



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC

Autor práce:

Bc. Josef MUSIL

Vedoucí práce:

prof. Ing. Zdeněk VOŠTRÁČKÝ DrSc. Dr.h.c.

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef MUSIL**
Osobní číslo: **E17N0085P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC

1. Zpracujte přehled konvenčních a moderních vypínačů pro sítě HVDC.
2. Popište současný stav v návrhu, konstrukci a provozu HVDC sítí s důrazem na technicko-ekonomické limity, možnosti řízení a na problematiku vypínání jmenovitých a zkratových proudů.
3. Zpracujte obvodové modely a simulujte funkčnost vybraných typů vypínačů pro sítě HVDC s respektováním provozních vlastností sítí HVDC.
4. Posuďte provedené simulace a stanovte možnosti navazující práce v souvislosti s funkčností a topologií moderních vypínačů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

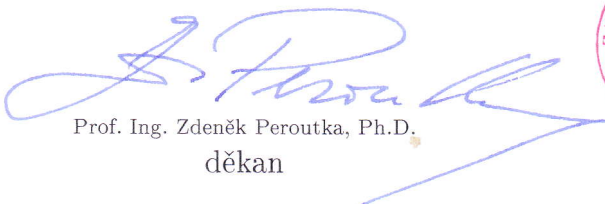
Seznam odborné literatury:

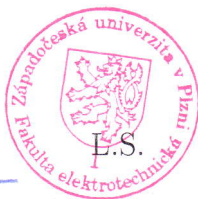
1. K. Bárta, Z. Vostracký: Spínací přístroje velmi vysokého napětí.
2. P. S. Jimenéz: Design and analysis of HVDC switchgear station for meshed HVDC grid. Publikace z databáze IEEE Xplore Digital Library.
3. Podpůrné materiály výrobců (ABB, Siemens, Alstom, General Electric, atd.).


Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Musil, Josef . *Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC* [*Modern technology in switching equipment HVDC*]. Plzeň, 2019. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc. Dr.h.c.

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC. Čtenář zde bude obeznámen s mnoha současnými typy stejnosměrných vypínačů. Součástí této práce jsou veškeré detailní informace týkající se principu a přehledného uspořádání jednotlivých větví každého stejnosměrného vypínače. V této diplomové práci se nachází informace o systému řízení sítí HVDC, porovnání finančních nákladů na sítě HVDC a HVAC, zajímavé sdělení o projektu Suedlink, či o prvním stejnosměrném přenosu na světě o napětí 1100 kV. Autor se zaměřil i na detailní podrobnosti o hybridních vypínačích společností ABB a Alstom. Cílem této práce bylo sestavit funkční obvodové modely hybridních vypínačů v MATLABu Simulink, které se svými nastavenými parametry a vypínacími časy budou co nejreálněji přibližovat skutečným vypínačům. V této práci byl kladen důraz na zpracování důležitých informací ve spínací oblasti HVDC, které budou rozšiřovat problematiku tohoto systému, jež navazuje na předchozí sepsanou bakalářskou práci nesoucí název *Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání*.

Klíčová slova

HVDC, hybridní vypínač, komutační spínač, ultra rychlý spínač, simulace, Matlab Simulink, technicko-ekonomické limity

Abstract

Musil, Josef . *Modern technology in switching equipment HVDC* [*Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC*]. Pilsen, 2019. Diploma thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electrical Power Engineering and Environmental Engineering. Supervisor: prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc. Dr.h.c.

The diploma thesis is focused on the modern technology in switching equipment HVDC. The reader will be familiar with many of the current types of DC switches. Part of this work details information about the principle and clear arrangement of individual branch of each DC circuit breakers. In this paper there are located information about HVDC's network control system, economic comparison of HVAC and HVDC, an interesting information about project Suedlink, or the world's first direct-current voltage of 1100 kV. The author of this work also focused on detailed description of ABB and Alstom hybrid circuit breakers. The aim of this work was to build functional circuit models of hybrid circuit breakers in MATLAB Simulink, which with their set parameters and tripping times will be the same as the real circuit breakers. This diploma thesis is a part of greater topic focused on extension of a bachelor thesis called *Operation of HVDC grids with emphasis on the switching phenomena*.

Keywords

HVDC, hybrid circuit breaker, load commutation switch, ultra fast disconnecter, simulation, MATLAB Simulink, technical-economic limits

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 21. května 2019

Bc. Josef Musil

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc. Dr.h.c., konzultantovi Ing. Vladimíru Vajnarovi a Ing. Janu Velebovi Ph.D. za poskytnuté informace a za jejich přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této diplomové práce.

Obsah

| | |
|--|------------|
| Seznam použitých symbolů a zkratk | vii |
| Seznam obrázků | x |
| Seznam tabulek | xii |
| Úvod | 1 |
| 1 Přehled topologií vypínačů HVDC systému | 2 |
| 1.1 Elektromechanický vypínač | 3 |
| 1.1.1 Elektromechanický vypínač s pasivní rezonancí | 3 |
| 1.1.2 Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí | 3 |
| 1.1.3 Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí s použitím dvou vypínačů | 5 |
| 1.2 Wang-Marquardtův vypínač | 6 |
| 1.3 Polovodičový vypínač | 7 |
| 1.3.1 Polovodičový vypínač s paralelním svodičem přepětí | 7 |
| 1.3.2 Polovodičový vypínač se zpětnou diodou | 8 |
| 1.4 Hybridní vypínače | 9 |
| 1.4.1 Hybridní vypínač ABB | 11 |
| 1.4.2 Hybridní vypínač Alstom | 11 |
| 1.4.3 Hybridní vypínač SGCC | 13 |
| 1.4.4 Shrnutí stejnosměrných vypínačů z hlediska zkratových proudů | 13 |
| 2 Konstrukce a provoz HVDC sítí | 14 |
| 2.1 Projekty HVDC sítí | 14 |
| 2.1.1 Projekt Suedlink | 14 |
| 2.1.2 UHVDC 1100 kV - Changji-Guquan | 18 |
| 2.2 Technicko-ekonomické limity systému HVDC | 19 |
| 2.2.1 Technické výhody | 19 |
| 2.3 Řízení HVDC sítí | 25 |
| 2.3.1 Řídící a ochranný systém MACH | 29 |
| 2.4 Hybridní HVDC vypínač ABB | 31 |
| 2.4.1 Konstrukce vypínače s detailním popisem vypínacího procesu | 32 |
| 2.4.2 Komutační spínač LCS | 36 |
| 2.4.3 Ultra-rychlý vypínač UFD | 37 |
| 2.4.4 Hlavní vypínač v pomocné větvi | 38 |
| 2.5 Hybridní vypínač Alstom | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.1 | Prototyp ultra-rychlého 120 kV hybridního vypínače Alstom | 43 |
| 3 | Simulace obvodových modelů hybridních DC vypínačů v MATLABu Simulink | 44 |
| 3.1 | Hybridní DC vypínač s nuceným komutačním obvodem | 44 |
| 3.1.1 | Obvodový model | 45 |
| 3.1.2 | Průběh vypínání zkratových proudů | 46 |
| 3.2 | Hybridní vypínač ABB | 51 |
| 3.2.1 | Obvodový model | 51 |
| 3.2.2 | Průběh vypínání zkratových proudů | 54 |
| 3.3 | Hybridní vypínač Alstom | 58 |
| 3.3.1 | Obvodový model | 58 |
| 3.3.2 | Průběh vypínání zkratových proudů | 60 |
| 4 | Závěr | 65 |
| 5 | Literatura | 67 |

Seznam použitých symbolů a zkratek

| | |
|--------|--|
| HVDC | High Voltage Direct Current. Vysokonapěťový stejnosměrný proud. |
| MVDC | Medium Voltage Direct Current. Stejnosměrný proud vysokého napětí. |
| DC | Direct Current, Stejnosměrný proud. |
| AC | Alternating Current. Střídavý proud. |
| HVAC | High Voltage Alternating Current. Vysokonapěťový střídavý proud. |
| Q | Jalový výkon ($kVAr$). |
| P | Činný výkon (MW). |
| UHVDC | Ultra High Voltage Direct Current. Ultra vysokonapěťový stejnosměrný proud. |
| SGCC | State Grid Corporation of China. Čínská společnost zabývající se energetikou. |
| LCC | Line Commutate Converter. Zdroj proudu. |
| VSC | Voltage Source Converter. Napěťový zdroj. |
| CSC | Current Source Converter. Zdroj proudu. |
| MW | Jednotka činného výkonu. |
| MVA | Jednotka zdánlivého výkonu. |
| kV | Jednotka elektrického napětí. |
| kA | Jednotka elektrického proudu. |
| ms | Jednotka času. |
| km | Jednotka vzdálenosti. |
| NEP | Netzentwicklungsplan. Rozvojový plán sítí v Německu. |
| EnWG | Energiewirtschaftsgesetz. Energetický zákon v Německu. |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz. Zákon o obnovitelných zdrojích energie v Německu. |
| EnLAG | Energieleitungsausbaugesetz. Zákon o výstavbě přenosové soustavy v Německu. |
| NABEG | Zákon o zrychlení výstavby elektrické sítě v Německu. |
| BNetzA | Bundesnetzagentur für Elektrizität..., Celoněmecká síťová agentura. |
| PST | Phase Shifting Transformers. Transformátory s regulací fáze. |
| IGCT | Insulated Gate Commutated Thyristor. Tyristor řízený 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. |
| CB | Hlavní vypínač stejnosměrných vypínačů. |
| LCS | Load Commutation Switch. Komutační spínač. |
| RCD | Residual DC Current Breaker. Reziduální stejnosměrný vypínač. |
| R_c | Komutační odpor (Ω). |
| L_c | Komutační indukčnost (H). |
| C_c | Komutační kondenzátor (F). |

| | |
|---------------------|---|
| U_{pnc} | Napětí na kondenzátoru v počátečním stavu (V). |
| I_s | Proud vypínače procházející hlavní větví obvodu (A). |
| I_o | Celkový proud mechanického vypínače (A). |
| S_x | Jednotlivé vypínače. |
| T | Polovodičový spínač. |
| R_v | Svodič přepětí. |
| i_L | Proud procházející polovodičovým spínačem (A). |
| L_{dc} | Indukčnost stejnosměrné sítě (H). |
| W_r | Energie absorbovaná ve svodiči přepětí (J). |
| I_o | Amplituda poruchového proudu v čase $t=0$ (A). |
| T_{open} | Doba vypnutí poruchového proudu (s). |
| U_{dc} | Stejnoseměrný zdroj (V). |
| U_v | Napětí na svodiči přepětí (V). |
| i_{dc} | Proud procházející vypínačem ABB (A). |
| HVDC Light | Technologie HVDC přenosu. |
| IC | Investment Cost. Investiční náklady. |
| DCF | Discounted Cash Flow. Diskontovaný peněžní tok. |
| AC | Annual Costs. Roční náklady. |
| IA | Initial Amount. Počáteční částka. |
| NPV | Net Present Value. Čistá současná hodnota. |
| U_{2i} | Fázové napětí měniče (V). |
| U_{1i} | Napětí na sběrnici AC filtru (V). |
| ΔU | Úbytek napětí na vedení (V). |
| X_v | Reaktance vedení (Ω). |
| M | Modulační index. |
| ω | Základní frekvence 50 Hz. |
| φ | Fázový posun výstupního napětí ($^\circ$). |
| $\cos\varphi$ | Účinnost sítě. |
| M\$ | Milion dolarů. |
| € | Měna Evropské měnové unie. |
| PWM | Pulse Width Modulation. Pulzní šířková modulace. |
| FACTS | Flexible Alternating Current Transmission System. |
| IEC | International Electrotechnical Commission. Mezinárodní elektrotechnická komise. |
| PCT | Phase Control Thyristor. Fázově řízené tyristory. |
| ENTSO-E .. | Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav. |
| PSS/E | Power System Simulator for Engineering. Program pro energetické inženýry. |
| PSCAD | Power Systems Computer Aided Design. |
| STATCOM . | Static Synchronous Compensator. Statický synchronní kompenzátor. |

| | |
|--------|--|
| CPEC | China-Pakistan Economic Corridor. |
| SF6 .. | Sulfur hexafluoride. Fluorid sírový. |
| BIGT | Bi-mode Insulated Gate Transistor. |
| BIL .. | Basic Insulation Level. Základní izolační napěťová úroveň. |
| RTE . | Réseau de Transport d'Électricité. Provozovatel přenosové soustavy ve Francii. |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Obecné schéma HVDC vypínače [1] | 2 |
| 1.2 | Elektromechanický vypínač s pasivní rezonancí [2] | 3 |
| 1.3 | Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí [2] | 4 |
| 1.4 | Druhá varianta elektromechanického vypínače s aktivní rezonancí [2] | 5 |
| 1.5 | Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí s použitím dvou vypínačů [1] | 5 |
| 1.6 | Wang-Marquardtův DC vypínač [1] | 6 |
| 1.7 | Polovodičový vypínač s paralelním svodičem přepětí [2] | 7 |
| 1.8 | Polovodičový vypínač se zpětnou diodou [2] | 9 |
| 1.9 | Obecné schéma zapojení hybridního DC vypínače [2] | 9 |
| 1.10 | Druhá varianta hybridního HVDC vypínače [2] | 10 |
| 1.11 | Hybridní HVDC vypínač společnosti ABB [1] | 11 |
| 1.12 | Hybridní HVDC vypínač společnosti Alstom [1] | 12 |
| 1.13 | Hybridní vypínač HVDC SGCC [1] | 13 |
| 2.1 | Možné směry toků elektrické energie v závislosti na počasí [6] | 15 |
| 2.2 | Uložení kabelů v projektu Suedlink [7] | 17 |
| 2.3 | Prostorové uspořádání rozvodny [8] | 18 |
| 2.4 | Nejvýkonnější transformátor na světě s napětím 1100 kV UHVDC [17] | 18 |
| 2.5 | Topologie spojení VSC-HVDC [15] | 25 |
| 2.6 | Fázorový diagram napětí a proudu [15] | 26 |
| 2.7 | Fázorový diagram reprezentující provozní stavy konvertoru [15] | 27 |
| 2.8 | P-Q diagram VSC-HVDC systému [15] | 28 |
| 2.9 | Celková struktura řízení VSC-HVDC [15] | 29 |
| 2.10 | Hybridní HVDC vypínač ABB [20] | 31 |
| 2.11 | Schéma zapojení hybridního HVDC vypínače společnosti ABB [18] | 32 |
| 2.12 | Řídící proces vypínání hybridního vypínače ABB [18] | 34 |
| 2.13 | Vypínací proces hybridního vypínače ABB [18] | 35 |
| 2.14 | Ověření modulárního IGBT vypínače [18] | 36 |
| 2.15 | Komutační spínač LCS s termosyfonovým chladicím systémem, viz 2.11c [19] | 37 |
| 2.16 | Průřezový pohled na kontaktní systém UFD, (vlevo-sepnut, vpravo-otevřen), viz 2.11b [19] | 38 |
| 2.17 | Design hlavního vypínače pomocné větve, viz 2.11e [19] | 39 |
| 2.18 | Design 80 kV IGBT vypínače umístěného v pomocné větvi, viz 2.11e [18] | 39 |
| 2.19 | Hybridní vypínač Alstom [22] | 40 |
| 2.20 | Vypínací proces hybridního vypínače Alstom [22] | 42 |
| 2.21 | Vypínací proces hybridního 120 kV vypínače Alstom [23] | 43 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Hybridní vypínač s nuceným komutačním obvodem vytvořený v MATLABu Simulink | 45 |
| 3.2 | Vypínání zkratového proudu hybridního DC vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope | 47 |
| 3.3 | Vypínání zkratového proudu hybridního DC vypínače - Scope1 | 48 |
| 3.4 | Procházející proudy hybridním DC vypínačem během komutačního procesu - Scope2 | 49 |
| 3.5 | Hybridní vypínač ABB vytvořený v MATLABu Simulink | 51 |
| 3.6 | Obvodový model řídicího systému LCS a) s grafickým znázorněním vypínacího procesu b) | 53 |
| 3.7 | Vypínání zkratového proudu hybridního ABB vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope | 54 |
| 3.8 | Vypínání zkratového proudu hybridního ABB vypínače - Scope1 | 55 |
| 3.9 | Průběh procházejícího proudu a napětí na vypínači ABB - Scope2 | 56 |
| 3.10 | Hybridní vypínač Alstom vytvořený v MATLABu Simulink | 58 |
| 3.11 | Vypínání zkratového proudu hybridního Alstom vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope | 61 |
| 3.12 | Vypínání zkratového proudu hybridního Alstom vypínače - Scope1 | 62 |
| 3.13 | Průběh procházejícího proudu a napětí na vypínači Alstom - Scope2 | 63 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Porovnání investičních nákladů HVAC a VSC-HVDC systémů [13] | 24 |
| 2.2 | Porovnání celkových nákladů systému HVAC a VSC-HVDC [13] | 24 |
| 2.3 | Typy konstrukčního provedení komutačního spínače LCS (výkonové ztráty jsou spočteny na jednu součástku) [19] | 37 |
| 3.1 | Nastavené hodnoty svodičů přepětí, kondenzátorů a rezistorů v příslušných větvích hybridního vypínače Alstom [26] | 60 |

Úvod

Tato práce bezprostředně navazuje na mou již sepsanou bakalářskou práci nesoucí název *Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání*. Předchozí práce zahrnuje detailní popis mnoha stejnosměrných vypínačů používaných i mimo oblast HVDC, byly v ní sepsány informace o elektromechanickém vypínači, polovodičovém vypínači a v neposlední řadě i o dvou hybridních vypínačích, jež kombinují vlastnosti předchozích dvou zmíněných. Diplomová práce bude ještě rozšiřovat portfolio výše zmíněných vypínačů. Třetí kapitola bude celá věnována obvodovým modelům hybridních vypínačů vytvořených v programu Matlab Simulink s příslušnými průběhy procházejících proudů. Každý simulovaný hybridní vypínač je specifický použitými součástkami, při čemž vypínač společnosti ABB používá pro vypnutí zkratového proudu IGBT tranzistory a hybridní vypínač s nucenou komutací a hybridní vypínač Alstom zajišťuje vypínání zkratových proudů díky speciálním fázově řízeným tyristorům PCT, či GTO tyristorům a určitý rozdíl mezi jednotlivými vypínači je v topologii rozmístění konkrétních součástí. Psaní diplomové práce právě na toto téma vychází z atraktivity problematiky stejnosměrných vysokonapěťových sítí, jež jsou využívány v širokém spektru po celém světě. Jedním z mála států v Evropě, kterým HVDC systém neprochází je právě Česká republika. Proto se autor této práce rozhodl rozšířit získané informace v bakalářské práci o nové, které by do budoucna mohly zvětšit potenciální zájem o tuto oblast. K největším problémům systému HVDC patří vypínání jejich zkratových proudů, poněvadž stejnosměrný proud v žádném okamžiku aktivního provozu neprochází nulou. Tato práce ve třetí kapitole zahrnuje informace o vypínání zkratového proudu, který bude v obvodu reprezentován použitím funkčního bloku s nastavenou hodnotou doby vzniku zkratu.

V první kapitole budou zobrazeny schémata zapojení stejnosměrných vypínačů s principem funkčnosti tří typů elektromechanických vypínačů, tří hybridních vypínačů, dvou polovodičových vypínačů a jednoho speciálního typu nazývaného Wang-Marquardtův.

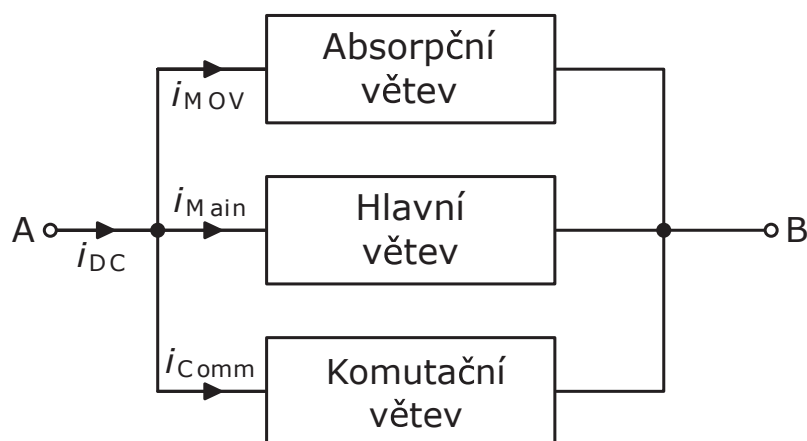
Druhá kapitola bude zaměřena na porovnání HVDC a HVAC sítí s důrazem na technicko-ekonomické limity. V této kapitole může čtenář nalézt i informace o výstavbě budoucích projektů na území Německa a zajímavé sdělení bude ukryto i v podobě prvního projektu DC napětí 1100 kV aplikovaného v Číně. Do této kapitoly bude zahrnut i popis řízení HVDC sítí. Největší důraz bude kladen na detailní rozbor konkrétních zařízení nacházejících se ve vypínači ABB. V závěru této kapitoly bude umístěn vizuální vypínací proces hybridního vypínače Alstom, který je rozčleněn do šesti grafických oblastí.

Třetí kapitola bude pojednávat o hlavním úkolu celé diplomové práce, což ve výsledku znamená vytvoření jednotlivých simulací hybridních vypínačů v bezporuchovém provozním režimu, který díky vnořenému poruchovému funkčnímu bloku přejde do zkratového režimu. Každý simulovaný hybridní vypínač v MATLABu Simulink zajistí optimální vypnutí celého vypínače vhodným selektivním odstupňováním jednotlivých větví vypínače.

1 Přehled topologií vypínačů HVDC systému

V této kapitole diplomové práce jsou sepsány informace o různých typech HVDC vypínačů s kladeným důrazem na princip jejich činnosti. Následující části této kapitoly popisují nejvíce používané vypínače s jednotlivými schémata zapojení v oblasti HVDC. Některé typy vypínačů budou ve třetí kapitole diplomové práce modelované v softwaru Matlab Simulink. Všechny popsané vypínače jsou založeny na shodném principu funkčnosti s velmi podobnou strukturou zapojení. Obecné schéma zapojení HVDC vypínače je znázorněno na obrázku 1.1, skládající se ze tří nezbytných větví pro správnou funkčnost vypínacího procesu. Každý vypínač vždy obsahuje hlavní větev, komutační větev a absorpční část. Pořadí postupu vypínání zůstává u všech vypínačů stejné. U některých konceptů vypínačů jsou jednotlivé větve uspořádány odlišnými způsoby za použití více komutačních větví k omezení poruchového proudu.

V normálním bezporuchovém stavu prochází proud hlavní větví. Jakmile nastane určitá porucha, vypínač v hlavní větvi bude rozepnut a proud bude komutován do komutační větve. Třetí větev, nazývaná absorpční, je v obvodu potřebná z důvodu odvedení nahromaděné energie v obvodu před celkovým vypnutím vypínače. Tato větev ve většině případů obsahuje metal-oxidový varistor *MOV* s nelineární U-I charakteristikou. Když dojde k poklesu napětí vypínače na napětí *MOV*, *MOV* varistor bude svádět proud a vytvoří proti-napětí. Toto proti-napětí oponuje napětí systému a zajistí svedení proudu na nulovou hodnotu. [1]

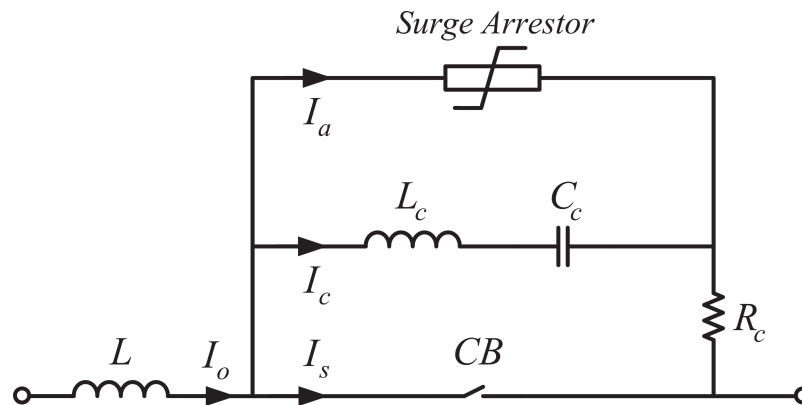


Obrázek 1.1: Obecné schéma HVDC vypínače [1]

1.1 Elektromechanický vypínač

1.1.1 Elektromechanický vypínač s pasivní rezonancí

Mechanický vypínač HVDC s pasivním rezonančním obvodem patří mezi staré technologie a původně byl vyvinut pro systémy CSC-HVDC, respektive LCC. Obrázek 1.2 znázorňuje zjednodušené schéma zapojení mechanického vypínače s pasivní rezonancí, který je tvořen svodičem přepětí, hlavním vypínačem CB, sériovým spojením L_c a C_c v komutační větvi, odporem R_c mezi hlavní a komutační větví a tlumivkou předřazenou před větve obvodu.



Obrázek 1.2: Elektromechanický vypínač s pasivní rezonancí [2]

V praktickém využití je vypínač tvořený vzduchovým prostředím s několika vypínacími jednotkami. Během normálního provozu prochází proud I_s rovnající se I_o pouze přes CB, pokud vznikne vlivem určitého hlediska zkrat, bude proud komutován do komutační větve, kde zajistí nabíjení kondenzátoru. Pro pochopení procesu přerušení je nutné v průběhu procesu analyzovat aktuální rovnici. Diferenciální rovnice během přerušení může být napsána ve tvaru:

$$L_c \frac{d^2 i_s}{dt^2} + \left(R_c + \frac{\partial u_{arc}}{\partial i_s} \right) \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{C_c} i_s = \frac{I_o}{C_c} \quad (1.1)$$

Přibližné řešení pro tuto rovnici je:

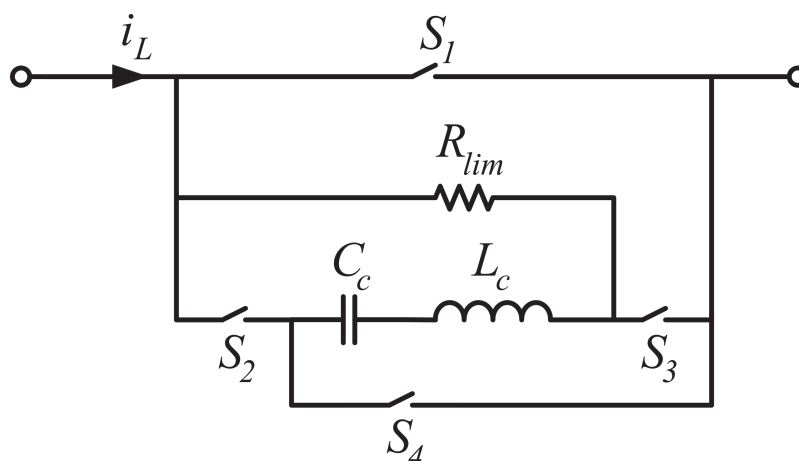
$$i_s = I_o \left[1 + e^{-\frac{1}{2L} \left(R_c + \frac{\partial u_{arc}}{\partial i_s} \right) t} \cdot \sin \omega_c t \right] \quad (1.2)$$

kde $\omega_c = \sqrt{1/L_c C_c}$. Jestli-že $\left(R_c + \frac{\partial u_{arc}}{\partial i_s} \right) < 0$, proud i_s bude oscilovat s narůstající amplitudou. První přerušení proudu v nule je dostatečné k tomu, aby se vypínač odpojil.

1.1.2 Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí

Pod podmínkou předem nabitého komutačního kondenzátoru C_c vzniknou v aktivním režimu proudové oscilace okamžitě, jejich hodnota se bude zvyšovat a působit proti proudu CB, pokud

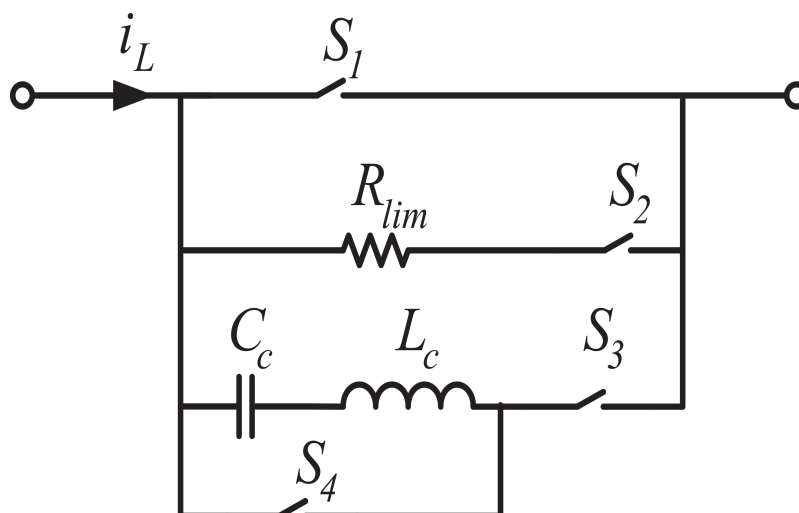
bude proud komutován do větve LC . V některých odborných textech je toto schéma uváděno jako hybridní přerušovací metoda. Tyristory jsou v těchto typech vypínačů obecně používány jako komutátorové nebo odpojovací spínače. Tento koncept zapojení je také znám pod pojmem dvoustupňová metoda přerušování. Ačkoli pro tento koncept existuje několik variant zapojení, v této práci bude čas věnován dvěma základním topologiím, jejichž schéma lze spatřit na obrázku 1.3 a 1.4. Obrázek 1.3 popisuje první variantu mechanického vypínače s aktivní rezonancí.



Obrázek 1.3: Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí [2]

V první topologii zapojení je při normálním zatížení zapnutý pouze hlavní vypínač S_1 , zatímco ostatní spínače S_2 , S_3 , S_4 se nachází ve vypnutém stavu. Kondenzátor C_C je předem nabitý záporným napětím U_{C0} . Jakmile je detekován poruchový proud, hlavní vypínač S_1 se otevře a současně dochází k zavření vypínačů S_2 a S_3 . Poté jde zpětný proud procházející L_C větví proti vzniklému zkratovému proudu a v okamžiku dosažení stejné hodnoty obou proudů bude výsledný proud komutován do paralelních větví. Po nabití kondenzátoru C_C poklesne proud na nulu a spínač S_2 se otevře. Následně dochází k vybíjení kondenzátoru C_C přes smyčku $C_C - S_4 - S_3 - L_C - C_C$. Po vybití kondenzátoru přestane procházet proud a spínač S_3 se vypne a hlavní proud začne opět procházet větví zahrnující $R_{lim} - L_C - C_C - S_4$. Spínač S_4 se otevře jakmile přestane procházet proud, což vede k nové energetické rovnováze, ve které je kondenzátor plně nabitý.

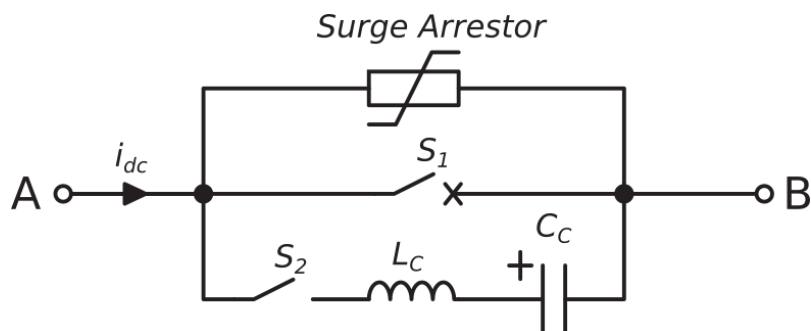
Přerušování jmenovitého proudu může být pro druhou variantu zapojení realizováno pouze uzavřením spínače S_3 . Obrázek číslo 1.4 popisuje druhou topologii mechanického vypínače s aktivním rezonančním obvodem. Po rozpoznání poruchy ve druhé variantě zapojení se hlavní vypínač S_1 otevře a současně s ním je uzavřen vypínač S_3 , což zajistí nulový proud uvnitř hlavního vypínače. Po úplném nabití kondenzátoru bude spínač S_3 opět přirozeně otevřen. [2]



Obrázek 1.4: Druhá varianta elektromechanického vypínače s aktivní rezonancí [2]

1.1.3 Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí s použitím dvou vypínačů

Během vypínání vypínače dochází k oddělení kontaktů a vytvoření oblouku mezi kontakty. Jakmile bude mezera mezi kontakty dostatečná, spínač v komutační větvi bude sepnut a dochází tím k vybíjení předem nabitého kondenzátoru a injektovaný proud vede k nulové hodnotě proudu v hlavní větvi. Oblouk se uhasí a poruchový proud bude komutován do komutační větve, kde nabíjí kondenzátor, až do okamžiku uvedení *MOV* varistoru do provozu. Tento starý koncept byl popsán již v 70. letech. Tento typ DC vypínače je v současnosti propagován společností Mitsubishi Electric. Vakuové vypínače jsou v těchto DC vypínačích používány jako mechanické vypínače v důsledku jejich krátké požadované mezery mezi kontakty a nízké hmotnosti kontaktů umožňující jejich rychlé oddělení. Vakuové vypínače jsou dostupné pro hladinu napětí 40,5 kV. Aby bylo zajištěné rovnoměrné rozložení napětí na vypínači, musí být několik vypínačů s jejich odpovídající velikostí zapojeno do série. Pro kondenzátor je zapotřebí v tomto typu DC vypínače nabíjecí obvod. Jako spínače zajišťující vybíjení kondenzátoru mohou být použita spouštěcí jiskřiště nebo tyristory.



Obrázek 1.5: Elektromechanický vypínač s aktivní rezonancí s použitím dvou vypínačů [1]

Díky této možnosti vypínání bude vyžadováno více sériově připojených zařízení. V simu-

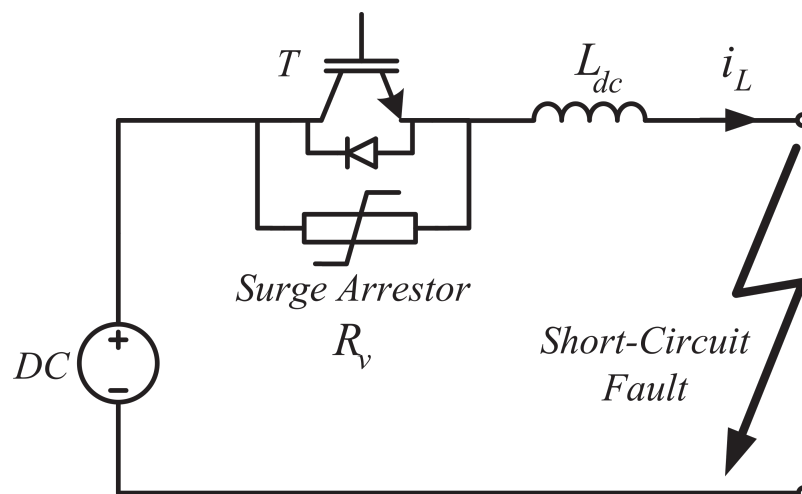
zařízení nacházející se v levé části od generátoru impulzů. V simulaci byl použit rezistor, indukčnost a kondenzátor v pulsním generátoru. Jejich velikosti dosahují těchto hodnot, 10Ω , $0,1 \text{ mH}$ a 10 F . Rezistor v tlumicí větvi byl nastaven na $0,05 \Omega$. [1]

1.3 Polovodičový vypínač

Pro přerušení zkratového stejnosměrného proudu je nejvhodnější použít polovodičové součástky z důvodu jejich rychlých a ultra-rychlých dob spínání. Samostatný polovodičový vypínač může být rychlejší než všechny ostatní typy stejnosměrných vypínačů. Vypínače na bázi samostatných polovodičů je možné vytvořit několika jejich různými konfiguracemi s použitím pomocných obvodů. V různých odborných literaturách je možné shledat dvě hlavní topologie tohoto typu vypínače a další odlišné specifikace mohou být zařazeny do jedné z těchto topologií. Obecně platí, že samostatné polovodičové vypínače obsahují mnoho IGBT tranzistorů, IGCT nebo jiných spínačů založených na polovodičové technologii, které jsou zapojené do série a paralelně pro podporu napětí a proudu během normálních i poruchových stavů.

1.3.1 Polovodičový vypínač s paralelním svodičem přepětí

Na obrázku 1.7 je znázorněna typická konfigurace obvodu stejnosměrného polovodičového vypínače. Polovodičový spínač T v tomto typu zapojení působí jako hlavní vypínač a paralelně s ním je spojen svodič přepětí R_v . Během nominálního provozu se nachází spínač T v zapnutém stavu a proud prochází směrem od zdroje k zátěži. Jakmile je v jakémkoliv místě vedení, či na jiných zařízeních HVDC systému zjištěn zkrat, spínač T bude vypnut. Poté se proud zátěže komutuje do svodiče přepětí R_v , který zajistí odvedení nahromaděné energie z obvodu. Přepětí na spínači T je limitováno ochrannou úrovní napětí svodiče přepětí R_v , které v mnoha aplikacích dosahuje 1,5 násobku jmenovité hodnoty stejnosměrného zdroje.



Obrázek 1.7: Polovodičový vypínač s paralelním svodičem přepětí [2]

Úroveň napětí svodiče přepětí je spočteno jako $U_{dc} + U_{margin}$ a také se předpokládá, že

impedance bodu poruchy je zanedbatelně malá. Když se vypínač T vypne v čase $t = 0$, U_{margin} je aplikováno na L_{dc} , čímž je možné indukční proud vypočítat následujícím způsobem:

$$i_L = I_0 - \frac{U_{margin}}{L_{dc}}t \quad (1.3)$$

kde I_0 je amplituda poruchového proudu v čase $t = 0$. Doba vypnutí poruchového proudu T_{open} je dána tímto vztahem:

$$T_{open} = \frac{L_{dc}}{U_{margin}}I_0 \quad (1.4)$$

a energie absorbovaná v R_v může být stanovena tímto způsobem:

$$W_R = \frac{1}{2}L_{dc}I_0^2\left(\frac{U_{dc}}{U_{margin}} + 1\right) \quad (1.5)$$

U_{margin} je obvykle mnohem menší než U_{dc} v aplikacích s vysokým výkonem, aby se potlačilo napětí na spínači T a snížili se vodivostní ztráty. V takovém případě bude čas v rovnici 1.4 dosahovat vyšší hodnoty a energie W_R je větší než akumulovaná energie v L_{dc} v čase $t=0$, která je dána velikostí $\frac{1}{2}L_{dc}I_0^2$. Čím nižší napětí je na spínači T , tím více kapacity potřebuje svodič přepětí.

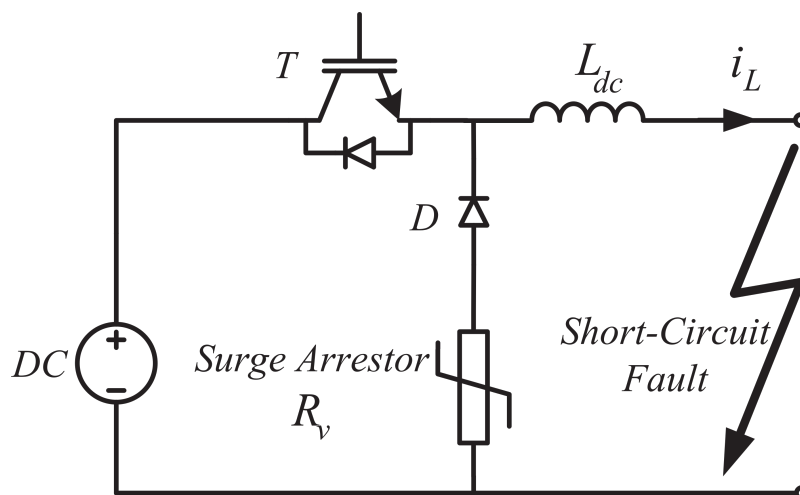
1.3.2 Polovodičový vypínač se zpětnou diodou

Mezi další topologie polovodičových vypínačů patří použití IGBT tranzistorů v kombinaci se zpětnou diodou a svodičem přepětí. Zpětná dioda se svodičem přepětí propojuje kladný a záporný pól stejnosměrné linky. Tento typ obvodu redukuje energii absorbovanou ve vypínači s potlačením přepětí na ventilu. Během bezporuchového provozu je spínač T zapnut a prochází přes něj proud induktivního charakteru i_L . Po detekci poruchy budeme uvažovat vypnutí vypínače T v čase $t = 0$, poté bude zkratový proud komutován do smyčky $L_{dc} - R_v - D$. Z tohoto důvodu klesne proud procházející přes zdroj U_{dc} okamžitě k nule. Jakmile je úroveň napětí svodiče přepětí vyjádřena pomocí U_v , je možné stanovit přepětí na vypínači, které je dáno součtem $U_{dc} + U_v$. Protože zdroj U_{dc} nedodává žádnou energii do obvodu po vypnutí spínače T , energie absorbovaná v DC vypínači je při vypínání stejná jako energie uložená v L_{dc} , která je protékána proudem I_0 .

Energie W_R je v tomto případě dána vztahem:

$$W_R = \frac{1}{2}L_{dc}I_0^2 \quad (1.6)$$

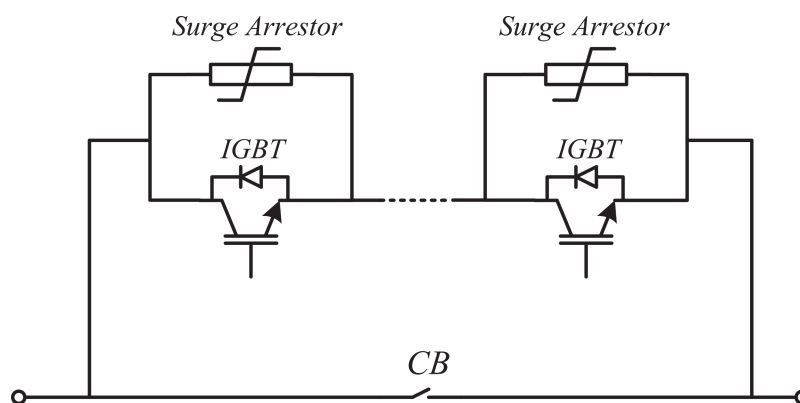
Porovnáme-li energie obou typů polovodičových vypínačů získáme skutečnost v podobě menší energie u vypínače s diodou D než je tomu u vypínače s paralelním svodičem přepětí. Velikost R_v může být redukována pomocí zpětné diody, protože napětí U_v nemá vliv na energii W_R , přepětí na spínači T může být potlačeno bez zvýšení energie W_R volbou nízké hodnoty U_v . [2]



Obrázek 1.8: Polovodičový vypínač se zpětnou diodou [2]

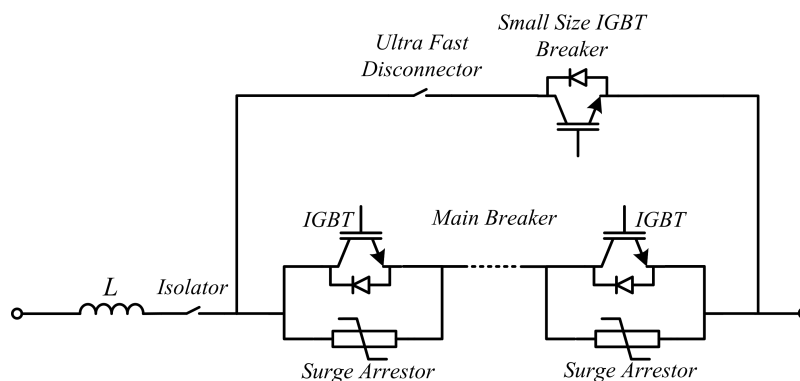
1.4 Hybridní vypínače

Integračně říditelná polovodičová zařízení s mechanickým vypínačem jsou v jednotné konfiguraci nazývána jako hybridní vypínací technologie. Obecně platí, že v rámci hybridního vypínače je komutační větev složena z polovodičových součástek a prochází jím proud pouze během procesu přerušení. V hybridních vypínačích společnosti ABB prochází proud v bezporuchovém stavu i komutační větví, jež je tvořena z IGBT tranzistorů. V některých vědeckých publikacích byl vypínač simulován odlišným způsobem, kde zkratový proud procházel pomocnou větví pouze v případě vzniku zkratu. U hybridních vypínačů Alstom dochází k průchodu proudu komutační větví pouze v případě poruchy.



Obrázek 1.9: Obecné schéma zapojení hybridního DC vypínače [2]

Všechny spínače či vypínače jsou řízeny elektronickými obvody. Nedávný i současný vývoj v oblasti polovodičových spínačů zajistil zlepšení jejich vlastností, mezi které patří průrazné napětí, provozní ztráty, doba spínání a spolehlivost, tudíž je možnost použít tato zařízení jako hlavní přerušovací spínače. Pro hybridní vypínače existuje několik možných typologií, v praxi nejvíce přitahují pozornost tři hlavní struktury, jež jsou popsány právě v této práci. Obrázek 1.9 znázorňuje základní hybridní technologii. V tomto typu hybridního vypínače se nachází ultra rychlý mechanický spínač, ke kterému je sériově připojen malý počet polovodičových IGBT tranzistorů. Tato typologie kombinuje nízké ztráty čistého mechanického spínače s rychlou spínací odezvou polovodičových součástek. Vzhledem k tomu, že zhášecí komora musí vytvářet pouze dostatečné napětí pro komutaci a nikoliv umělou proudovou nulu, je možné o těchto typologiích prohlásit, že jsou rychlejší než běžné vypínače. Použití této typologie bylo vyvinuto pro MVDC. Další typ konfigurace, která byla zavedena v hybridních technologiích, využívá sériového spojení rychlých polovodičových součástek s ultra rychlým mechanickým spínačem v hlavní větvi obvodu. Komutační, respektive paralelní větev, je tvořena sériovým zapojením polovodičových spínačů. Rychlé polovodičové zařízení v hlavní cestě obvodu představují výkonové IGBT tranzistory.



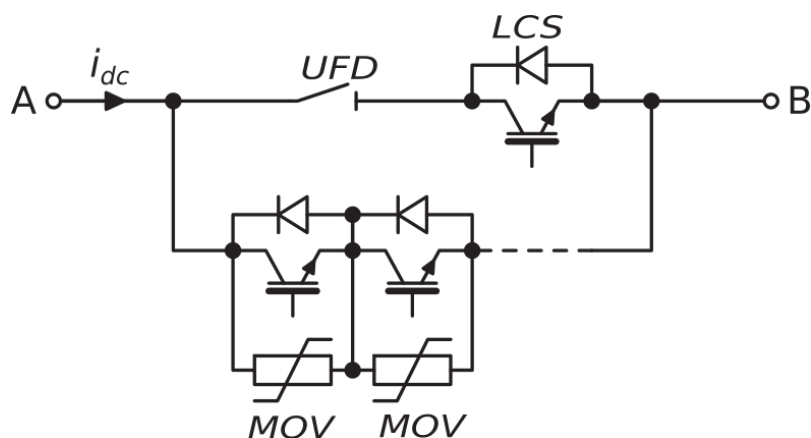
Obrázek 1.10: Druhá varianta hybridního HVDC vypínače [2]

IGBT tranzistory v hlavní větvi potřebují vytvořit dostatečně vysoké napětí pro komutaci proudu do paralelních IGBT tranzistorů, tyto tranzistory v hlavní větvi mají nižší zatížitelnost než paralelní vypínač v pomocné větvi. Obvykle může být větev, přes kterou prochází nominální proud, realizována pomocí malého počtu IGBT tranzistorů zapojených do série, provozní ztráty a pokles napětí bude na nízkých hodnotách. Během normálního provozu bude proud procházet přes ultra rychlý spínač a malý počet IGBT tranzistorů a proud v hlavním vypínači pomocné větve bude nulový. Pokud dojde k poruše DC systému, stejnosměrný vypínač okamžitě komutuje proud do komutační větve obsahující hlavní DC vypínač a poté se ultra rychlý spínač otevře. Když se mechanický spínač nachází v otevřené poloze, hlavní vypínač v pomocné větvi přeruší proud. Ultra rychlý spínač bude v otevřené pozici vystaven zotavovacímu napětí, které je definované ochranou úrovní svodičů přepětí. Mechanický spínač se otevře při nulovém proudu a nízkém napětí. Ultra rychlý spínač je vystaven zotavovacímu napětí, které je definované ochrannou úrovní svodičů přepětí, až poté, co bude v otevřené

poloze a současně bude otevřen hlavní DC vypínač. Zjednodušené schéma této topologie je znázorněno na obr. 1.10. [2]

1.4.1 Hybridní vypínač ABB

Hybridní vypínač společnosti ABB je zobrazen na obrázku 1.11. Tento koncept vypínače používá ve své hlavní větvi proudu dvě důležitá zařízení, prvním zařízením je ultra rychlý mechanický spínač, na něhož jsou kladeny menší časové nároky, než na druhé zařízení nazývaní se *LCS*, nebo-li komutační vypínač, skládající se z několika IGBT tranzistorů zajišťující první okamžik vypnutí poruchového proudu. Komutační větev hybridního vypínače ABB je složena z několika skupin IGBT tranzistorů, kde ke každé z těchto skupin je paralelně připojen svodič přepětí *MOV*. Jakmile proud i_{dc} dosáhne prahové hodnoty systému, dochází k vypnutí komutačního vypínače a souběžně s tím k zapnutí IGBT tranzistorů v komutační větvi. Prahová hodnota stejnosměrného proudu, při kterém bude vypnut komutační spínač, je stanovena na 120% jmenovité hodnoty DC systému.



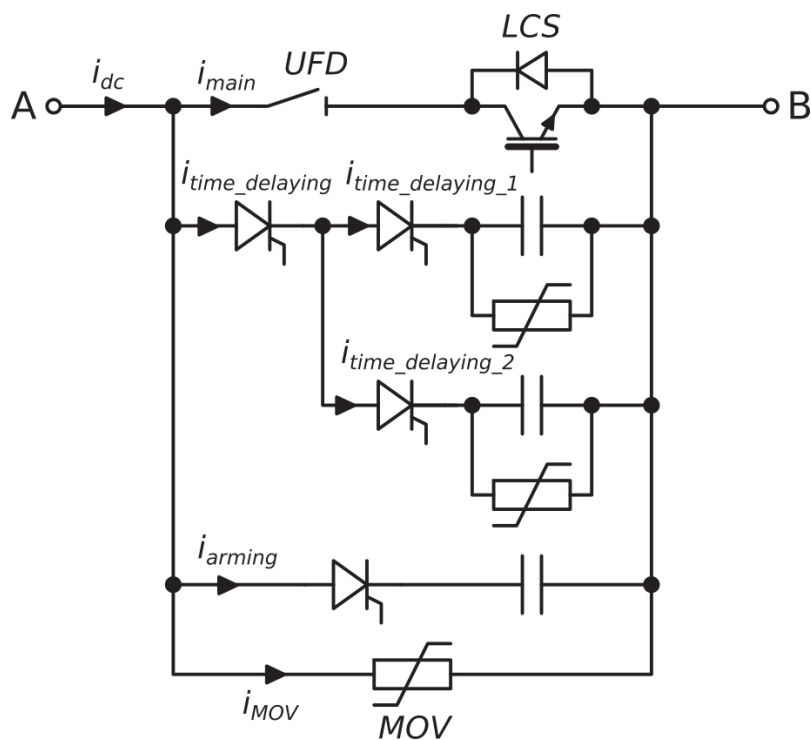
Obrázek 1.11: Hybridní HVDC vypínač společnosti ABB [1]

V některých literaturách je uváděna skutečnost, že komutační větev je v bezporuchovém stavu také sepnuta, čímž umožňuje, aby nominální proud byl rozdělen do hlavní i komutační větve. Jmenovitý proud však ve větší míře prochází hlavní větví, v literatuře [3] je tento hlavní proud přibližně 90 % z celkového procházejícího nominálního proudu. V tomto případě je však důležité, aby IGBT tranzistory v komutační větvi byly plně řízeny a umožnily průchodu proudu o různých hodnotách. S tímto je spojena i velká náročnost na *MOV* varistory, které musí být nastaveny tak, aby napětově ochránily všechny zařízení DC sítě. Společnost ABB nazývá systém vypínacího procesu hybridního vypínače výrazem pro-aktivní řízení, jehož graf je možné shledat na obrázku 2.12. [1]

1.4.2 Hybridní vypínač Alstom

Hybridní vypínač Alstom je představen na obrázku 1.12 vycházející ze stejné koncepce jako vypínač ABB. Největší rozdíl mezi oběma typy hybridních vypínačů spočívá v komutační

větví, která je u hybridního vypínače Alstom složena ze tří GTO, či PCT tyristorových větví. První komutační větev je nazývána jako zpožďovací či (temporizační, v simulaci této práce je nazývána jako pomocná větev), ke které je paralelně připojena další komutační větev složená z jednoho výkonového tyristoru, což lze vidět ve třetí kapitole této práce v simulaci hybridního vypínače Alstom. Třetí komutační větev nese název aktivační. Komutace proudu z hlavní do pomocné větve obvodu nastává v okamžiku vypnutí spínače *LCS* v hlavní větvi obvodu a souběžného zapnutí výkonových tyristorů v komutační větvi. Jakmile bude proud procházet aktivační větví, vypínací impuls obdrží *UFD* spínač v hlavní větvi vypínače. Poruchový proud nabíjí kondenzátor v komutačních větvích obvodu, dokud není dosažena ochranná úroveň napětí *MOV* varistoru. Toto *MOV* napětí je řádově srovnatelné s *LCS* napětím. Tyristory ve druhé zpožďovací větvi jsou explicitně zapnuty, což způsobí komutování poruchového proudu do této větve.



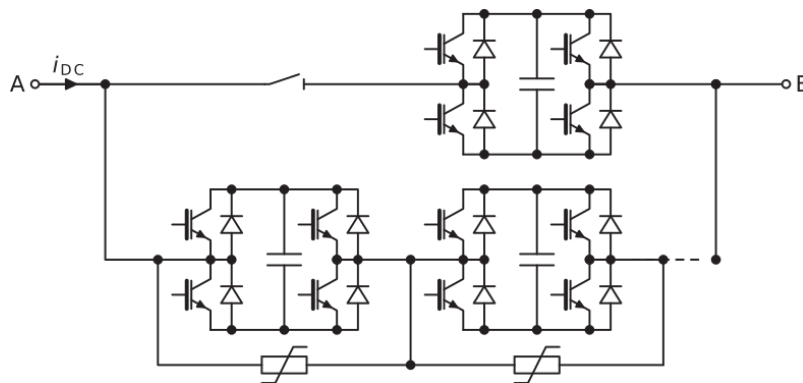
Obrázek 1.12: Hybridní HVDC vypínač společnosti Alstom [1]

Ochranné napětí na metal-oxidovém varistoru *MOV* ve druhé zpožďovací větvi dosahuje vyšší hodnoty, než napětí na *MOV* v první zpožďovací větvi. Oba kondenzátory jsou dimenzovány tak, aby mohl být *UFD* vypínač dostatečně otevřen při nabíjení kondenzátorů. Tyristory ve třetí komutační větvi, respektive aktivační větvi, budou do sepnutého stavu aktivovány v okamžiku vypnutí *UFD* vypínače. Poslední stav vyskytující se v tomto vypínacím režimu nastává v době dosažení maximální přípustné hodnoty poruchového proudu GTO tyristorů v aktivační větvi, kdy proud prochází poslední větví a pomocí metal-oxidového svodiče přepětí je sveden do země. Pokud je vyžadováno delší časové zpoždění pro omezení poruchového proudu, může být do této koncepce hybridního vypínače Alstom přidán větší počet tyristorových větví. Pro obousměrné přerušení proudu musí být tyristory instalovány

v antiparalelním režimu. Po odstranění poruchového stavu a nutnosti opětovného zapnutí hybridního vypínače Alstom musí být kondenzátory v obvodu vybity. [1] Detailnější informace o jednotlivých vypínacích krocích hybridního vypínače Alstom jsou sepsány v [3] zdroji literatury.

1.4.3 Hybridní vypínač SGCC

Dalším typem stejnosměrného vypínače je SGCC (State Grid Corporation of China), jedná se o speciální vypínač vyobrazený na obrázku 1.13, jehož typologie byla vyvinuta v Číně. Tento koncept stejnosměrného vypínače je velmi podobný vypínači společnosti ABB. V tomto typu hybridního vypínače je pro hlavní i komutační vypínač používáno můstkové zapojení IGBT tranzistorů se zpětnou diodou. Operační postup vypínání je stejný jako u vypínače ABB. Procházející proud se rozděluje do dvou větví, z nichž každá z nich sestává z již zmíněných IGBT tranzistorů, přičemž v hlavní větvi obvodu se také nachází *UFD* spínač. Hlavní rozdíl mezi SGCC a konceptem ABB spočívá v tom, že pokud je celý můstek vypnut, tak kondenzátor je nabíjen proudem procházejícím větví mezi dvěma diodami. Proud je komutován, pokud jsou všechny vložené kondenzátory ve větvi dostatečně nabité. V důsledku můstku je možnost v konceptu SGCC přerušit proud v obou směrech. Tento koncept používá vakuové vypínače jako přerušovače proudu. V odborném článku [1] je v simulaci nastavena kapacita můstku na $1 \mu F$. [1]



Obrázek 1.13: Hybridní vypínač HVDC SGCC [1]

1.4.4 Shrnutí stejnosměrných vypínačů z hlediska zkratových proudů

Mechanické HVDC vypínače jsou schopny přerušit proudy do 4 kA s pasivním rezonančním obvodem, zatímco vypínače s aktivním rezonančním obvodem mohou přerušit proudy dosahující až 8 kA. Pro topologie hybridních vypínačů byla experimentálně prokázána úroveň přerušení proudu 9 kA a díky stále se rozvíjející oblasti polovodičové techniky je teoreticky dosažitelná úroveň až 16 kA. Pro čisté polovodičové vypínače je prokazatelná vypínací hodnota 5 kA. [2]

2 Konstrukce a provoz HVDC sítí

2.1 Projekty HVDC sítí

2.1.1 Projekt Suedlink

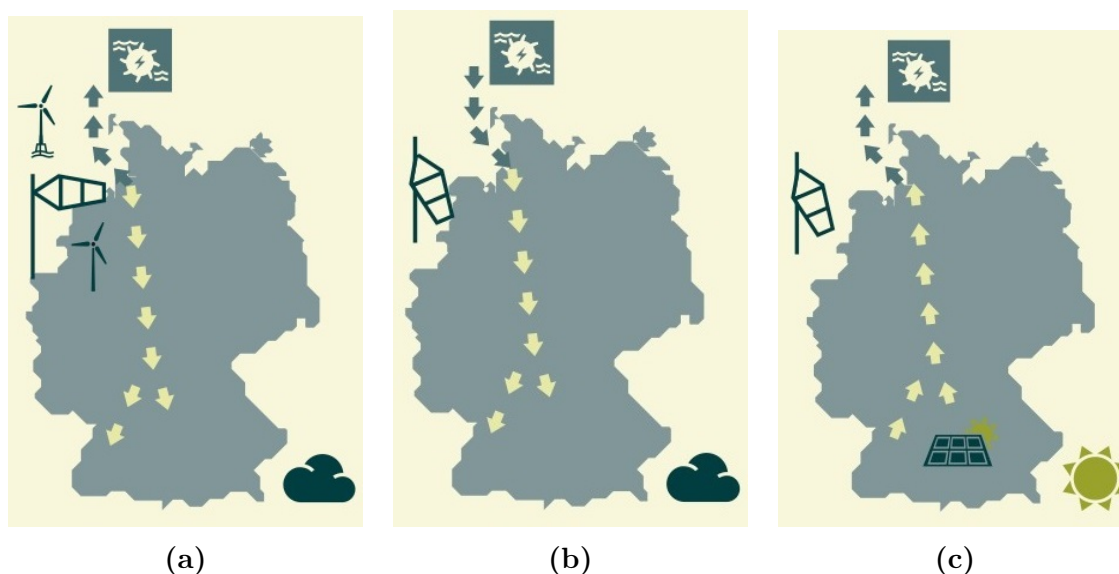
V roce 2025 by mělo být v Německu dle vývojových projektů Netzentwicklungsplan NEP dokončeno 36 nových vedení (stejnoseměrného + střídavého proudu) s celkovou délkou dosahující hodnoty 2800 km. Původní předpoklad finanční náročnosti na všechny tyto projekty byl odhadován na 10 miliard eur, do tohoto limitu se jistojistě všechny projekty nevejdou, poněvadž pouze cena samotného projektu Suedlink byla kvůli zpoždění trojnásobně překročena. Vzhledem k náročným schvalovacím úkonům Německo přikročilo k mnoha legislativním změnám, aby vývoj těchto sítí co nejvíce posílilo a zrychlilo. V Německu bylo provedeno několik zákonů urychlující schvalovací a plánovací zákony, v legislativě byly upraveny mimo energetického zákona EnWG také zákony o subvenci obnovitelných zdrojů EEG, zákon o rozšíření sítě EnLAG a zákon o urychlení vybudování nových sítí NABEG. Posudek na ekologický vliv těchto vybudovaných sítí je spravován jednotlivými spolkovými ministerstvy společně s německou síťovou agenturou BNetzA.

Mezi největší zvláštnosti patří začlenění veřejnosti do budovaných projektů, což umožní mnoha místním spolkům, či určitým občanským sdružením začlenit své názory, nebo poznámky do průběžného postupu plánování. Mezi vývojové projekty NEP patří i tzv. Suedlink. Jedná se o klíčové budoucí vedení, které umožní propojení severní části Německa s jižní oblastí, kde se nachází energeticky náročné průmyslové spolkové země jako jsou Baden-Württembersko a Bavorsko. Ke konci roku 2018 mělo Německo celkově nainstalováno 207,41 GW elektrické energie, v které se nachází 59,42 GW větrné energie (53,01 GW - onshore, 6,41 GW - offshore) a 45,93 GW solární. Podle německého rozvojového plánu sítí Netzentwicklungsplan NEP má být v Německu v roce 2030 instalováno v celkové větrné energii 73,5 GW a v solární energii 66,3 GW, což představuje od konce roku 2018 do roku 2030 přibližný nárůst o 23,7 % ve větrné energii a o 44,4 % v solární energii. Jen pro určitou představu je v této práci uveden i podíl výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách v Německu, která v každém roce v Německu klesá. V roce 2010 činil tento podíl 20,43 % z celkových instalovaných 155,34 GW, v roce 2018 je tento podíl pouze 9,52 % z celkových instalovaných 207,41 GW. Pokles je způsoben zvyšujícím se instalovaným výkonem obnovitelných zdrojů a postupným vypínání jednotlivých bloků jaderných elektráren. Mnoho zajímavých informací, grafů a jednotlivých srovnání výroby elektrické energie v Německu je možné shledat na webové stránce v [9] zdroji literatury.

Důležitý aspekt pro vybudování Suedlinku je ukryt i v dalších možnostech rozšíření větrných parků na severu Německa. Toto vedení je v německých zdrojích uváděno i pod heslem

vedení pro větrnou energii. Projekt Suedlink byl zapojen do programu výstavby projektů v roce 2013 s přesně určenými postupy výstavby, které ovšem nebudou dodrženy ve stanovených obdobích z několika důvodů, i přes velkou snahu projektové společnosti o výstavbu koridoru v optimální trase z hlediska dopadu na občany a přírodu. Největším důvodem zpoždění je nesouhlas německého obyvatelstva s výstavbou nadzemního vedení, proto německá legislativa přikročila k výstavbě vedení pod zem pomocí kabelových linek. Část vymezeného koridoru projektu Suedlink bude tedy realizován pomocí kabelů především v oblasti Bavorska, čímž dochází k mnohonásobnému zvýšení nákladů. U kabelového vedení je ovšem také nutné dodržovat ochranná pásma, kvůli kterým je zapotřebí vykácet široké pruhy lesů a také není možné na poli nad kabelovým vedením a v jeho blízkosti nic pěstovat, čímž se naskytá otázka jestli je podzemní vedení opravdu tím správným řešením.

Na obrázku 2.1 se nachází tři možné scénáře směru toku výkonu vedením Suedlink a Nordlink. Konečný odhad výstavby projektu Nordlink je datován k letošnímu roku 2019 a projekt Suedlink by měl být dokončen v budoucích šesti letech.



Obrázek 2.1: Možné směry toků elektrické energie v závislosti na počasí [6]

(2.1a) - V tomto scénáři dochází k velkému foukání větru a malému slunečnímu svitu, což způsobí, že vedení Suedlink bude přenášet elektrickou energii z větrných parků ze severu Německa do jižní průmyslové části. Přebytečná elektrická energie bude pomocí vedení Nordlink transportována z rozvodny Wilster nacházející se ve Šlesvicku-Holštýnsku do nové rozvodny Ertsmyra (nedaleko Tonstadu) v Norsku.

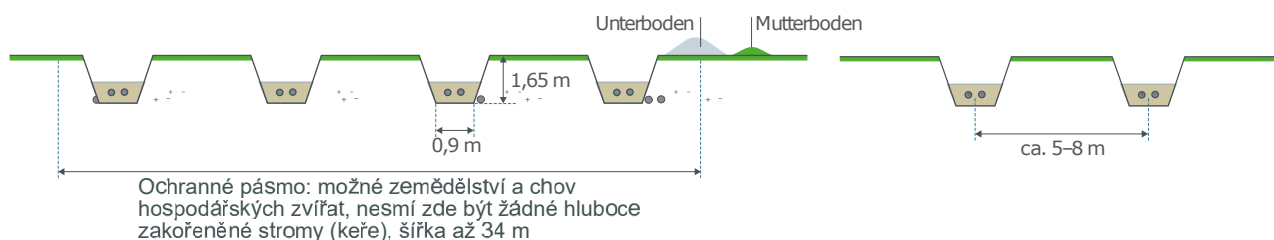
(2.1b) - V druhém případě nebude foukat vítr v severní části Německa a v jižní oblasti Bádén—Württemberska a Bavorska bude zataženo. Tento stav způsobí, že elektrický výkon bude procházet pomocí vedení Nordlink z vodních elektráren v Norsku přes Suedlink do jižní části Německa. Pomocí 623 km dlouhého vedení NordLink s výkonem 1,4 GW bude možné zásobovat elektrickou energií více než 3,6 milionu německých domácností.

(2.1c) Třetí varianta umožňuje přenášet elektřinu opačným směrem než předchozí dvě možnosti. Pokud bude v jižní části optimálně svítit slunce na fotovoltaické panely, pak se bude výkon přenášet do severní části Německa. Tento jev nebude v praxi až tak reálný, neboť průmyslové zóny se nachází právě v jižní části Německa. [6]

Provozovatelé přenosových soustav TenneT a TransnetBW, přes které 800 km dlouhé vedení Suedlink bude procházet, sice náklady na výstavbu neuvedli, ale mnichovský deník *Süddeutsche Zeitung* vydal informaci, že budou náklady na výstavbu více jak trojnásobné namísto prvoplánových odhadů. Původní odhadovaná částka činila hodnotu 4 miliardy € (asi 108 miliard Kč), z čehož vyplývá finální částka rovnající se 12 miliard € (zhruba 324 miliard Kč). Tuto cenu ve výsledku zaplatí jednotliví zákazníci (firmy a domácnosti), jelikož budou moci přenosové společnosti TenneT a TransnetBW zařadit celkové výdaje na tento projekt do svých plánovaných výdajů a zaplatit je prostřednictvím větších poplatků za přenosové služby. Projekt Suedlink, který bude přenášet elektřinu z větrných parků ze severu Německa pomocí *energetických dálnic* je rozčleněn do dvou částí, přičemž první část je tvořena větším územním rozsahem z finální délky 800 km procházející spolkovými oblastmi Šlesvicka–Holštýnska přes Dolní Sasko, Severní Porýní – Vestfálsko a Hessensko do Bavorska. Druhá část bude spojoval Bádén—Württembersko s Bavorskem s plánovanou dobou dokončení obou částí v roce 2025 díky *ambicióznímu harmonogramu*. Uvedení do provozu projektu Suedlink v roce 2025 je klíčové i z hlediska uzavření posledních jaderných bloků na území Německa. V Bavorsku a Bádén—Württembersku má být uzavřeno do roku 2022 8 GW jaderných elektráren. Uzavření všech jaderných bloků nejvíce poznamená Bavorsko, jelikož tato země je skoro z 50 % závislá na energii z jaderných elektráren. Odstavení 4 GW jaderného výkonu v Bavorsku způsobí velké snížení instalovaného výkonu v síti, který by byl schopný dodávat do sítě energii v nepřetržitém režimu, což pomocí nových vybudovaných solárních a paroplynových elektráren v Bavorsku nebude možné. Výstavba těchto elektráren řeší tento problém pouze krátkodobě, proto je pro Německo velmi klíčové vybudování projektu Suedlink. Tento projekt především vyřeší problém v nedostatečné kapacitě přenosových sítí mezi severní a jižní částí Německa. Další výhoda tohoto projektu spočívá v řešení přenosu výkonu v německo–rakouské obchodní zóně, jež je nezávislá na koordinovaném systému propočtů přeshraničních kapacit v oblasti východní a střední Evropy. Česká republika a Polsko na tyto přeshraniční přetoky elektrické energie zareagovaly instalací transformátorů s posuvnou fází PST, které umožní menší přetěžování jednotlivých zařízení přenosových sítí. Podle informací německého ministerstva bude do roku 2020 dokončeno 85 % všech plánovaných projektů, ostatní projekty budou dokončeny do konce roku 2025, jediný projekt s dokončením výstavby až v roce 2030 bude spojoval Německo s Polskem.

Technické vlastnosti

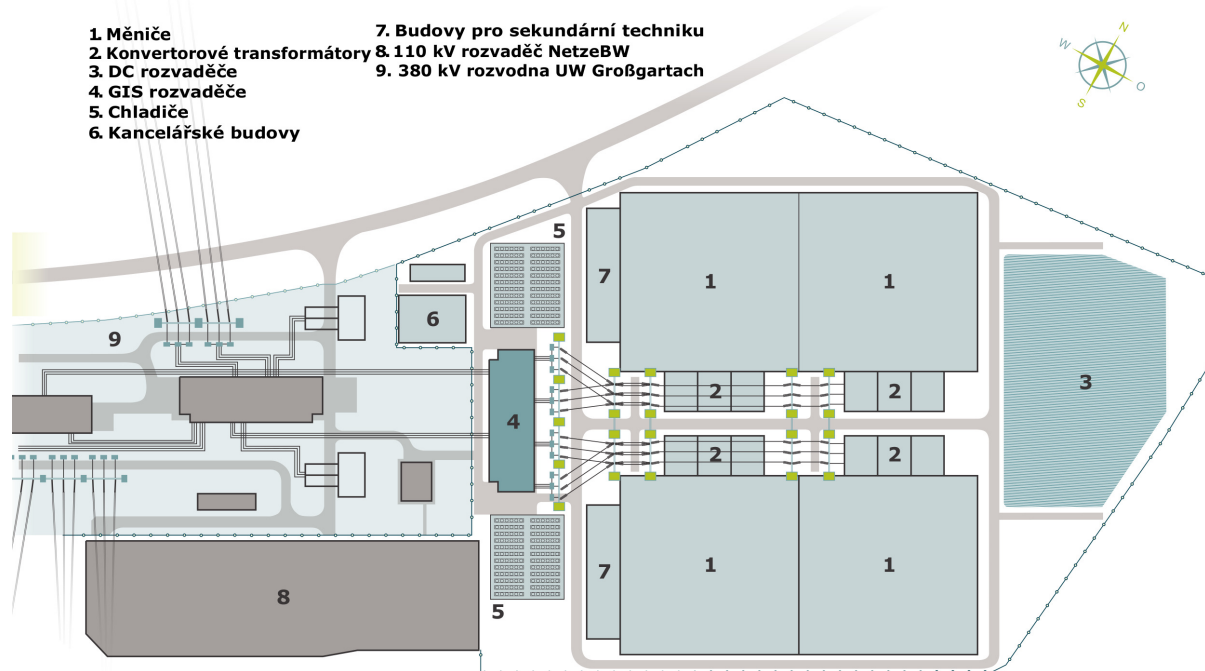
Projekt Suedlink bude přenášet výkon 4 GW ve dvojitým paralelním vedení (2 x 2 GW) mezi Wilsterem a Raum Grafenrheinfeldem, Brunsbüttel a Großgartach (Leingarten). Technické parametry projektu SuedLink zatím nejsou fixní. TenneT a TransnetBW v současné době hodnotí různé technické možnosti návrhu. Jednou z možných variant je použití podzemních vodičů s napětím 320 kV, které se v Německu používají pro připojení větrných elektráren na moři. Druhou možností jsou podzemní kabely s napěťovou úrovní 525 kV. Kabelový systém projektu Suedlink sestává u napětí 320 kV ze dvou obvodů a čtyř kabelů, pro napětí 525 kV jednoho obvodu a dvou kabelů. Pro každý projekt je společně umístěna ochranná trubka pro optické vlnovody pro přenos dat mezi body síťového připojení. Každý okruh je položen v jediném výkopu. Celková provozní šířka trasy projektu SuedLink činí v Bádensku-Württembersku přibližně 15 metrů. Tato šířka v sobě zahrnuje oba kabelové výkopy včetně mezery a vnější ochranné vzdálenosti tří metrů. Vodiče kladné a záporné polarity jsou od sebe v příkopu vzdáleny asi 0,5 metru, výkopy mají hloubku asi 1,65 metru, aby bylo zajištěno pokrytí kabelů o délce nejméně 1,3 metru. Vzdálenost mezi příkopy je přibližně 5-8 metrů. Tato vzdálenost je určena v závislosti na místních podmínkách a konstrukčním procesu, jakož i na tepelných požadavcích půdy. Ochranné pásmo dosahuje šířky až 34 metrů, v této oblasti není možné vysazení hluboko-zakořeněného lesního porostu, ale nachází se zde možnost chovu dobytka či určitého druhu zemědělství. V roce 2015 byla stanovena zákonem prioritou výstavby Suedlinku pomocí podzemního kabelu, čímž tedy neobsahuje žádné nadzemní vedení.



Obrázek 2.2: Uložení kabelů v projektu Suedlink [7]

Konvertory pro SuedLink jsou naprogramovány jako samočinné měniče výkonu (VSC - Control Voltage Source). Tato zařízení umožňují konverzi střídavého proudu na stejnosměrný proud v obou směrech. Stanice VSC pracují na principu propojení několika IGBT tranzistorů s možností black-startu, více informací o VSC je možné shledat v [3]. Stanice HVDC konvertoru se skládá ze dvou přibližně 20 metrů vysokých konvertorových hal a rozvaděče. Celá lokalita konvertorové stanice SuedLink je podle aktuálního plánování přibližně 230 až 300 metrů široká. [4]-[7]

Prostorové uspořádání HVDC rozvodny v GROSSGARTACH/LEINGARTEN



Obrázek 2.3: Prostorové uspořádání rozvodny [8]

2.1.2 UHVDC 1100 kV - Changji-Guquan

V lednu 2018 byl z transformačního závodu v Norimberku do Číny transportován nejvýkonnější vysokonapěťový transformátor na světě, který bude sloužit k transformaci elektrických parametrů pro UHVDC linku spojující Changji s Guquan.

Transformátor byl nejprve pomocí speciálního dopravce přepraven do přístavu v Norimberku, kde byl naložen na loď a přes Main-Dunaj kanál odvezen do Rotterdamu, odkud byl pomocí lodní dopravy přeplaven do Číny. V červenci 2016 společnost Siemens obdržela objednávku k výrobě čtyř transformátorů tohoto typu. O rok později byl dokončen první světový transformátor s napěťovou úrovní 1100 kV, který úspěšně absolvoval testy v testovacím poli. Transformátor dosahuje délky 37,5 metrů, je 14,4 metrů vysoký a 12 metrů široký, čímž pro tým odborníků vytvořil určitou logistickou výzvu pro přepravu takhle gigantického stroje. V pro-



Obrázek 2.4: Nejvýkonnější transformátor na světě s napětím 1100 kV UHVDC [17]

vozu transformátor váží necelých 900 tun a jeho účinnost přesahuje 99% jmenovitého výkonu. Tyto transformátory poprvé umožnily přenos vysokonapěťového stejnosměrného proudu (HVDC) s nízkými hodnotami ztrát v rekordním rozsahu 3 284 kilometrů s přenosovou kapacitou 12 GW. Transformátory UHVDC jsou součástí konvertorových stanic, která přeměňuje střídavý proud na stejnosměrný proud na začátku stejnosměrné přenosové linky a z DC/AC na druhém konci vedení. Stejnosměrný proud zajišťuje možnost přenášet energii s nízkými hodnotami ztrát, které jsou v porovnání se střídavými o třetinu nižší. Díky těmto transformátorům s napětím 1100 KV je projekt Changji-Guquan jediný svého druhu na světě. Transformátor nejenže umožňuje přenos na úrovni rekordního napětí, ale s výkonem 587 MVA je nejsilnějším provozuschopným transformátorem na světě. Společnosti Siemens s ABB tak dosáhly nového rozměru vysokonapěťového stejnosměrného proudu. Společnost ABB také představila transformátory této napěťové úrovně. Linka UHVDC z Changji do Guquan provozuje čínská síť State Grid Corporation (SGCC) a její uvedení do provozu bylo provedeno 31. prosince 2018. [17]

2.2 Technicko-ekonomické limity systému HVDC

2.2.1 Technické výhody

HVDC je osvědčená technologie s mnoha patrnými technickými výhodami. Mezi její největší přednosti patří možnost přenosu velkého výkonu na velmi dlouhé vzdálenosti, s vyšší účinností a nižšími elektrickými ztrátami na vzdálenosti i více než 1000 km. Systém HVDC umožňuje bezpečné a stabilní asynchronní propojení sítí, které pracují na různých frekvencích nebo jsou z určitých důvodů nekompatibilní. Další předností HVDC technologie je okamžité a přesné řízení toku energie. Po několika světových instalacích HVDC systému se tento způsob přenosu energie stává nedílnou součástí elektrického napájení, což zvyšuje celkovou stabilitu, spolehlivost a přenosovou kapacitu. [10]

Typicky se přenos elektrické energie ve většině vnitrostátních sítí uskutečňuje prostřednictvím vysokonapěťového střídavého proudu (HVAC). Koróna, skin efekt a přítomnost kapacity a určitého svodu způsobují ztráty energie v AC systémech. Z těchto důvodů je zapotřebí u střídavých systémů větší míra izolace, větší rozměry vodičů a jsou zde nutná i zařízení spojená s jalovým výkonem. HVAC systém tedy není vhodný pro přenos velké objemové energie na dlouhé vzdálenosti. Pro přenos velkého výkonu je navržena technologie vysokého napětí stejnosměrného proudu (HVDC). Podpora jalového výkonu na obou stranách měřen, schopnost black-startu, malé velikosti filtrů a schopnost měnit směr toku výkonu bez změny polarity napětí stejnosměrného proudu je možný u konvertorových stanic VSC tvořených IGBT tranzistory [13]. Detailní informace o typech měničů VSC (Voltage Source Converter) a LCC (Line Commutated Converter) se můžete dozvědět v mé bakalářské práci *Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání* na straně 23.

Asynchronní rozvodná síť

Několik světových instalací HVDC systému zajišťuje propojení dvou střídavých systémů, které nejsou synchronní. Pokud mají být propojeny střídavé systémy, musí být zajištěna jejich synchronizace. To znamená, že by měly střídavé systémy pracovat se stejným napětím a frekvencí, což je velmi obtížné dosáhnout. Jelikož je HVDC asynchronní, může se přizpůsobit libovolnému jmenovitému napětí a frekvenci, kterou přijímá z vedlejších připojených AC sítí. Z tohoto důvodu se HVDC systém používá pro připojení velkých střídavých systémů v mnoha částech světa.

Pro ilustraci je nutné uvést, že ve Skandinávii systém Nordel není synchronní se sítí ENTSO-E (bývalé UCTE) v západní kontinentální Evropě, přestože jmenovité frekvence jsou stejné. Energetický systém ve východní části USA také není synchronní se systémem západní oblasti USA, Texasu či Quebeccu. V Japonsku a Jižní Americe existují také sítě HVDC, které spojují střídavé sítě s různými jmenovitými frekvencemi (50 a 60 Hz). [10]

Podmořské kabely

V systému HVDC neexistují žádné technické limity pro vzdálenosti, na který může být tento systém použit. V případě dlouhého přenosu výkonu pomocí střídavého kabelu bude tok jalového výkonu v důsledku velké kapacity kabelu omezovat maximální možnou přenosovou vzdálenost, což je velmi nevýhodné, proto je vhodné pro způsoby podmořských kabelů používat právě systém HVDC. U HVDC systému neexistuje žádné takové omezení, proto je tento typ jedinou životaschopnou alternativou technického přenosu pro velmi dlouhé kabelové propojení. [10]

Pro ilustraci instalovaných podmořských kabelů je v této práci uveden nejdelší typ podmořského kabelu s délkou 580 km spojující Norsko s Nizozemskem (NorNed), postavený společností ABB pomocí HVDC systému. Velmi detailní informace o tomto nejdelším podmořském přenosu je možné shledat v předchozí práci autora. [3]

Několik spojení HVDC konfigurace s velmi dlouhými podmořskými kabely je dnes uvažováno po celém světě, především v Evropě. Velmi diskutovaným tématem je spojení Islandu s Evropou. [10]

Možnosti řízení

Mezi základní výhody HVDC technologie patří snadné ovládání aktivní energie v přenosové síti. Ve většině HVDC technologií je hlavní řízení založeno na konstantním přenosu výkonu. Tato skutečnost HVDC systému se v posledních letech stala bezesporu velmi důležitou s ohledem na snižující se okraje energetických sítí, neboť trhy s elektřinou jsou v mnoha zemích deregulovány, respektive je zde určité omezení regulačních zásahů.

V mnoha případech může technologie HVDC také zlepšit výkon střídavých napájecích systémů pomocí dodatečných ovládacích prvků. Pokud jsou splněna určitá kritéria, ovládací

prvky jsou aktivovány automaticky. Automatické řídicí funkce HVDC systému zahrnují řízení konstantního kmitočtu, přerozdělování toku energie ve střídavých sítích, tlumení výkyvů výkonů v AC sítích apod. V mnoha případech mohou takové dodatečné řídicí funkce umožnit bezpečné zvýšení schopnosti přenosu výkonu ve střídavých přenosových linkách, kde je tato stabilita limitována. Dnešní pokročilý vývoj v oblasti polovodičové technologie umožňuje téměř neomezené možnosti řízení přenosových systémů HVDC. Výkonové tyristory nebo IGBT tranzistory jsou nejvíce využívány v řídicích systémech. Polovodičové technologie mají velký význam i v oblasti mikroprocesorů, jež jsou klíčovým prvkem řídicích systémů. Odlišné softwarové programy jsou vhodné pro optimální nastavení řízení HVDC systému. Obvykle se používá program pozitivních sekvencí, například PTI's PSS/E program se používá pro studium toku zatížení a stability. Pro podrobnější zkoumání výkonu vnitřních řídicích smyček konvertoru a jeho interakce s nedalekou sítí musí být vytvořena simulace v úplném trojfázovém reprezentačním programu, jako je PSCAD/EMTDC. [10]

Nízké zkratové proudy

Mezi velké výhody HVDC systému patří skutečnost, že nepřispívá ke zkratovému proudu propojené střídavé sítě. Úroveň zkratového proudu se zvýší v přijímacím systému, když je vysokonapěťový přenos střídavého proudu konstruován z elektrárny do velkého střediska zatížení. Vysoké zkratové proudy se stále častěji stávají obtížným problémem pro mnoho velkých měst, což může mít za následek potřebu výměny existujících hlavních vypínačů a jiných zařízení v případě, že je úroveň nastavení, či dimenzování sítí příliš nízká. Situace je zcela odlišná, pokud jsou nové generátory elektráren připojeny do zátěžových center měst pomocí DC vedení. HVDC systém je velmi energeticky *inteligentní*, poněvadž nepřispívá ke zkratovému proudu propojeného střídavého proudu. [10]

Ekonomické a environmentální výhody

Po dosažení určité vzdálenosti, které jsou nazývány jako *break-even*, respektive *critical distance*, má systém HVDC nižší celkové náklady na výstavbu a provoz než stejné střídavé přenosové sítě. Výše zmíněné vzdálenosti dosahují v nadzemním vedení hodnoty v intervalu 400-800 km, pro kabelové sítě jsou tyto vzdálenosti od 25 m do 50 m. Souhrnná cena vysokonapěťového stejnosměrného přenosu je nižší i přes velmi vysoké cenové požadavky na měničny nacházející se na obou koncích HVDC systému. Prakticky ve všech případech má vedení HVDC nižší přenosové ztráty ve srovnání s HVAC vedením se stejnou kapacitou vedení, což znamená, že stejnosměrný přenos umožní přenos větší energie ke střídači. Při požadavku dodávky stejného množství energie mají HVDC systémy také menší dopad na životní prostředí než HVAC, protože vyžadují menší prostory na výstavbu nadzemních vedení. Propojení HVDC umožňuje energetickým systémům efektivněji využívat výrobní elektrárny, jeho největší přínos je možné sledovat v připojení k dostupným vodním či větrným zdrojům nahrazujícím tepelné či jaderné elektrárny. Technologie HVDC je klíčovou složkou budoucího energetického systému založe-

ného na obnovitelných zdrojích energie, mezi které patří větrná a solární energie, které jsou často volatilní i vzdáleně umístěné.

Pozitivní účinky na napájecí systémy

Mnoho vedení HVDC bylo vytvořeno pro propojení různých energetických systémů. Spojení HVDC pomáhají stávajícím generátorům, které jsou vázány do energetického systému, pracovat efektivněji, takže nová výstavba elektráren může být odložena, což přináší velký význam v ekonomickém i ekologickém hledisku. S ohledem na životní prostředí je velmi efektivní vybudování většího počtu vodních elektráren, které mohou do sítě dodávat výkon téměř nepřetržitě. Vodní elektrárna Tři soutěsky v Číně je vůbec největší elektrárnou na světě a umožňuje dodávat do sítě výkon 22 500 MW. Z této elektrárny jsou vyvedeny celkově tři linky HVDC systému, které jsou schopné přenášet výkon 9 000 MW o napěťové hladině ± 500 kV. Třetí vedení HVDC systému přenáší výkon 3000 MW ze Tří soutěsek do Šanghaje na vzdálenost 1060 km. Připojení hydroelektrických zdrojů do energetického přenosového mixu s převážnou elektřinou z tepelných elektráren přináší velké výhody pro životní prostředí.

Nižší počet vodičů v systému HVDC

V konfiguraci HVDC systému existuje mnoho řešení jak přenášet elektrickou energii. První způsob spočívá v přenosu elektrické energie pomocí jednoho vodiče, druhý vodič představuje zem, tento systém se nazývá monopolární. Druhý způsob přenosu je ve světě velmi hojně využíván, protože jeho přenos za pomoci dvou vodičů je efektivní, spolehlivý a oproti střídavému nízko-ztrátový na delší vzdálenosti. Tento systém může v případě poruchy bezpečně pracovat jako monopolární systém s uzemněním. Jeden bipolární systém vedení HVDC je z hlediska spolehlivosti srovnatelný s dvojitým střídavým přenosem. Jedna linka bipolárního HVDC systému se dvěma vodiči má tedy menší vliv na životní prostředí než dvojitá střídavá vedení se šesti vodiči. HVDC vedení tedy vyžaduje menší zastavěný prostor. U systému HVDC Light je možné použít pro stejnosměrný přenos extrudované polymerové kabely, které umožnily přenos velkých výkonů pomocí podzemních vodičů, vytvářející zajímavou alternativu k tradičnímu nadzemnímu vedení. [11]

Nižší přenosové ztráty

Přenosové ztráty HVDC systému jsou ve většině případů nižší než ztráty střídavého proudu. Optimalizovaná přenosová linka vysokonapěťového stejnosměrného přenosu má nižší ztráty než střídavé vedení stejné kapacity. Ztráty v každé konvertorové stanici představují zhruba 0,6 % přenášeného výkonu pro HVDC Classic a menší než 1 % pro HVDC Light.

V porovnání dvou způsobů přenosu elektrické energie vychází nižší celkové ztráty pro přenos HVDC, zhruba o 30-50%. Kabely HVDC systému mají také nižší ztráty než kabely střídavého proudu z důvodu jejich menšího počtu [11]. HVDC vedení Western Link spojující Skotsko s Walesem je dlouhé 420 km a umožní přenášet výkon 2200 MW o napětí ± 600 kV.

Celkové náklady na tento podmořský HVDC přenos činí 29 miliard korun a mezi jeho přednostmi patří velmi nízké výkonové ztráty rovnající se 3% (včetně kabelů a měničových stanic) z celkového přenosového výkonu. Pro srovnání přenosu HVDC a HVAC na vzdálenost 800 km při 2500 MW jsou zde uvedeny tyto hodnoty ztrát. Ztráty konvenční 400 kV AC linky dosahují hodnoty 9,4 %, pro ± 500 kV HVDC přenos je to 6% a pro napětí ± 800 kV HVDC představují ztráty pouze 2,6%. [12]

Nižší investiční náklady

Pro přenos většího množství elektrické energie na dlouhé vzdálenosti nabývající řádu několika stovek kilometrů, či tisíce kilometrů je přenos pomocí HVDC systému efektivnější a především levnější než střídavá linka o stejné přenosové kapacitě. Je však důležité podotknout, že investiční náklady na konvertorové HVDC měnirny jsou velmi vysoké z důvodu použití výkonových polovodičových součástek umožňující konverzi z AC/DC a poté na druhém konci vedení z DC/AC. Na určitou vzdálenost přesahující (600-800 km) u venkovních nadzemních vedení bude mít systém v podobě HVDC přenosu vždy nejnižší náklady. Zlomová vzdálenost výhodnosti stejnosměrného proudu oproti střídavému je u kabelového vedení spočítána na mnohem menší vzdálenost dosahující velikosti 50 km. Vzdálenost závisí na několika faktorech (jak pro vedení, tak pro kabely) a musí být provedena detailní analýza pro každý jednotlivý případ. V mnoha evropských projektech vyhrává v dnešní době výstavba stejnosměrného vedení. [11]

Pro případ dokázání skutečných porovnání obou typů přenosu elektrického výkonu je v této práci uvedena i studie zabývající se detailním popisem se skutečnými náklady na projekt HVDC systému nacházejícího se v Pakistánu, kde spojuje města Matiari a Lahore. Tento systém bude schopný přenášet výkon 4000 MW pomocí nadzemního vedení na vzdálenost 878 km při napětí ± 660 kV. Analýza celkových nákladů je provedena mezi systémy VSC-HVDC a HVAC.

Obě technologie jsou technicko-ekonomicky analyzovány prostřednictvím DCF (discounted cash flow), které dávají nesrovnalosti v ročních nákladech AC a celkových investičních nákladech IC. Roční náklady tvoří ztráty v rámci přenosové soustavy a náklady na prevenci a údržbu. Pojistné částky a spolehlivost systému však nebyla v této studii zvažována. Počáteční částka IA pokrývá cenu konvertorových stanic, nadzemního vedení, vypínačů, stožárů a pozemků spojených s výstavbou 878 km dlouhého vedení. [13]

Náklady na přenosovou soustavu jsou uvedeny v tabulce 2.1 jak pro sítě HVDC o napětí ± 660 kV, tak pro HVAC pracující s napětím 500 kV s uvažováním jejich potřebných zařízení pro správný provoz. Cena nadzemního vedení je včetně stožárů a použitých vodičů. V tabulce 2.1 jsou u střídavého vedení zahrnuty i náklady na statické kompenzátory jalového výkonu.

Zda-li bude výstavba projektu provedena pomocí HVDC či HVAC, určuje ekonomika projektu, protože vybudování nových vedení je v mnoha případech především otázkou celkových nákladů. Systém VSC-HVDC je relativně nová technologie a nabízí několik technických vý-

| Komponenty | VSC-HVDC | HVAC |
|--------------------------|----------|----------|
| Elektrické stanice | 800 M\$ | 283 M\$ |
| Nadzemní vedení | 915 M\$ | 1358 M\$ |
| Pozemky | 70 M\$ | 70 M\$ |
| STATCOM | | 141 M\$ |
| Čisté investiční náklady | 1785 M\$ | 1852 M\$ |

Tabulka 2.1: Porovnání investičních nákladů HVAC a VSC-HVDC systémů [13]

hod oproti HVAC, což je popsáno v odstavci technických výhod této kapitoly. Navrhovaný stejnosměrný systém se skládá ze dvou bipolárních přenosových systémů o napětí ± 660 kV s průřezem 4×1250 mm². Náklady na stanice VSC-HVDC se mohou snižovat díky pokrokům v oblasti výkonové elektroniky. Pokud je věnována náležitá pozornost oblasti průřezu a vzdálenosti linek, je celková potřebná investice pro vedení dlouhé 878 km u systému HVAC přibližně 1,48 krát vyšší než pro systém VSC-HVDC. Celková cena AC linky činí 1358 milionu dolarů pro vedení dlouhé 878 km, což činí 1,55 milionů dolarů za jeden kilometr vedení. Pro systém VSC-HVDC je celková cena pro jeden kilometr vedení 1,04 milionů dolarů. V oblasti investičních nákladů je systém VSC-HVDC levnější než HVAC systém o zhruba 67 milionů dolarů. [13]

| Komponenty | VSC-HVDC | HVAC |
|----------------------------|----------|----------|
| Čisté investiční náklady | 1785 M\$ | 1852 M\$ |
| Roční náklady AC | 60 M\$ | 90 M\$ |
| Čistá současná hodnota NPV | 2362 M\$ | 2785 M\$ |

Tabulka 2.2: Porovnání celkových nákladů systému HVAC a VSC-HVDC [13]

Pro ekonomické srovnání jsou definovány dvě složky: *údržba* (preventivní a nápravná) a *ztráty* systému. Ztráty v přenosové soustavě jsou důležitým ekonomickým ukazatelem. Ztráty v přenosové síti HVDC na bázi VSC jsou složeny ze ztrát (např. filtrů, transformátorů HVDC a IGBT tranzistorů). Tyto celkové ztráty činí zhruba 7,4% (1,8% u každé elektrické stanice) a zbývající 3,8% jsou způsobeny jouleovými ztrátami. Ztráty v systému HVAC se určují zvážením ztrát v elektrické stanici střídavého proudu, kde se nacházejí např. transformátory a kompenzační cívky, které tvoří 0,5% celkového výkonu a jsou zde započteny i ztráty vedení. Ztráty na vedení jsou způsobeny procházejícím proudem skrz vodiče. Roční náklady na údržbu činí 0,5% z celkových nákladů na komponenty. Celkové roční náklady na údržbu systému HVAC činí 2,06 M\$ a pro systém HVDC tato hodnota dosahuje velikosti 4,11 M\$. Náklady na HVDC jsou vyšší kvůli složitosti VSC stanic. [13]

Výsledkem zvýšených nákladů na údržbu přenosového systému HVAC je instalace statických synchronních kompenzátorů STATCOM. Toto zařízení optimalizuje toky výkonů v síti a jeho základním prvkem jsou trojfázové VSC měniče. Jeho obrovská přednost spočívá ve skutečnosti, že dokáže být zdrojem či spotřebičem jalového výkonu a umožňuje i určité možnosti regulace. Použití statických synchronních kompenzátorů je vhodné z důvodu možnosti jeho dynamického řízení napětí a možné stabilizace napětí v přenosových a distribučních sítích a zlepšení kvalitativních parametrů přenášené elektrické energie s možností řízení jalového i činného výkonu. [14]

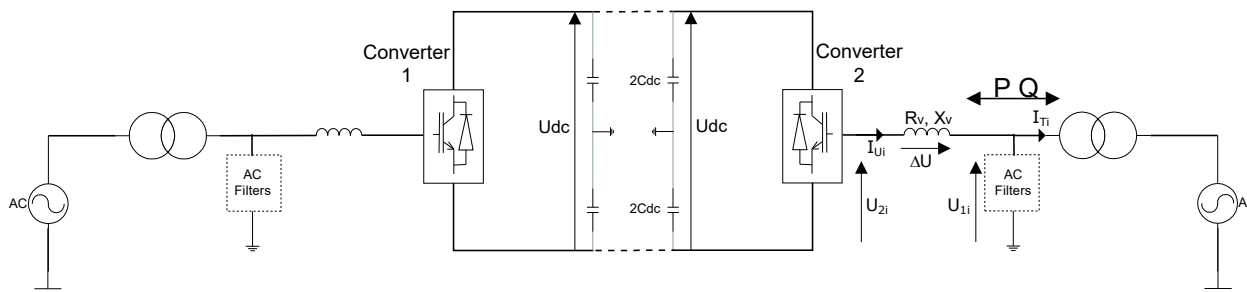
Celkové odhadované roční náklady na VSC-HVDC jsou tedy 60 milionů dolarů a pro HVAC činí zhruba 90 milionů dolarů.

Reálné ekonomické srovnání mezi HVAC a HVDC systémy je popsáno s aspektem na všechny významné zařízení obsahující oba typy přenosu. Výroba elektrické energie z tepelných, jaderných a větrných elektráren má být připojena do jižní oblasti Pakistánu do města Matiari, odkud musí za pomoci 878 km dlouhého vedení přenášet elektrický výkon do druhého největšího města Pakistánu Láhauru, kde žije více než 11 milionů obyvatel.

Celková hodnota přenosu VSC-HVDC systému dosahuje hodnoty 2362 M\$, což je zhruba o 423 M\$ menší cena než v případě HVAC. VSC-HVDC systém nabízí tedy nákladově efektivnější možnost výstavby a lepší přenosovou síť se schopností black-startu. HVDC systém má obrovský prostor možností v Pákistánu s inaugurací CPEC splnit požadavky na zatížení.[13]

2.3 Řízení HVDC sítí

V této kapitole bude sepsána problematika řízení VSC-HVDC systému, který je používán v širokém spektru po celém světě. Systém VSC-HVDC je použit ve více než 24 vybudovaných světových aplikacích, přičemž společnost ABB se zasloužila o 18 projektů. Základní fungování VSC-HVDC lze vysvětlit tím, že každý terminál je považován za zdroj napětí spojený s přenosovou sítí střídavého proudu pomocí sériových reaktorů. Tyto dva terminály jsou propojeny pomocí stejnosměrného spojení, jak je schematicky znázorněno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Topologie spojení VSC-HVDC [15]

Jak je uvedeno výše, převodník může být reprezentován jako variabilní střídavý zdroj napětí, kde amplituda, fáze a frekvence mohou být řízeny nezávisle na sobě. Znamená to, že VSC měnič, složený z IGBT tranzistorů lze vidět jako velice rychle ovladatelný synchronní

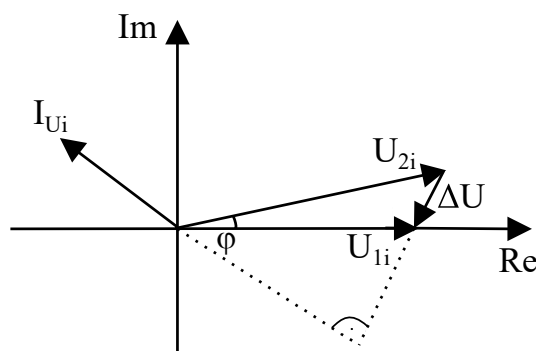
stroj s okamžitým fázovým napětím (U_{2i} na obrázku 2.5), které je popsáno v následující rovnici.

$$U_{2i} = \frac{1}{2}U_{dc}M\sin(\omega t + \varphi) + \text{harmonické} \quad (2.1)$$

kde M je modulační index, který je definován jako poměr špičkové hodnoty modulující vlny a špičkové hodnoty nosné vlny; ω je základní frekvence, φ je fázový posun výstupního napětí v závislosti na poloze modulační vlny.

Proměnné M a φ mohou být nezávisle nastaveny regulátorem VSC tak, aby poskytovaly libovolnou velikost napětí a fázového posunu ve vztahu k základnímu frekvenčnímu napětí v AC systému. Výsledkem je, že poklesem napětí (ΔU znázorněný na obrázku 2.5) na reaktoru (X_v znázorněný na obrázku 2.5) lze měnit hodnotu činného a jalového toku.

Obrázek 2.6 ukazuje základní reprezentaci napěťového fázoru VSC měniče pracujícího jako střídač dodávající jalový výkon do střídavé sítě. V tomto případě má výstupní napětí VSC měniče U_{2i} větší amplitudu a je fázově posunuto vzhledem ke střídavému napětí U_{1i} .



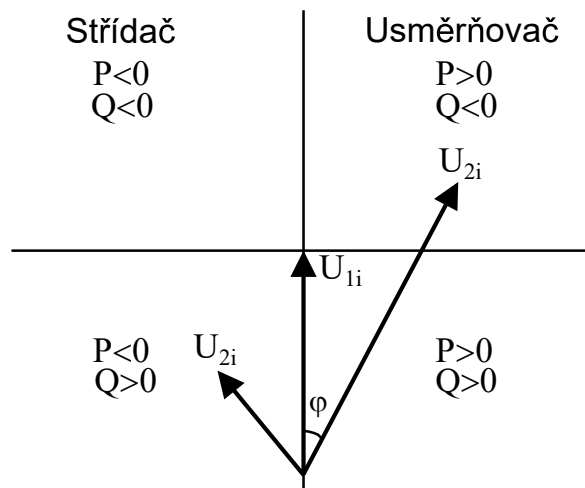
Obrázek 2.6: Fázorový diagram napětí a proudu [15]

Činný výkon procházející mezi konvertorem a sítí může být řízen změnou fázového úhlu φ mezi napětím generovaným měničem U_{2i} a napětím U_{1i} na sběrnici AC filtru. Činný výkon se vypočítá podle rovnice 2.2 za předpokladu bezeztrátového vedení X_v .

$$P = \frac{U_{2i}U_{1i}\sin\varphi}{X_v} \quad (2.2)$$

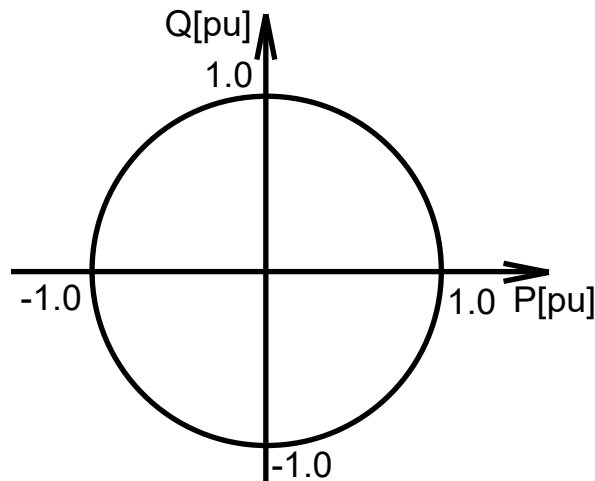
Tok jalového výkonu je určen amplitudou U_{2i} , která je řízena šířkou impulzů z měniče. Maximální výstupní střídavé napětí střídače závisí na hodnotě stejnosměrného napětí. Jalový výkon se vypočítá podle rovnice 2.3.

$$Q = \frac{U_{2i}(U_{2i} - U_{1i}\cos\varphi)}{X_v} \quad (2.3)$$



Obrázek 2.7: Fázorový diagram reprezentující provozní stavy konvertoru [15]

Fázorový diagram 2.7 představuje dva možné scénáře, v kterých se může měnič nacházet, levá část fázorového diagramu popisuje případ střídačového chodu, kde $P < 0$ a $Q > 0$ pro napětí U_{2i} . V pravé části diagramu je zobrazen usměřňovačový chod, u kterého je $P > 0$ a $Q < 0$. Pokud se předpokládá konstantní fázor síťového napětí, je z fázorového diagramu zřejmé, jak je činný a jalový výkon závislý na fázi a amplitudě napětí můstkového měniče. Je-li střídavé napětí sítě U_{1i} větší než napětí střídače U_{2i} , pak prochází činný výkon od střídavého zdroje směrem ke střídači. Pokud nebudeme uvažovat ztráty způsobené procházejícím proudem vodiče a ztráty v konvertorových stanicích, docílíme stavu, že v systému VSC-HVDC je činný výkon střídavého systému stejný jako činný výkon stejnosměrné linky v ustáleném stavu. Tento stav může být diskutován pouze na úrovni teoretických předpokladů, ve skutečnosti dochází vlivem průchodu proudu ke ztrátám, které rostou s druhou mocninou proudu. To může být splněno, pokud jeden ze dvou převodníků řídí činný výkon ve stejný čas, kdy druhý převodník ovládá stejnosměrné napětí. Výroba a spotřeba jalového výkonu může být použita pro kompenzaci, která je zapotřebí ve střídavé síti pro zlepšení účinníku $\cos\varphi$. Možnosti činného a jalového výkonu lze snadno vidět v diagramu P-Q uvedeném na obrázku 2.8. Pro jednoduchost jsou charakteristiky P-Q vykresleny pomocí jednotkových hodnot s předpokladem, že střídavé systémy na obou stranách pracují při napětí 1,0 p.u. Systém VSC-HVDC je schopen pracovat v jakémkoliv bodě uvnitř kruhu, potažmo na jeho kružnici. Poloměr kružnice představuje hodnotu zdánlivého výkonu. V připojených AC sítích k VSC-HVDC systému lze střídavé napětí řídit pomocí změny jalového toku. Říditelný činný výkon lze přenášet přes vedení v obou směrech se stejnou maximální hodnotou, která je omezena pouze jmenovitou hodnotou přenosové soustavy.

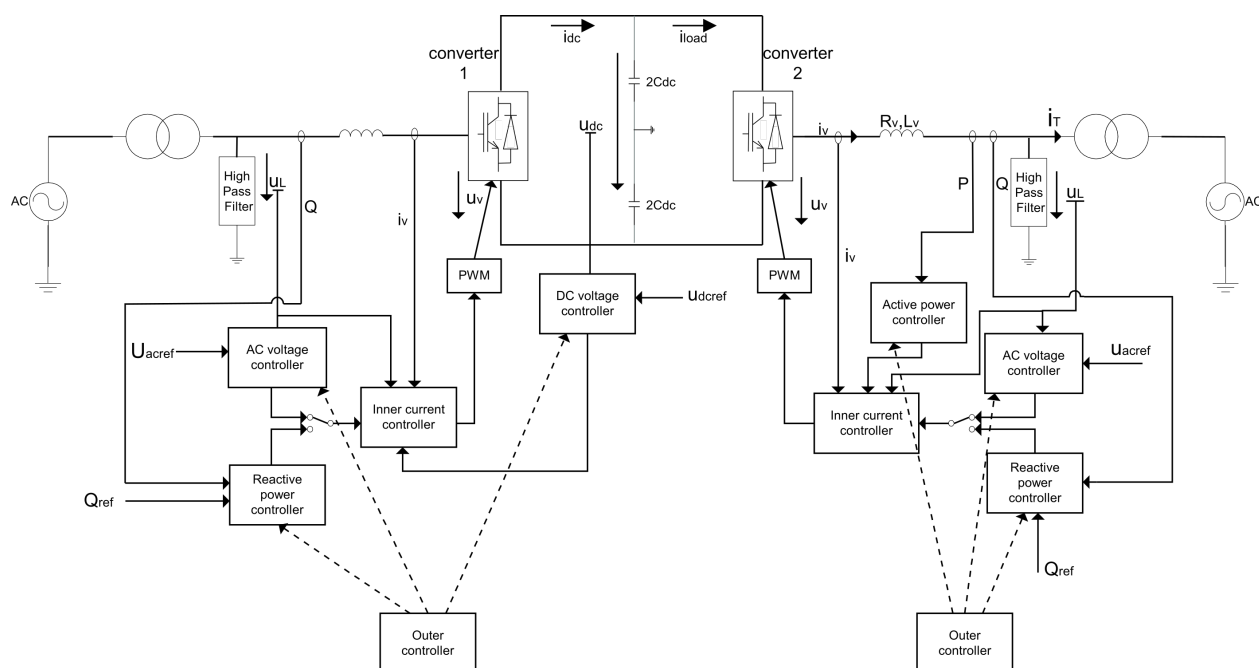


Obrázek 2.8: P-Q diagram VSC-HVDC systému [15]

Přenos energie pomocí výše zmíněného systému je řízen stejným způsobem jako u klasického připojení HVDC, což představuje následující princip: usměrňovač řídí stejnosměrné napětí a střídač umístěný na konci stejnosměrné linky řídí činný výkon. Stejně jako u klasických HVDC systémů může procházet tok proudu v obou směrech.

U klasických HVDC typů není možné jalový výkon ovládat nezávisle na činném výkonu. Použití VSC-HVDC systému s sebou přináší určitý stupeň volnosti, který představuje pomocí technologie PWM možnost nezávislého řízení jalového výkonu. Tok jalového výkonu může být řízen v každém měničích samostatně pomocí střídavého napětí, které je požadováno nebo nastaveno manuálním způsobem beze změny stejnosměrného napětí. Činný výkon může být řízen pomocí stejnosměrného napětí, či změnou frekvence střídavého proudu, popřípadě může být nastaven také manuálním způsobem na optimální hodnotu. Z celkového pohledu je tedy možné u použití systému VSC-HVDC řídit všechny důležité elektrické parametry, mezi které patří, tok činného výkonu, tok jalového výkonu, střídavé napětí, stejnosměrné napětí a frekvence střídavého systému.

Řídicí systém VSC-HVDC je založen na rychlé vnitřní proudové regulační smyčce řídicí střídavý proud. Ukazatele střídavého proudu jsou určeny vnějšími regulátory. Vnější regulátory zahrnují stejnosměrný regulátor napětí, střídavý regulátor napětí, regulátor činného výkonu, regulátor jalového výkonu a v neposlední řadě také regulátor frekvence. Referenční hodnota činného proudu může být odvozena od regulátoru stejnosměrného napětí, regulátoru účinného výkonu a frekvenčního regulátoru. Referenční hodnotu jalového proudu lze získat pomocí regulátoru střídavého napětí, či regulátoru jalového výkonu. Ve všech těchto regulátorech mohou být použity integrátory, které zajistí odstranění všech chyb v ustáleném stavu. Například, jak je znázorněno na obrázku 2.9, každá strana vedení obsahuje regulátor střídavého napětí a regulátor jalového výkonu. Každý z těchto regulátorů generuje referenční hodnotu pro vnitřní regulátor proudu. Vnitřní regulátor proudu vypočítá pokles napětí v konvertorovém reaktoru, který vede k požadovanému proudu.



Obrázek 2.9: Celková struktura řízení VSC-HVDC [15]

Je zřejmé, že všechny regulátory nelze použít současně. Volba vhodných druhů regulátorů pro výpočet referenčních hodnot proudu měniče bude záviset na aplikaci a může vyžadovat pokročilou studii elektrického systému. Pro konkrétní přiblížení problematiky je vhodné uvést, že např.: regulátor činného výkonu může být použit pro ovládání činného výkonu měniče, regulátor jalového výkonu je racionálně použit pro řízení jalového výkonu, regulátor střídavého napětí, který se obvykle používá, když systém dodává pasivní síť, může být použit k udržení střídavého napětí.

Pokud je zátěž pasivního charakteru, pak VSC-HVDC systém může řídit frekvenci a střídavé napětí. Je-li zatížením stejnosměrné linky střídavý systém, pak VSC-HVDC může regulovat střídavé napětí a tok výkonu.

Pro dosažení bilanční rovnováhy výkonu je nezbytný regulátor stejnosměrného napětí, který zaručí vyvážený tok činného výkonu přes stejnosměrné vedení. Činný výkon vytékající ze stejnosměrné linky je oproti vstupujícímu snížen o ztráty v celkovém HVDC systému, jakýkoliv jiný rozdíl by znamenal, že se napětí v systému rychle změní. Hodnotu procházejícího činného výkonu, která musí být v určitých mezích systému, mohou nastavit příslušné konvertory. Ve všech provozních stavech zajistí regulátor stejnosměrného napětí bilanční rovnováhu činného výkonu. [15]

2.3.1 Řídící a ochranný systém MACH

Řídící systém je mozkiem všech přenosových HVDC systémů. Jednou z nejdůležitějších předností moderní techniky HVDC je ovladatelnost. Řídící systém MACH poskytuje bezkonkurenční výpočetní kapacitu a umožňuje vysoký stupeň integrace a manipulace se všemi řídicími a ochrannými funkcemi. Kromě toho ovládání MACH poskytuje pokročilé funkce zjišťující

vzniklé chyby systému a možnosti dálkového ovládání. Systém je navržen tak, aby běžel nepřetržitě po dobu více než třiceti let, což umožňuje systému HVDC, aby byl po celou dobu jeho životnosti kontrolován a chráněn nejspolehlivějším způsobem. Pro splnění současných a budoucích požadavků společnost ABB vyvinula systém MACH jako plně počítačový systém s využitím nejmodernějších počítačů, mikroprocesorů a digitálních signálních procesorů spojených vysoce výkonnými průmyslovými standardními sběrnici a optickými komunikačními linkami. Díky rozsáhlému použití počítačů a mikroprocesorů bylo možné zahrnout velmi silný vnitřní dohled na provoz HVDC systému, což eliminuje pravidelnou údržbu řídicí techniky. Systém se skládá ze serverů pro řízení a monitorování stanic, pracovních stanic operátorů, řídicích a ochranných hlavních počítačích, jednotek digitálních signálních procesorů, I / O systémů a řídicích jednotek ventilů. Díky modularitě a vysokému výkonu zařízení MACH je typ hardwarového a systémového softwaru používaného pro řídicí systém VSC-HVDC stejný jako u řídicího systému LCC-HVDC nebo FACTS. Ve skutečnosti se liší pouze aplikační software a způsob řízení ventilu. Možnost aktualizace softwaru ke zlepšení HVDC systému je další výhodou řídicího a ochranného systému MACH, což představuje, že i starší systém HVDC se může těšit na výhody skvělé ovladatelnosti. To je výborný způsob, jak prodloužit životnost stávajícího přenosového spojení s rychlým dokončením projektu a minimálním přerušáním přenosu. [16]

2.4 Hybridní HVDC vypínač ABB

Technické požadavky na stejnosměrné vypínače HVDC jsou velmi vysoké, poněvadž doba povolená k přerušení procházejícího proudu je kratší než u srovnatelné střídavé aplikace kvůli nižší impedanci vedení (což představuje skutečnost, že pokles napětí způsobený poruchou se může šířit rychleji). Hybridní vypínač může být sestaven pro obousměrné přerušení proudu za pomoci anti-sériově zapojených IGBT modulů. Zkratový proud musí být obvykle vypnut do 5 ms, aby nedošlo k ovlivnění konvertorových stanic vzdálených 200 km. Poruchy musí být odstraněny v řádech milisekund, poněvadž měničové stanice se obvykle spoléhají na stejnosměrné napětí, které musí dosahovat pro požadavky normálního provozního režimu minimálně 80 % její jmenovité hodnoty. Kratší doba odstranění závady znamená nižší požadavky na rozptýlení výkonu v buňkách svodičů přepětí, ale vyžaduje vyšší požadavky na napěťovou schopnost svodiče, což vede k vyšší finanční náročnosti na celý vypínač.



Obrázek 2.10: Hybridní HVDC vypínač ABB [20]

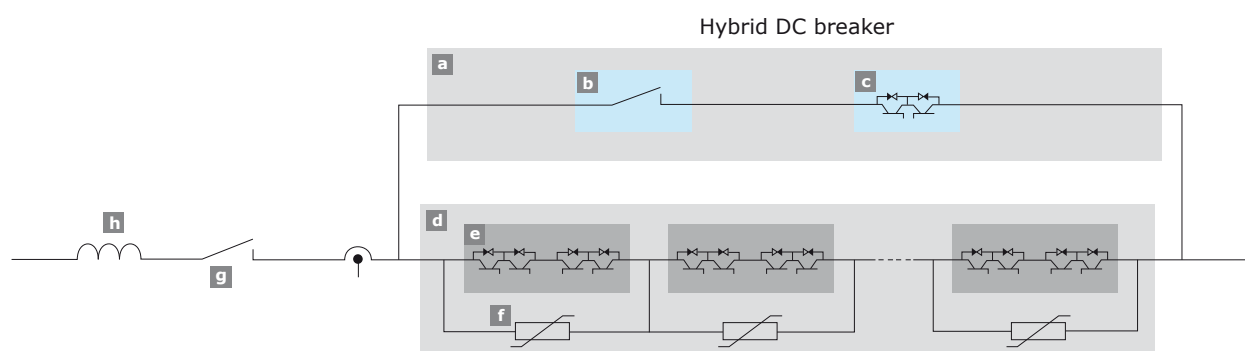
Čistě mechanický vypínač HVDC může odstranit poruchu na lince během několika desítek milisekund, ale pro splnění požadavků spolehlivé sítě HVDC jsou tyto časy příliš pomalé. HVDC vypínače založené pouze na polovodičové technologii mohou snadno docílit rychlých vypínacích časů pro omezení zkratového proudu, ale jelikož jsou polovodiče trvale zapojeny ve větvi procházejícího nominálního proudu, dochází k velkým ztrátám, které jsou typické v rozsahu 30% celkových ztrát konvertorové stanice. Hybridní HVDC vypínač může být integrován do stanice DC konvertoru nebo může být proveden jako samostatná instalace. Detailní porovnání všech typů vypínačů lze shledat v mé bakalářské práci [3] a principy jednotlivých vypínačů používaných ve stejnosměrných obvodech lze shledat v 1. kapitole této práce. Doba přerušení je závislá na době odezvy ochrany a době působení HVDC vypínače. Delší vypínací doba vypínače vyžaduje, aby měl HVDC vypínač vyšší maximální schopnost přerušení proudu. To také zvyšuje energii, kterou musí svodič přepětí svést do země, což odpovídajícím způsobem zvyšuje celkové náklady na HVDC vypínač. Je proto důležité, aby doba přerušení byla co nejkratší. Je-li výrobcem stanoven vypínací čas a maximální proudová vypínací schopnost vypínače, pak jediným zbývajícím nastavitelným parametrem je indukčnost reaktoru HVDC (který určuje rychlost proudového nárůstu). Zmíněný reaktor se nachází na obrázku 2.11h.

Velikost reaktoru HVDC může být naopak omezena faktory, jako jsou náklady a stabilita rozvodné sítě HVDC. Doba povolená pro odstranění poruchy ovlivní požadovanou napěťovou schopnost svodiče a také napěťovou ochranu, která hlídá velikost napětí v požadovaných mezích.

Za předpokladu, že je doba přerušení pomocné větve hybridního vypínače zhruba 2 ms (obrázek 2.13), a pokud se HVDC porucha nachází v blízkosti rozvaděče HVDC, pak díky reaktoru o hodnotě 100 mH v 320 kV HVDC systému s 10% maximálním přepětím bude maximální vzestup poruchového proudu 3,5 kA/ms. U tohoto systému prochází jmenovitý proud 2 kA, a jeho vypínací schopnost dosahuje 9 kA.

2.4.1 Konstrukce vypínače s detailním popisem vypínacího procesu

Hybridní HVDC vypínač společnosti ABB, zobrazený na obrázku 2.11, pracuje na principu, při kterém prochází proud během vypínacího procesu všemi třemi větvemi. Hlavní proudová větev hybridního vypínače 2.11a se skládá z ultra-rychlého spínače *UFD* 2.11b zapojeného sériově ke komutačnímu vypínači *LCS* 2.11c. V průběhu normálního bezporuchového stavu protéká proud pouze hlavní větví obvodu 2.11a. Při výskytu poruchy v HVDC systému zajistí komutační vypínač *LCS* přepnutí zkratového proudu do komutační větve, která je též nazývána jako větev hlavního vypínače 2.11d.



Obrázek 2.11: Schéma zapojení hybridního HVDC vypínače společnosti ABB [18]

Vypnutí hlavní větve obvodu nastává po zvýšení proudu o 20% nad jmenovitou hodnotu, čímž dochází k poruchovému stavu a následně se po časovém zpoždění iniciuje vypínací signál komutačního spínače *LCS*. Zkratový proud již neprochází hlavní větví 2.11a a se zpožděním 250 μs po vypnutí komutačního vypínače *LCS* dochází k vypnutí ultra-rychlého spínače *UFD*. Kontakty mechanického spínače 2.11b jsou rozpojeny v bezproudovém stavu při nízkém napětí, což umožňuje provést toto zařízení jako odpojovač s lehkým kontaktním systémem. Pohony Thomson mají za následek rychlé otevření kontaktů a jako izolační médium je zde použit plyn SF6. Pro přenesení poruchového proudu do komutační větve vypínače se musí otevřít všechny hlavní buňky *LCS*. V případě určitého omezení proudu se všechny buňky otevírají

v závislosti na zjištěném místě poruchy vyhodnoceným DC systémem řízení s příslušnými ochranami.

Po vypnutí ultra-rychlého spínače je komutační vypínač ochráněn od primárního napětí, které se následně rozvine přes pomocnou větev hybridního vypínače 2.11d. Výsledná hodnota napětí komutačního spínače je tedy výrazně snížena ve srovnání se složkou, která zůstává v hlavní proudové cestě po celý spínací cyklus.

Hybridní vypínač společnosti ABB 2.11 je tvořen výčtem těchto prvků:

- (a) Hlavní větev hybridního vypínače skládající se z (b) a (c)
- (b) Ultra-rychlý mechanický spínač UFD
- (c) Komutační spínač LCS
- (d) Pomocná větev hybridního vypínače ABB složená z prvků (e) a (f)
- (e) Polovodičový vypínač složený z IGBT tranzistorů
- (f) Svodiče přepětí
- (g) Reziduální stejnosměrný vypínač RCD
- (h) Tlumivka omezující velikost proudu

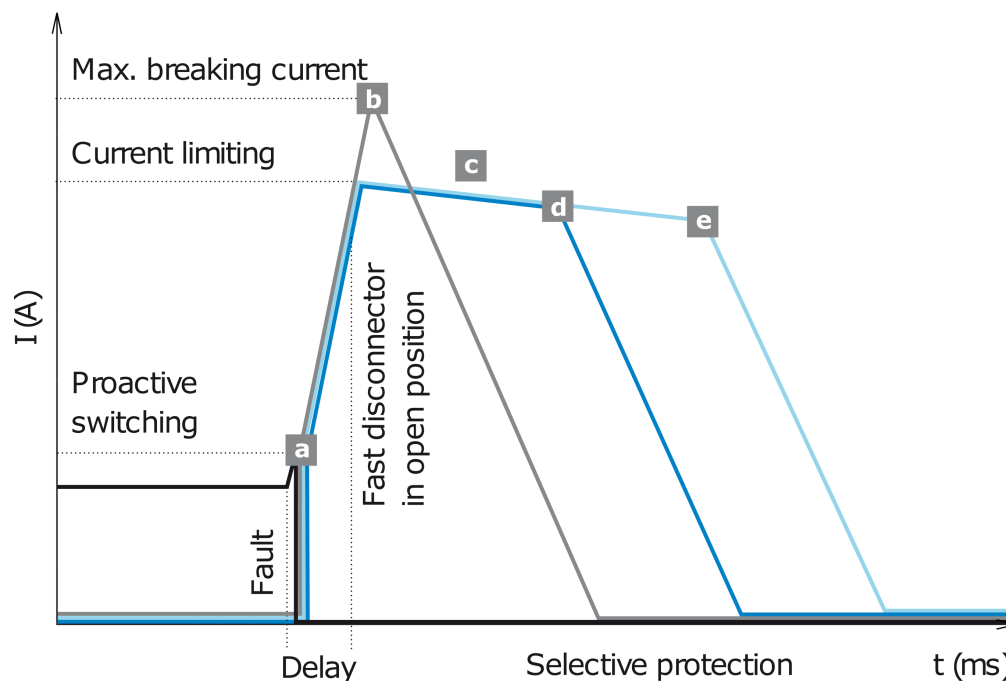
Pomocná větev hybridního HVDC vypínače 2.11d, založená na bázi polovodičů (IGBT tranzistorů), je rozdělena na několik sekcí 2.11e s jednotlivými svodiči přepětí 2.11f, které omezují během vypínacího procesu v každé buňce napětí 2.11e na určitou úroveň.

Po svedení proudu téměř k nulové hodnotě za pomoci svodičů přepětí zajistí reziduální vypínač *RCD* přerušení proudové cesty do 1 s a ochrání tak jednotlivé svodiče přepětí od procházejícího zbytkového proudu, který způsobuje tepelné namáhání.

Proaktivní řízení hybridního vypínače HVDC umožňuje kompenzovat časové zpoždění ultra-rychlého spínače, pokud je jeho doba menší než doba potřebná pro selektivní ochranu. Proaktivní proudová komutace je spuštěna pomocí vestavěné nadproudové ochrany hybridního HVDC vypínače, jakmile proud HVDC systému překročí určitou úroveň nadproudu, tento proces je viditelný na obrázku 2.12a. Tato hodnota je o 20% vyšší než jmenovitá velikost proudu. Pomocná větev hybridního vypínače zpožďuje přerušení poruchového proudu do doby, než je přijat vypínací signál, nebo když je zkratový proud v blízkosti maximální proudové vypínací schopnosti pomocné větve hybridního vypínače, viz 2.12b.

Pomocná větev hybridního vypínače může pracovat v režimu, který umožní omezit hodnotu vypínacího proudu poskytující určité prodloužení doby před vybavením vlastní zabezpečovací ochrany hybridního vypínače, obrázek 2.12c. Pomocná větev hybridního vypínače řídí pokles napětí v HVDC reaktoru k nulové hodnotě, aby se zabránilo dalšímu nárůstu elektrického proudu. Maximální doba režimu omezující zkratový proud závisí na schopnosti

rozptylu energie v blocích svodiče přepětí 2.12d. Pro hybridní vypínače HVDC je možné použít rychlou záložní ochranu podobnou, která se používá u čistých polovodičových vypínačů. V případě selhání vypínače lze záložní vypínače aktivovat téměř okamžitě - obvykle do méně než 0,2 ms. Tím se zabrání možnosti velkých poruch v rozvodné HVDC síti a zachová se požadovaná schopnost přerušení zkratového proudu.

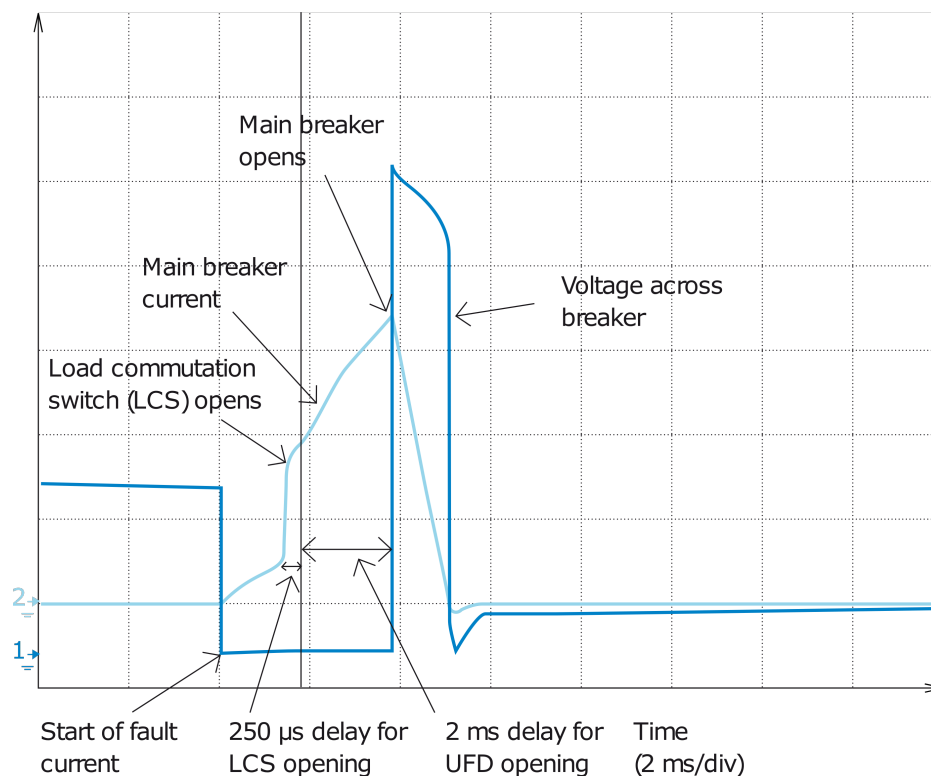


Obrázek 2.12: Řídící proces vypínání hybridního vypínače ABB [18]

- (a) V tomto okamžiku dochází k otevření komutačního spínače LCS (load commutation switch)
- (b) Maximální proudová vypínací schopnost pomocné větve, tedy celého vypínače
- (c) Omezení hodnoty proudu
- (d) Externí vypínací signál selektivní ochrany k hlavnímu vypínači HVDC
- (e) Maximální teplotní ochrana pomocné větve hybridního vypínače

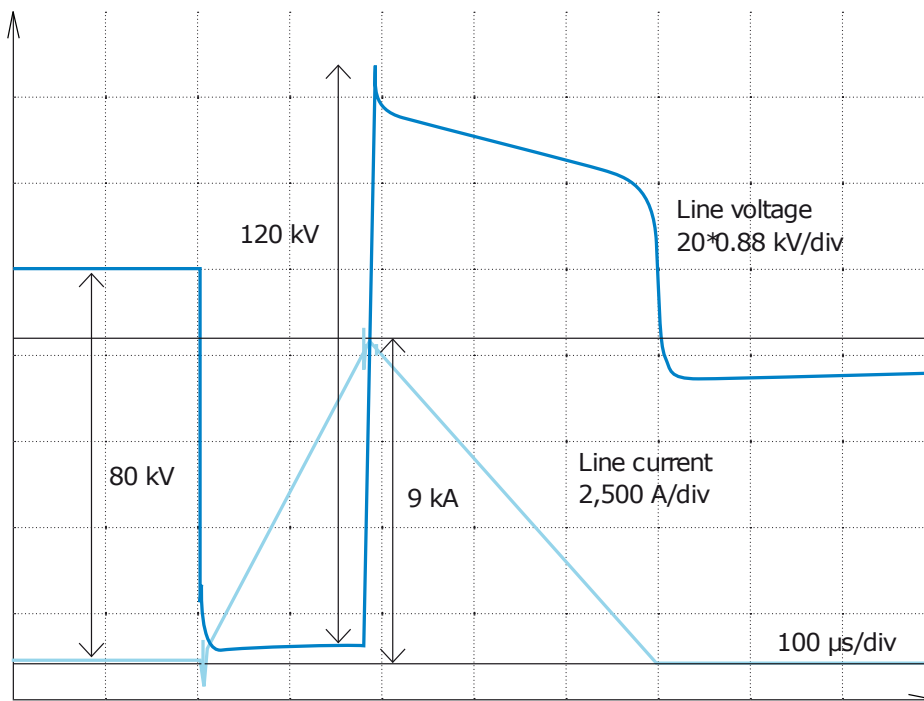
Kompletní hybridní HVDC vypínač byl ověřen společností ABB s maximálním vypínacím proudem dosahujícím 9 kA při 2 ms časovým zpožděním pro otevření ultra-rychlého vypínače připojeného paralelně k pomocné větvi, které zajišťuje vypnutí maximálního procházejícího zkratového proudu, zobrazeného na obrázku 2.13. Maximální vypínací hodnota zkratového proudu pro stávající generaci polovodičů činí 9 kA. Další generace polovodičových zařízení umožní vypínací hodnotu proudu až 16 kA. Účelem prováděných testů společnosti ABB bylo ověřit spínací výkon výkonových elektronických částí a rychlost otevření mechanického ultra-rychlého vypínače. Testovaná sestava je složena z jednoho jednosměrného hlavního vypínače

o napětí 80 kV spolu s ultra-rychlým vypínačem a komutačním spínačem *LCS*. Vyšší jmenovité napětí je dosaženo připojením několika IGBT článků do série. Zavedení technologií BIGT (bimode insulated gate transistor), které zahrnují funkčnost zpětné vodivé diody na IGBT čípech, zdvojnásobí stávající schopnost proudové hodnoty.



Obrázek 2.13: Vypínací proces hybridního vypínače ABB [18]

Na výše uvedeném obrázku 2.13 je možné sledovat průběhy napětí a proudu na hybridním vypínači ABB. Světle modrý průběh značí průchod proudu hybridním vypínačem, v nominálním stavu neprochází vypínačem žádný proud. V době vzniku zkratu je z obrázku zřejmé, že napětí z 80 kV klesne na nulovou hodnotu a proud bude zvyšovat svoji hodnotu. Vypínací proces trvá celkově zhruba 6 ms, přičemž jeden dílek v grafu představuje hodnotu 2 ms. Po dobu 2 ms protéká zkratový proud hlavní větví vypínače, respektive do 1,75 ms dojde k vypnutí komutačního vypínače *LCS* umístěného v hlavní větví vypínače, poté je zkratový proud komutován do pomocné větve, kde stále zvyšuje svou hodnotu a po vypnutí *LCS* vypínače dochází po 250 μ s k vypnutí ultra-rychlého vypínače v téže větví. Po 4 ms je vypnuta i pomocná větev hybridního vypínače a nyní nastává okamžik zajišťující svedení nahromaděné energie na nulovou hodnotu pomocí svodiče přepětí.



Obrázek 2.14: Ověření modulárního IGBT vypínače [18]

Po dobu vzniku zkratu je napětí na vypínači až do doby vybavení svodiče přepětí nulové. Hybridní vypínač HVDC je navržen tak, aby dosáhl schopnosti přerušení proudu 9 kA s jmenovitým napětím 320 kV a jmenovitým přenosovým proudem 2 kA.

Ověřovací test IGBT vypínače pomocné větve je vyobrazen na obrázku 2.14. V provedené simulaci byl proveden test na maximální přetěžovací proud dosahující velikosti 9 kA. Během proudové komutace bylo na skupině IGBT vypínače naměřeno napětí 120 kV. Vypínací schopnost jednoho IGBT článku tedy přesahuje více než 1 GVA.

Skupina tvořící svodič přepětí zajišťuje svedení proudu k nulové hodnotě za co nejkratší možnou dobu tím, že jejich celková vnitřní ochranná úroveň je zvolena tak, aby byla 1,5 násobkem jmenovitého stejnosměrného napětí. Ochranná napěťová úroveň svodičů přepětí tvoří hlavní konstrukční parametr pro celkové jmenovité napětí hybridního vypínače. Nicméně, minimální schopnost rozptylu elektrické energie v absorpční větvi je závislá na počtu paralelních ZnO bloků, či MOV varistorů, které budou různě specifické pro daný projekt s ohledem na četnost poruchových událostí, počet pokusů o restartování při poruchové události nebo proudové absorpci tvořící celkovou vypínací dobu vypínače, která patří mezi nejdůležitější faktory pro strategickou ochranu systému. [18], [19], [20], [21]

2.4.2 Komutační spínač LCS

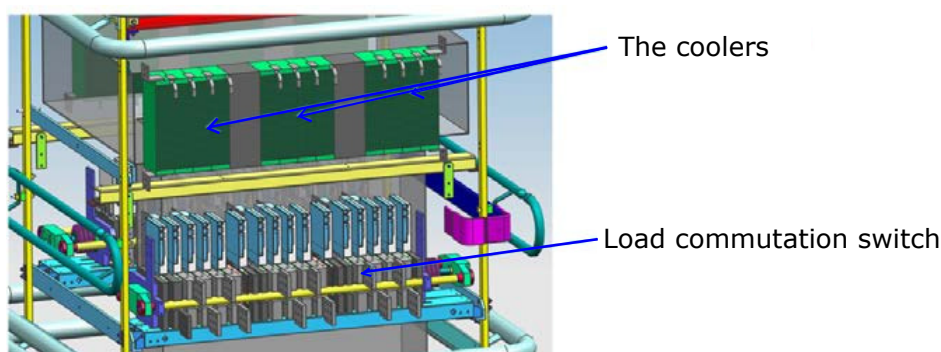
Komutační spínač *LCS* obsahuje pouze malý počet modulů IGBT, které umožňují přenos jakéhokoliv poruchového proudu na hlavní vypínač pomocné větve. Pro obousměrné přerušení elektrického proudu je nutné zapojit IGBT moduly anti-sériově. Sériově připojené, redundantní IGBT HVDC vypínací moduly zlepšují spolehlivost komutačního spínače. Pro oba

směry toku proudu byla vybrána pro komutační spínač matice o velikosti 3 x 3 IGBT modulů zapojených v hlavní větvi obvodu. U komutačního spínače *LCS* je zapotřebí chladicí systém z důvodu nepřetržitého vystavení procházejícímu proudu. Chladicí systém je závislý na místě instalace hybridního DC vypínače. Pokud je hybridní DC vypínač instalován v blízkosti konvertorové stanice, může být chladicí systém integrován s vodním chladicím systémem této stanice. Není-li vypínač součástí konvertorové stanice musí mít samostatný chladicí systém. Pro tento případ se využívá chladicí systém Cothex, který je založen na pasivním dvoufázovém konceptu odpařování/kondenzace s chlazením vzduchem.

| Typ | Max. IGBT ztráty | Max. ztráty diod | Topologie zapojení |
|-----|------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 1.5 kW | 1.3 kW | 3x3 |
| 2 | 2.5 kW | 2.2 kW | 2x2 |

Tabulka 2.3: Typy konstrukčního provedení komutačního spínače *LCS* (výkonové ztráty jsou spočteny na jednu součástku) [19]

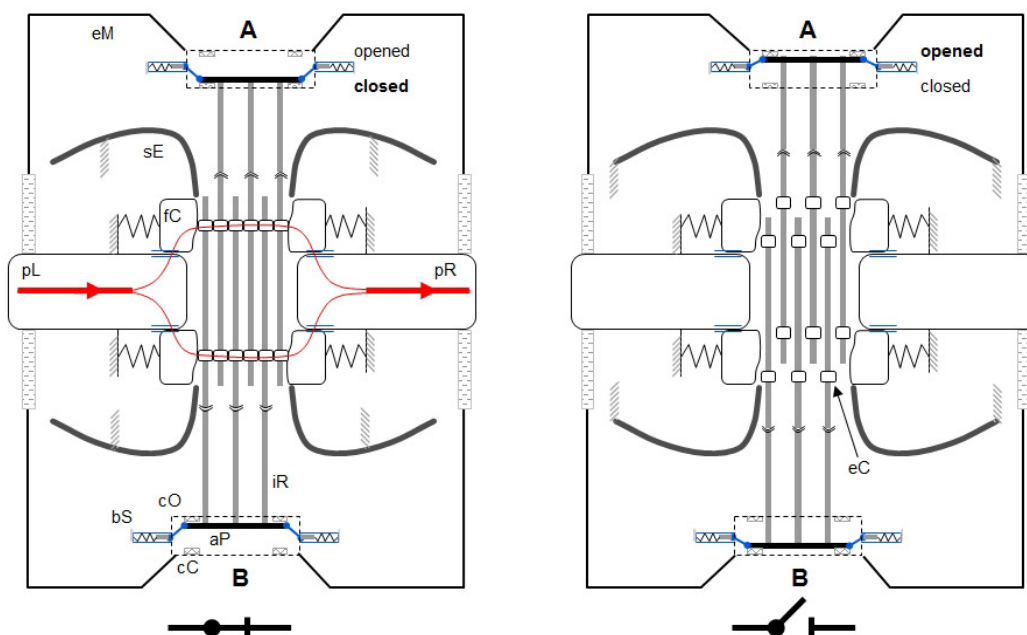
Na obrázku 2.21 jsou zobrazeny *stacky* komutačního spínače s třemi chladicími termosyfonovými jednotkami.



Obrázek 2.15: Komutační spínač *LCS* s termosyfonovým chladicím systémem, viz 2.11c [19]

2.4.3 Ultra-rychlý vypínač *UFD*

Maximální doba otevření *UFD* je tedy určena maximálním zkratovým proudem (omezeným hlavním vypínačem) a rychlostí vzestupu poruchového proudu (omezena reaktorem a impedancí vedení). Pro hybridní vypínač s jmenovitým stejnosměrným napětím 320 kV a jmenovitým proudem 2600 A je doba od spouštěcího signálu k dielektrické izolaci *UFD* nižší než 2 ms. Doba otevření ultra-rychlého odpojovače je zhruba desetkrát nižší než u běžně dostupných vypínačů HVAC. Kontaktní systém zobrazený na obrázku 2.16 má lehkou a kompaktní konstrukci založenou na multisegmentovaných elektrických kontaktních prvcích (eC), které se pohybují ve směru kolmém na dráhu proudu (pL, pR). To umožňuje rychlé přerušování proudu a zvětšení dielektrické izolace mezi kontakty.

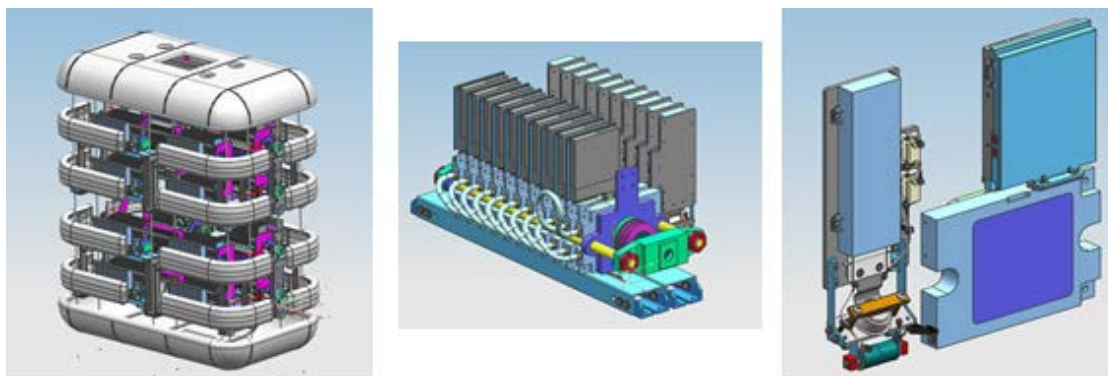


Obrázek 2.16: Průřezový pohled na kontaktní systém UFD, (vlevo-sepnut, vpravo-otevřen), viz 2.11b [19]

Dvě axisymetrické elektrody (sE) poskytují dielektrické stínění kontaktů s pružinou (fC) stlačující pohyblivé kontakty (eC), které v uzavřené poloze tvoří dva paralelní kontaktní stohy vedoucí zatěžovací proud. Pohyblivé kontaktní prvky (eC) jsou zabudovány do plochých izolačních tyčí (iR). Tyto izolační tyče jsou připojeny k pohonům pracujícím na principu odpudivé síly založené na známém principu Thomsonovy cívk. Poskytují rychlou odezvu na vypínací signál, vysoké zrychlení až 3000 g s duálním pohybem kontaktů. Kontaktní systém včetně pohonů je umístěn uvnitř kovového krytu typu GIS (eM) s použitím stlačeného izolačního plynu SF₆, což podstatně snižuje potřebné izolační vzdálenosti a tím i hmotnost celého kontaktního systému. Externí řídicí a kontrolní jednotka obsahuje před-nabitě kondenzátory sloužící jako zásobník energie pro jednotlivé pohony, řídicí a kontrolní obvody.

2.4.4 Hlavní vypínač v pomocné větvi

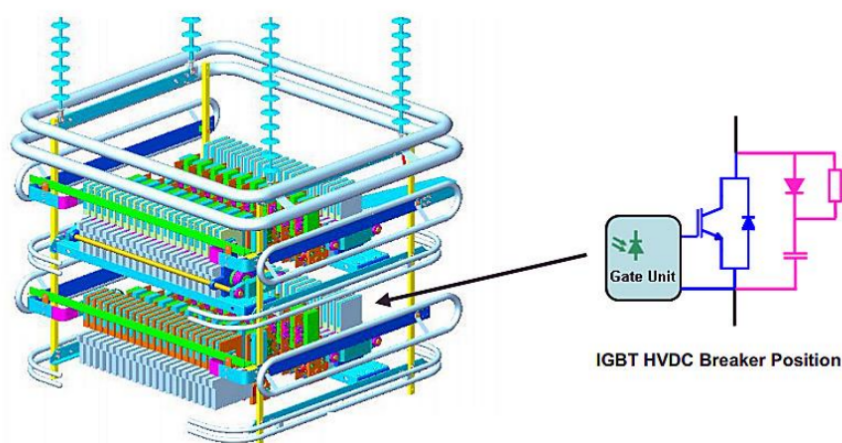
Hlavní vypínač pomocné větve se skládá z 80 kV článků. Pro vyšší úroveň napětí je zapotřebí vyšší počet IGBT buněk. Ke každé skupině IGBT tranzistorů je paralelně připojen vlastní svodič přepětí, který umožňuje koordinovat požadavky na absorpci energie. Během vypínacího procesu se napětí na každé buňce zvyšuje na maximální ochrannou úroveň svodiče přepětí, která u tohoto typu činí 120 kV (1,5 násobek napětí IGBT vypínače). Každý *stack* obsahuje 10 IGBT modulů, které tvoří celkový vypínač v pomocné větvi. Každá skupina IGBT tranzistorů hlavního vypínače pomocné větve je složena ze čtyř sériově spojených *stacků* pro vypnutí procházejícího proudu v jednom směru. Pro obousměrné přerušení toku proudu musí být anti-sériově spojeno 8 *stacků*. Mechanická struktura dvojitého článku může mít 160 kV.



Obrázek 2.17: Design hlavního vypínače pomocné větve, viz 2.11e [19]

V jiném uvedeném případě HVDC vypínač obsahuje čtyři vypínací HVDC *stacky*, jejichž prototypy jsou zobrazeny na obrázku 2.21. Pro přerušení proudu v obou směrech jsou nutné dva *stacky*. Každý *stack* se skládá až z dvaceti sériově zapojených IGBT vypínačů. Použití *packu* IGBT tranzistorů s jmenovitým napětím 4,5 kV umožňuje kompaktní konstrukci *stacku* a zajišťuje stabilní režim zařízení při zkratu v případě selhání jednotlivých komponent. Chladicí systém není v pomocné větvi pro IGBT tranzistory vyžadován, jelikož v nominálním provozu nejsou vystaveny procházejícímu elektrickému proudu. Pro splnění požadavků na jmenovité napětí u komutačního spínače je pro každý směr toku proudu nutný jeden IGBT vypínač. Paralelní spojení IGBT modulů zvyšuje hodnotu jmenovitého proudu hybridního HVDC vypínače.

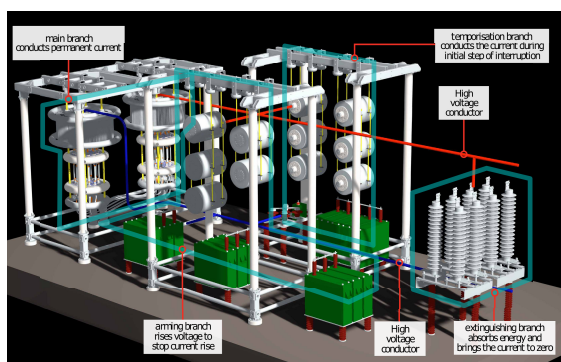
V odborné publikaci [19] byl otestován hlavní vypínač skládající se z několika modulů IGBT proti možné poruše jednoho z modulů. Pokud dojde k selhání jednoho IGBT modulu v pomocné větvi během komutace, je zde zajištěno, že případná porucha neovlivní ostatní moduly a zkratový proud tak může být vypnut. Podle testů má maximální proud v pozicích vedle modulu IGBT, který selhal, 0,6 kA a IGBT modul a jeho snímač přežívají.



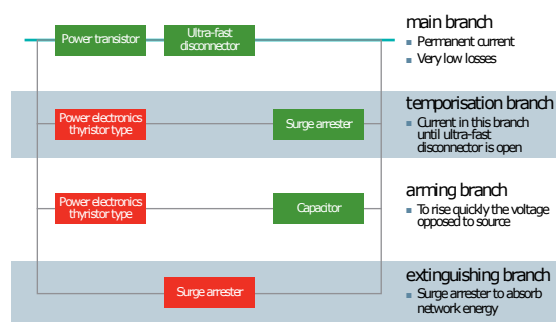
Obrázek 2.18: Design 80 kV IGBT vypínače umístěného v pomocné větvi, viz 2.11e [18]

2.5 Hybridní vypínač Alstom

Společnost Alstom vytvořila společně s partnery z různých zemí, pracujícími společně na evropském projektu TWENTIES, prototyp vypínače pro DC napětí 120 kV vyhovující provozu v dané stejnosměrné síti a také provedla řadu specifických testů inspirovaných normami IEC, které zajišťují testy vypínačů HVAC. Jednou z technologických možností bylo optimalizovat stávající DC vypínač novým požadavkům, který se používá ve spojení HVDC point-to-point. Tento DC vypínač však s dobou přerušení v rozmezí od 27 ms do 40 ms je poměrně pomalý, protože jeho hlavním prvkem je konvenční střídavá komora pro zhášení oblouku. Další možností bylo spojit výkonovou elektroniku s ultra-rychlým odpojovačem. Tato varianta řešení byla pro prototyp vybrána, jelikož vyniká nízkými ztrátami v hlavním obvodu proudu a její vypínací čas je mnohonásobně kratší než u konvenčního vypínače bez použití výkonových polovodičových součástek a navíc neobsahuje plyn SF₆. Pro přerušení stejnosměrného zkratového proudu musí DC vypínače pracovat 10 až 20krát rychleji než vypínače v AC sítích. Proudové přerušování DC sítí proto musí být provedeno velmi přesně a mnohem rychleji.



(a) Konstrukční uspořádání



(b) Popis jednotlivých větví

Obrázek 2.19: Hybridní vypínač Alstom [22]

Na obrázku 2.19 se nachází konstrukční uspořádání 2.19a hybridního vypínače Alstom, které udává grafický přehled s jednotlivými prvky celého obvodu. V tomto obrázku jsou červenou a modrou barvou vyznačeny vodiče vysokonapěťového stejnosměrného přenosu. V levé části obrázku lze shledat hlavní větev vypínače složenou z výkonových polovodičů (IGBT tranzistorů) a *UFD* vypínače, kterou v nominálním bezporuchovém stavu permanentně prochází proud. V horní části 2.19a je umístěna *temporizační* větev, či jiným názvem *zpoždovací*, jež umožňuje průchodu proudu v prvním komutačním stavu, kdy je již výkonový polovodičový vypínací prvek hlavní větve vypnutý. Počet paralelních *zpoždovacích* větví je závislý na dané aplikaci a jeho počet roste v závislosti na jmenovité hodnotě HVDC vedení s ohledem na rovnoměrné rozložení zkratového proudu do jednotlivých větví při vypínacím procesu. Ve spodní části konstrukčního uspořádání je možné spatřit *aktivační* větev složenou z výkonových GTO tyristorů s příslušnými kondenzátory. Touto větví protéká zkratový proud v předposlední fázi vypínacího procesu, kdy se napětí na vypínači postupně zvyšuje a pomocí zkratového proudu

jsou nabíjeny jednotlivé skupiny kondenzátorů. Po dosažení vypínací schopnosti této větve je aktivován svodič přepětí, jež odvede z obvodu nahromaděnou energii ve formě proudu k nulové hodnotě.

Obrázek 2.19b popisuje jednotlivé uspořádání proudových větví hybridního vypínače Alstom. Hybridní vypínač sestává z následujících větví s těmito prvky:

- Hlavní větev - výkonové IGBT tranzistory a ultra-rychlý odpojovač UFD
- Temporizační (zpožďovací) větev - Výkonové tyristory se svodiči přepětí
- Aktivační větev - Výkonové tyristory s kondenzátory
- Absorpční větev - Svodiče přepětí, respektive metal-oxidového varistoru MOV

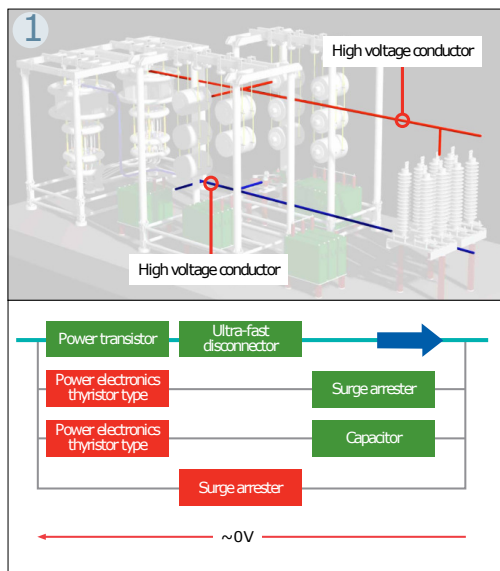
V následujících krocích bude popsána problematika vypínacího průběhu hybridního vypínače Alstom. Na všech obrázcích 2.20 je barevně znázorněn stav jednotlivých prvků obvodu. Zelená barva prvku značí zapnutý stav, červené zbarvení prvku představuje vypnutý stav a žlutý reprezentuje stav, kdy kondenzátor či svodič přepětí určitým způsobem reaguje na procházející proud, respektive kondenzátor je nabíjen procházejícím proudem a svodič přepětí naopak zajišťuje jeho svedení na nulu. Vypínací postup je rozdělen do šesti kroků a zahrnuje tyto procesy:

Krok 1: V bezporuchovém provozu prochází proud pouze hlavní větví obvodu pomocí vysokonapěťových stejnosměrných vodičů zobrazených na obrázku 2.20a. V tomto kroku je možné na výkonovém IGBT tranzistoru a ultra-rychlém odpojovači naměřit přibližně nulové napětí. Tento stav v podobě nulového napětí ve skutečném případě nenastane, neboť díky procházejícímu proudu vznikají na výkonových polovodičových součástkách a ultra-rychlém mechanickém odpojovači určité výkonové ztráty.

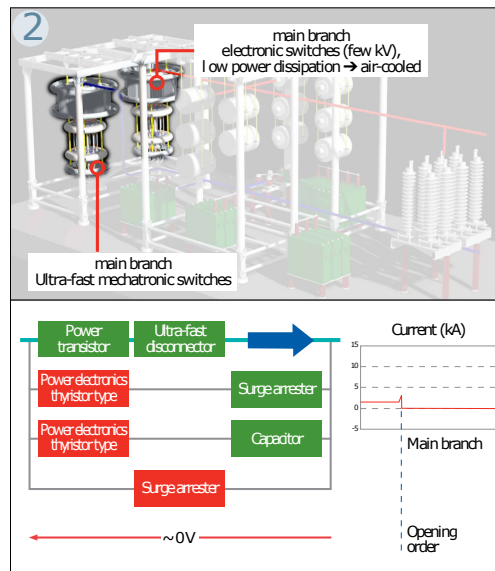
Krok 2: V této fázi simulačního procesu dochází ke vzniku poruchy, která způsobí nárůst proudu. V tomto okamžiku narůstá proud v hlavní větví obvodu a IGBT tranzistory komutačního spínače *LCS* obdrží vypínací povel a proud je komutován do *temporizační* větve. Na obrázku 2.20b je možné vidět nízko-ztrátové vzduchem chlazené vypínací polovodičové prvky se sériově připojeným ultra-rychlým odpojovačem. Ultra-rychlý odpojovač zůstává v tomto kroku zapnutý.

Krok 3: Proud je komutován do *temporizační* větve až do doby, kdy dojde k úplnému otevření ultra-rychlého odpojovače. V této etapě vypínacího procesu je možné na vypínáči naměřit několik kV. Na obrázku 2.20c se nachází výkonové tyristory se svodičem přepětí.

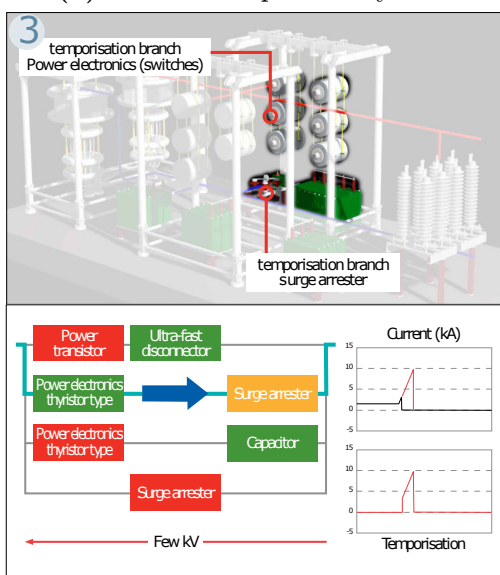
Krok 4: V této části 2.20d vypínacího procesu prochází proud aktivační větví složenou opět z výkonových tyristorů a skupin kondenzátorů. V této oblasti zvyšuje proud svoji hodnotu až do aktivace skupinových svodičů přepětí. Napětí z několika kV vzroste na hodnotu 163 kV, která představuje 1,35 x násobek jmenovité hodnoty 120 kV.



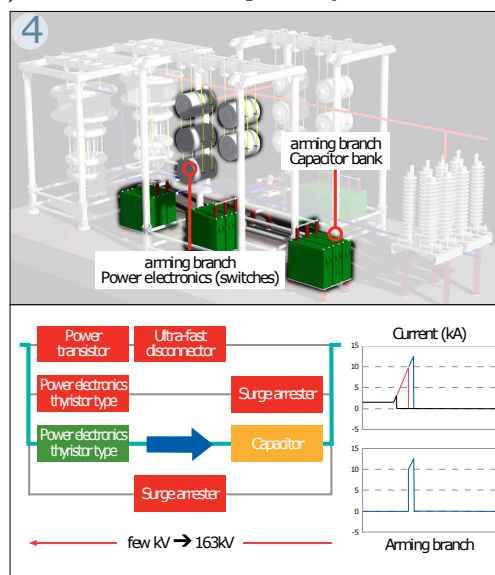
(a) Krok 1: Bezporuchový stav



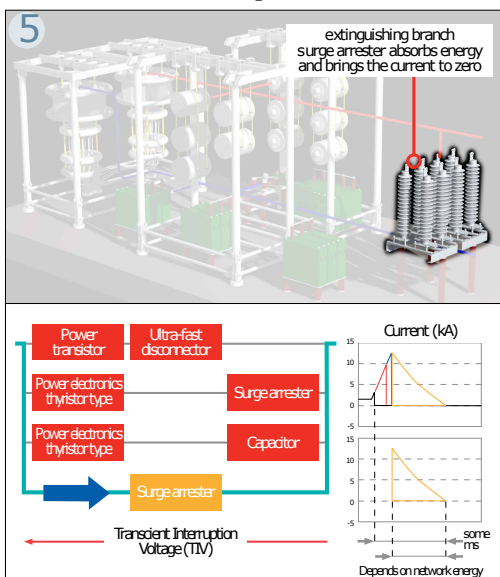
(b) Krok 2: Detekce poruchy - otevření LCS



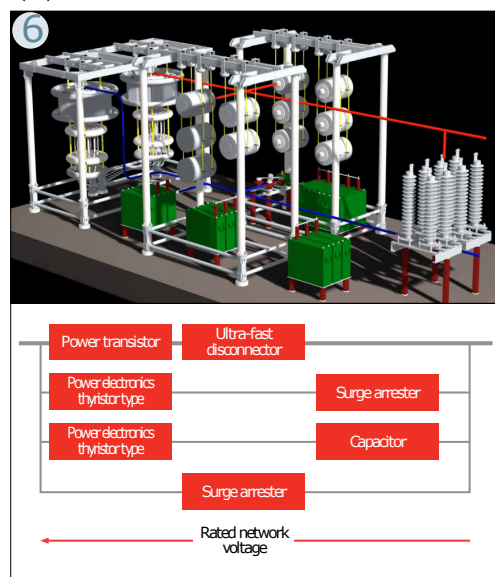
(c) Krok 3: Komutace proudu - otevření UFD



(d) Krok 4: Proud ve zpoždovací větvi



(e) Krok 5: Absorpce energie svodičem přepětí



(f) Krok 6: Vypínač vypnut

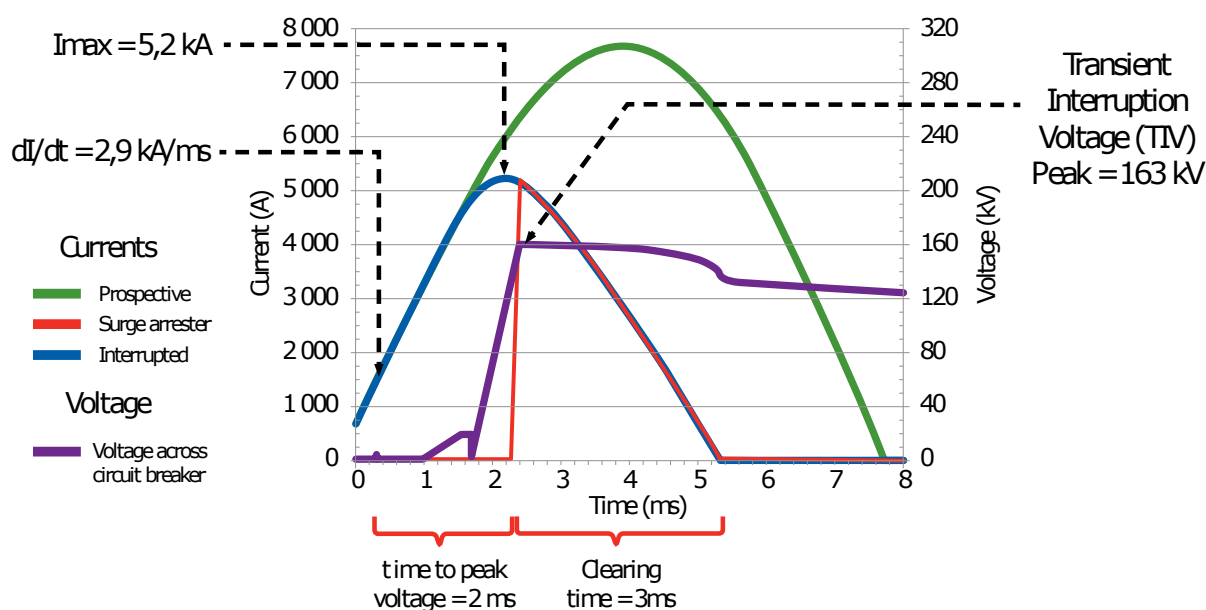
Obrázek 2.20: Vypínací proces hybridního vypínače Alstom [22]

Krok 5: Na obrázku 2.20e se nachází svodič přepětí, který absorbuje energii a snižuje proud na nulu. Doba působení svodiče přepětí trvá řádově několik milisekund a je závislá na jeho provedení a na celkové energii HVDC sítě. V této etapě vypínacího procesu nastane zotavené napětí, které je typické pro vysokonapěťové vypínače, u nichž se objevuje po přerušení procházejícího proudu.

Krok 6: V této fázi vypínacího procesu je již porucha odstraněna a na vypínači lze naměřit napětí napájecí sítě rovnající se hodnotě 120 kV. [22]

2.5.1 Prototyp ultra-rychlého 120 kV hybridního vypínače Alstom

Prototyp hybridního Alstom vypínače s jmenovitým napětím 120 kV byl úspěšně testován v provozních podmínkách přenosové sítě HVDC, jeho jmenovitý proud činí 1500 A s možností 20 minutového přetížení proudem 2045 A. Tyto testy byly provedeny v rámci demonstračních aktivit společnosti RTE zaměřujících se na technologie DC vypínačů, jež jsou součástí rozsáhlého projektu Twenties podporovaného programem Evropské komise FP7. Krátkodobé přetížení v podobě 2 minut umožňuje vypínači přenést proud 3675 A. Maximální proud vypínače dosahuje hodnoty 10 kA, přičemž podle vztahu dI/dt může být nárůst proudu v podobě 2,9 kA/ms. Minimální úroveň napětí, kterou musí vydržet vypínač s ohledem na základní izolační úroveň (BIL) činí 750 kV. Hodnota základní izolační úrovně BIL musí vyhovovat všem zařízením systému. Absorbující hodnota energie byla zjištěna pomocí detailně prováděných testů v období od ledna do listopadu roku 2013 a činí 1,2 MJ. Úroveň zotavovacího napětí dosahuje velikosti 163 kV. Při zkouškách pod reálnými provozními omezeními vysokonapěťové DC sítě byl úspěšně ověřen prototyp vypínače umožňující přerušit proud 5200 A při 160 kV s vypínací dobou 5 ms. Doba do dosažení maximální úrovně napětí, na kterou reaguje svodič přepětí činí 2 ms, poté je díky němu sveden proud do země během 3 ms. [23]



Obrázek 2.21: Vypínací proces hybridního 120 kV vypínače Alstom [23]

3 Simulace obvodových modelů hybridních DC vypínačů v MATLABu Simulink

Hlavním úkolem diplomové práce bylo sestavit funkční simulační modely hybridních vypínačů HVDC systému, které budou fungovat na podobném principu jako vypínače společnosti ABB a Alstom. Prvním testovaným vypínačem byl hybridní vypínač s nucenou komutací, který byl nastaven dle reálných parametrů odborné publikace [25]. Tento vypínač je připojen na napětí dosahující 20 kV s vypínací schopností zkratového proudu 3,97 kA za dobu 3,69 ms. Druhý vypínač uvedený v této práci je hybridní vypínač ABB, který dokáže vypnout zkratový proud o hodnotě 3,75 kA za dobu 17,5 ms. Tímto vypínačem prochází v nominálním stavu proud 2 kA s jmenovitým napětím sítě 320 kV. Třetím v pořadí je hybridní vypínač Alstom s vypínací schopností 7,2 kA za dobu 28,1 ms, který je připojený na napětí 120 kV.

3.1 Hybridní DC vypínač s nuceným komutačním obvodem

Typologie hybridního vypínače s nuceným komutačním obvodem byla navržena univerzitou v Aachenu a mezi její přednosti patří komutační obvod, který umožňuje komutovat proud do pomocné větve ještě před otevřením ultra-rychlého mechanického spínače. Po komutaci elektrického proudu do pomocné větve mohou být kontakty mechanického spínače odděleny bez možného vzniku elektrického oblouku. Oddělení kontaktů bez vzniku elektrického oblouku je nicméně zaručeno, pokud platí tato rovnice:

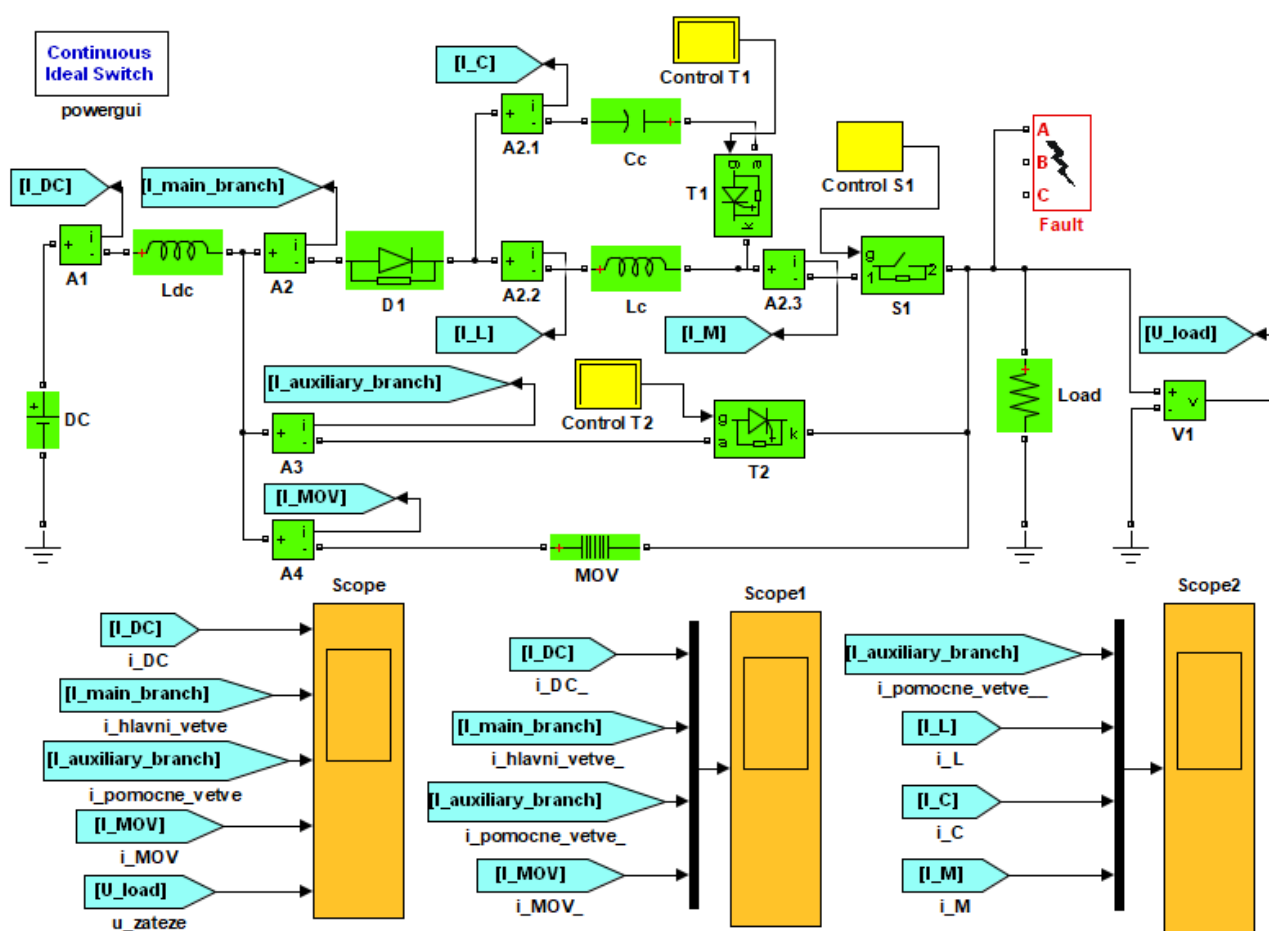
$$\frac{1}{2}C_c U_{pnc}^2 = \frac{1}{2}L_{dc} I_{kom}^2 \quad (3.1)$$

Aby nedošlo ke vzniku elektrického oblouku, musí být energie uložená v induktoru L_{dc} shodná s energií před-nabitého kondenzátoru C_c . Pokud je energie uložená v L_c větší než v C_c , pak proud mechanického spínače i_M nemůže klesnout na nulu a v případě, že je energie uložená v L_c menší než C_c proud mechanického spínače i_M změní směr po průchodu proudem nulou. Z těchto skutečností plyne, že je velmi důležité správně navrhnout parametry C_c , jeho přednabití U_{pnc} , velikost induktoru hlavní větve vypínače L_c a úroveň detekce zkratového proudu zajišťující správnou vypínací funkci mechanického spínače bez vzniku oblouku. V praktických aplikacích se hodnoty jednotlivých prvků mohou lišit v závislosti na typu poruchy, prostředí a době vzniku zkratu, z čehož vyplývá, že není možné garantovat vypínací proces bez vzniku

elektrického oblouku, poněvadž je velmi obtížné docílit stejné velikosti obou energií.

3.1.1 Obvodový model

Na obrázku 3.1 je možné spatřit vytvořenou typologii hybridního vypínače s nucenou komutací v programu Simulink, který je nástavbou softwaru MATLAB. Jednotlivé komponenty obvodu byly vybrány z knihovny SimPowerSystems.



Obrázek 3.1: Hybridní vypínač s nuceným komutačním obvodem vytvořený v MATLABu Simulink

V hybridním vypínači s nuceným komutačním obvodem jsou použity tyto prvky:

- DC - stejnosměrný zdroj o napětí 20 kV
- **powergui** - nastavení simulačního procesu, umožňuje použití ideálního spínacího zařízení
- **A1** - ampérmetr měřící celkový proud vypínače
- **Ldc** - indukčnost stejnosměrného vedení dosahující velikosti 3,3 mH
- **A2** - ampérmetr měřící proud procházející skrz hlavní větev obvodu

- **D1** - vlivem diody neprochází záporný indukční proud přes mechanický vypínač
- **A2.1** - ampérmetr měřící proud kondenzátorem C_c
- **Cc** - komutační kondenzátor $30 \mu F$ před-nabitý na 3 kV
- **A2.2** - ampérmetr měřící proud induktorem L_c
- **Lc** - komutační induktor $21 \mu H$
- **T1** - GTO tyristor zajišťující zapnutí komutačního obvodu
- **Control T1** - Řízení GTO tyristoru
- **A2.3** - ampérmetr měřící proud ultra-rychlým spínačem
- **T1** - ultra-rychlý mechanický spínač hlavní větve
- **Control S1** - řízení ultra-rychlého mechanického spínače
- **Fault** - blok reprezentující zkrat v 1 ms
- **A3** - ampérmetr měřící proud pomocné větve
- **Control T2** - řízení GTO tyristoru pomocné větve
- **A4** - ampérmetr měřící proud absorpční větve
- **MOV** - svodič přepětí nastavený na ochrannou úroveň 30 kV
- **V1** - voltmetr měřící napětí na zátěži
- **Load** - impedance obvodu
- **Scope** - blok zobrazující jednotlivé průběhy zkratových proudů ve větvích obvodu a napětí na zátěži
- **Scope1** - blok zobrazující poruchové proudy v jediném výsledném grafu
- **Scope2** - blok zobrazující jednotlivé proudy během komutačního procesu

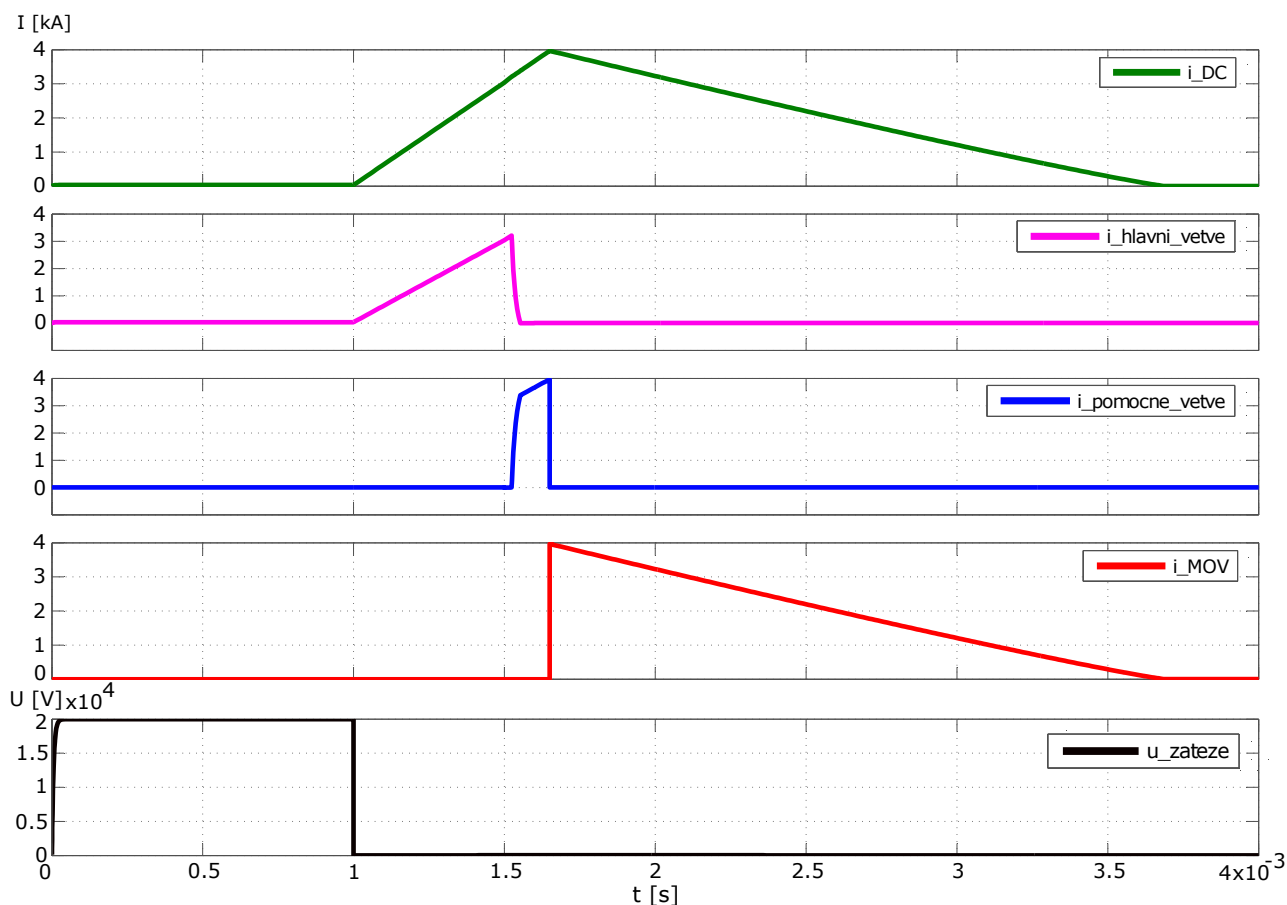
Hybridní vypínač s nucenou komutací obsahuje celkově tři větve podílející se na vypínacím procesu zkratového proudu. V nominálním stavu prochází proud přes diodu $D1$, komutační induktor L_c a mechanický spínač $S1$. V hlavní větvi obvodu se nachází komutační obvod $L_c - C_c$, který je řízen pomocí tyristoru $T1$. Dioda $D1$ zabráňuje průchodu záporného indukčního proudu přes mechanický spínač a umožňuje mu tak vypnout při nulovém proudu. Pomocná větev obvodu je složena z plně říditelných polovodičových tyristorů. V třetí větvi vypínače se nachází metal-oxidové varistory absorbující nahromaděnou energii obvodu.

3.1.2 Průběh vypínání zkratových proudů

V této podkapitole jsou zobrazeny tři grafy procházejícího proudu hybridním vypínačem s nucenou komutací. V prvním grafu 3.2 jsou přehledně znázorněny čtyři průběhy elektrického proudu tekoucí vypínačem během vypínacího procesu a nejspodnější průběh představuje napětí na zátěži. První *zelený* průběh znázorňuje celkový proud vypínače skládající se z proudu

protékajícího hlavní větví, pomocnou větví a větví absorbující energii značenou ve schématu jako větev i_{MOV} . V bezporuchovém stavu prochází proud pouze hlavní větví obvodu přes diodu $D1$, komutační induktor L_c a mechanický spínač $S1$, tyristory $T1$ a $T2$ se nachází ve vypnutém stavu.

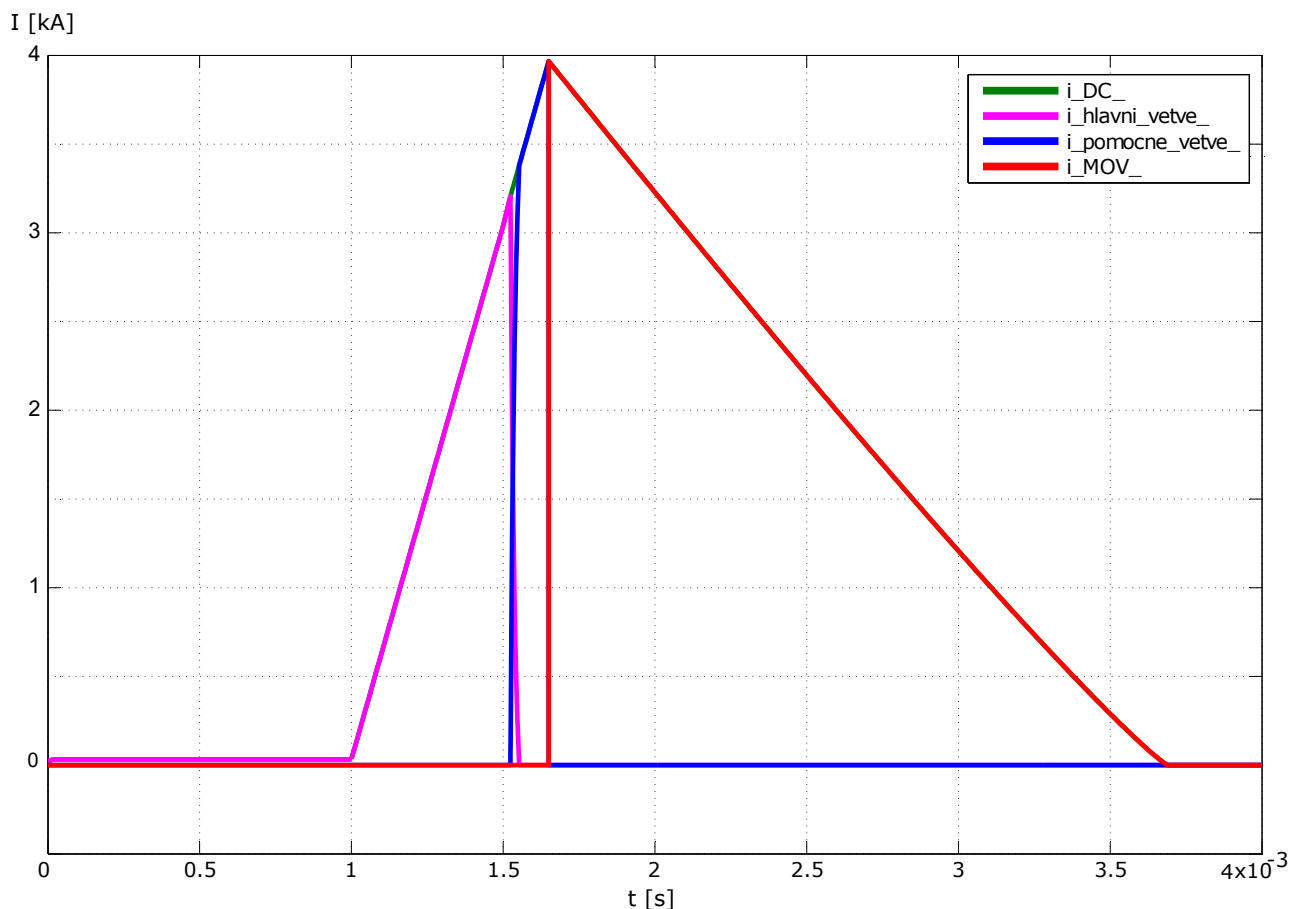
V komutační větví se nachází kondenzátor C_c , který je před-nabitý na 3 kV a jeho energie je o něco větší než energie uložená v cívce L_c , kterou do 1 ms teče proud o velikosti 33 A. Komutační kondenzátor může být nabit na napětí 3 kV několika způsoby. První způsob nabití může být aplikován pomocí převodníku DC/DC, což je ale vhodné pouze pro nízkonapěťové stejnosměrné systémy. Při použití v HVDC aplikaci dosahuje napětí velmi vysoké hodnoty, takže je téměř nemožné odebírat energii přímo ze sítě. Druhý proveditelný způsob umožňující nabíjení komutačního kondenzátoru je uschován v možnosti nabíjení pomocí baterie, která je instalována přímo v DC vypínači. Tyto baterie však musí být pravidelně dobíjeny a jejich životnost je omezená. Třetí způsob dodávky elektrické energie je pomocí laseru. K nejlepšímu způsobu zajišťujícímu nabíjení komutačního kondenzátoru patří právě laserové energie.



Obrázek 3.2: Vypínání zkratového proudu hybridního DC vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope

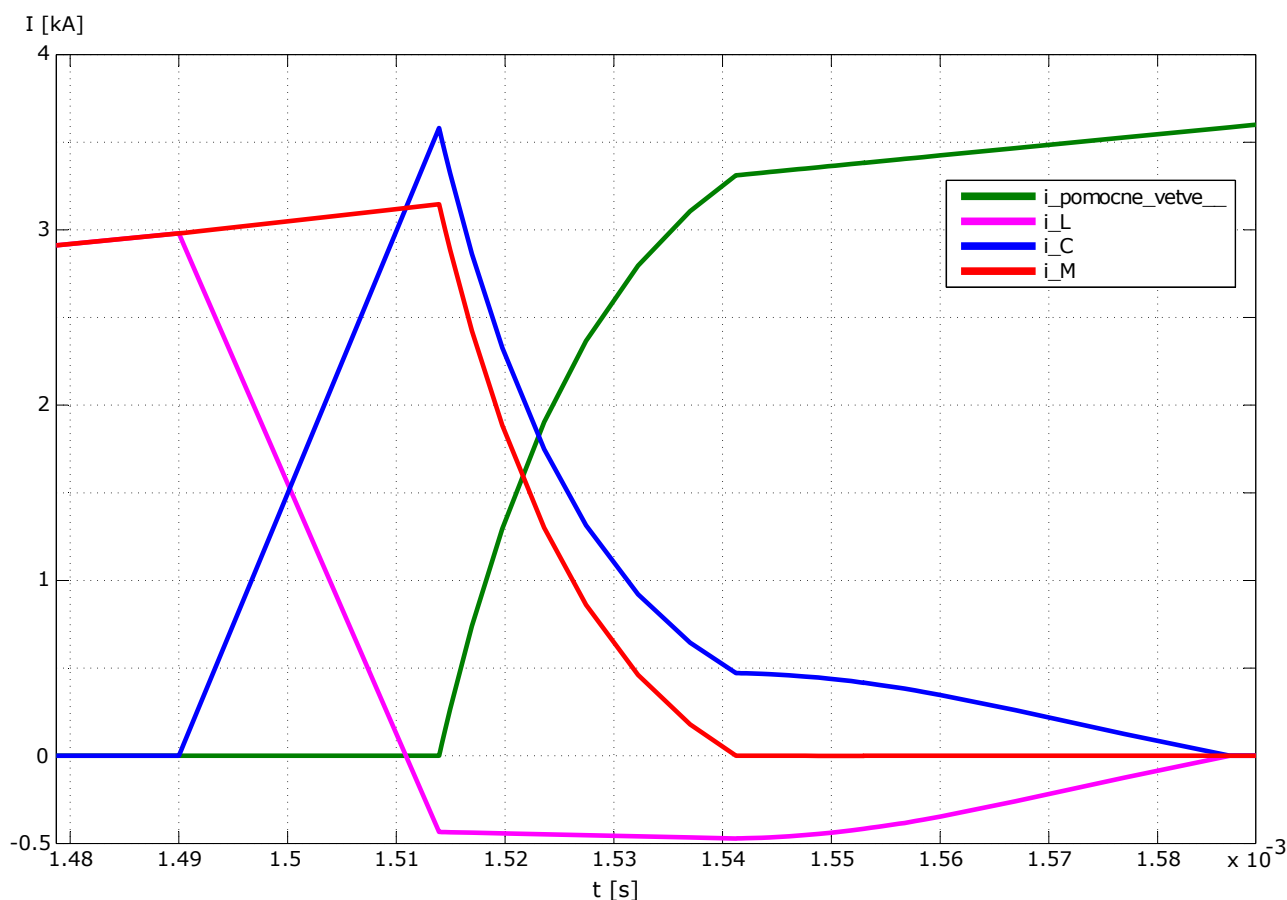
V pravé oblasti schématu zapojení 3.1 se nachází blok *Fault* reprezentující vznik zkratu v době 1 ms, který způsobuje nárůst proudu a celkový proud je v grafu 3.2 reprezentován zeleným průběhem. Velikost nárůstu zkratového proudu je dána celkovým konceptem vypínače, ve které bezpochyby hraje roli odpor jednotlivých prvků, tedy odpor celkového vypínače

a samozřejmě je nárůst proudu ovlivněn především velikostí jednotlivých indukčností. Pokud byla velikost indukčnosti L_{dc} nastavena na vyšší hodnotu, zkratový proud dosahoval za stejný vypínací čas menší velikosti. Velikost reaktoru zapojeného v elektrických sítích tak značně omezuje hodnotu zkratového proudu. Detekční úroveň proudu 2,98 kA způsobí v čase 1,49 ms spuštění obou tyristorů $T1$ a $T2$. Hlavní větví obvodu přestane procházet proud v době 1,541 ms (obrázek 3.4) a poté celkový zkratový proud protéká pouze pomocnou větví znázorněnou *modrým* průběhem v 3.2. Pomocná větev je vypnuta pomocí výkonového GTO tyristoru v čase 1,65 ms při 3,967 kA. V poslední fázi vypínacího procesu 3.2 (*červený* průběh) prochází proud pouze absorpční větví, která snižuje její hodnotu do nuly až do doby 3,69 ms. Poslední průběh prvního grafu 3.2 znázorňuje napětí na zátěži, které je do doby vzniku zkratu přibližně 20 kV, po vzniku zkratu se toto napětí na zátěži sníží k nule vlivem vysoké hodnoty procházejícího proudu, jedná se o kovový zkrat. Druhý graf 3.3 hybridního vypínače s nucenou komutací v sobě zahrnuje všechny průběhy proudů procházející jednotlivými větvemi. *Zelený* průběh celkového proudu je ve vypínacím průběhu vidět pouze v malé oblasti v době, kdy dochází k přebírání zkratového proudu pomocnou větví a to v rozmezí od 1,514 ms do 1,541 ms. Nárůst proudu dosahuje hodnoty 609 A/ 0,1 ms, celkový nárůst proudu tedy dosahuje velikosti 3967 A/ 0,65 ms. Absorpční větev se nachází v aktivní režimu po dobu 2,04 ms, proud je v tomto časovém období snižován k nulové hodnotě.



Obrázek 3.3: Vypínání zkratového proudu hybridního DC vypínače - Scope1

Obrázek 3.4 znázorňuje detailní zobrazení komutačního průběhu proudu hybridního vypínače s nucenou komutací, který je ve svém principu obdobný jako průběh Fig.12. v publikaci [25]. Proud komutačního induktoru i_L se snižuje po zapnutí tyristorů $T1$ a $T2$, což představuje *růžový* průběh. Oba tyristory jsou zapnuty ve stejný čas. Po zapnutí tyristoru $T1$ v čase 1,49 ms prochází proud kondenzátorem C_c až do doby jeho úplného nabití nastávající v čase 1,514 ms. S rostoucím proudem i_c , klesá napětí na kondenzátoru. Poruchový proud bude od okamžiku nabití kondenzátoru postupně přebírán pomocnou větví a proud i_M se sníží k nule v čase 1,541 ms. Dvě nutné podmínky pro správnou funkci simulačního procesu hybridního vypínače s nuceným komutačním obvodem spočívají v nekonečné velikosti odporu paralelně připojenému k diodě $D1$, pokud je uveden v provozu komutační obvod a druhou podmínkou je nekonečný odpor paralelně připojeného rezistoru k výkonovému tyristoru $T1$ v bezporuchovém stavu. Druhá podmínka zajistí, že elektrický proud nebude procházet v nominálním stavu kondenzátorem C_c . Obě podmínky jsou díky vybraným prvkům z knihovny SimPowerSystems splněny, neboť ve vypnutém stavu nabývají rezistance diody $D1$ a tyristoru $T1$ nekonečné velikosti. Každý polovodičový a mechanický prvek použitý v simulacích hybridních vypínačů má k sobě paralelně připojený RC snubber obvod, který může sloužit k omezení špičkového napětí při vypínacím procesu či k omezení možných zákmitů.



Obrázek 3.4: Procházející proudy hybridním DC vypínačem během komutačního procesu - Scope2

Vzhledem k tomu, že energie před-nabitého kondenzátoru C_c je větší než energie uložená

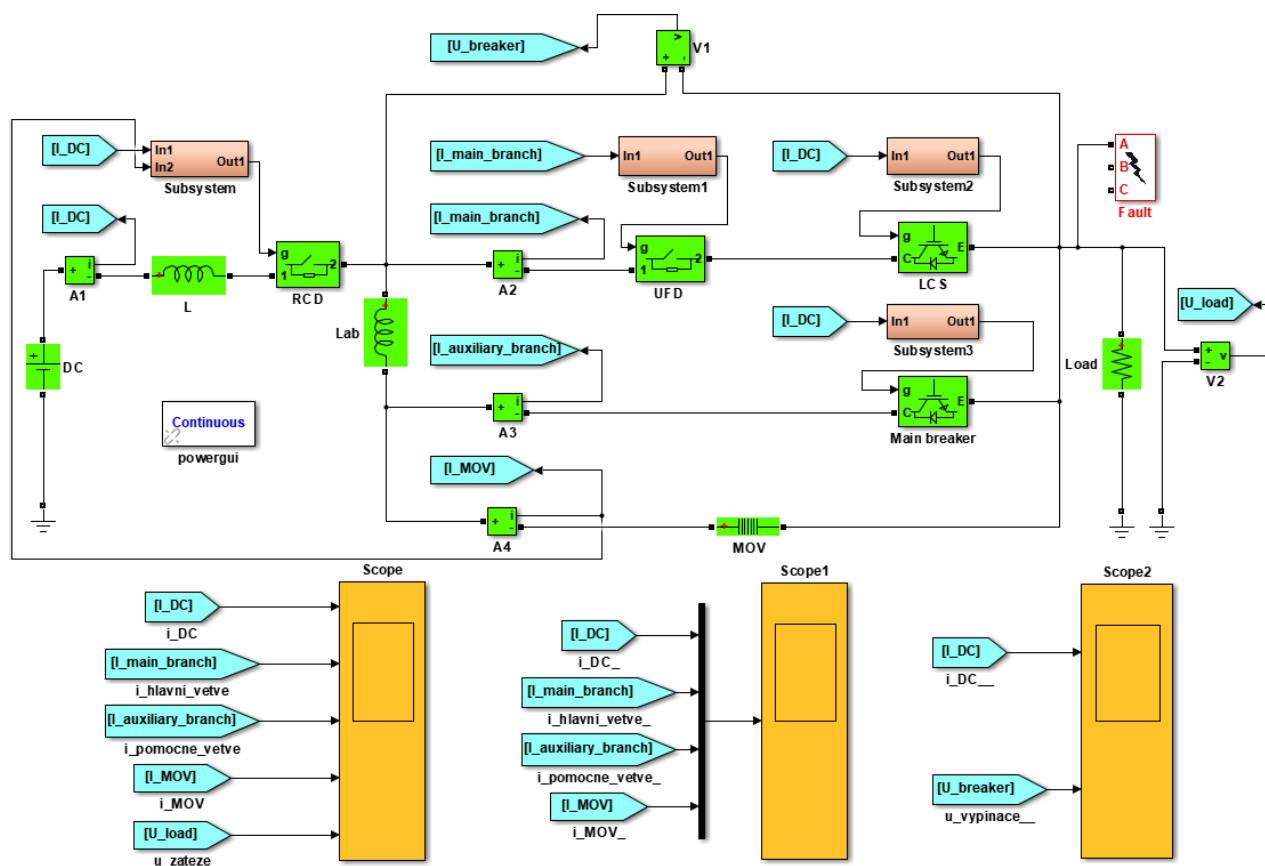
v induktoru L_c , zůstává na komutačním kondenzátoru C_c zbytková energie i v momentě, kdy je L_c plně demagnetizována. Induktor L_c bude magnetizován kondenzátorem C_c v záporném směru a proud induktoru i_L změni směr. Když se polarita napětí komutačního kondenzátoru převrátí a překročí stavové napětí polovodičové větve, systémový proud je komutován z větve mechanického spínače do polovodičové větve v době 1,511 ms. Záporný proud i_L nastává v době 1,511 ms a až do doby 1,586 zajišťuje nabíjení kondenzátoru C_c záporným proudem. Odpor paralelně připojený k diodě $D1$ je v nepropustném stavu diody nekonečný, čímž zneumožňuje eventuálnímu průchodu záporného indukčního proudu přes mechanický vypínač $S1$ a zajistí mu možnost bezpečného odpojení od zdroje bez vzniku elektrického oblouku. V době 1,586 ms je proud induktoru i_L nulový a tyristor $T1$ je vypnut a zbytková energie se uloží do kondenzátoru C_c , který je záporně nabit. Ochranná úroveň napětí varistoru je nastavena na 1,5 násobek jmenovitého napětí sítě, které činí 20 kV. Po úplném vypnutí ultra-rychlého mechanického vypínače je vypnut i výkonový tyristor $T2$ nacházející se v pomocné větvi. Po vypnutí $T2$ v čase 1,65 ms je zkratový proud komutován z pomocné větve do větve varistoru absorbující energii.

Provedená simulace hybridního vypínače s nucenou komutací byla pro některé prvky parametrově nastavena shodně s publikací [25]. Nejdůležitější podmínka pro správnou funkčnost celého simulačního procesu spočívala v reálně nastavených vypínacích časech s ohledem na velikosti procházejících proudů. V této simulaci byl dodržen i požadavek na otevření mechanického vypínače bez vzniku elektrického oblouku. V grafu 3.4 je možné vidět, že od doby 1,541 ms již neprochází proud vypínačem $S1$ a k jeho vypnutí dochází díky speciálně nastavenému řízení v čase 1,553. Hybridní vypínač s nucenou komutací reprezentuje bezpečnou možnost vypnutí stejnosměrného proudu 3,97 kA za dobu 3,69 ms, čímž je z praktického hlediska přibližně osmkrát rychlejší než konvenční střídavé vypínače.

3.2 Hybridní vypínač ABB

3.2.1 Obvodový model

Tato kapitola pojednává v detailním popisu o hybridním vypínači společnosti ABB, který je zobrazen na obrázku 3.5. Simulace vypínače byla vytvořena v návaznosti na studium problematiky vypínání zkratových proudů nacházejících se v 2.4, kde je tomuto tématu věnována celá podkapitola. Obvodový model byl sestaven dle nastudovaných teoretických podkladů mnoha publikací a jeho vypínací časy hlavní a pomocné větve obvodu vychází z odborného článku [20]. V bezporuchovém stavu prochází proud pouze hlavní větví obvodu přes *UFD* a *LCS*. Skutečné zapojení hybridního HVDC vypínače ABB obsahuje IGBT tranzistory, kde jeden z nich tvoří komutační spínač *LCS* a druhý představuje hlavní vypínač pomocné větve (v obvodu 3.5 pod názvem *Main breaker*), svodiče přepětí a dvou mechanických spínačích, přičemž první je nazýván jako *UFD*, jež je zapojen v sérii s *LCS* a otevírá se až v době, kdy proud prochází pouze pomocnou větví. Druhý mechanický vypínač je pouze ochranný, zvaný reziduální a není na něj tak rychlý požadavek vypnutí, poněvadž je předřazen před všemi větvemi obvodu a vypíná se až po svedení zkratového proudu k nule, aby obvod ochránil od možného zbytkového procházejícího proudu. Hybridní vypínač ABB byl navržen pro jednosměrné vypnutí zkratového proudu.



Obrázek 3.5: Hybridní vypínač ABB vytvořený v MATLABu Simulink

Díky bloku *FAULT* je do obvodu v čase 0,02 s vnořen zkrat, který způsobuje nárůst proudu 1,75 kA / 2,5 ms. Celkový vypínací čas 320 kV hybridního vypínače protékajícího proudem o jmenovité hodnotě 2 kA dosahuje 17,5 ms.

V hybridním vypínači ABB jsou použity tyto prvky:

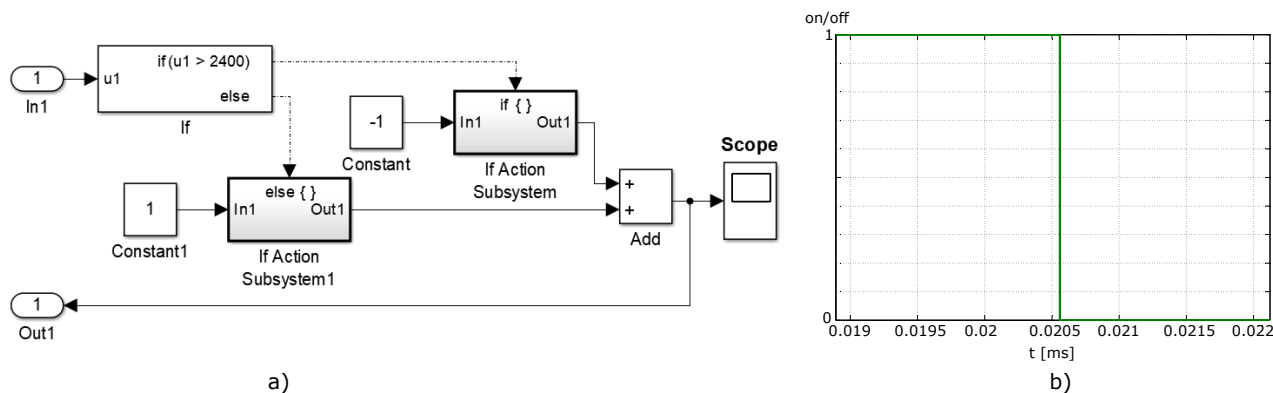
- **DC** - stejnosměrný zdroj o napětí 320 kV
- **powergui** - nastavení simulačního procesu
- **A1** - ampérmetr měřící celkový proud vypínače
- **L** - reaktor omezující proud, 450 mH
- **RCD** - reziduální vypínač zaručující vypnutí zbytkového proudu do 1 s od vzniku zkratu
- **Subsystem** - řízení *RCD* v závislosti na čase, procházejících proudů I_{DC} a I_{MOV}
- **A2** - ampérmetr měřící proud hlavní větve obvodu
- **UFD** - ultra-rychlý mechanický spínač
- **Subsystem1** - řízení *UFD* v závislosti na čase a procházejícím proudem hlavní větve obvodu
- **V1** - voltmetr měřící napětí na hybridním vypínači
- **LCS** - komutační spínač zajišťující vypnutí obvodu při 2,4 kA
- **Subsystem2** - řízení *LCS* v závislosti na procházejícím proudem I_{DC}
- **Lab** - indukčnost 1 mH mezi hlavní a pomocnou větví
- **A3** - ampérmetr měřící proud pomocné větve obvodu
- **Main breaker** - hlavní vypínač umožňující vypnutí zkratového proudu 3,75 kA
- **Subsystem3** - řízení hlavního vypínače v závislosti na procházejícím proudem I_{DC}
- **A4** - ampérmetr měřící proud absorpční větve obvodu
- **MOV** - metal-oxidový varistor nastavený na ochrannou úroveň 480 kV
- **Fault** - blok reprezentující zkrat v době 0,02 s
- **Load** - odporová zátěž
- **V2** - voltmetr měřící napětí na zátěži
- **Scope** - blok zobrazující jednotlivé průběhy zkratových proudů ve větvích obvodu a napětí na zátěži
- **Scope1** - blok zobrazující poruchové proudy v jediném výsledném grafu
- **Scope2** - blok zobrazující výsledný průběh proudu a napětí na vypínači

Simulační obvod hybridního vypínače ABB je v systému řízení diametrálně rozdílný oproti hybridnímu vypínači s nucenou komutací. Celý vypínací proces je řízen v závislosti na čase a

procházejícím proudem jednotlivými větvemi obvodu. Vypnutí komutačního spínače *LCS* zajišťuje *Subsystem*, který vyhodnotí, že procházející proud vzrostl o 20% nad jmenovitou hodnotu sítě. V nominálním stavu prochází vypínačem proud 2 kA, přičemž tento první vypínací režim umožní vypnutí hlavní větve při proudu 2,4 kA. Díky vypnutí komutačního spínače *LCS* je zkratový proud komutován do pomocné větve, kde stále zvyšuje svou hodnotu až do velikosti 3,75 kA. Pro tento vypínací proud je správně navržen *Subsystem3*, který na tuto skutečnost reaguje vypnutím hlavního vypínače pomocné větve. Jakmile je proud hlavní větve obvodu roven nule, dochází se zpožděním 250 μ s po vypnutí komutačního spínače i k vypnutí *UFD* spínače, což mu umožní vypnutí v bezproudovém stavu bez možného vzniku oblouku a nabízí mu možnost konstrukce odpojovače. Z důvodu větší bezpečnosti z hlediska jištění se zde nabízí i možnost konstruovat *UFD* jako vypínač. Poslední vypínací režim je obstarán za pomoci *RCD* a jeho systému řízení, který vyniká především skutečností umožňující vypnout zbytkový proud 1 s od doby vzniku zkratu, zároveň se však musí celkový proud vypínače rovnat proudu procházejícímu absorpční větví. Reziduální vypínač *RCD* chrání svodiče přepětí a veškeré zařízení v hybridním vypínači od tepelného namáhání způsobeného zbytkovým proudem.

Řídicí systém komutačního spínače LCS

Jako ilustrační příklad jednoho řídicího systému byl zde vybrán vypínací proces komutačního spínače hybridního vypínače ABB, který je rozčleněn do dvou sekcí na obrázku 3.6.



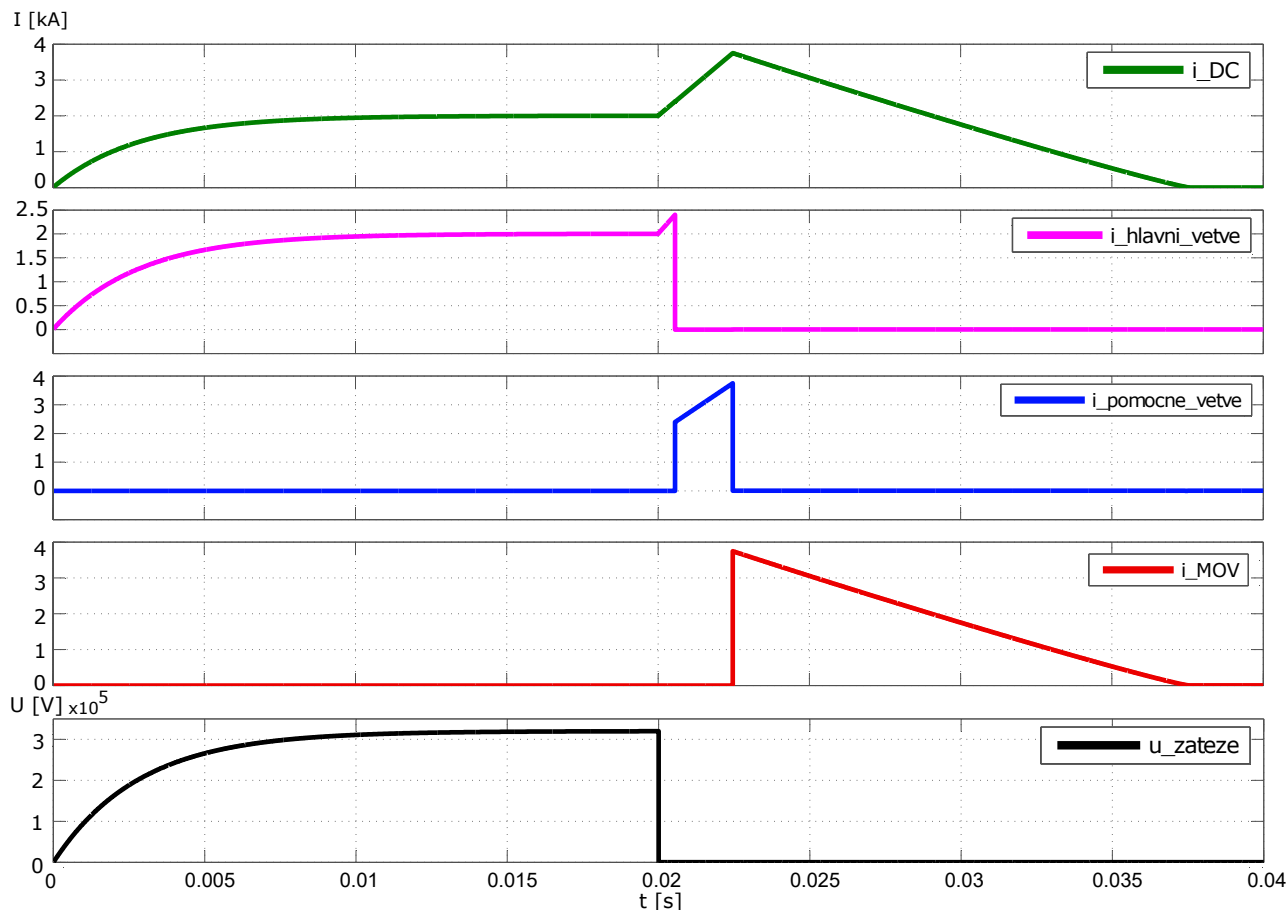
Obrázek 3.6: Obvodový model řídicího systému LCS a) s grafickým znázorněním vypínacího procesu b)

Řídicí systém, nebo-li *Subsystem2* je složený z jednoho funkčního bloku *if*, do kterého vstupuje měřený proud celkového vypínače I_{DC} , dvou konstant s opačnými hodnotami, dvou akčních subsystémů závislých na bloku *if*, sčítacího bloku a grafického prostředí zobrazujícího výsledek vypínacího procesu. Vstup *In1* představuje již zmíněný proud vypínače I_{DC} , který dává bloku *if* v každém okamžiku přehled o velikosti proudu procházejícího obvodem. Tento komutační spínač je nastaven na vypínací hodnotu překračující 20% jmenovitého proudu. Jmenovitý proud vypínače je díky příslušným StakPak IGBT modulům nastaven na hodnotu 2000 A, tato hodnota vychází z katalogového listu. Aby bylo zřetelné, jak řídicí systém komutačního spínače pracuje, je na obrázku 3.6 vidět ve funkčním bloku *if* nastavený

parametr proudu na 2400 A, který po překročení této hodnoty zajistí v čase 0,02055 vypnutí komutačního spínače a proud je komutován do pomocné větve. Ostatní *Subsystemy* pracují na obdobném principu lišící se pouze v nastavených velikostech proudů a časech podléhajících dílčím úkonům vypínače.

3.2.2 Průběh vypínání zkratových proudů

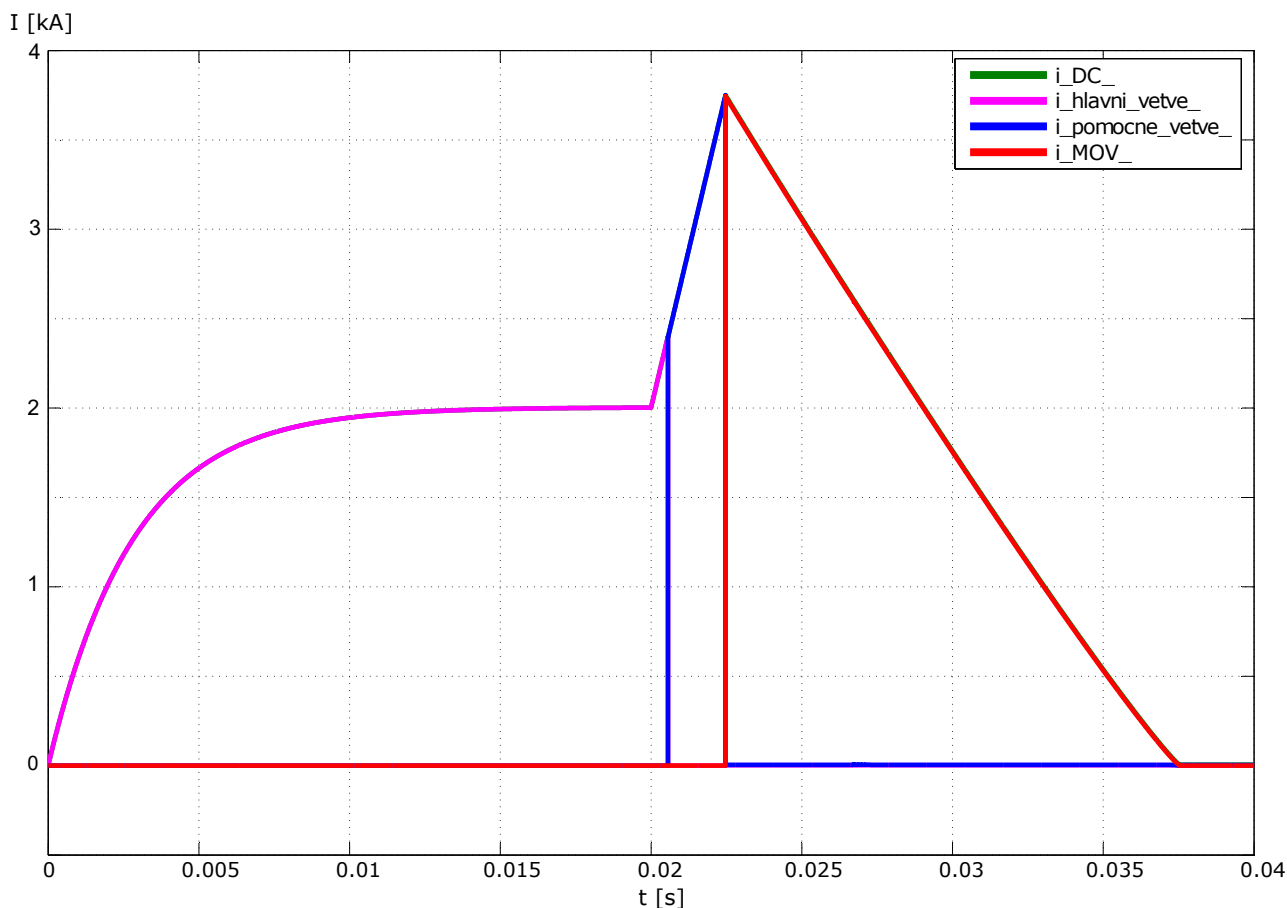
Obrázek 3.7 zobrazuje jednotlivé elektrické proudy tekoucí přes hybridní vypínač ABB.



Obrázek 3.7: Vypínání zkratového proudu hybridního ABB vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope

Zelený průběh v 3.7 značí jako u hybridního vypínače s nucenou komutací celkový proud vypínače, který v každém okamžiku prochází přes předřazený *RCD* vypínač a poté je podle charakteru obvodu v různých časových intervalech rozčleněn do jednotlivých větví. Druhý *růžový* průběh zobrazuje proud pouze hlavní větví obvodu skládající se z ultra-rychlého spínače *UFD* a komutačního spínače *LCS*, přičemž každý z nich je vypnut v jiném časovém období. Díky zobrazenému průběhu je možné spatřit proudovou vypínací hodnotu spínače *LCS* rovnající se 2,4 kA, které odpovídá čas 0,0206 s. Poruchový proud prochází hlavní větví pouze po dobu 0,6 ms od doby vzniku zkratu. Vypínací doba *LCS* je závislá pouze na dosažené hodnotě zkratového proudu. *Modrý* průběh hybridního vypínače znázorňuje proud pomocnou

větví, který prochází od doby 0,0206 do 0,0225 s, respektive 1,9 ms. Zlepšení vypínacího procesu by mohlo nastat v podobě skutečnosti, že by pomocnou větví procházel určitý proud okamžitě od vzniku zkratu, čímž by mohl nastat pozvolnější nárůst zkratového proudu přes hlavní vypínač. Autor této práce zvolil tento způsob procházejícího proudu i s ohledem na různé vědecké publikace, ve kterých bylo spínání jednotlivých větví nastaveno obdobným způsobem. Ze zobrazeného průběhu proudu pomocnou větví je patrné spínání hlavního vypínače z téměř nulové hodnoty do 2,4 kA, u některých publikací dosahuje skokový průběh proudu hodnoty i 4 kA, kde z 3 kA okamžitě vzroste na 7 kA.



Obrázek 3.8: Vypínání zkratového proudu hybridního ABB vypínače - Scope1

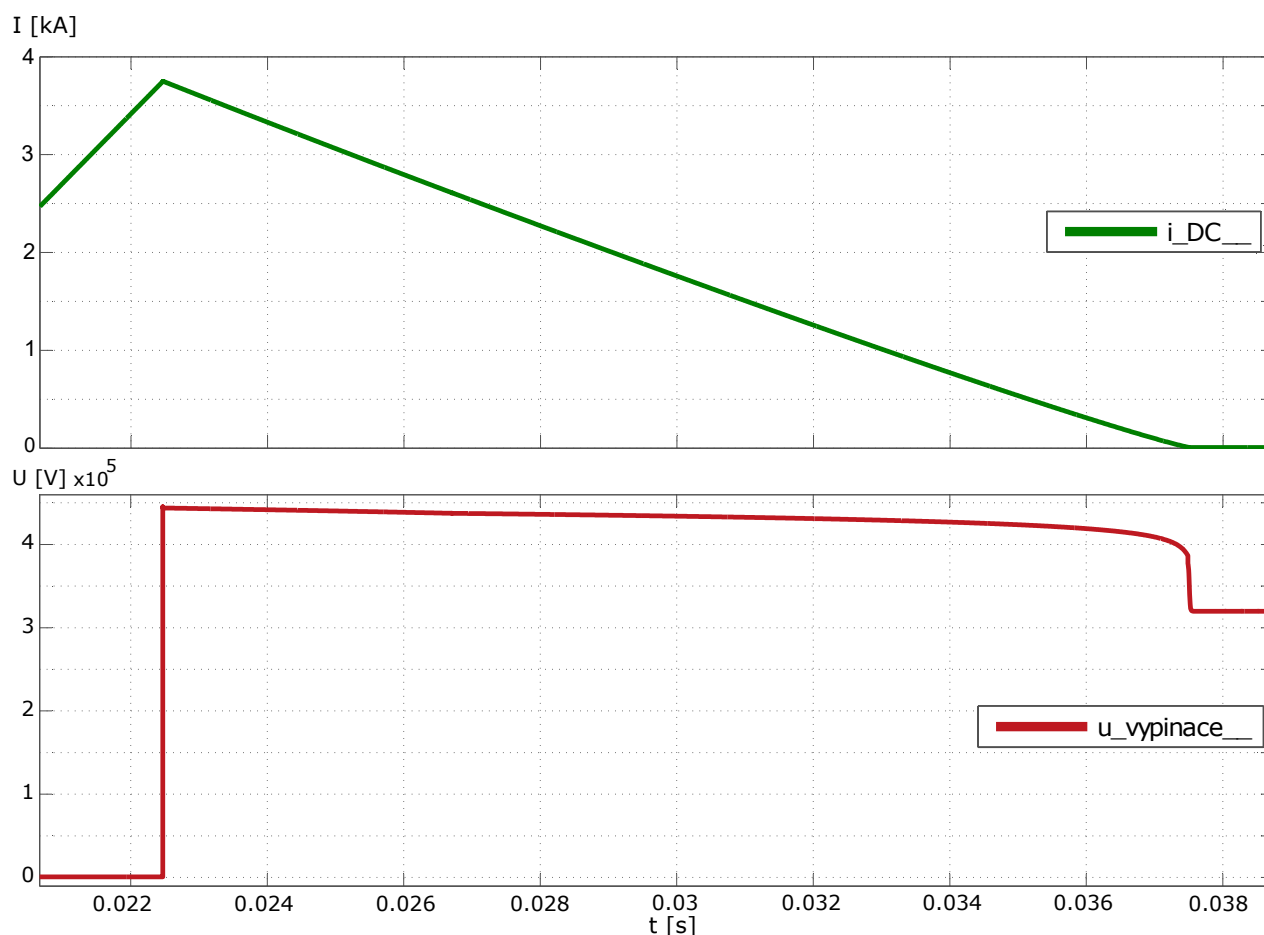
Červený průběh proudu v obrázku 3.7 značí explicitní průběh absorpční větve reagující na maximální dosaženou hodnotu proudu pomocné větve v kooperaci s ochranným napětím svodiče přepětí, které bylo pro napájecí napětí 320 kV zvoleno na úroveň 480 kV. V publikaci [19] a v některých ostatních, je ochranná úroveň napětí metal-oxidových varistorů také nastavena na hodnotu 1,5 násobku napájecího napětí.

Poslední pátý průběh věrohodně popisuje průběh napětí na zátěži, které díky vhodně zvolenému reaktoru L a odporové zátěži, narůstá v součinnosti s proudem a má pozvolný nárůst na hodnotu dosahující 320 kV. Napětí 320 kV se nachází v ustáleném stavu a po vzniku zkratu klesne na nulovou hodnotu vlivem vzrůstajícího poruchového proudu, jedná se o kovový zkrat. Naopak napětí na vypínači zobrazené na obrázku 3.9 je do spuštění svodičů přepětí

téměř nulové vlivem nízké impedance celého vypínače, čímž na něm nevznikají významné ztráty HVDC přenosu.

Ve schématu hybridního vypínače 3.5 jsou také zařazeny čtyři ampérmetry měřící hodnotu proudu v různých částech obvodu, první ampérmetr měří celkovou hodnotu proudu protékajícího přes reziduální vypínač, druhý ampérmetr zobrazuje proud hlavní větve, kterým do okamžiku zkratu a v první fázi vypínacího procesu prochází celkový proud, třetím ampérmetrem prochází proud až nad velikost 2,4 kA a poslední ampérmetr A4 zobrazuje poruchový proud, jež je pomocí svodiče přepětí sveden na nulovou hodnotu.

Pro správné porovnání jednotlivých proudů obvodu bylo nutné všechny tyto průběhy zahrnout do jednoho výsledného grafu 3.8, který bude zřetelným způsobem reprezentovat celý vypínací proces. Průběhy proudu v uvedeném obrázku jsou barevně shodné s předchozím grafem 3.7. V obrázku 3.8 není vidět *zelený* průběh celkového proudu, neboť tento proud je v bezporuchovém stavu a v prvním nárůstu zkratového proudu do velikosti 2,4 kA shodný s proudem hlavní větve, poté je celkový proud reprezentován příslušnými proudy ostatních větví.



Obrázek 3.9: Průběh procházejícího proudu a napětí na vypínači ABB - Scope2

V grafu 3.9 je důkladně zobrazen průběh proudu a napětí na vypínači, které je od okamžiku zkratu až do uvedení svodiče přepětí nulové v součinnosti s narůstajícím proudem. V okamžiku vypnutí pomocné větve se na vypínači objeví napětí rovnající se 450 kV, které se nachází

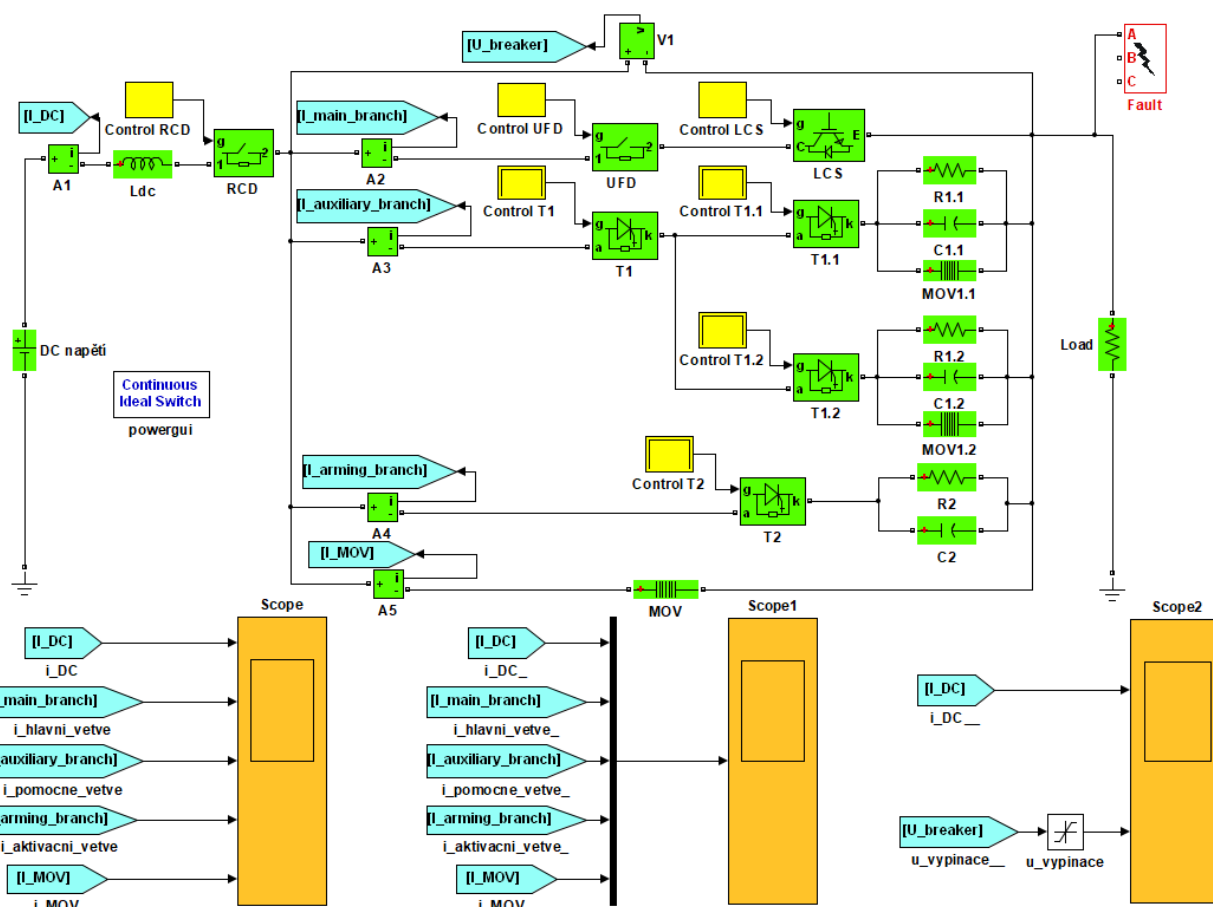
v ochranné úrovni svodiče přepětí, jehož hodnota činí 480 kV. Při snižování proudu k nule klesá i napětí na vypínači, které se v čase 0,0375 ustálí na napětí sítě 320 kV. Celkový vypínací čas hybridního vypínače dosahuje 17,5 ms z důvodu dlouhého absorpčního procesu svodičů přepětí trvajících od času 0,0225 do 0,0375, tedy 15 ms. Vypínací proces hybridního vypínače ABB tedy dosahuje času 17,5 ms s hodnotou proudu 3,75 kA.

3.3 Hybridní vypínač Alstom

3.3.1 Obvodový model

Třetí simulovaný hybridní vypínač 3.10 je principiálně založený na konceptu společnosti Alstom, která poskytuje jiné rozložení vnitřních součástek zajišťující vypínání proudu, než hybridní vypínač ABB. Hybridní vypínač Alstom je v *hlavní* větvi obdobný jako vypínač ABB, skládající se z ultra-rychlého spínače a komutačního spínače složeného z IGBT tranzistorů, tyto tranzistory jsou v praxi zapojeny sériově, či antiparalelně pro oboustranné možnosti vypínání procházejícího proudu. V této simulaci byl vypínač navrhnout pouze pro jednosměrné přerušení zkratového proudu.

Model vypínače byl vytvořen v softwaru MATLAB Simulink s detailně nastavenými parametry jednotlivých prvků pro správnou funkčnost simulačního procesu. Vypínač je tvořen *pomocnou* větví obsahující velmi výkonné PCT tyristory, kde každý tyristor ve skutečnosti představuje více sériově zapojených tyristorů pro reálnější simulační proces. Třetí větev hybridního vypínače je nazývána jako *aktivační* a jejím úkolem je přenést zkratový proud v posledním okamžiku vypínacího procesu, čímž umožní zkratové a tepelné odlehčení předchozí pomocné větvi. Absorpční větev Alstom vypínače se liší oproti předchozím simulovaným vypínačům pouze v nastavené velikosti ochranného napětí, které zde dosahuje hodnoty 180 kV,



Obrázek 3.10: Hybridní vypínač Alstom vytvořený v MATLABu Simulink

což opět splňuje požadavek 1,5 násobku napájecího napětí.

V hybridním vypínači Alstom jsou použity tyto prvky:

- **DC** - stejnosměrný zdroj o napětí 120 kV
- **powergui** - nastavení simulačního procesu, umožňuje použití ideálního spínacího zařízení
- **A1** - ampérmetr měřící celkový proud vypínače
- **Ldc** - indukčnost stejnosměrné sítě o velikosti 0,15 H
- **RCD** - reziduální vypínač zaručující vypnutí zbytkového proudu do 1 s od vzniku zkratu
- **Control RCD** - řízení reziduálního vypínače pomocí časově nastaveného vypnutí
- **A2** - ampérmetr měřící proud hlavní větve obvodu
- **UFD** - ultra-rychlý mechanický spínač
- **Control UFD** - časové řízení ultra-rychlého spínače, vypnutí nastává v čase 0,507 s
- **V1** - voltmetr měřící napětí na hybridním vypínači
- **LCS** - komutační spínač zapojený v hlavní větvi obvodu
- **Control LCS** - řízení komutačního spínače zajišťující vypnutí obvodu v čase 0,5055, jemuž odpovídá proud 5,92 kA
- **A3** - ampérmetr měřící proud pomocné větve obvodu
- **T1** - PCT tyristor pomocné větve, jeho odpor reprezentuje 19 tyristorů
- **Control T1** - blok zajišťující řízení tyristoru T1, tyristor je vypnut v čase 0,507
- **T1.1** - PCT tyristor první pomocné větve, nastavený odpor reprezentuje 19 tyristorů
- **Control T1.1** - blok zajišťující řízení tyristoru T1.1, tyristor je vypnut v čase 0,506
- **R1.1** - 15 k Ω rezistance v první pomocné větvi
- **C1.1** - 500 μF kondenzátor v první pomocné větvi
- **MOV1.1** - svodič přepětí s ochrannou úrovní 7 kV
- **T1.2** - PCT tyristor druhé pomocné větve, nastavený odpor představuje 19 tyristorů
- **Control T1.2** - blok zajišťující řízení tyristoru T1.2, jehož vypínací čas je shodný s tyristorem T1, vypínací proud dosahuje velikosti 7,07 kA
- **R1.2** - 6 k Ω rezistance v druhé pomocné větvi
- **MOV1.2** - svodič přepětí s ochrannou úrovní 80 kV
- **C1.2** - 1200 μF kondenzátor v druhé pomocné větvi
- **A4** - ampérmetr měřící proud aktivační větve
- **T2** - PCT tyristor, jehož odpor představuje 38 tyristorů

- **Control T2** - blok zajišťující řízení tyristoru T2, jehož vypínací čas je nastaven na hodnotu 0.5074
- **R2** - 30 k Ω rezistance v aktivační větvi
- **C2** - 250 μF kondenzátor v aktivační větvi
- **A5** - ampérmetr měřící proud absorpční větve
- **MOV** - metal-oxidový varistor nastavený na ochrannou úroveň 180 kV
- **Fault** - blok reprezentující zkrat v době 0,5 s
- **Load** - 80 Ω odporová zátěž
- **Scope** - blok zobrazující jednotlivé průběhy zkratových proudů ve větvích obvodu
- **Scope1** - blok zobrazující poruchové proudy v jediném výsledném grafu
- **Scope2** - blok zobrazující výsledný průběh proudu a napětí na vypínači

V simulačním procesu byly nastaveny parametry vybraných prvků hybridního vypínače podle publikace [26], které jsou přehledně znázorněny v tabulce 3.1.

| Označení a počet tyristorů | Označení a ochranná úroveň svodiče přepětí | Rezistory | Kondenzátory |
|----------------------------|--|----------------------|---------------------|
| T1.1 - 19 ks | MOV1.1 - 7 kV | R1.1 - 15 k Ω | C1.1 - 500 μF |
| T1.2 - 19 ks | MOV1.2 - 80 kV | R1.2 - 6 k Ω | C1.2 - 1200 μF |
| T2 - 38 ks | MOV - 180 kV | R2 - 30 k Ω | C2 - 250 μF |

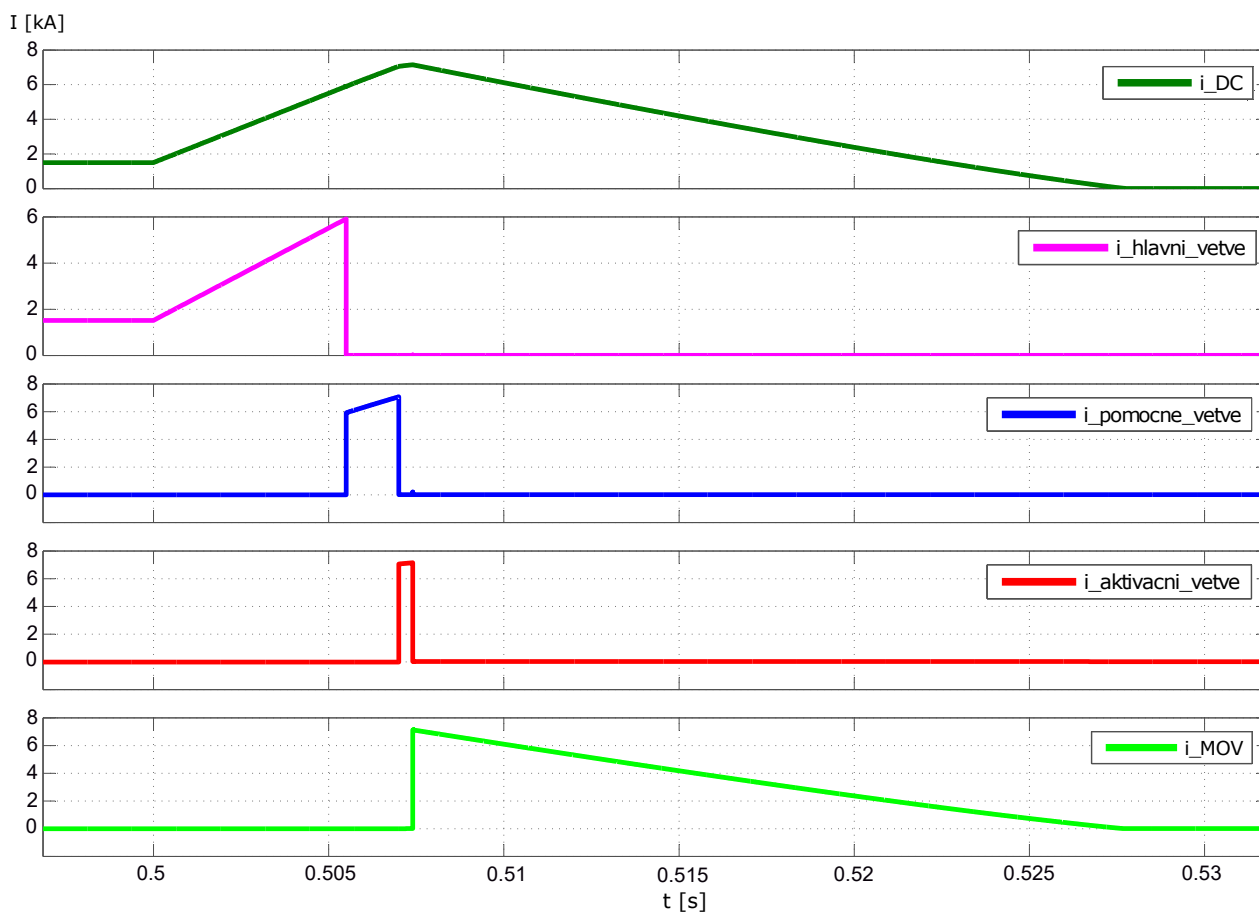
Tabulka 3.1: Nastavené hodnoty svodičů přepětí, kondenzátorů a rezistorů v příslušných větvích hybridního vypínače Alstom [26]

3.3.2 Průběh vypínání zkratových proudů

Zobrazené průběhy na obrázku 3.11 přehledně znázorňují procházející proudy jednotlivými větvemi hybridního Alstom vypínače. První průběh tohoto grafu v *zeleném* provedení představuje celkový proud procházející hybridním vypínačem, jehož doba trvání činí 28,1 ms. Druhý *růžový* průběh, zobrazující proud hlavní větve obvodu, má vypínací čas nastaven na hodnotu 5,5 ms po době vzniku zkratu, čímž umožňuje přenést proud do velikosti 5,92 kA. Jmenovitý proud dosahující 1,5 kA prochází v nominálním stavu pouze hlavní větví hybridního vypínače. *Modrý* graf, zobrazující zkratový proud pomocné větve, v některých literaturách uváděna jako (zpoždovací, či temporizační) větev, přebírá proud 5,92 kA a během 1,5 ms umožní zkratový proud zvýšit na hodnotu přibližně 7,07 kA. Bezpečné vypnutí této větve zajistí fázově řízené tyristory typu 5STP 48Y7200 s maximální efektivní hodnotou propustného proudu I_{RMS} dosahující velikosti 7,6 kA v době 0,507 ms, respektive 7 ms po době vzniku zkratu. Po vypnutí pomocné větve hybridního vypínače převezme veškerý zkratový proud aktivační větev, jež zvýší hodnotu zkratového proudu na hodnotu 7,2 kA, která je v obvodu nejvyšší dosažitelná.

Vypnutí aktivační větve zařídí opět výkonový fázově řízený tyristor stejného typu s nastaveným vypínacím časem 7,4 ms od okamžiku vzniklého zkratu. Tyristory společnosti ABB se nachází v přítlačných typech pouzder a jsou přítlačovány poměrně velkou silou mezi chladiče.

Posledním krokem vypínacího procesu zobrazeného v pátém průběhu tohoto grafu je svedení proudu k nulové hodnotě. Doba absorpčního procesu je možné měnit podle nastavení koeficientů svodiče přepětí. Hlavní parametr ovlivňující celkovou dobu vypínacího procesu, respektive absorpčního procesu, je ukryt v ochranné úrovni napětí daného svodiče. Čím vyšší byla v simulačním procesu nastavena ochranná úroveň napětí, tím kratší dobu trval vypínací proces, ale s rostoucí velikostí ochranného napětí je zapotřebí větší požadavek dimenzování na všechny zařízení umístěné v simulačním procesu. V této simulaci jsou hodnoty nastaveny tak, že doba svedení proudu k nule trvá přibližně 20,3 ms s reálně nastavenou hodnotou ochranného napětí svodiče o velikosti 180 kV.

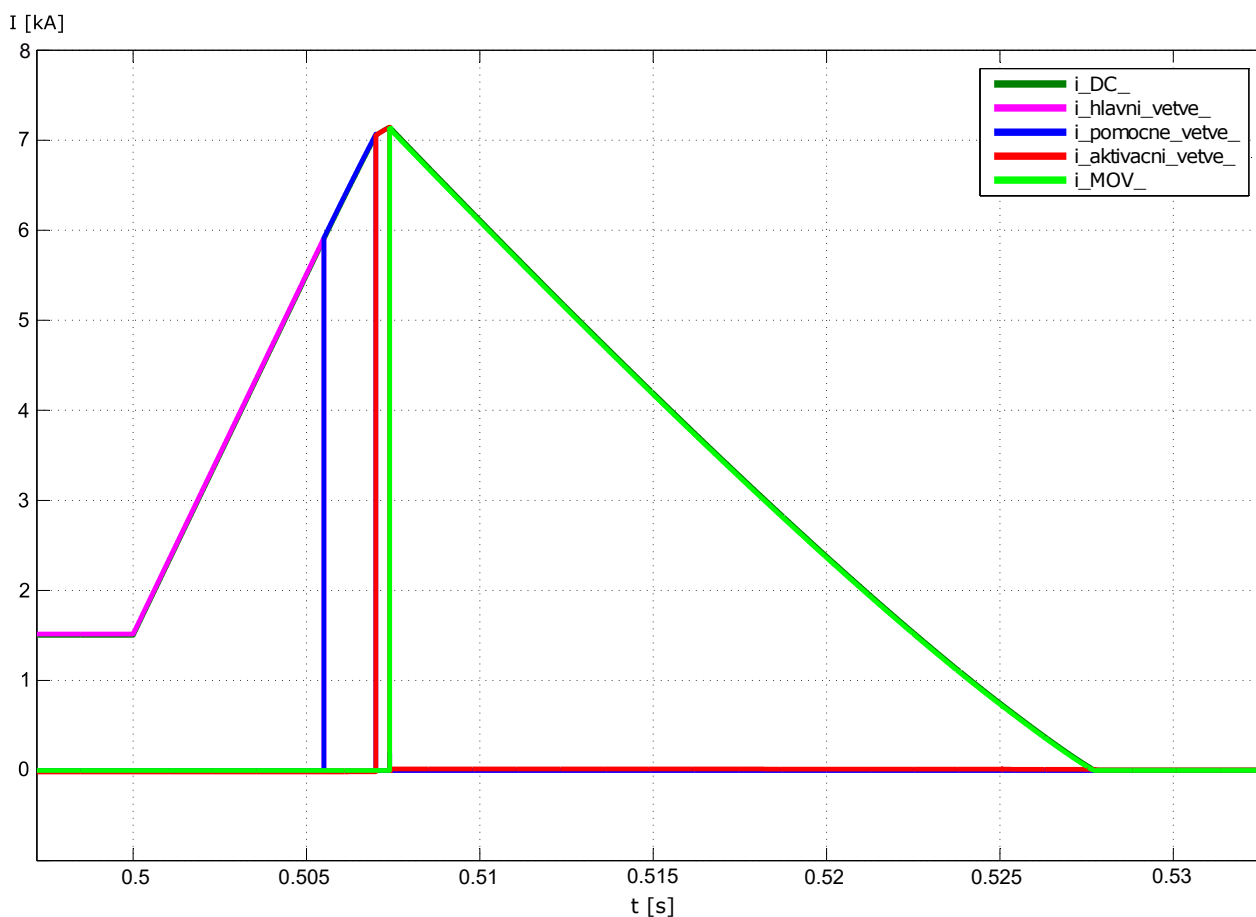


Obrázek 3.11: Vypínání zkratového proudu hybridního Alstom vypínače s přehledným zobrazením jednotlivých větví obvodu - Scope

Všechny simulace hybridního vypínače byly provedeny pomocí *Solveru* ode23tb(stiff/trbdf2) s nastaveným typem *Variable step*, které jsou vhodné k simulaci modelů se spojitými stavy.

Následující průběh vyobrazený na obrázku 3.12 graficky znázorňuje proudy ve všech větvích obvodu umístěných v jednom přehledném grafu. Průběhy proudů v grafu 3.11 a 3.12 jsou

shodně barevně sjednoceny pro lepší ilustraci procházejících proudů. Do času 0,5 s prochází hlavní větví vypínače jmenovitý proud sítě 1,5 kA a díky nastavené indukčnosti L_{dc} o velikosti 0,15 H má zkratový proud nárůst 0,77 kA / 1 ms. Celkový nárůst proudu činí 5,7 kA / 7,4 ms. Komutační spínač *LCS* obvykle umožní vypnout proud přesahující 20 % jmenovité hodnoty. V této simulaci byl nastaven vypínací čas hlavní větve na hodnotu 5,5 ms, který by v praxi měl být nastaven na nižší hodnotu. Celkový vypínací proces DC vypínače by měl dosahovat hodnoty okolo 5 ms, aby zařízení ve stejnosměrném přenosu nebylo vystaveno vysokým hodnotám zkratového proudu způsobujícího velké tepelné namáhání jednotlivých součástí. Tato konfigurace hybridního Alstom vypínače je výhodná z hlediska nízkých provozních ztrát, neboť jmenovitý proud neprochází v bezporuchovém stavu pomocnou a aktivační větví. Procházející zkratový proud pomocnou větví zajistí od okamžiku vypnutí komutačního spínače nabíjení kondenzátorů *C1.1* a *C1.2*.

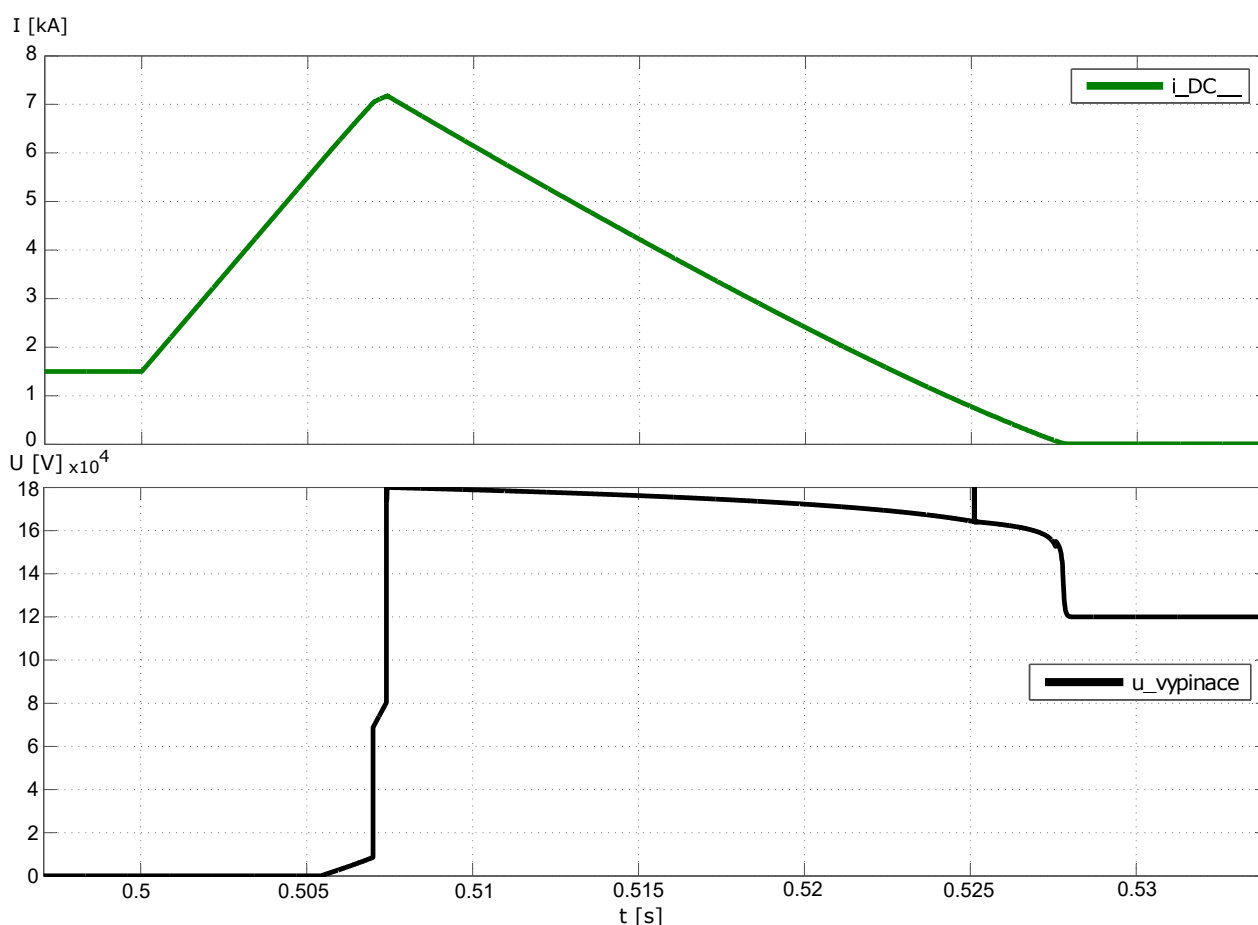


Obrázek 3.12: Vypínání zkratového proudu hybridního Alstom vypínače - Scope1

Obsažené tyristory *T1*, *T1.1* a *T1.2* jsou v tomto simulačním procesu reprezentovány tyristory PCT, jež jsou využity v aplikacích jako ventily a pracují na principu fázového řízení proudu u převodu střídavého proudu na stejnosměrný, či naopak. Mezi jejich výhody patří možnost pracovat při nízkých frekvencích, nejčastěji při síťové frekvenci. Největší atraktivitu těchto tyristorů je možné shledat v efektivním řízení velmi vysokých hodnot proudů s minimálními ztrátami v propustném stavu. [24]

Pomocná a aktivační větev hybridního Alstom vypínače jsou v této simulaci složeny ze čtyř vypínatelných PCT tyristorů, které díky nastaveným hodnotám rezistance představují větší počet tyristorů, v pomocné větvi představuje každý tyristor celkově 19 tyristorů a jeden tyristor aktivační větve rezistancí odpovídá 38 tyristorům. Pomocná větev obsahuje i kombinaci dvou paralelních pomocných větví, jež mají za úkol rozdělit zkratový proud do dvou částí, čímž dochází k rovnoměrnému tepelnému a proudovému zatížení obou větví.

Dolní pomocná větev, obsahující tyristor $T1.2$, má vypínací čas nastaven na 7 ms po době vzniku zkratu a její princip je shodný s horní zpožďovací větví, u které vypínací čas dosahuje hodnoty 6 ms.



Obrázek 3.13: Průběh procházejícího proudu a napětí na vypínači Alstom - Scope2

Klíčové průběhy hybridního vypínače Alstom jsou představeny v grafu 3.13, kde je ve stejném měřítku nad sebou zobrazen celkový proud procházející vypínačem a napětí na vypínači. Do doby vypnutí komutačního spínače LCS je na vypínači nulové napětí, které se po rozepnutí kontaktů komutačního spínače začne pomalu zvyšovat a v okamžiku vypnutí tyristoru $T1.1$ dosahuje velikosti 3 kV, čímž vyhovuje předpokladům pro správnou funkčnost celého vypínače, neboť ochranná úroveň napětí první pomocné větve je nastavena svodičem přepětí na 7 kV. V okamžiku 0,507 s dochází k současnému vypnutí tyristorů $T1$ a $T1.2$ způsobující prudký nárůst napětí z 8,6 kV na hodnotu 69 kV. Ochranná úroveň svodiče přepětí je v druhé pomocné větvi nastavena na velikost 80 kV, což opět splňuje požadavek na korektní

průběh vypínacího procesu. Po úplném vypnutí pomocné větve se napětí z 69 kV ještě zvýší na úroveň 80 kV a při této hodnotě nastane rozepnutí poslední aktivační větve tyristorem T_2 , které vyvolá mžikový nárůst napětí na maximální dosažitelnou úroveň v celém vypínacím procesu dosahující velikosti 180 kV. Při ochranném napětí 180 kV je zkratový proud ve své maximální hodnotě 7,2 kA a díky vhodně nastaveným svodičům přepětí absorpční větve se napětí i proud postupně snižují na příslušné hodnoty. Důležitým aspektem svodiče přepětí je odvedení nahromaděné energie ve formě proudu k nulové hodnotě a současnému snížení napětí na úroveň napájecího napětí sítě 120 kV, které nastává v čase 0,5281 s.

V grafu 3.13 je v průběhu napětí na vypínači zobrazen špičkový impuls, který bohužel nebylo možné z průběhu žádným způsobem odstranit. Při změně velikosti kondenzátoru C_2 byl tento špičkový impuls pouze přesunut do oblasti, kde již obvodem neprochází proud a došlo tam k velkému napěťovému zákmitu. Při změně hodnoty *snubber* odporů jednotlivých tyristorů byl změněn průběh napětí při vypínání dílčích tyristorů, to jest od období 0,5055 do 0,5074 s. Těsně před ustálením napětí na velikost 120 kV došlo díky změně *snubber* odporů také k určitému zákmitu napětí. Ve schématu zapojení vypínače Alstom 3.10 se nachází saturační blok, který omezuje horní hranici napětí vypínače. Tento blok byl do simulace vnořen z důvodu omezení velkého napěťového impulsu vzniklého při vypnutí tyristoru T_2 , tento velký napěťový impuls by mohl zapříčinit zničení celého hybridního vypínače.

Na poslední blok řízení *Control RCD* nejsou kladeny požadavky rychlých vypínacích dějů, neboť má tento blok v obvodu za úkol dát vypínací povel vypínači *RCD*, který vypíná proud o velikosti jednotek μA či pA, jež může procházet obvodem určitou dobu po svedení proudu svodičem přepětí. Jedná se o bezpečnostní reziduální vypínač zařazený před všemi větvemi obvodu. Tento reziduální vypínač však musí být odolný vůči průchodu největšího možného zkratového proudu hybridním vypínačem Alstom.

Možnosti navazující práce v oblasti hybridních stejnosměrných vypínačů mohou být spojeny s nově nastavenými hodnotami simulačních procesů a detailně propracovaným systémem řízení s podrobným rozbohem jednotlivých součástí tvořící celkový koncept vypínače. Budoucí simulace stejnosměrného vypínače by mohla být vytvořena do celkového systému HVDC, v kterém by byly zakomponovány konvertorové stanice napojené na dvě napěťově odlišné AC systémy, parametry stejnosměrného vedení, systém řízení vypínače s možností obousměrného přerušení procházejícího proudu. Další práce by mohla zahrnovat detailní analýzu s výsledným simulačním průběhem hybridního vypínače čínské energetické přenosové soustavy SGCC. Celková oblast HVDC přenosu je pro budoucí tvůrce bakalářských, diplomových, či disertačních prací ve všech aspektech zajímavá, neboť se jedná o velmi efektivní přenos elektrické energie na velké vzdálenosti o vysokých napěťových hladinách (nejčastěji ± 320 kV, ± 500 kV, ± 600 kV, ± 660 kV, ± 800 kV a nyní již i ± 1100 kV), ve kterém jsou obsaženy všechny prvky moderní elektroniky. HVDC systém je použit na všech světových kontinentech a jeho hodnota čítá více než 150 uvedených projektů do provozu. Jelikož HVDC přenos nepatří mezi žádná ojedinělá témata a v Evropě je vybudováno již více než 40 HVDC systémů, je z autorova hlediska téma ***HVDC*** pro budoucí zkoumání velmi atraktivní.

4 Závěr

Diplomová práce s názvem *Moderní technologie v oblasti spínacích přístrojů sítí HVDC* je ve své podstatě zaměřena na prohloubení informací bakalářské práce nesoucí název *Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání*, která byla stejným autorem sepsána v bakalářském studiu. V první kapitole diplomové práce byl autorem vytvořen ucelený přehled mnoha stejnosměrných vypínačů používaných ve stejnosměrném přenosu s detailním principem vypínání zkratových proudů. Mnoho typů vypínačů pro stejnosměrný přenos, které byly v práci popsány, pracují na mechanickém principu bez použití polovodičových součástí, mezi tyto vypínače patří elektromechanický vypínač s pasivní rezonancí umožňující vypnout zkratový proud až 4 kA, vypínač s aktivní rezonancí je schopný přerušit proud až 8 kA. První kapitola zahrnuje popis třech typů polovodičových vypínačů vynikající svou spolehlivou a velmi rychlou přerušovací schopností s možností přerušování až 5 kA. Mezi jejich nevýhody však patří vysoké hodnoty ztrát představující v propustném nominálním stavu až 30% celkových ztrát měničových stanic. Poslední a nejspíše tou nejvíce průlomovou oblastí dnešních vypínačů zahrnuje výzkum a vývoj hybridních vypínačů představující možnost vypnutí zkratového proudu až 9 kA a díky rychlému vývoji polovodičové techniky je tato hodnota teoreticky stanovena na 16 kA. Autor diplomové práce se detailně zaměřil na hybridní vypínače s nucenou komutací, hybridní vypínače Alstom, SGCC a především na hybridní vypínač společnosti ABB, o kterém z internetových publikací zjistil mnoho zajímavých informací, jež sepsal do první kapitoly a především do třetí, kde je možné najít i velmi detailní popis vypínacího procesu.

V druhé kapitole diplomové práce se nachází projekty HVDC sítí, za zmínku zde stojí především vysokonapěťový stejnosměrný projekt Suedlink, jež má být v budoucích letech vytvořen na území Německa, kde umožní tok energie ze severní části Německa zahlcený větrnými elektrárnami do jižní průmyslové oblasti Baden-Württemberska a Bavorska. Tento projekt dosahuje vzdálenosti 868 km s možností přenosu 4 GW s celkovou cenou 324 miliard Kč. Velmi zajímavé hledisko rozvoje energetických zdrojů představilo Německo ve své publikaci pro Suedlink, kde počítá u větrných elektráren s nárůstem na 73,5 GW do roku 2030 ze stávajících 59,42 GW datujících k roku 2019. U fotovoltaických elektráren dosahuje tato prognóza nárůstu z počátečních 45,93 GW na 66,3 GW v období stejného časového horizontu. Projekt Suedlink je z hlediska koncepce velmi důležitý i pro Českou republiku, neboť budou díky tomuto projektu vyřešeny z určité části i přetoky elektrické energie přes ČR, které v tomto případě budou přenášeny přes HVDC systém napojený na větrné parky. Z hlediska technicko-ekonomického srovnání HVDC a HVAC systému se v druhé kapitole nachází porovnání projektového vedení v Pakistánu umožňujícího přenést 4 GW při napětí ± 660 kV, které má dosahovat délky 878 km s celkovými náklady 2362 M\$ pro HVDC konfiguraci, respektive 2785 M\$ pro HVAC systém. Detailní popis investičních a celkových finančních srovnání je popsán v podkapitole 2.2.1. V druhé kapitole je možné spatřit podrobný popis řízení VSC-

HVDC systému s jednotlivě definovanými vztahy pro přenášený činný a jalový výkon. Na konci druhé kapitoly je možné shledat 120 kV hybridní vypínač společnosti Alstom s grafickým zobrazením vypínacích větví obvodu a popisem vypínacího průběhu zkratového proudu. U prototypu hybridního vypínače Alstom byly úspěšně testovány zkoušky francouzskou přenosovou společností RTE v rámci demonstračních aktivit rozsáhlého projektu TWENTIES, které mu umožňují přerušit proud 5,2 kA za čas 5 ms. Nejvýkonnější transformátor na světě o napětí 1100 kV, vyrobený společností Siemens, je popsán v 2.1.2.

Ve třetí kapitole diplomové práce se nachází simulace tří typů hybridních vypínačů, první z nich je nazýván dle svého funkčního principu jako hybridní vypínač s nuceným komutačním obvodem, druhý a třetí hybridní vypínač pracuje na vypínacím principu společností ABB a Alstom. Hybridní vypínač s nuceným komutačním obvodem byl nastaven dle reálných elektrických parametrů podle publikace [25], která vychází z podrobných informací univerzity v Aachenu, která tento vypínač poprvé představila. V diplomové práci se nachází vytvořený model hybridního vypínače v MATLABu Simulink, který vykazuje stejné vypínací průběhy proudu v jednotlivých větvích obvodu jako model navržený výzkumnou institucí *State Grid Smart Grid Research Institute*. Vypínací schopnost vypínače je nastavena na hodnotu zkratového proudu dosahující 3,9 kA s celkovou dobou vypnutí 3,69 ms. Velká přednost tohoto vypínače je uschována v možnosti vypnutí mechanického spínače bez vzniku elektrického oblouku, díky vhodně nastavenému komutačnímu obvodu, který je řízený pomocí výkonových tyristorů. Druhý simulovaný hybridní vypínač principiálně fungující na konfiguraci společnosti ABB byl nastaven podle několika publikací s reálně nastavenými vypínacími časy. Tento vypínač je připojen na napětí 320 kV a byla mu přiřazena indukčnost o hodnotě 0,45 mH, která oproti indukčnosti 0,1 mH nemá tak rychlý nárůst zkratového proudu. Provedený model hybridního vypínače ABB vyniká svým systémem řízení, jenž je odlišný od ostatních simulovaných vypínačů, neboť je logicky nastaven na maximální hodnoty procházejících proudů jednotlivých větví podle funkčních bloků *if*. Hybridní vypínač ABB přenášející v nominálním režimu 2 kA umožňuje vypnout zkratový proud o hodnotě 3,75 kA za 17,5 ms, samotné vypnutí IGBT tranzistorů v pomocné větvi ABB vypínače trvá pouze 2,5 ms po době vzniku zkratu, ale celkový vypínací čas dosahuje takto vysoké hodnoty z důvodu 15 ms trvajících absorpčního procesu zajišťujícího odvedení nahromaděné energie z obvodu. Poslední simulovaný vypínač od firmy Alstom byl z hlediska nastavení nejvíce obtížný, poněvadž jeho obvod je velmi rozsáhlý díky použitým tyristorům, rezistorům, kondenzátorům a svodičům přepětí. Tento vypínač ve své konfiguraci obsahuje oproti hybridnímu vypínači ABB ještě jednu proudovou větev navíc, nazývanou jako aktivační. Hybridní vypínač Alstom má parametry jednotlivých zařízení nastaven podle publikace [26], která se velmi detailně zabývá hybridními vypínacími. Hybridní vypínač Alstom je schopný vypnout zkratový proud 7,2 kA za čas 28,1 ms. Každý simulovaný vypínač měl nastaven v absorpční větvi ochrannou úroveň napětí na velikost 1,5 násobku jmenovitého napětí sítě. Pro hybridní vypínač s nucenou komutací dosahuje ochranné napětí svodiče přepětí hodnoty 30 kV, hybridní vypínač ABB má nastavenou ochrannou úroveň 480 kV a Alstom vypínač 180 kV.

5 Literatura

- [1] AUGUSTIN, T., S. NORRGA a H.-P. NEE. Modelling of HVDC breakers for HVDC grid simulations. In: *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2017, 2017, 74 (6.)-74 (6.) [cit. 2018-10-08]. DOI: 10.1049/cp.2017.0074. ISBN 978-1-78561-421-7. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2017.0074>
- [2] MOKHBERDORAN, A., H. LEITE, A. CARVALHO a N. SILVA. A Review on HVDC Circuit Breakers. In: *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2014, 2014, 5.1.2-5.1.2 [cit. 2018-10-28]. 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>
- [3] MUSIL, Josef. *Provoz HVDC sítí s důrazem na problematiku spínání* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2017 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27589/1/BP_Musil.pdf
- [4] HROZEK, Dian. SuedLink – vedení pro větrnou energii a páteř Energiewende. *OENERGETICE.CZ* [online]. 15. listopadu. 2015 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/suedlink/>
- [5] VOBORIL, David. SuedLink: Dokončení páteřní linky vedení Německa odloženo na 2025. *OENERGETICE.CZ* [online]. 2016, 29. září 2016 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/elektrina/suedlink-dokonceni-paterni-linky-vedeni-nemecka-odlozeno-na-2025/?fbclid=IwAR1txs8L3KXlax8bXQr1xRN1kJLs_K6tEm8iq2Hvtvx2wKIS60NRhhy705I
- [6] SUEDLINK DIE WINDSTROMLEITUNG: HGÜ-TECHNOLOGIE. *Transnet BW* [online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://www.transnetbw.de/de/suedlink>
- [7] *SuedLink Gleichstrom-Erdkabe: Für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung* [online]. 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Our_Grid/Onshore_Germany/SuedLink/Technologie/Factsheet_Technik_Gleichstrom-Erdkabel_.pdf
- [8] *NETZAUSBAU FÜR DIE ENERGIEWENDE: TECHNOLOGIE UND UMSETZUNG* [online]. 2016 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.transnetbw.de/downloads/uebertragungsnetz/projekte/suedlink/basisbroschuere.pdf?v2>

- [9] *Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland* [online]. 2018 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm?year=all&period=annual&type=power_inst
- [10] *Technical advantages* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages>
- [11] *Economic and environmental advantages* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>
- [12] *Fact Sheet: High-voltage direct current transmission (HVDC)* [online]. 2014 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/energy/2013-08-x-win/factsheet-hvdc-e.pdf>
- [13] RAZA, Ali, Armughan SHAKEEL, Hafiz Tahzeeb ul HASSAN, Mohsin JAMIL a Syed Omer GILLANI. Economic Analysis for HVDC Transmission System in Pakistan. *International Journal of Control and Automation*. 2017, 10(11), 29-38. DOI: 10.14257/ijca.2017.10.11.03. ISSN 20054297. Dostupné také z: http://www.sersc.org/journals/IJCA/vol10_no11/3.pdf
- [14] MAJLING, Eduard. Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách. *O Energetice.cz* [online]. 13. červen 2015 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach/>
- [15] DU, Cuiqing. *The control of VSC-HVDC and its use for large industrial power systems* [online]. Göteborg, 2003 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/70561950.pdf>. Disertace. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [16] MACH control and protection system. *ABB* [online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://new.abb.com/systems/hvdc/mach-control-and-protection-system>
- [17] Weltweit erster 1.100-kV-HGÜ-Transformator. *SIEMENS* [online]. Nürnberg, 2018, 24 Januar 2018 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/press/de/feature/2018/energymanagement/2018-01-1100kv.php#ii158>
- [18] *ABB review: Breakthrough technology* [online]. 2013, 2013(2) [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/4571d0d0f0d5c4d5c1257b8f0028d642/ABB%20Review%202-2013_72dpi.pdf
- [19] DERAKHSHANFAR, R., T.U. JONSSON, U. STEIGER a M. HABERT. *Hybrid HVDC breaker – Technology and applications in point-to-point connections and DC grids* [online]. CIGRE 2014, 2014 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/36a26a2c0458fdc9c1257d5d002eb98b/Hybrid%20HVDC%20breaker%20_Technology%20and%20applications%20in%20point-to-point%20connections%20and%20DC%20grids.pdf

- [20] HASSANPOOR, Arman, Jurgen HAFNER a Bjorn JACOBSON. Technical Assessment of Load Commutation Switch in Hybrid HVDC Breaker. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2015, 30(10), 5393-5400 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2372815. ISSN 0885-8993. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6963422/>
- [21] CALLAVIK, Magnus, Anders BLOMBERG, Jürgen HÄFNER, a Björn JACOBSON. *The Hybrid HVDC Breaker: An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids* [online]. 2012 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/c9d5ba256e7e9671c1257ab6004b1feb/hybrid-hvdc-breaker---an-innovation-breakthrough-for-reliable-hvdc-gridsnov2012.pdf>
- [22] *HVDC circuit breakers: driving towards the Supergrid* [online]. 8 December 2014 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.think-grid.org/hvdc-circuit-breakers-driving-towards-supergrid>
- [23] *120 kV Ultra Fast Direct Current Circuit Breaker: Successfully tested under operational constraints of HVDC transmission grid* [online]. 2013 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: http://www.think-grid.org/sites/default/files/HVDC_Breaker_V4%20-%20Wall%20Panel%20v08.pdf
- [24] ABB, „ABB-Produkty-Polovodiče-Tyristory-Fázově řízené tyristory (PCT),“ 2017. [Online]. Available: <http://new.abb.com/semiconductors/cs/thyristors/pct>.
- [25] BINGJIAN, Yang, Gao YANG, Wei XIAOGUANG, He ZHIYUAN, Chen LONGLONG a Shan YUNHAI. A hybrid circuit breaker for DC-application. In: *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 187-192 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1109/ICDCM.2015.7152036. ISBN 978-1-4799-9880-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7152036/>
- [26] JAMSHIDI FAR, Aliakbar a Dragan JOVCIC. Design, Modeling and Control of Hybrid DC Circuit Breaker Based on Fast Thyristors. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2018, 33(2), s. 919-927 [cit. 2019-03-21]. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2761022. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8063336/>