6 Vyhlazovací tlumivky

Důležitým provozním zařízením v systému HVDC bývají také vyhlazovací tlumivky, které v obvodu plní několik funkcí. Hlavním úkolem tlumivek je vyhlazení stejnosměrného proudu a omezení vzniku přerušovaných proudů při nízkém zatížení vedení. Je nutné objasnit, že přerušovaný proud je nežádoucí, mohl by způsobit vysoká přepětí, která mohou vést k poškození jednotlivých částí vedení. Další jejich funkcí je omezení vlivu poruchových proudů. Vyhlazovací tlumivky také zamezují rezonanci v obvodu na určitých frekvencích. Tato zařízení také vedou k omezení rušení a jako sériová impedance potlačují vyšší harmonické složky. [1]

2.3 Typy měničů a zařízení spojené s přenosem

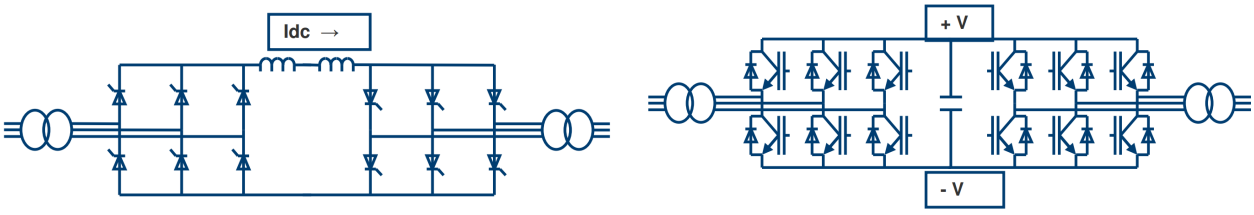
Konvertorové stanice jsou místa pro transformaci elektrických parametrů z AC na DC nebo opačně. Tyto stanice jsou součástí přenosového systému HVDC, bez kterých by tento systém nebylo možné realizovat.

V dnešní době jsou používány dva hlavní typy měničů:

- **Line Commutated Converter (LCC)**
- **Voltage Source Converter (VSC)**

2.3.1 LCC vs VSC

LCC HVDC	VSC HVDC
-proudový zdroj, lze ho nazývat CSC	-napěťový zdroj
-v existenci od počátku roku 1950	-v komerčním využití od roku 1999
-napětí v obou směrech	-proud v obou směrech
-změnou polarity v měniči se změní tok výkonu	-pro směr toku výkonu nevyžadují obrácení polarity vodičů
-využívá tyristory	-IGBT tranzistory, popř GTO tyristory
-vypnutí zajištěno vnějším obvodem	-nevyžadují vnější obvod pro vypnutí
-větší přenosová kapacita	-nižší přenosová kapacita
-vyšší schopnost přetížení	-nižší schopnost přetížení
-vyžaduje silnější AC sítě	-není závislá na dobrém fungování AC sítě
-pro schopnost black-startu vyžaduje dodatečné zařízení	-schopnost black-startu, (možnost startu bez přídavného napájení na jednom konci linky)
-generuje harmonické zkreslení	-nevýznamné hodnoty harmonického zkreslení
-vyžaduje harmonické AC a DC filtry	-nevyžaduje filtry
-hrubší regulace jalového výkonu	-jemnější regulace jalového výkonu
-větší zastavěná plocha z důvodu harmonických filtrů	-50-60 % LCC plochy
-vyžaduje konvertorové transformátory	-použití běžných konvenčních transformátorů
-nižší ztráty měniče	-vyšší ztráty měniče
-nižší náklady	-vyšší náklady o 10-15 %
-vyšší spolehlivost dodávky	-nižší spolehlivost, vzhledem k vysokému počtu komponentů
-vyspělejší technologie	-méně vyspělé technologie
-vyžadují použití MI kabelů	-ideální pro použití XLPE kabelů
-schopnost vyššího napětí	-nižší napětí
-účinnost vyšší než 85 %	
-vyžaduje připojení dvou aktivních elektrických sítí na obou koncích [12]	-vhodnější pro instalace na moře (větrné elektrárny, ropné plošiny, ostrovy) [30]



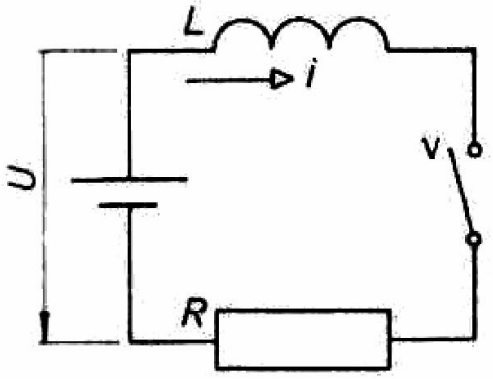
(a) LCC stanice **(b)** VSC stanice

Obrázek 2.8: Typy měničů v HVDC systémech [30]

3 Spínání a vypínání stejnosměrného proudu na úrovních VVN

3.1 Zapínání obvodu napájeného stejnosměrným napětím

V této kapitole je popsána problematika zapínání obvodu napájeného stejnosměrným napětím. V případě připojení napětí k níže uvedenému obvodu proběhne v obvodu přechodný jev, proud zvyšuje svoji hodnotu z nulové velikosti a po doznění přechodného jevu získá velikost jmenovitého proudu obvodu. Je vhodné brát v potaz při teoretickém zpracování výpočtu, že zapnutí vypínače připojujícího napětí nastane okamžitě.



Obrázek 3.1: Jednoduchý indukční obvod [8]

Pro nejlepší znázornění uvažujeme jednoduchý indukční obvod, který je zobrazen na obrázku 3.1. Konstatní napětí U připojíme k obvodu v čase $t = 0$. Podle II. Kirchhoffova zákona platí v zapnutém obvodu vzorec:

$$u_L + u_R = U \tag{3.1}$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = U \tag{3.2}$$

Jedná se o lineární diferenciální rovnici 1. řádu s konstantními koeficienty a s konstantní pravou stranou, rovnici 3.2 převedeme na charakteristickou rovnici a za pomoci dalších úprav zobrazených níže získáme homogenní řešení:

$$L \cdot \lambda + R = 0 \tag{3.3}$$

$$\lambda = -\frac{R}{L} \tag{3.4}$$

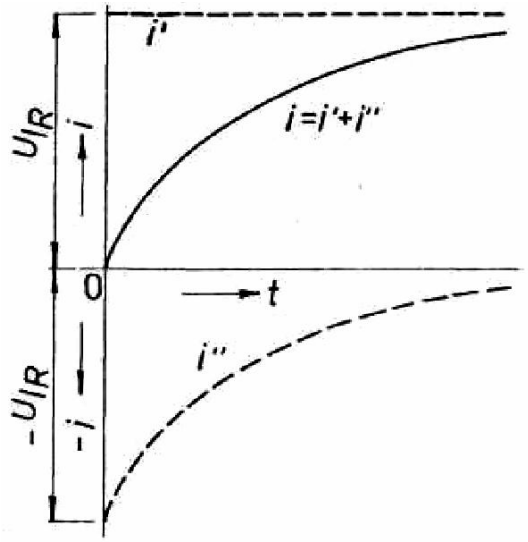
Časová konstanta je poté rovna:

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = \frac{L}{R} \tag{3.5}$$

Je nutné u tohoto obvodu také uvést podmínky:

$$i_L(0) = 0 \tag{3.6}$$
$$i_L(p) = i_L(\infty) = \frac{U}{R} \tag{3.7}$$
$$t = 0 \tag{3.8}$$
$$i_L(0-) = i_L(0+) \tag{3.9}$$
$$i_L(t \geq t_0) = K \cdot e^{\lambda(t-t_0)} + i_L(p) \tag{3.10}$$
$$0 = K \cdot e^{\lambda(0-0)} + \frac{U}{R} \tag{3.11}$$
$$i_L = -\frac{U}{R} \cdot e^{\lambda t} + \frac{U}{R} = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \tag{3.12}$$

Grafické znázornění vypočteného časového průběhu přechodného proudu je uvedeno na obrázku 3.2. Z odborného hlediska je dán přechodný proud součtem dvou složek, přechodné i'' a ustálené i'.



Obrázek 3.2: Časový průběh přechodného proudu obvodu napájeného stejnosměrným napětím [8]

Můžeme uvést, že ustálená složka $i' = U/\mathrm{R}$ znázorňuje proud, jež prochází obvodem po doznění přechodného jevu a nabývá konstantní hodnoty. Přechodná složka daná vztahem $i'' = -U/Re^{-t/\tau}$ narůstá od velikosti $-U_0/R$ do nuly. Průběh této složky charakterizuje přechodný jev, přičemž rychlost její změny je udávána časovou konstantou τ. Prostřednictvím časové konstanty τ máme přehled o době trvání přechodného jevu. Stanovené parametry, kterými je vhodné se řídit, ukazují, že absolutní hodnota přechodné složky 5% ustálené velikosti je rovna době $t = 3\tau$. V případě hodnoty $t = 4\tau$ jsou to 2%, lze předpokládat, že přechodný jev trvá dobu 4τ a dopustíme se tedy chyby 2% ustáleného proudu.

3.2 Zhášení elektrického oblouku v obvodu stejnosměrného proudu

V této kapitole si popíšeme informace týkající se zhášení elektrického oblouku v obvodu stejnosměrného proudu. Je nutné vědět, že při rozpínání kontaktů přístrojů, kterými protéká proud, dochází ke vzniku elektrického oblouku. Můžeme dosáhnout zhášení oblouku několika způsoby, jeho uhašení docílíme zvýšením napětí nezbytného pro udržení oblouku (tedy zvětšením odporu oblouku), prodloužením sloupce oblouku nebo zvětšením intenzity elektrického pole, obvykle využíváme několik možností sou-

časně. Aby byl oblouk rychle natažen a došlo na něm ke zvětšení napětí, jsou ve vypínačích zapotřebí zvláštní zhášecí komory, které také plní funkci omezení prostoru na přijatelnou mez, kde účinkuje plamen oblouku a horké plyny vznikající jeho hořením. V ideálním případě požadujeme u vypínačů při rozpojování kontaktů nekonečně rychlé zvětšení vzduchové mezery s klesajícím proudem na nulu. V reálných obvodech spočívají problémy v elektromagnetické energii indukčnosti, kterou je zapotřebí převést do jiné formy energie. Energií z indukčnosti můžeme nabíjet kondenzátor C, jenž je připojen paralelně ke kontaktům, což lze spatřit na 3.3, z elektromagnetické energie se stane elektrostatická. Napětí mezi kontakty se pochopitelně s nabíjením kondenzátoru zvětšuje, neboť je kondenzátor paralelně připojen. Z rovnosti elektromagnetické a elektrostatické energie zjistíme maximální možnou hodnotu přepětí.

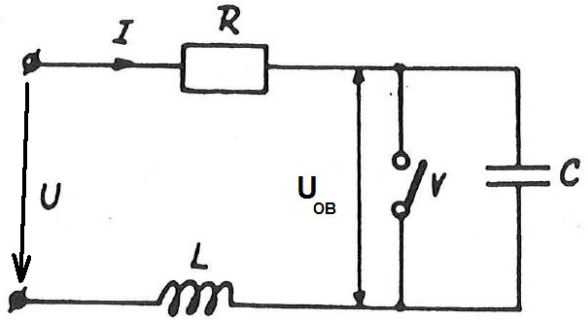
$$W_m = W_e \tag{3.13}$$

$$\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_m^2 \tag{3.14}$$

$$U_m = I \cdot \sqrt[2]{\frac{L}{C}} \tag{3.15}$$

Pro konkrétní představu si můžeme provést výpočet přepětí pro proud $I = 1000\ A, L = 10^{-3}\ H, C = 0,1\ \mu F$. Tyto uvedené hodnoty nám způsobí přepětí:

$$U_m = 1000.\sqrt[2]{\frac{10^{-3}}{10{-}7}} = 100\ 000\ V \tag{3.16}$$



Obrázek 3.3: Stejnosměrný obvod s elektrickým obloukem [34]

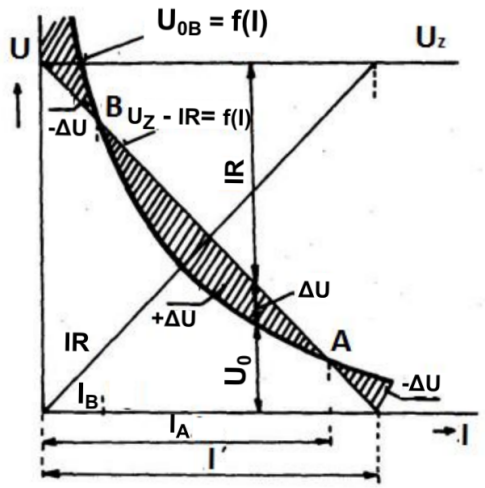
V obvodech přístrojů na nízké napětí nejsou vysoké hodnoty přepětí povoleny z důvodu zajištění funkční spolehlivosti přístrojů, nesmí dojít k dosažení, nebo dokonce k překročení izolačních pevností zapojených přístrojů. Tuto podmínku lze zajistit v případech, kde se větší část elektromagnetické energie mění v tepelnou, která přechází do okolí místa, kde byl vytvořen elektrický oblouk. Výhoda této konstrukce přístrojů spočívá ve snižování elektrostatické energie zaručující nabíjení kondenzátorů, tím se snižuje i přepětí mezi kontakty přístroje.

Nyní se zaměříme na podmínky stability stejnosměrného oblouku. Na obrázku 3.4 lze vidět statickou voltampérovou charakteristiku oblouku $U_{ob} = f(i)$, napětí zdroje U_z a odporovou charakteristiku $p = IR$. Ve skutečných zapojeních je nutné brát v potaz kapacitu C, která je mezi vodiči, vodiči a zemí

a mezi kontakty. Jakmile mezi kontakty přístroje prochází proud, můžeme kapacitní proud zanedbat, protože ve srovnání s hlavním proudem nabývá malých hodnot. Kapacitní proud se projeví až na konci vypínacího procesu, kdy se hlavní proud zmenšuje na nulu a napětí na oblouku strmě zvyšuje svoji hodnotu. Podle obrázku 3.3 můžeme zavést rovnici:

$$U = Ri + U_{0B} + L\frac{di}{dt} \tag{3.17}$$

V případě ustáleného obvodu platí di/dt=0 a indukčnost můžeme zanedbat. Pro lepší představu použijeme přímku $U_z - Ri = f(i)$, která vychází z bodu $u = U_z$. Tato přímka protíná voltampérovou charakteristiku v bodech A a B. Stabilní bod se nachází pouze v bodě A, podle proudu i_A můžeme rozdělit úbytky napětí na Δu a na $-\Delta u$, což je patrné z obrázku 3.4. Úbytek napětí Δu je možné kompenzovat pouze indukčností L, při této kompenzaci platí rovnost $\Delta u = L\ di/dt$. Podmínka rovnováhy je pro bod A splněna, poněvadž nezáleží na straně posunu k bodu A. Tato vlastnost však neplatí pro bod B, kde záleží na místu, odkud se k bodu B přibližujeme, při pohybu k bodu B zprava platí $di/dt < 0$,$\Delta u > 0$, pro případ posuvu k bodu B zleva platí $di/dt > 0$, $\Delta u < 0$. Oblouk zhasíná, pokud se pracovní bod pohybuje směrem vlevo od bodu B, v opačném případě dojdeme postupným posuvem ke stabilní hodnotě v bodě A. Pro bod B můžeme zavést pojem nestabilní rovnovážný stav. Z předchozích uvedených informací jsme zjistili, že v okamžiku rozepnutí kontaktů, jimiž prochází ustálený proud I_0, vznikne mezi kontakty napětí U_0, (oblouk získal ihned délku, pro níž je vyznačena na obrázku 3.4 voltampérová charakteristika), proud zmenší svoji hodnotu na velikost i_A a prochází trvale obvodem, mezi kontakty ovšem také hoří nepřetržitě oblouk, na kterém vzniká úbytek napětí U_0.

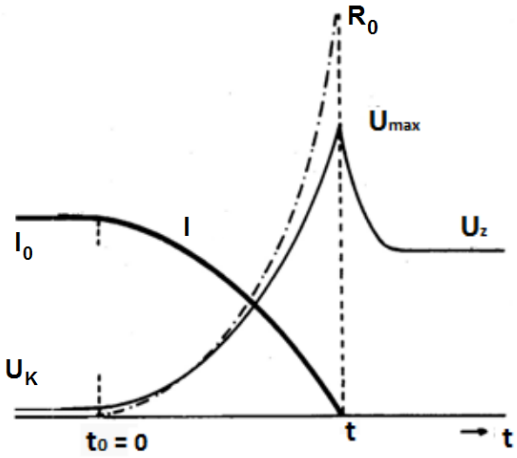


Obrázek 3.4: Určení podmínky zhášení stejnosměrného oblouku metodou grafické integrace [34]

Pokud chceme, aby po rozpojení kontaktů došlo ke zhasnutí oblouku, musí voltampérová charakteristika probíhat nad přímkou $U_z - Ri = f(i)$, v tomto případě se neprojeví průsečík A a proud se zmenší z hodnoty I_0 na nulu. V grafu nyní můžeme zaznamenat pouze záporný úbytek $-\Delta u$ a zavedeme rovnici $U = Ri + u_0 - \Delta u$ ($u_0 = U_{ob}$). Zvýšením úbytku napětí $\Delta u = Ldi/dt$ (voltampérová charakteristika se nachází dále od vnější charakteristiky obvodu) docílíme zkrácení doby zhášení. [10]

Nejdůležitější graf představující vypínané veličiny při stejnosměrném oblouku je zobrazen na obrázku 3.5. Do doby $t_0 = 0$ je na kontaktech úbytek napětí U_k a prochází obvodem proud I_0. Po

rozepnutí kontaktů (po době $t_0 = 0$) se zvětšuje odpor oblouku R_0 a s ním roste i napětí u_0, proud se v tomto případě zmenšuje. V době $t_0 = t$ nabyl proud nulové hodnoty a můžeme mezi kontakty naměřit nejvyšší hodnotu napětí. Prostřednictvím svodu mezi kontakty se hodnota kapacity C vybíjí a napětí sníží svoji hodnotu na U_z.

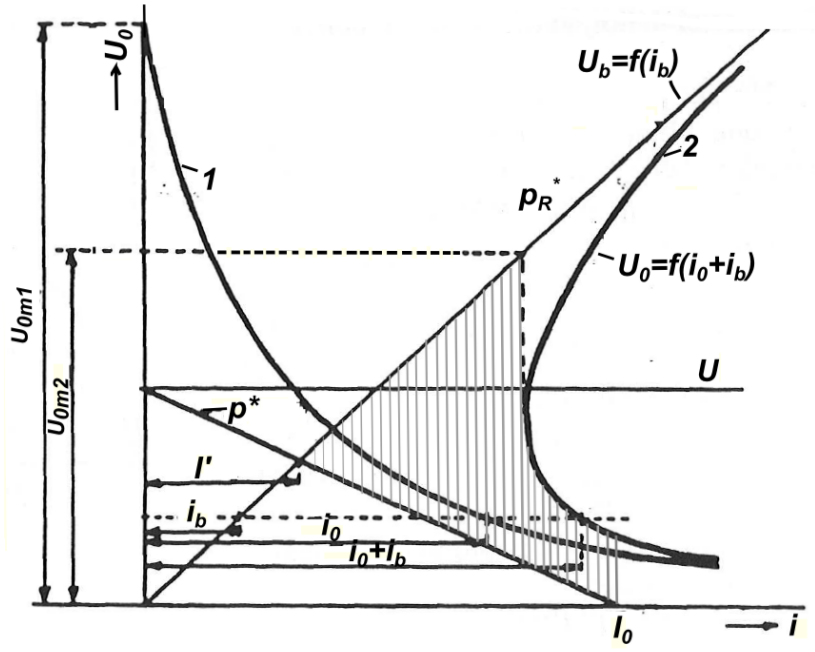


Obrázek 3.5: Zhášení stejnosměrného oblouku [34]

Velikost vypínacího přepětí je ovlivňováno indukčností sítě, s rostoucí indukčností se zvětšuje i přepětí, důležité je brát v potaz i vliv změn v průběhu dynamické charakteristiky. Při použití zhášecí komory se štěrbinami je přepětí při vypínání stejnosměrného obvodu výrazně nižší, protože napětí na oblouku v komoře není závislé na proudu, s tím souvisí i kratší doba hoření oblouku, jež díky vhodně zvolené komoře nabývá znatelně kratších okamžiků. U keramických zhášecích komor je oblouk veden do prostoru přepaženého úzkými štěrbinami, což znázorňuje křivka č.2 na obrázku 3.6. V grafu 3.6 lze vidět dva průběhy voltampérových charakteristik, u křivky č.1 je při velkém proudu malé napětí, avšak při zmenšení hodnoty proudu nabývá napětí značně vysokých hodnot. Charakteristiku č.1 znázorňuje uložení kontaktů stejnosměrného vypínače do oleje. U stejnosměrných vypínačů není vhodné použití zhášecího média olejem, neboť při průchodu oblouku malým proudem se stýkává olej s vnějším povrchem sloupce oblouku, napětí na oblouku se rychle zvětšuje, čímž dochází k přepětí a s ním roste i odvod tepla.

Snížit přepětí při vypínání stejnosměrných vypínačů zajistíme připojením odporového bočníku paralelně ke kontaktům. Napětí na odporovém bočníku je stejné jako na kontaktech přístroje, celkový proud sítě je podle Kirchhoffova zákona rozdělen na $i = i_0 + i_b$, přičemž proud i_0 prochází přes kontakty a proud i_b přes bočník. Získáváme křivku číslo 2 v grafu 3.6, jež prochází výrazně výše než křivka 1 a díky tomuto procesu je zhášení oblouku ukončeno dříve a z obrázku lze vidět, že získáváme i menší hodnotu přepětí U_{om2}. K úplnému přerušení proudu mezi kontakty přístroje dojde v hodnotě $I_0^{'}$. K připojenému bočníku je ještě nutné do série připojit pomocný kontakt K, který zajistí odpojení bočníku a tím i trvalého odpojení obvodu. V případě, že bočník není připojen, můžeme znázornit křivku číslo 1 v grafu 3.6 představující závislost mezi napětím na oblouku a celkovým proudem i. Tato křivka prochází blízko přímky p^*, důležitá podmínka zhasnutí oblouku byla splněna, avšak v případě dosažení limitního stavu oblouk trvale hoří a přepětí U_{om1} je na konci vypínání relativně vysoké, stejně jako napětí na indukčnosti.

Účinné zhášení oblouku docílíme jedním ze dvou opatření:



Obrázek 3.6: Určení voltamperové charakteristiky [34]

- Zvýšením intenzity elektrického pole E ve sloupci oblouku, zvětšením délky oblouku nebo zvětšením součtu úbytků napětí v prostoru elektrod, u zvětšení součtu úbytku napětí je použit větší počet elektrod, čímž získáme oblouk "rozsekaný" na více kratších úseků a dochází tak ke zvětšení intenzity pole v prostoru mezi kontakty.
- Zvětšením odporu v síti nebo snížením napájecího napětí, v případě nepřiměřené délky oblouku získáváme velký nárok na rozměry celého vypínače, což je nevýhoda a navíc může nastat velké přepětí ohrožující izolaci spotřebičů v síti.

V konstrukční praxi stejnosměrných vypínačů je nejvíce používána kombinace zvětšení intenzity elektrického pole v oblouku a zvětšení délky sloupce oblouku na přijatelnou míru. Nejvíce se používá tzv. magnetické vyfukování oblouku, v prostoru, kde hoří oblouk, se vytváří příčné magnetické pole, které zvětšuje rychlost pohybu oblouku a dochází k jeho roztažení nebo vtažení mezi izolační štěrbiny. Magnetické pole je možno vytvářet vypínaným proudem, které je zajištěné sériovým zapojením zhášecích cívek. [10] [34]

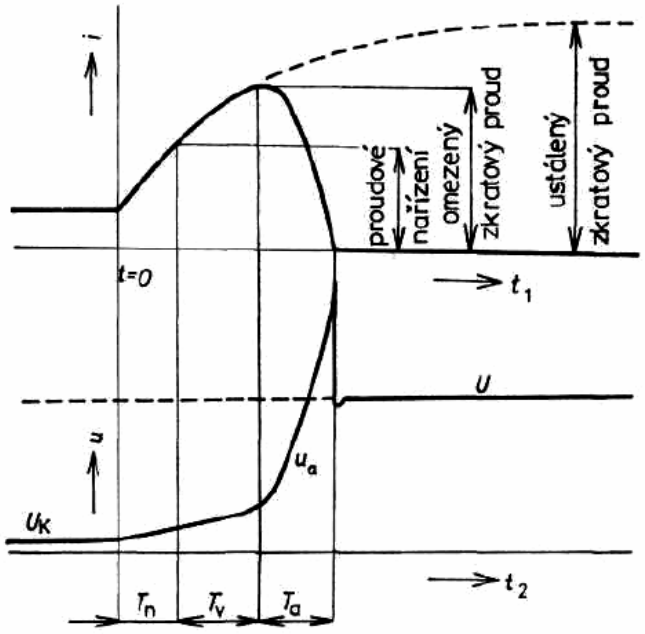
3.3 Rychlovypínače

Tato zařízení dosahují vysokých vypínacích výkonů při průchodu stejnosměrného proudu a bývají většinou v provedení jednopólových jednotek. Rychlovypínače můžeme zařadit do kategorie tzv. omezovacích vypínačů. Pro ilustraci si zde uvedeme příklad představující krajní vypínací hodnotu proudu 10 kA, komora zvládne tento proud při napětí 3000 V a musí nabývat rozměrů 120x120 cm. Je nutné zdůraznit, že i při napětí 500 V činí zkratové proudy s ustálenou hodnotou i několik desítek kiloampérů a musíme zajistit jejich rychlé vypnutí, proto se právě v těchto aplikacích montuje stejnosměrný rychlovypínač, který je vypínač omezovači. Stejnosměrný vypínač je zkonstruován tak, že si sám omezí

velikost vypínacího proudu. Tento přístroj tedy může zvětšit vypínací schopnost vypínače stejnosměrného proudu. Omezovací schopnosti vypínač nabývá zpravidla, když jsou u něj splněny dvě základní podmínky:

- Zapálení oblouku s oddálením kontaktů nastane ještě předtím, (pohled k počátku nárůstu proudu) než proud získá svoji maximální velikost.
- Po zapálení oblouku poté naroste rychle odpor, s ním samozřejmě dojde ke zmenšení proudu, ale také odpor převede celý obvod do labilního stavu.

Nyní si zde popíšeme obrázek představující procházející proud a napětí po době oddálení kontaktů přístroje. Z obrázku 3.7 vidíme, že do času $t = 0$ procházel obvodem ustálený proud. V době $t = 0$ dojde ke zkratu a proud v periodě T_n, (která je nazývaná dobou nastavení), začne zvyšovat svoji hodnotu. V tuto dobu dosáhne proud takového násobku nastaveného proudu a zajistí činnost nadproudové spouště. Doba, která je v charakteristice dále uvedena, se nazývá vlastní doba vypínače T_v a v případě nejrychlejších vypínačů dosahuje 1 ms. Tato doba zajišťuje dobu od náběhu mechanismu spouště přes vybavení vypínacího mechanismu do okamžiku oddálení kontaktů. Každá z dob je závislá na jiném konkrétním případě, doba T_n je závislá na časové konstantě vypínaného obvodu, doba T_v je pro danou konstrukci konstantní a doba T_a představuje hoření oblouku a je závislá na napětí obvodu a provedení zhášedla. Doba T_a je v rozmezí 5-30 ms. Součet všech tří dob zajišťuje celkovou dobu vypnutí.



Obrázek 3.7: Průběh proudu a napětí na kontaktech stejnosměrného rychlovypínače při vypínání [8]

Špičku zkratového proudu pod hodnotu ustáleného zkratového proudu lze omezit rychlým nárůstem odporu oblouku. Vypínací schopnost stejnosměrného rychlovypínače je dána krajním ustáleným proudem představující hodnotu, která by obvodem procházela kdybychom nezajistili vypnutí. Velikost neomezeného plného zkratového proudu můžeme nazvat tzv. předvídaným proudem. V případě kdy úsek zajišťující vyfukování oblouku do zhášecí komory proběhne rychle, můžeme říci, že došlo k brzkému oddálení kontaktů s rychlým zapálením oblouku. Rychlovypínače jsou rozměrově i hmotnostně velmi náročné vypínače s možností vypínání velkých jmenovitých proudů. U těchto přístrojů musíme

zajistit také přesný mechanismus, který je řízen pomocí speciálního ovládacího zařízení. Tyto speciální zařízení jsou založeny na principu přímého silového působení na pohyblivý kontakt přístroje. Lze je rozdělit do dvou hlavních kategorií, při čemž první kategorie využívá působení elektrodynamických sil mezi kontakty využívající přímo energie přerušovaného proudu, druhou kategorií je energie z cizího zdroje zajištující rozpojení kontaktů. První kategorie je charakterizována účinky elektromagnetických polí, jež jsou zesilovány feromagnetickými materiály a lze je nazývat podle principu jednotlivých částí, čímž můžeme zavést pojmy nárazová kotva nebo odpalovací transformátor. Tento typ vypínače omezuje proudy o něco větší než je nastavená velikost, lépe řečeno propuštěná špička proudu narůstá stále pomaleji než vypínaný proud, jiným názvem konverguje k určité absolutní hodnotě. U druhé kategorie se používá elektrická energie nabitého kondenzátoru s rychlým účinkem čidla, které je složitější a používá se pro jištění malých podpětí, přepětí, nadproudů (např. $1,2I_n$), ale i pro jištění neelektrických veličin s možností převodu na elektrické signály a dalším typem této druhé kategorie bývá mechanická energie vypínacích pružin. U této kategorie dochází k omezení proudu vždy ve stejné době, jinak řečeno, velikost propuštěné špičky je více závislá na strmosti nárůstu proudu, je to odlišné od první kategorie s vlastní ovládací energií.

Mezi nejdůležitější zařízení rychlovypínače patří mechanismus, jež mžikově reaguje na vzrůstající proud. Tyto mechanismy lze rozdělit do dvou skupin:

- přídržný elektromagnet
- odpalovací cívka [8] [9]

3.4 HVDC vypínače

Vypínač stejnosměrného proudu bude umístěn na stejnosměrné síti a v případě poruchy nám zaručí bezpečné odpojení od sítě. Tento typ vypínače bude muset splnit určité základní požadavky. Základním požadavkem je, aby přerušil proud na nulu v případě poruchy, současně by měla být rozptýlena energie uložená v indukčnosti, musí být přeměněna v jiný druh energie. Tento vypínač musí být také odolný vůči změnám napětí. V této kapitole budou popisovány dva typy HVDC vypínačů. Elektromechanický vypínač je první typ HVDC vypínače, dalším a v pořadí druhým typem je polovodičový vypínač, z odborného anglického hlediska je nazýván vypínačem "Solid-state". Elektromechanický vypínač můžeme rozdělit do tří skupin: (1) metoda generování inverzního napětí (2) metoda oscilování divergentního proudu (3) metoda injektování inverzního proudu. Pouze třetí metoda může být používaná ve vysokém napětí při proudové zatížitelnosti. V tomto typu jističe zajistíme nulovou hodnotu proudu pomocí (navrstvení) inverzního proudu (vysoké frekvence) na vstupní proud při vybití kondenzátoru, který byl předem nabit přes induktor. Náklady na komponenty potřebné pro elektromechanické DC jističe by neměli být výrazně vyšší než v případě AC jističů. Elektromechanické HVDC vypínače jsou dostupné do hodnoty 500 kV, 5 kA a jejich vypínací čas činí řádově 100 ms.

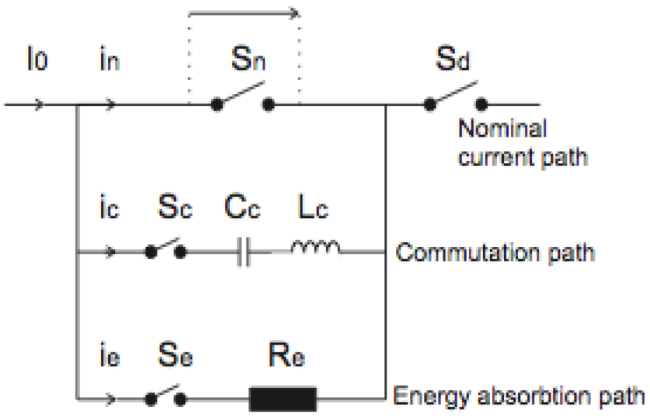
3.4.1 Elektromechanický vypínač

Na obrázku 3.8 lze vidět schéma zapojení elektromechanického vypínače, jež je složen ze tří části.

První částí prochází stejnosměrný jmenovitý proud a spínač je v tomto okamžiku sepnutý (**nominální část**).

Druhá část elektromechanického vypínače se nazývá **komutační**, tato část je složena ze spínače a rezonančního obvodu (kondenzátor a cívka) a používá se k vytvoření inverzního proudu.

Třetí část elektromechanického jističe je složena ze spínače a varistoru a slouží k **absorpci energie**.

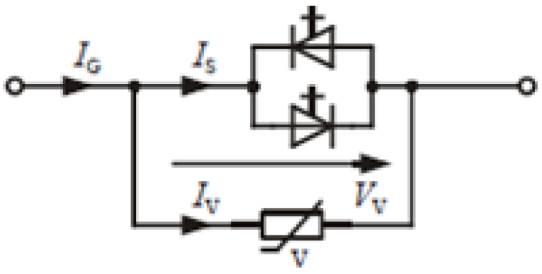


Obrázek 3.8: Elektromechanický vypínač [6]

Komutační část má sériovou rezonanci, v případě požadavku na přerušení proudu může dojít k proudovým oscilacím mezi hlavní částí a komutační částí při vlastní frekvenci $(1/LC)$. Jestliže amplituda oscilačního proudu je větší než vstupní proud, tak nastane nulový přechod a spínač může přerušit proud v nominální (hlavní) části. Proud I_0 nadále prochází a nabíjí kondenzátor. Jakmile napětí na kondenzátoru překročí danou hodnotu, jež odpovídá napěťovým schopnostem obvodu vypínače, třetí absorpční část zajistí snížení proudu, tuto činnost nám konkrétně zajistí varistor připojený paralelně ke komutační větvi. Toto schéma představuje základní obvod mechanického vypínače, jenž by pro případné použití ve vysokém napětí musel být dále implementován o jednotlivé prvky. Optimální hodnota kapacity zajistí nižší dobu vypnutí vypínače a zlepší celý vypínací proces. Oscilace obvodu roste, když je odpor oblouku dU/dt vypínače nominální cesty záporný. Vyšší oscilace mohou vést k rychlejší době přerušení. Současně velký poměr C/L maximalizuje přerušení vypínače.

3.4.2 Polovodičový vypínač

Druhý typ HVDC vypínače nazývaný Solid-state dokáže přerušit proud mnohem rychleji než elektromechanické vypínače, které mají vypínací dobu v řádech několika milisekund. Pro konkrétní představu je autorem předloženo schéma zapojení polovodičového vypínače na obrázku 3.9 se zapojením značky vypínatelné součástky v hlavní větvi.



Obrázek 3.9: Polovodičový vypínač [6]

Tyto vypínače jsou založeny na principu IGCT tyristorů, jež mají v porovnání s IGBT tranzistory

menší ztráty v zapnutém stavu. IGCT tyristory obsahují integrovaný řídící obvod, který musí ležet blízko řídícího prvku. Vypnutí u těchto tyristorů probíhá velmi rychle a odpadají problémy s nadměrným ohřevem při vypnutí. Tento tyristor lze používat do napětí 6 kV s maximálním proudem 6 kA a lze ho používat pro vyšší spínací frekvence než IGBT tranzistory. V případě požadované vyšší hodnoty napětí je možné tyto součástky řadit sériově. Proud prochází skrz IGCT tyristor a jakmile nastane požadavek na přerušení proudu, IGCT tyristor se vypne. Poté se napětí začne rychle zvětšovat a připojený varistor (paralelně s hlavní větví) zajistí svedení přepětí. Varistor je odpor závislý na napětí a je určen pro zablokování napětí nad úroveň napěťového systému. Hlavní nevýhody těchto typů vypínačů bývají vysoké ztráty v zapnutém stavu a relativně vysoké kapitálové náklady. Typické hodnoty polovodičových vypínačů v provozu jsou 4 kV, 2 kA, ačkoliv jsou realizovány i pro hodnoty do 150 kV. [6] [7]

4 Hybridní vypínače HVDC

U střídavých vypínačů dochází k vypnutí proudu při průchodu nulou, v případě aplikace stejnosměrných sítí tohoto principu nelze využít. Největší problematikou provozu stejnosměrných sítí bývá už po desetiletí jejich způsob vypínání, díky kterému bylo nutné vytvořit speciální topologie stejnosměrných vypínačů. Mezi jedny z nich patří právě hybridní DC vypínač (HDCCB), který se skládá z mechanického vypínače, příslušných polovodičů a svodičů přepětí. Obecně se HDCCB skládá ze tří nezbytných větví, jež umožňují plynulý provoz zařízení s možností rychlého vypnutí. Hlavní větev je tvořena mechanickým vypínačem a komutačním spínačem, pomocná větev je složena z polovodičových součástek a omezovače přepětí MOV. HDCCB v sobě zahrnuje tři bezpečné kroky přerušení proudu, jež budou popsány v následující kapitole. V této kapitole budou popsány principy vypínačů od dvou světových společností ABB a Alstom, které využívají podobných principů vypínání, ale za pomoci odlišných komponentů. Vypínače od obou společností jsou schopny vypnout proud velmi rychle a mezi jejich velké výhody patří nízké ztráty v normálním provozu. Na konci této kapitoly budou tyto vypínače komplexně porovnány.

4.1 Hybridní HVDC vypínač ABB

Hlavní obvod zahrnuje ultra rychlý mechanický vypínač UFD zapojený v sérii s komutačním spínačem LCS, jehož funkcí je komutovat poruchový proud do pomocné větve v době zjištění závady. Tyto dva komponenty společně zaručují nízké ztráty vypínače v běžném provozu. Komutační spínač LCS obsahuje malé množství IGBT tranzistorů umožňující komutovat poruchový proud. IGBT tranzistory umístěné v hlavní větvi by měly být instalovány anti-sériově z důvodu obousměrného přerušení proudu. Pomocná větev obsahuje IGBT buňky připojené paralelně ke svodičům přepětí. Každá buňka pomocné větve obsahuje dva IGBT moduly zapojené v sérii proti sobě. Pro vyšší hladinu napětí je nutné zapojit více buněk do série. Funkcí této pomocné větve je nést velký poruchový proud, když je mechanický vypínač UFD v otevíracím procesu, čímž snižuje velmi vysoké proudové zatížení mechanického přepínače. Omezovač přepětí nejen, že snižuje proud na nulu odstraněním energie, ale slouží také jako přepět'ová ochrana IGBT buněk pomocné větve. Celková ochranná úroveň svodičů přepětí je zvolena na 1,5 násobek jmenovitého stejnosměrného napětí.
Hybridní vypínač ABB uvádí v praxi otevření komutačního spínače hlavní větve v čase 1-2 ms, následné otevření ultra rychlého vypínače trvá 0,25 ms. Poté prochází proud pomocnou větví trvající 2 ms a konečné svedení není uváděno z důvodu rozdílných použití jednotlivých svodičů přepětí.

4.1.1 Princip hybridního HVDC vypínače ABB

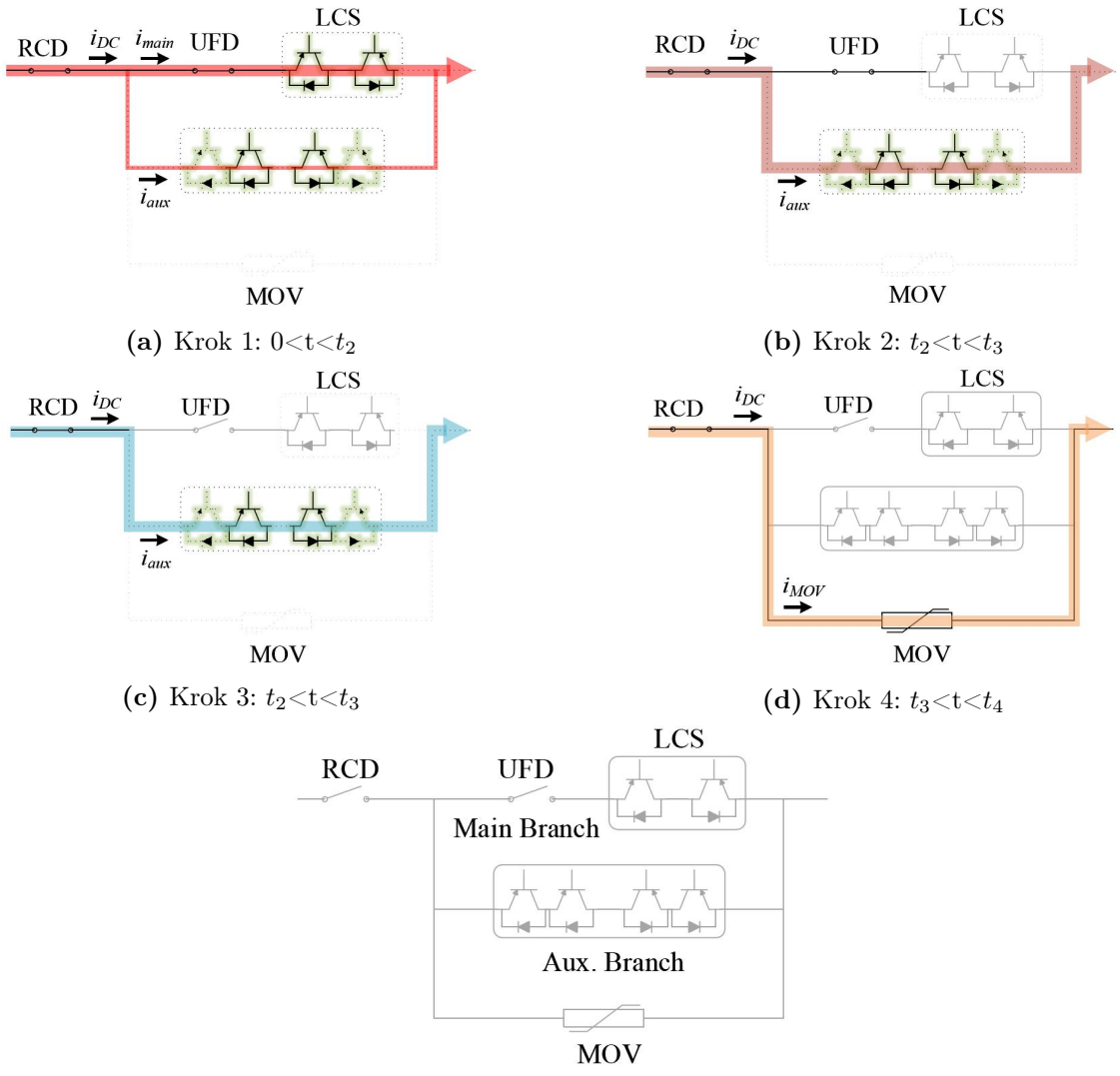
Krok1: Vypínač se nachází v normálním provozním režimu, většina zatěžovacího proudu prochází hlavní větví z důvodu nízké impedance komutačního spínače složeného z IGBT tranzistorů. Poměrně nízké množství proudových toků prochází také pomocnou větví v důsledku relativně velké impedance IGBT buněk.

Krok 2: V případě vzniku poruchy proud narůstá extrémně rychle na úroveň vypínací hodnoty komutačního spínače LCS. Po dosažení této hodnoty je zaslán vypínací signál na IGBT tranzistory v

LCS, to vede ke komutaci poruchového proudu do pomocné větve, což je znázorněno na obrázku 4.1b.

Krok 3: Při dosažení vypínací hodnoty LCS se otevře ultra rychlý vypínač UFD za dobu menší než jsou 2 ms. Hlavní schopností IGBT buněk v pomocné větvi musí být velká odolnost vůči velkému množství procházejícího proudu, který má během 2ms stále rostoucí charakter. IGBT buňky v pomocné větvi mají zabezpečenou vlastní ochranu pro případ překročení maximálního vypínacího proudu IGBT tranzistorů proudem poruchovým. Po dosažení úplného otevření ultra rychlého vypínače UFD bude vyslán vypínací signál na IGBT buňky a poruchový proud bude komutován do oblasti svedení MOV.

Krok 4: Jakmile se dosáhne vypínacího času IGBT buněk v pomocné větvi, nastává okamžik, kdy je poruchový proud nucen komutovat do MOV (metal oxide varistor). Poruchový proud je za pomoci MOV snížen na nulu. Po odstranění poruchy musí být do jedné vteřiny otevřen RCD, jež slouží jako ochrana svodiče přepětí MOV od tepelného přetížení v důsledku zbytkového proudu.



(a) Krok 1: 0<t<t_2

(b) Krok 2: t_2<t<t_3

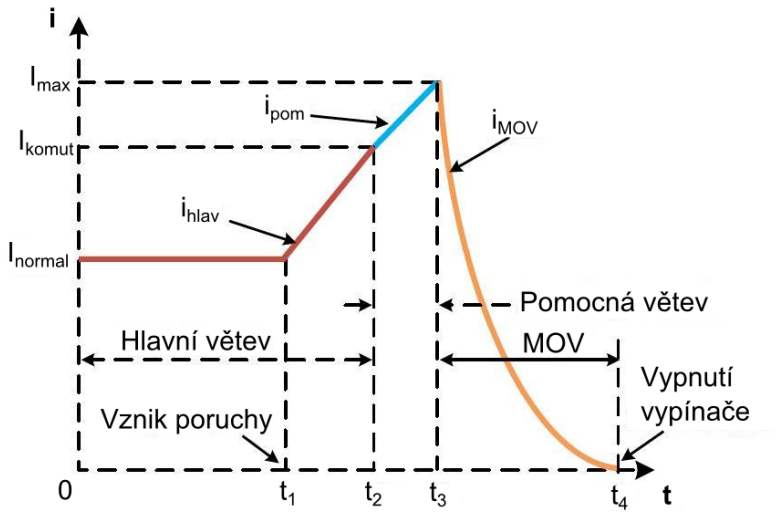
(c) Krok 3: t_2<t<t_3

(d) Krok 4: t_3<t<t_4

(e) Vypínací proces ukončen

Obrázek 4.1: Postup vypínání poruchového proudu hybridním ABB vypínačem [5]

Na obrázku 4.2 je zobrazen časový průběh vypínacího procesu HVDC vypínače skládající se ze čtyř po sobě jdoucích intervalů. Obecně lze tento proces rozdělit na tři etapy. První z nich je detekce chyby, druhá etapa zahrnuje komutaci proudu do pomocné větve a třetí etapa představuje výsledné odstranění závady, lépe řečeno svedení proudu pomocí speciálního varistoru určeného pro hybridní vypínače.



Obrázek 4.2: Časový průběh vypínacího procesu HVDC vypínače ABB [5]

4.2 Hybridní HVDC vypínač Alstom

Vypínací rychlost IGBT buněk vypínače ABB je bezesporu velmi rychlá. Nicméně je tato charakteristika nevhodná v několika aplikacích. Mechanický spínač se v této aplikaci otevře příliš pomalu v porovnání s IGBT buňkami, a proto je také nutná delší doba ochrany systému. Z tohoto důvodu se pokusila společnost Alstom zavést svoji speciální technologii HDCCB k vyřešení zmíněného problému. Alstom Grid HDCCB obecně obsahuje tři větve s funkcemi podobnými HDCCB od ABB. Rozdíl těchto technologii spočívá v pomocné větvi, která se u obou typů výrazně liší. Společnost Alstom aplikuje ve svých vypínačích v pomocné větvi pulsní výkonové tyristory PPT, jak je znázorněno na obrázku 4.3. Pomocná větev Alstom HDCCB se skládá ze dvou časově zpožděných větví a jedné "arming" větve, kterou lze přeložit ve smyslu aktivační větve. Každá pomocná větev obsahuje sériově spojené skupiny tyristorů, jejichž vypnutí je nesmírně obtížné. Z tohoto důvodu jsou ke každé skupině tyristorů připojené kondenzátory zajištující přerušení poruchového proudu danou větví. V pomocné větvi musí být nejméně dvě zpožd'ovací cesty, jež jsou v grafu 4.3 nazývány "time-delaying". První zpožd'ovací větev obsahuje velké kondenzátory a svodiče přepětí s paralelní nízkonapěťovou úrovní ochrany. Tato úroveň ochrany by neměla být vyšší než jmenovité napětí komutačního spínače LCS umístěného v hlavní větvi. Druhá zpožd'ovací větev funguje na podobném principu jako první, s tím rozdílem, že svodič přepětí má vyšší jmenovité napětí. Struktura třetí části pomocné větve, jíž teče proud i_{arming} se neliší od dvou zpožd'ovacích. Kondenzátor této větve musí být vhodně zvolen k hlavnímu svodiči MOV.

4.2.1 Princip hybridního HVDC vypínače Alstom

Krok 1: Během normálního provozu jsou všechny tyristorové skupiny v pomocné větvi vypnuty a zátěžový proud protéká komutačním spínačem, jenž je sériově připojen k ultrarychlému vypínači hlavní

větve. Pokud vznikne porucha, IGBT tranzistory komutačního spínače LCS dostávají vypínací povel a poté nastává okamžik zapnutí tyristorových skupin první zpožd'ovací větve.

Krok 2: V tomto kroku poruchový proud komutuje do první zpožd'ovací větve a kondenzátor se začíná pomalu nabíjet, jak je znázorněno na obrázku 4.3b. Po vypnutí komutačního spínače LCS se také mechanický spínač UFD začíná s určitým zpožděním otevírat. Ultra rychlý vypínač bude rozepnut v okamžiku, kdy zpožd'ovacími větvemi nepoteče žádný proud.

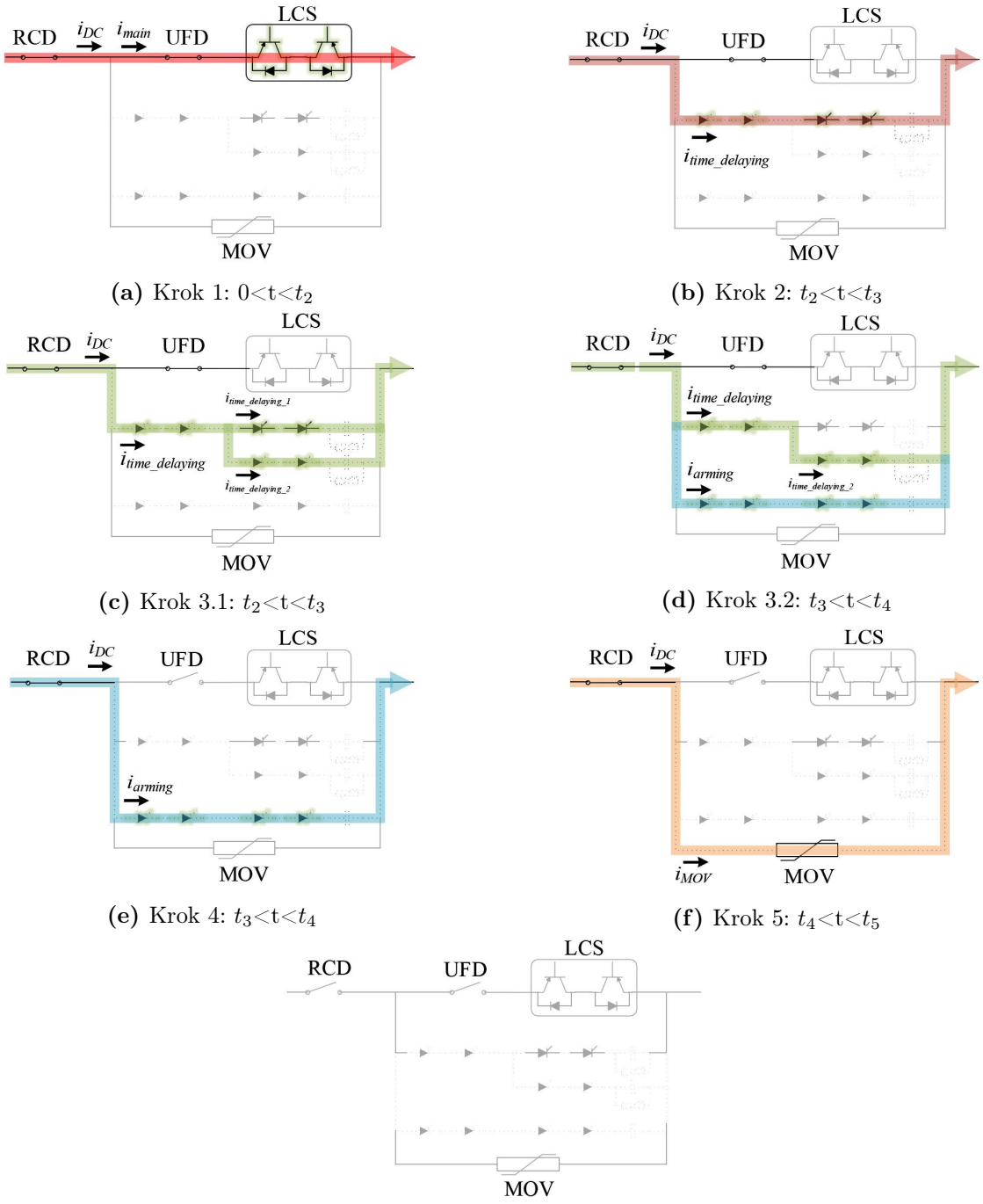
Krok 3: Tento krok zahrnuje dvě oblasti:

Krok 3.1: Kontakty ultra rychlého vypínače UFD se od sebe s určitým zpožděním "pomalu"oddalují, ale je nutno upřesnit, že mechanický vypínač ještě není zcela otevřen, v tomto okamžiku jsou otevřeny tyristorové skupiny v druhé zpožd'ovací větvi. Poruchový proud poté komutuje z první zpožd'ovací větve do druhé.

Krok 3.2: Po úplném nabití kondenzátoru první zpožd'ovací větve nastává doba, kdy dochází k postupnému vybití kondenzátoru do paralelního svodiče přepětí této větve. To znamená, že napětí na kondenzátoru se ustálí a poruchový proud se v této oblasti sníží na nulu. Tyristory první zpožd'ovací větve se vypnou dle příslušných charakteristik. Z tohoto důvodu je poruchový proud kompletně převeden do druhé zpožd'ovací větve. Po dosažení úplného vypnutí UFD prochází proud i_{arming}, což představuje obrázek 4.3e.

Krok 4: U kondenzátoru druhé zpožd'ovací větve probíhá podobný proces jako u kondenzátoru první větve. To vede k okamžitému vypnutí tyristorů ve všech zpožd'ovacích větvích a začíná procházet poruchový proud i_{arming}.

Krok 5: Aktivační větev "arming"operuje s úkolem převést poruchový proud do nelineárního odporu svodiče přepětí, touto aktivační větví prochází největší hodnota poruchového proudu. Nakonec je poruchový proud přerušen pomocí svodičů přepětí a k zajištění spolehlivého vypínacího procesu dochází po rozepnutí reziduálního odporu RCD, jenž je umístěn v hybridním vypínači před všemi větvemi. V bezporuchovém stavu přes tento reziduální odpor trvale prochází proud.



(a) Krok 1: 0<t<t_2

(b) Krok 2: t_2<t<t_3

(c) Krok 3.1: t_2<t<t_3

(d) Krok 3.2: t_3<t<t_4

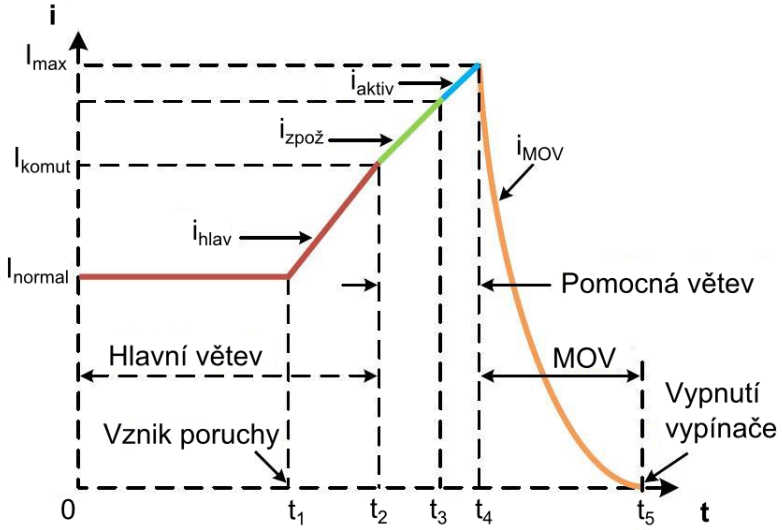
(e) Krok 4: t_3<t<t_4

(f) Krok 5: t_4<t<t_5

(g) Vypínací proces ukončen

Obrázek 4.3: Postup vypínání poruchového proudu hybridním Alstom vypínačem [5]

Vypínací proces hybridního vypínače Alstom představuje pět časových intervalů znázorněných na obrázku 4.4.



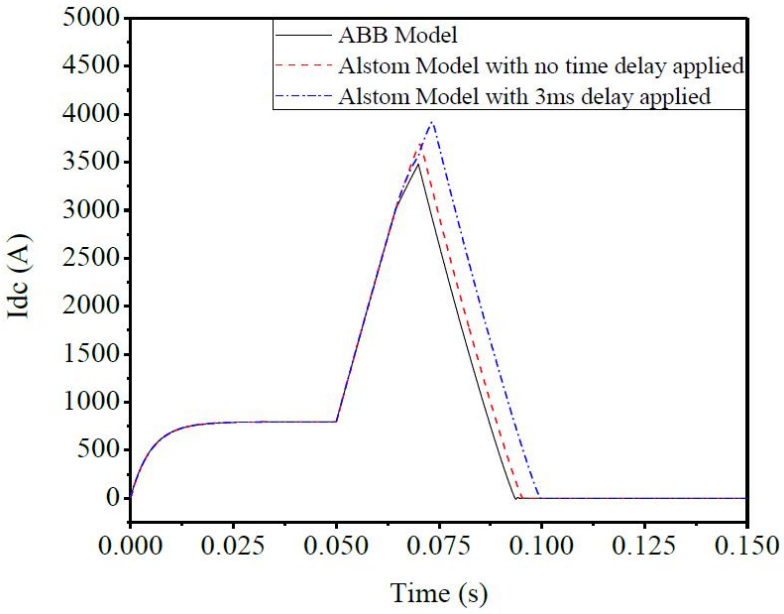
Obrázek 4.4: Časový průběh vypínacího procesu HVDC vypínače Alstom [5]

4.3 Porovnání HDCCB ABB a ALSTOM

Pro konkrétní představu jsou na obrázku 4.5 představeny vypínací oblasti vypínačů společnosti ABB a Alstom, srovnání vypínačů je pozorováno po dobu 0,15 s s poruchou vyskytující se 0,05 s. Pro přesné porovnání obou vypínačů je nutné zajistit stejné parametry jednotlivých součástek v hlavní větvi, rozdíly ve vypínacím procesu nastanou až v pomocných větvích. Z důvodu jednoduššího testování zahrnuje vypínač ABB v pomocné větvi pouze jednu IGBT buňku s dvěma anti-sériovými tranzistory. V reálné aplikaci je nutné zajistit minimálně dvě IGBT buňky. Modely Alstom jsou složeny z jednotlivých tyristorů obsažených v každé pomocné větvi. Hybridní vypínač ABB v této simulaci představuje rychlejší způsob vypnutí poruchy, než hybridní vypínač Alstom. Celková doba vypnutí hybridního vypínače ABB nastává v čase 0,093 s, vypínač společnosti Alstom zajistí vypnutí v okamžiku 0,095 s. Delší vypínací dobu hybridního vypínače Alstom je možné zajistit mechanickým spínačem, jemuž nastavíme zpoždění 3ms, tuto situaci představuje modrá čerchovaná křivka zajišťující vypnutí v čase 0,1 s zobrazená na obrázku 4.5. S nastavením zpoždění mechanického spínače protéká pomocnými odbočkami vyšší poruchový proud blížící se hodnotě 4000 A. Pro IGBT buňky ve vypínači ABB může být vyšší hodnota poruchového proudu problémem. Tyristory používané ve vypínacím systému Alstom bezpečně odolávají vyšším hodnotám poruchových proudů požadovaných, pokud systém vyžaduje delší dobu přerušení. Mechanické spínače působí pomaleji v porovnání s IGBT tranzistory, jež mají vyšší spínací schopnosti, z tohoto důvodu jsou pro tyto aplikace více používány tyristory.

Hybridní vypínač ABB dokáže poruchový proud vypnout v kratším časovém intervalu, naopak vypínač společnosti Alstom bezpečněji snese vyšší hodnotu poruchového proudu. V praxi jsou kvůli své jednoduchosti a možnosti zapnutí a vypnutí více oblíbené IGBT tranzistory, ale jejich cena bývá v porovnání s tyristory vyšší. V topologii ABB je pro vyšší napětí vyžadováno větší množství zapojených IGBT buněk v sérii. Každý tyristor v aplikaci Alstom je sériově spojen s kondenzátorem, jehož cena se zvyšuje v závislosti na své velikosti a jmenovitém napětí. Další rozdíl mezi těmito topologiemi spočívá ve výkonových ztrátách v průběhu normálního provozu. Protože IGBT buňky pomocné větve hybridního ABB vypínače zůstávají v normálním provozu zapnuty, vzniká zde také malé množství ztrát z důvodu

menšího průchodu proudu. Ztráty vzniklé na hybridním vypínači ABB představují 0,01% celkového přenosového výkonu systému. Ztráty v aplikaci Alstom vypínačů nabývají nižších hodnot v porovnání s použitými IGBT buňkami v hybridních ABB vypínačích.



Obrázek 4.5: Časový průběh vypínacího procesu hybridních HVDC vypínačů [5]

Nicméně ztráty vzniklé v kondenzátorových skupinách Alstom vypínačů při použití vysokého napětí nabývají také vyšších hodnot. Napět'ové konvertory (VSC) aplikované v HVDC systémech používají polovodiče, které jsou schopny přenést proud v obou směrech s možností okamžitého zapnutí a vypnutí, jedná se o vypínače na bázi IGBT komponentů. Měniče typu LCC jsou složeny z polovodičů umožňující přenést napětí a lze je pouze sepnout, což představují zmíněné tyristory. IGBT tranzistory mají v porovnání s tyristory nižší přenosovou schopnost výkonu a menší možnost přetížení. V souladu s těmito vlastnostmi lze tyristory použít v měničích LCC HVDC umožňující vyšší přenosovou schopnost s možností většího přetížení, než je tomu u měničů VSC s instalovanými IGBT tranzistory. Z těchto důvodů by měly být více instalované hybridní vypínače ABB v systémech VSC-HVDC. V měnících soustavách LCC-HVDC je relativně vhodnější použít hybridní vypínače společnosti Alstom. Z ekonomického hlediska je pro úroveň vysokého stejnosměrného napětí (MVDC) vhodnější použít vypínače společnosti ABB, protože náklady na IGBT tranzistory nejsou tak vysoké v porovnání s kondenzátory. V systému HVDC naopak dochází k výraznému zvýšení cen IGBT tranzistorů. V tomto systému je cena IGBT tranzistorů vyšší v porovnání s kondenzátory použitými v hybridních Alstom vypínačích i přesto, že kondenzátory zvyšují svoji velikost a náklady s rostoucí hodnotou napětí. V HVDC systémech je preferován vypínač společnosti Alstom, jež vyžaduje delší dobu přerušení pro ochranu systému a dokáže vypnout vyšší hodnotu proudu. Hybridní vypínač ABB využívaný v MVDC a v HVDC systémech je vhodnější pro aplikace, ve kterých je nutná rychlejší doba přerušení proudu. [5]

4.4 Porovnání technologií vypínačů

V této kapitole budou detailně porovnány jednotlivé technologie vypínačů z hlediska vypínacího času, výkonových ztrát, proudové a napět'ové zatížitelnosti.

4.4.1 Vypínací čas

Mechanické vypínače dosahují vysokých vypínacích časů, v příslušné kapitole mechanického vypínače bylo uvedeno řádově 100ms, ve skutečnosti můžeme časovou odezvu na poruchu brát do 60 ms. Solid-state vypínače, nebo-li polovodičové vypínače jsou schopny zajistit dobu přerušení menší než je 1ms. Mezi tyto dvě topologie stejnosměrných vypínačů můžeme zařadit hybridní vypínač, jež je s dobou přerušení 2-30 ms velmi používaný ve vysoce výkonných systémech na hladinách velmi vysokého napětí.

4.4.2 Výkonové ztráty

Mechanické vypínače a hybridní vypínače bez polovodičových součástek v hlavní větvi mají nejnižší provozní ztráty ze všech typů konfigurací. Důvodem toho je velmi nízký úbytek napětí na kovových kontaktech hlavního vypínače. Ztráty těchto dvou zmíněných topologií činí méně než 0.001 % celkových ztrát VSC stanic. Hybridní vypínače s polovodičovými součástkami umístěnými v hlavní větvi představují také přijatelné provozní výkonové ztráty. V případě použití hybridních vypínačů nejsou výkonové ztráty vyšší než 0,1 % celkových energetických ztrát VSC systému. Třetí možností vypínání stejnosměrného proudu je použití solid-state vypínače, který má ale v porovnání s předchozími typy nejvyšší výkonové ztráty. V tomto typu vypínače se nachází mnoho IGBT tranzistorů nebo jiných polovodičových zařízení(GTO), jež jsou zapojeny v hlavní proudové větvi a způsobují relativně vysoký úbytek napětí. Energetické ztráty pro tuto technologii můžou ve srovnání s VSC stanicí dosáhnout 30 %.

4.4.3 Napěťová a proudová zatížitelnost

V dnešní době jsou používány mechanické HVDC vypínače se jmenovitým napětím až do 500-550 kV. Hybridní vypínače byly ověřeny experimentálními zkouškami až do jmenovitých hodnot 120 kV a očekává se dosažení úrovně 320 kV a vyšších. Polovodičové vypínače (Solid-state) nejsou užívány ve velmi vysokém napětí, ale jejich parametry byly navrženy a provedeny pro aplikace vysokého napětí. S ohledem na vývoj polovodičových zařízení se předpokládá dosažení jmenovitého napětí vyššího než je 800 kV. Mechanické HVDC vypínače jsou schopny přerušit proudy do 4 kA s pasivním rezonančním systémem, s aktivním rezonančním obvodem jsou schopné vypínat až 8 kA. U hybridních vypínačů je současná proudová úroveň přerušení 9 kA, přičemž byla experimentálně ověřena proudová hladina až do hodnoty 16 kA. V případě polovodičových vypínačů dosahuje vypínací proud 5 kA, v praxi činí nejvyšší hodnota 2 kA. [27]

5 Závěr

Bakalářská práce byla autorem pojata jako komplexní pohled na problematiku HVDC systémů a informacemi s nimi spojenými. Díky této práci je možno prohlásit, že přenos elektrické energie pomocí stejnosměrného přenosu je vhodný pro aplikace na delší vzdálenosti s minimálními přenosovými ztrátami. Tyto stejnosměrné systémy jsou vhodné pro spojení elektráren vyrábějící velké množství elektrické energie do vzdálených zátěžových center velkých měst. Instalované vzdálenosti stejnosměrného přenosu nabývají i více než 1500 km s přenosem energie větším než je 8000 MW, což lze přirovnat ke čtyřem instalovaným jaderným elektrárnám Temelín či Dukovanům. Energie vedená za pomoci stejnosměrného proudu z vodních či větrných elektráren na dlouhé vzdálenosti také umožňuje ušetřit mnoho miliónů oxidu uhličitého. Velkou pozitivní informaci lze nalézt i v řešení přenosu pomocí jednoho vodiče v případě poruchy bipolárního systému, čímž přecházíme do monopolárního systému, který využívá pouze jeden vodič k přenosu elektrické energie. Je nutné v závěru této práce uvést i důležité informace spojené s typy měničů, které umožňují tok elektrické energie oběma směry díky použití polovodičových součástek. VSC měniče jsou vhodné pro instalace na moře, čímž lze elektrickou energii přenášet z větrných elektráren vzdálených daleko od pevniny s možností black startu v případě výpadku elektrické sítě. Autor se v této práci zaměřil především na typy vypínačů umožňující bezpečné odpojení od sítě v případě poruchy. Vypínací časy všech typů vypínačů dosahují vysokých vypínacích hodnot, nejrychlejší vypínač je polovodičový, dalším v pořadí je hybridní vypínač a nejpomalejší vypnutí nastává v případě použití mechanického vypínače. Nejnižší provozní ztráty mají mechanické vypínače, poté následují hybridní vypínače a nejvyšší provozní ztráty mají polovodičové vypínače. Ve čtvrté kapitole této práce jsou porovnány hybridní vypínače společnosti ABB a Alstom. Hybridní vypínače ABB umožňují vypnutí v kratším časovém intervalu, ale neumožňují vypnutí tak vysokých poruchových proudů jako hybridní vypínače francouzské společnosti Alstom, též nazývanou jako Alstom Grid. Detailnější údaje všech těchto zmíněných informací jsou detailně popsány v příslušných kapitolách.

Z osobního pohledu autora není v budoucnu stejnosměrný přenos pro ČR vhodným řešením z důvodu malé vzdálenosti jednotlivých měst. Je možné, že stejnosměrný proud v budoucích letech přes ČR půjde, avšak pouze jako transport ze dvou různých zemí pro zásobování velkých měst umístěných v západní a východní části Evropy. V Evropě, zejména ve státech s velkým územním rozsahem, bude stejnosměrný proud stále více instalován. Německo a Francie bude podle domněnky autora více využívat stejnosměrný přenos z vodních a větrných parků vedených do velkých měst na území těchto zemí. Stejnosměrný přenos a problémy spojené s ním se v ČR v takové velké míře neřeší, proto je vhodné v těchto oblastech jednotlivé informace prohlubovat a věnovat se jim z důvodu rychlých pokroků v stejnosměrném přenosu.

Zadání následující práce může být v oblasti hybridních vypínačů spojených s časovým intervalem vypnutí, nebo v detailním porovnání ztrát stejnosměrného a střídavého vedení, či sestavení přenosového vedení HVDC systému. Diplomová práce týkající se hybridních vypínačů či speciálních vypínačů na stejnosměrný proud může být bezpochyby velmi zajímavá, ale jelikož se v této bakalářské práci autor zaobíral stejnosměrnými vypínači, bylo by vhodné zvolit jiné téma diplomové práce. Autor shledává návaznost diplomové práce v tématu spojené s celkovým návrhem HVDC sítě. V HVDC systému by byly umístěny všechny důležité prvky zajišťující správný chod systému. V tomto projektu by HVDC systém přenášel určitou hodnotu výkonu s možností jeho řízení, či vypínání při určité poruše. Další

zajímavá možnost navazující práce je ukryta v porovnání ztrát stejnosměrného a střídavého vedení. V první kapitole této práce byly autorem odvozeny vztahy pro jednotlivá porovnání ztrát, jež by v navazující práci mohly být aplikovány v praxi. Ve střídavém vedení by byl umístěn generátor vyrábějící vhodnou hodnotu výkonu přenášenou po tomto vedení, blokový transformátor, přenosové vedení určité vzdálenosti a distribuční transformátor jako finální prvek zajišt'ující napájení určité zátěže. Ve stejnosměrném přenosu budou zahrnuty stejné prvky jako ve střídavém, ale je nutné obohatit tento přenos i o konvertorové stanice umožňující přenést stejnou hodnotou přenášeného výkonu pro správné porovnání. Přenosový výkon by čítal stejnou hodnotu pro obě vedení s porovnáním ztrát na různé vzdálenosti. Tento projekt by odkryl i hodnoty ztrát jednotlivých komponentů obsažených ve stejnosměrném či střídavém vedení. Možnosti navazující práce mohou být ve všech těchto zmíněných návrzích velmi zajímavé. V této bakalářské práci čtenář shledá všechny podstatné informace o HVDC přenosu, která by ještě mohla v navazující diplomové práci být detailněji probrána pro úplné pochopení této problematiky. O HVDC systému toho není v českém jazyce mnoho sepsáno, z tohoto důvodu autor přemýšlí o návaznosti budoucí práce právě v této oblasti, která by se mohla v budoucnosti stát větším aktem diskuze. Ve světě jsou pro přenos elektrické energie využívány dva typy proudů, a to stejnosměrný a střídavý, a kdy jindy tento vysokonapět'ový stejnosměrný proud prozkoumat, než v době jeho největšího rozmachu.

6 Literatura

[1] MAJLING, Eduard. *HVDC – stejnosměrný přenos elektrické energie* [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/.

[2] VIJAY K. SOOD. *HVDC and FACTS controllers applications of static converters in power systems*. Boston: Kluwer Academic, 2004. ISBN 14-020-7891-9. Dostupné také z: https://archive.org/details/springer_10.1007-b117759

[3] *HVDC Transmission* [online]. [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: https://seminarlinks.blogspot.cz/2014/04/hvdc-high-voltage-direct-current-ppt.html

[4] JIMÉNEZ, PATRICIA SERRANO. Design and analysis of HVDC switch gear station for meshed HVDC grid. Göteborg Sweden, 2013, 65 s. Dostupné také z: https://core.ac.uk/download/pdf/29405012.pdf

[5] NGUYEN, Anh-Duc, Thai-Thanh NGUYEN a Hak-Man KIM. *Comparison of Different Hybrid Direct Current Circuit Breakers for Application in HVDC system*. Incheon National University, 2016. Dostupné také z: http://www.sersc.org/journals/IJCA/vol9_no4/37.pdf

[6] KOSTOULAS, Nikolaos, Vasileios SITOKONSTANTINOU, Mohammad IDRIS, Patrick STERLING, Saadman SAYED a Petros KARAISKOS. *DC circuit breakers and their use in HVDC grids*. Dostupné také z: http://www2.ee.ic.ac.uk/nikolaos.kostoulas10/yr2proj/HVDC%20Circuit%20Breakers%20Report.pdf

[7] IGBT a IGCT– nové spínací prvky [online]. 2003 [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FcFXaeCjKeIJ:elektro.tzb-info.cz/download.py%3Ffile%3Ddocu/texty/0001/000102_igbt_a_igct.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz

[8] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.

[9] HELŠTÝN, David, Petr KAČOR a Zdeněk HYTKA. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jistící: průvodce studiem*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Regionální centrum celoživotního vzdělávání, 2003. ISBN 80-248-0315-1. Dostupné také z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ep/ep_II/Elektricke%20%20pristroje%20spinac%ED%20ochranne%20a%20jistici.pdf

[10] BUL, B.K. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977.

[11] *High Voltage Direct Current Transmission: Proven Technology for Power Exchange* [online]. [cit. 2016-08-20]. Dostupné z: http://www.siemens.com/about/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc_proven_technology.pdf

[12] Ardelean, M., Minnebo, P.; 2015; HVDC Submarine Power Cables in the World; EUR 27527 EN; doi: 10.2790/95735. Dostupné také z: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97720/ld-na-27527-en-n.pdf

[13] KJØRHOLT, Åsa M Halvorsdatter. *HVDC Transmission Using a Bipolar Configuration Composed of an LCC and MMC* [online]. Norwegian University of Science and Technology, 2014, 139 s. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z:https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/258108/769312_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[14] RETZMANN, Dietmar. *HVDC Station Layout, Equipment LCC & VSC and Integration of Renewables using HVDC* [online]. 2011 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z:https://www.scribd.com/document/315038940/Cigre-AUS-2011-HVDC-GridAccess-tutorial-Re-pdf

[15] *Rio Madeira: The longest transmission link in the world - 2,375 kilometers.* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: http://new.abb.com/systems/hvdc/references/rio-madeira

[16] GUPTA, Sameer. *Introduction to HVDC and HVAC* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/SameerGupta8/hvdc-vs-hvac

[17] *Murraylink: The world's longest underground power transmission system.* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://new.abb.com/systems/hvdc/references/murraylink

[18] *Boosting Sweden's transmission capacity and grid system reliability: South-West HVDC Link, Sweden* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/be2633adacde87ab48257a39003c9f88/1207_reference%20case_Southwestlink_2GM5078%20gb%20HR.pdf

[19] MÜLLER, Bernd. *Siemens Ultra HVDC Transmission System in China* [online]. [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:N52THfZb1WsJ:www.solarplan.org/research/hvdc_sie%20mens%2520800%2520kv%2520china%2520transmission%2520system_2010.docx+&cd=7&hl=cs&ct=clnk&gl=cz

[20] *Xiangjiaba - Shanghai: The World's most powerful and longest Ultra high Voltage Direct Current project to go into commercial operation, in July 2010* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: http://new.abb.com/systems/hvdc/references/xiangjiaba---shanghai

[21] *The Baltic Cable HVDC Connection Sweden / Germany.* . [online]. [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/a74338323cd88e19c1256e36003ffd7a/Project%20Baltic%20Cable%20450%20kV%20MIND%20subm-.pdf

[22] HVDC – High Voltage Direct Current Transmission Unrivaled practical experience. . [online]. [2012] [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC-Classic/HVDC-Classic_Transmission_References_en.pdf

[23] *ABB review: Special Report 60 years of HVDC* [online]. Switzerland: ABB Group R&D and Technology, 2014 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z:https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC_72dpi.pdf

[24] *Mass-impregnated submarine cables for up to 550 kV DC: Very long submarine cables for extra-high voltage and power* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: http://www.abb.com/productguide/product.aspx?&c=c12573e7003302adc125702e0055084a&db=db0003db002618

[25] *The Classic HVDC Transmission.*[online]. [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: http://www.abb.com/industries/cz/9AAC30300393.aspx?country=CZ

[26] *Ultrahigh-voltage direct current transmission equipment reaches new heights* [online]. ABB Communications, 2012 [cit. 2016-09-16]. Dostupné z: http://www.abb.com/cawp/seitp202/951f0e814451ae71c1257aee004e5f79.aspx

[27] MOKHBERDORAN, A., H. LEITE, A. CARVALHO a N. SILVA. A Review on HVDC Circuit Breakers. *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2014, , 5.1.2-5.1.2 [cit. 2016-10-22]. DOI: 10.1049/cp.2014.0859. ISBN 978-1-84919-917-9. Dostupné z: http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2014.0859

[28] *Fact Sheet: High-voltage direct current transmission (HVDC)* [online]. 2014 [cit. 2016-09-03]. Dostupné z: http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/energy/2013-08-x-win/factsheet-hvdc-e.pdf

[29] *HVDC for beginners and beyond* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b4_rus/library/ALSTOM_HVDC_for_Beginners_and_Beyond.pdf

[30] MUKHEDKAR, Radnya. *Introduction to HVDC: LCC & VSC - Comparison* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: http://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/LCC_vs_VSC_ALSTOM.pdf

[31] LI, Zhan-ying, Zhen REN a Yong-jin CHEN. *Loss study of HVDC system* [online]. Electric Power Automation Equipment, 2007 [cit. 2016-09-02]. Dostupné z: http://www.epae.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20070104&flag=&journal_id=dlzdhsb&year_id=2007

[32] International Electrotechnical Commmission. IEC Standard 61803 Determination of power losses in high-voltage direct current(HVDC) converter stations [S]. Switzland ; [s.n.],1999

[33] *General Overview of HVDC Transmission System.*[online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: http://www.casa-1000.org/Docs/GeneralOverviewOfHVDCTransmissionSystem.pdf

[34] NOVOTNÝ, Vladimír. *Elektrické přístroje.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2306-0.