

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hybridní vypínače pro stejnosměrné sítě VVN

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip KOTÁB**
Osobní číslo: **E12B0030P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Hybridní vypínače pro stejnosměrné sítě VVN**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zpracujte rešerši aktuálního stavu problematiky hybridních, mechanických a polovodičových vypínačů VVN pro stejnosměrné sítě.
2. Popište princip, provedení a užití hybridních vypínačů.
3. Proveďte simulaci vypínacího procesu hybridního vypínače.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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


Seznam odborné literatury:

1. Häfner J., Jacobson B. Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids. In: International Symposium in Bologna. September 2011, Italy.
2. Kapoor R., Shukla A. Modelling and Control of a Hybrid Circuit breaker with Fault Current Limiting Ability. In: International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. December 2012, India.
3. Kapoor R., Shukla A., Demetriades G. State of Art of Power Electronics in Circuit Breaker Technology. IEEE 2012. ISBN 978-1-4673-0803-8.
4. Dokumenty ABB.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Šnajdr**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na princip vypínání stejnosměrných sítí pomocí hybridních vypínačů. V práci je zahrnut popis fungování stejnosměrných sítí, vlastnosti, výhody a použití. Dále se v práci objevuje srovnání jednotlivých typů vypínačů, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody. V poslední části je zhotoven proces vypínání bezporuchových i poruchových stavů hybridního vypínače velmi vysokého napětí včetně simulace tohoto procesu v softwaru MATLAB Simulink. Výsledky simulace vypínání odpovídají teoretickým předpokladům hybridního vypínače. Ověření vypnutí jmenovitého a poruchového proudu je v práci dostatečně popsáno, uvedeno a vysvětleno.

Klíčová slova

Hybridní vypínač, komutační spínač, ultra rychlý vypínač, přenosová síť, reaktance, zhášedlo, impregnant, saturace, komutace, tlumivka, kapacitor, svodič přepětí

Abstract

This bachelor thesis is focused on the principle of breaking DC networks by hybrid breakers. There is description of functioning of DC networks, properties, benefits and uses. Next step compares different types of breakers, their properties, benefits and disadvantages. In the last part is breaking process of undisturbed and failure states of the hybrid breaker high voltage direct current including simulation of this process in MATLAB Simulink software. A result of the simulation equals theoretical assumptions of the hybrid breaker. Verifying of breaking nominal and failure current is enough described and explained in this bachelor thesis.

Key words

Hybrid breaker, commutation switch, ultra fast disconnecter, transmission grid, reactance, quenching medium, impregnate, saturation, commutation, reactor, capacitor, surge arrester

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2015

Filip Kotáb

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za cenné profesionální rady, potřebnou pomoc v případě nejasností a neustálou motivaci k práci. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Vladimíru Vajnarovi, který mi též pomáhal s prací ohledně simulací.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ÚVOD DO STEJNOSMĚRNÝCH SÍTÍ, VLASTNOSTI, VÝHODY A POUŽITÍ	11
1.1 PROČ POUŽÍVAT HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)	12
1.2 PŘEMĚNA AC NA DC SÍŤE	12
1.2.1 Výkon získaný pomocí přeměny	13
1.2.2 Rozdíl mezi AC a DC vedením	13
1.2.3 Monopolní oproti bipolárnímu systému	14
1.3 POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH A POLOVODIČOVÝCH VYPÍNAČŮ STEJNOSMĚRNÝCH SÍTÍ	14
1.3.1 Mechanické vypínače	14
1.3.2 Polovodičové vypínače	15
1.4 VÝHODY HVDC	15
1.5 NEVÝHODY HVDC	16
1.6 DÁLKOVÉ VODNÍ PŘECHODY	16
1.7 EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ VÝHODY HVDC	17
1.8 TYPY HVDC SÍTÍ	18
1.9 NEJDELŠÍ HVDC PŘENOSOVÉ SPOJENÍ V EVROPĚ (NORDLINK)	19
2 HYBRIDNÍ VYPÍNAČ	21
2.1 POPIS HYBRIDNÍHO VYPÍNAČE	21
2.2 PRINCIP MECHANICKÉHO VYPÍNÁNÍ	23
2.3 PRINCIP ČINNOSTI HYBRIDNÍHO VYPÍNAČE	24
2.4 PROACTIVE CONTROL	25
2.5 PROVEDENÍ HYBRIDNÍHO VYPÍNAČE	26
2.6 TEORETICKÉ TESTOVÁNÍ HYBRIDNÍHO VYPÍNAČE	27
2.6.1 Testování IGBT prvků	27
2.6.2 Testování hybridního vypínače	29
3 IGBT TRANZISTORY	31
3.1 PRINCIP ČINNOSTI IGBT TRANZISTORŮ	31
3.2 PROUDOVÁ A NAPĚŤOVÁ ZATÍŽITELNOST IGBT TRANZISTORŮ	32
4 SIMULACE HVDC HYBRIDNÍHO VYPÍNAČE	33
4.1 VYPÍNAČÍ PROCES VYPÍNAČE V BEZPORUCHOVÉM STAVU	33
4.2 VYPÍNAČÍ PROCES VYPÍNAČE V PORUCHOVÉM STAVU	37
4.3 PROBLÉMY V SIMULACI A JEJICH ŘEŠENÍ	40
ZÁVĚR	41
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42

Úvod

Práce se zabývá problematikou fungování hybridních vypínačů, jejich popisem, teoretickými předpoklady k vypínání bezporuchových i poruchových stavů stejnosměrných sítí pomocí těchto vypínačů. V práci je řešena problematika stejnosměrných sítí, výhody, nevýhody, použití těchto sítí a porovnání stejnosměrných sítí se střídavými. Toto téma je řešeno z důvodu podstatných výhod stejnosměrných sítí oproti střídavým a možnému rozšiřování těchto sítí v budoucnu po celém světě. V tomto ohledu se zde nabízí obrovské spektrum možností využití těchto sítí, její specifický doplněk ke střídavým sítím a jejich obrovský přínos energetice jako takové.

Hybridní vypínače přináší k těmto sítím výhodný a nezbytný doplněk s ohledem na parametry, respektive jejich rychlé vypínání v řádech milisekund. Vypínač spojuje mechanické a polovodičové principy vypínání, které se navzájem vhodně doplňují. V případě poruchy sítě jsou tyto přístroje velmi důležité, aby nedošlo k ohrožení a přetížení sítě. Tak se zajistí stabilní a spolehlivý stav stejnosměrných sítí. Tento typ stejnosměrných vypínačů se značně liší od vypínačů používaných ve střídavé síti. Ve střídavé síti se snažíme proud vypínat v oblasti nuly. U stejnosměrných sítí se žádný takový stav nevyskytuje, protože zde není harmonický průběh proudu. V takovém případě musíme zejména poruchové proudy vypínat okamžitě a to za pomoci výkonových polovodičových součástek, které dokážou přerušit proudovou cestu velice rychle. Hybridní typ vypínače umožňuje nejprve průchod proudu ultra rychlým mechanickým vypínačem z důvodu malých ztrát při průchodu a poté se proud přerušuje pomocí polovodičových výkonových součástek.

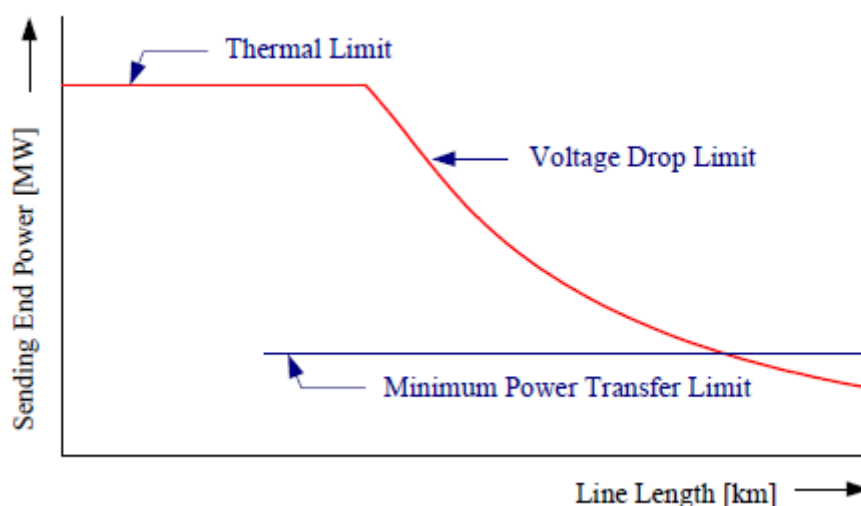
Text je rozdělen do několika částí; první se zabývá vlastnostmi stejnosměrných sítí a popisem mechanických a polovodičových vypínačů, které společně tvoří vypínač hybridní. Druhá představuje funkci a princip vypínání stejnosměrného proudu pomocí hybridního vypínače HVDC. Další část popisuje funkci polovodičových součástek IGBT, které se používají ve vypínači a následnou simulaci vypínacích procesů vypínače v bezporuchovém stavu i ve stavu poruchovém v programu MATLAB Simulink. Úkolem této práce je analyzovat vlastnosti hybridního vypínače, jejich podstatu a využití s ohledem na vypínání stavů ve stejnosměrné síti.

Seznam symbolů a zkratek

HVDC	Stejnosemřný proud vysokého napětí (High Voltage Direct Current)
AC	Střídavé napětí/proud
DC	Stejnosemřné napětí/proud
IGBT	Označení polovodičové spínací součástky
XLPE.....	Izolační materiál ze vzájemně propojeného polyetylénu
UFD.....	Ultra rychlý vypínač (Ultra Fast Disconnecter)
di/dt	Derivace proudu za čas
RCD snubber	Omezovač přepětí
GTO	Vypínací tyristor (Gate Turn Off)
LCS	Komutační spínač (Load Commutation Switch)
U.....	Napětí [V]
I.....	Proud [A]
P	Výkon [W]
MATLAB Simulink.....	Nadstavba programu MATLAB pro simulaci dynamických systémů

1 Úvod do stejnosměrných sítí, vlastnosti, výhody a použití

Princip využívání těchto sítí spočívá v tom, že dokážou přenášet velké množství energie velmi vysokým napětím, přičemž se na vedení objevují minimální ztráty. Sít' vytvořená propojením systémů pro přenos stejnosměrného proudu velmi vysokým napětím může poskytovat velmi výkonný a regulovatelný doplněk k dosavadní střídavé síti. Na rozdíl od střídavého proudu lze u koncepce přenosu stejnosměrným proudem snížit celkové ztráty. Lze zlepšit i řízení toku energie z míst, odkud přenos dosavadních sítí střídavého proudu naráží na svá omezení [3].



Obr. 1.1 Maximální zátěž AC vedení oproti délce vedení [5]

Přenosová kapacita AC nadzemního vedení je omezena z několika důvodů. Na Obr. 1.1 je zobrazen přehled těchto omezení. Pokles napětí na delší vzdálenosti se vyskytuje z důvodu reaktance. Když nastane tato situace, HSIL (High Surge Impedance Loading) pomáhá omezit pokles napětí a také zvyšuje přenosovou schopnost [5].

Přenos stejnosměrného proudu velmi vysokého napětí (HVDC – High Voltage Direct Current) je velmi efektivní technologie přenosu velkého množství elektrické energie na velkou vzdálenost při minimálních ztrátách. Díky těmto přednostem, a také díky možnosti umístit vedení například pod hladinu moře nebo pod zem, se tato technologie používá k přenosu elektrické energie na dlouhé vzdálenosti (např. z vodních elektráren v horách do tisíce kilometrů vzdálených míst spotřeby) a pro podmořské příhraniční přenosy (např. v Evropě). Je to zároveň ideální technologie pro některé nové trendy získávání elektrické

energie, např. pro připojení větrných elektráren na moři a pro další speciální aplikace [3].

Stejnosemřná síť umožňuje také propojení dvou a více střídavých transformačních stanic pomocí stejnosměrných kabelů nebo nadzemním vedením. Každá transformační stanice stejnosměrné sítě zahrnuje převod DC na AC síť. Aby bylo možné udržovat řízení výkonu převodu, je obvykle požadováno, aby stejnosměrné napětí mělo více než 80% jmenovité hodnoty. Pokud převodníky ztratí schopnost ovládnutí vzhledem k nízkému stejnosměrnému napětí, mohou být následky problematické. Může dojít k poklesu napětí v síti a nárůst proudu nebo napěťové namáhání na převodníku [5].

1.1 Proč používat HVDC ? (High Voltage Direct Current)

Střídavý přenos byl přednostní globální platformou pro elektrický přenos do domácností a firem za posledních 100 let. Ale i přenos vysokým napětím AC má určitá omezení, počínaje přenosovými kapacitami, omezení přenosu na dálku a nemožnost přímého spojení dvou střídavých sítí o různých frekvencích. S úsvitem nové energetické éry a nutností vybudovat chytřejší síť se očekává od HVDC růst daleko za své tradiční pozice jako doplněk k AC přenosu [2].

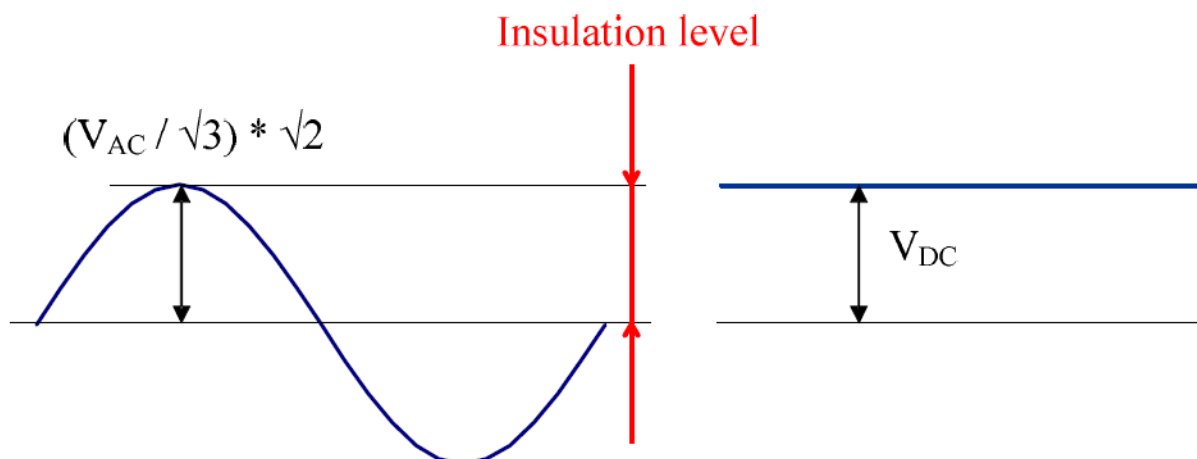
HVDC je dnes metodou volby pro podmořský elektrický přenos, pro propojení třífázových střídavých sítí a poskytuje efektivní, stabilní přenos a řídicí funkce. HVDC je také technologie volby pro dálkový přenos elektrické energie na velmi dlouhé vzdálenosti s nízkými elektrickými ztrátami. Důvody pro výběr HVDC místo AC jsou často výhodné a nezbytné. Buď je přenos HVDC nezbytný, nebo žádoucí v různých případech. Jeden z těchto případů představuje technické hledisko, a tím je v tomto případě ovladatelnost sítě nebo hledisko nižší celkové investice, včetně nižších ztrát nebo z důvodu životního prostředí [2].

1.2 Přeměna AC na DC sítě

Třífázový střídavý systém je normou pro celosvětový přenosový systém, zatímco stejnosměrné systémy jsou prakticky používané v několika větších zemích a používají se pro propojování sítí s odlišnými parametry. V několika případech za předpokladu určitých specifických podmínek, jsou AC sítě přeměňovány na DC sítě za pomoci AC-DC měničů z důvodu prospěchu systému [5].

1.2.1 Výkon získaný pomocí přeměny

Teorie říká, že hodnota vrcholu AC napětí požaduje stejnou izolační úroveň vzhledem k zemi, jako tomu je u DC systému, pokud zanedbáme fakt, že izolační úroveň pro nadzemní vedení záleží hlavně na vypínacím napětí a na atmosférickém přepětí z důvodu úderu blesku do vedení [5].



Obr. 1.2 AC a DC napětí vztahované k izolační úrovni [5]

Přeměna z AC na DC napětí, jak je popsáno výše, vytvoří novou schopnost přenosového výkonu:

$$P_{DC} = \sqrt{2} * P_{AC} \quad (1.1)$$

Toto není jedno z největších zajímavých vylepšení této přeměny. Hodnota stejnosměrného proudu protékajícího vodičem je o něco vyšší než efektivní hodnota střídavého proudu. To je způsobeno tím, že u DC sítí se neobjevuje skin efekt (přibližně 10%), a také se zde neobjevuje reaktance. Vzhledem k tomu, že u AC vedení způsobí reaktance více než 15% ztrát, je přeměna AC na DC znatelnou výhodou [5].

1.2.2 Rozdíl mezi AC a DC vedením

Na první pohled není mezi AC a DC nadzemním vedením žádný fyzický rozdíl. Kromě počtu vodičů je princip nadzemního vedení podobný. Oba typy používají vzduch jako izolaci, oba potřebují dostatek místa mezi vodiči, mezi vodiči a zemí a oba typy musí být chráněny proti atmosférickým vlivům. Rozdíly se objevují například v typu a délce izolátoru, v úrovni koróny a magnetického pole. Tyto rozdíly ovlivňují možnosti pro přechod z AC systému na DC systém. Jeden z největších rozdílů mezi AC a DC vedením je potřeba měření na obou koncích. V případě požadavku uskutečnění této přeměny je

velmi důležité zohlednit cenu těchto měření z důvodu jejich velmi vysoké nákladnosti [5].

1.2.3 Monopolní oproti bipolárnímu systému

Vzhledem k faktu, že DC systém umožňuje přenášet významně větší množství výkonu se stejnými vodiči, přeměna existujícího AC nadzemního vedení na DC nadzemní vedení může být výhodné i přes vysokou cenu měření. S ohledem na snížení ceny může být zvážen monopolní systém, který využívá zem jako zpáteční cestu. Toto je velmi ekonomicky lákavé, protože to znamená plné využití všech vodičů jednoho AC vedení a použití země jako zpáteční cesty přenosu. Ačkoliv je možný tento způsob zpátečního přenosu za pomoci země, existuje pouze několik monopolních systémů z důvodu možného poškození podzemních systémů, jako jsou potrubí a telekomunikační kabely. Tento problém je řešen tak, že polovina AC vodičů je použita jako izolované vodiče, ale pak je kapacita přenosu rozdělena na jednu polovinu. Nicméně, bipolární systém obnovuje kapacitu za pomoci využití pozitivních pólů a negativních pólů. S tímto systémem může být přeneseno stejné množství výkonu přes stejné vodiče, jako monopolní systém se zemním návratem [5].

1.3 Porovnání mechanických a polovodičových vypínačů stejnosměrných sítí

Existují různé typy vypínačů pro stejnosměrné sítě a každý má své specifické využití. V současné době převažuje používání polovodičových součástek z důvodu svých ideálních vlastností pro bezpečné a rychlé vypínání. Ovšem také se objevují i mechanické vypínače, které mají horší parametry než polovodičové, ale mohou být levnější a pro některé účely bezpečně postačí. V případě hybridních vypínačů se kombinují tyto dva způsoby vypínání.

1.3.1 Mechanické vypínače

Stejněsměrné zhášedlo představuje komplexní elektromagnetický systém, v němž se pro zhášení oblouku (jeho pohyb do komory) využívá vlastní proud vypínaného obvodu. Tento proud prochází i vinutím zhášecí cívky, která budí magnetické pole, jež je přenášeno pomocí feromagnetických bočnic do prostoru kontaktů. V okamžiku oddálení kontaktů (při vypínání) toto příčné magnetické pole zabírá s vlastním polem hořícího

oblouku. Vzniklá síla pak vhání elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory, kde dojde k jeho uhašení, a tím i přerušení toku proudu [11].

Výhody mechanických vypínačů:

- Nižší cena oproti polovodičovým vypínačům

Nevýhody mechanických vypínačů:

- Opalování kontaktů při vypínání, nutnost výměny kontaktů po určitém počtu vypnutí
- Nutnost zhášecí komory, použití zhášecích cívek
- Velikost vypínače
- Pomalejší vypínání oproti polovodičovým vypínačům
- Údržba mechanismu

1.3.2 Polovodičové vypínače

Výhody polovodičových vypínačů:

- Bezkontaktní vypínání
- Není potřeba zhášecí komory
- Menší velikost vypínače
- Rychlejší vypínání
- Není potřeba časté údržby
- Spolehlivost vypínání

Nevýhody polovodičových vypínačů:

- Vyšší cena oproti mechanickým vypínačům

1.4 Výhody HVDC

- Bezpečné a stabilní propojení střídavých energetických sítí, které pracují na různých frekvencích
- Okamžitá a přesná kontrola napájecího proudu
- Zlepšení celkové stability, spolehlivosti a přenosové kapacity

- Nižší dopad na životní prostředí, protože vyžaduje méně nadzemního vedení
- Celkově nižší přenosové ztráty než u AC přenosu (cca 3,5 % na 1000 km)
- Lze použít tenčí vodiče než u AC přenosu

1.5 Nevýhody HVDC

- Větší nároky na vypínání zkratových proudů, neboť se nedá využít průchodu proudu nulou jako tomu je u AC proudu
- Nelze jednoduše zvyšovat nebo snižovat napětí pomocí transformátorů

1.6 Dálkové vodní přechody

U dálkových podmořských vedení není žádné technické omezení potenciální délky HVDC kabelu. V delším přenosu u AC kabelů bude tok jalového výkonu vzhledem k velké kapacitě kabelu omezovat maximální možný přenosový výkon. U HVDC přenosu se kapacita kabelu neuplatní a to je důvod, proč je jedinou možnou alternativou používat tento typ přenosu pro podmořská vedení. Jedna alternativa je mezi Norskem a Nizozemskem, kde se tento podmořský systém používá. Je to nejdelší podmořský stejnosměrný vysokonapěťový kabel na světě, který má celkem 580 km a prochází z jižního Norska, přes Severní moře a končí v Nizozemsku [2].

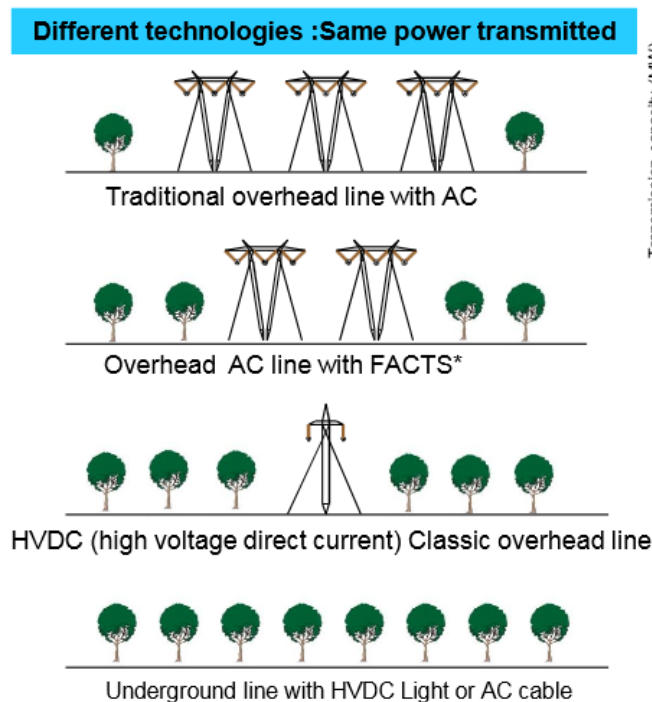
Firma ABB představila v srpnu 2014 průlomovou technologii pro podzemní a podmořský přenos energie. Je jí 525 kV kabel pro stejnosměrné přenosové spojení, používané zejména u obnovitelných zdrojů energie. Tento inovativní kabelový systém používá nový izolační materiál ze vzájemně propojeného polyetylénu (XLPE), vyvinutý firmou Borealis, a koncovky a propojení vyráběné společností ABB. Zatímco dosavadní produkty tohoto typu dovedou přenášet výkon cca 1 000 MW, nový kabel jej zvyšuje na 2 600 MW. Tím zároveň prodlužuje reálně dosažitelnou přenosovou vzdálenost u tohoto typu kabelů ze současných méně než 5 % energetických ztrát. Použití přenosového napětí 525 kV rovněž představuje 64 % zvýšení oproti současným rekordním 320 kV. Díky svým výkonovým parametrům přispěje tento produkt významnou měrou mimo jiné k dalšímu rozšíření technických možností využívání obnovitelných zdrojů energie a k jejich nákladovému zefektivnění [8].



Obr. 1.3 Průřez hliníkové verze kabelu [8]

1.7 Ekonomické a ekologické výhody HVDC

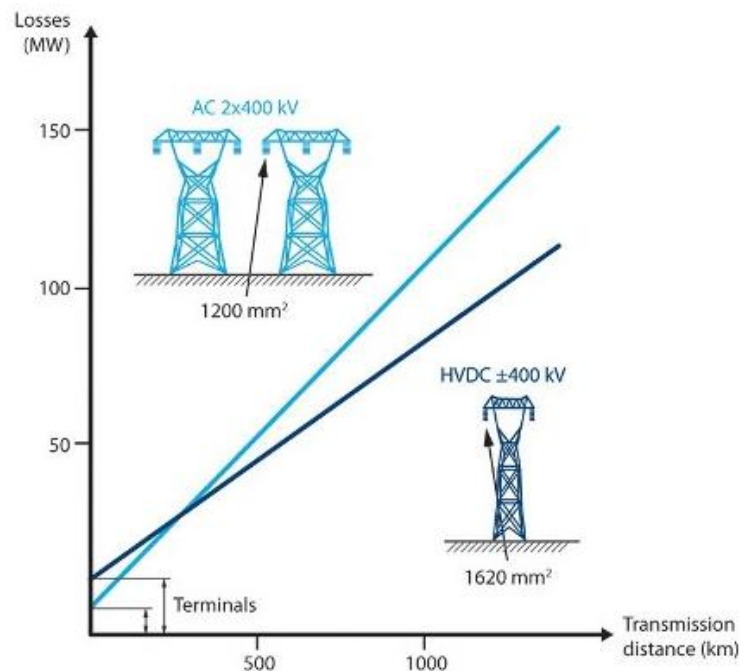
HVDC systémy mají nižší dopad na životní prostředí, protože vyžadují méně nadzemního vedení. HVDC kabely mají rovněž nižší ztráty než AC kabely.



Obr. 1.4 Porovnání stožárů pro AC přenos oproti DC přenosu [6]

Na Obr. 1.4 je vidět rozdíl provedení stožárů pro AC a DC vedení. U AC vedení typicky vedou tři fáze, a proto musí být stožáry mohutnější a zabírají znatelně více místa. U DC stožárů se vyskytují pouze dva póly, takže stožáry nejsou tak mohutné a mají lepší dopad na životní prostředí s ohledem na velikost. V případě provedení kabelového vedení

uloženého v zemi nebo pod mořem není potřeba výstavby stožárů vysokého napětí a venkovní prostředí zůstane nedotčeno.



Obr. 1.5 DC oproti AC vedení [2]

Srovnání mezi oběma systémy s ohledem na délku vedení a ztráty je zobrazeno na Obr. 1.5. Co se týče poměr vzdálenost/výkon vidíme, že DC vedení má při 1000 km ztráty pohybující se kolem 80 MW. AC vedení má pak při stejné hodnotě a vzdálenosti ztráty přes 100 MW. Celkový rozdíl je tedy 20 MW ztrát, což je znatelný rozdíl.

1.8 Typy HVDC sítí

HVDC síť se dělí na 2 typy:

- *HVDC Classic (LCC)*

Tento typ HVDC sítě se zaměřuje na přenos stejnosměrné energie pomocí nadzemního vedení nebo vedení pomocí kabelů, umístěných pod mořem. Používá se také na propojování nezávislých energetických systémů, kde nelze použít střídavý proud. V HVDC systému je elektrická energie převzata z jednoho místa v třífázové síti, převede se na stejnosměrnou energii v měnící stanici a je přenášena pomocí nadzemního vedení nebo po kabelu. Poté je opět převedena zpět na střídavou energii v další transformační stanici a je

dodávána do střídavé sítě. HVDC přenos má typicky jmenovitý výkon více než 100 MW a mnoho přenosů má jmenovitý výkon v rozmezí 1000 – 5000 MW [9].

- ***HVDC Light (VSC)***

Druhým typem HVDC systému je typ HVDC Light. Tento typ je navržen tak, aby bylo možné přenášet elektrickou energii v podzemí a pod vodou na velké vzdálenosti. Nabízí se řada výhod s ohledem na životní prostředí, jako například neutrální elektromagnetická pole, bezolejové měnírny apod. Zvyšuje se zde spolehlivost energetických sítí a tato technologie rozšiřuje ekonomickou oblast výkonu na několik desítek megawattů. V horní hranici technologie dosahuje 1800 MW s přenosovým napětím 500 kV [10].

Výhody tohoto systému jsou následující:

- ***Propojování větrných farem k síti***
- ***Podzemní kabelová vedení***
- ***Poskytování přenosu elektrické energie na ostrovy, olejové a ropné platformy***
- ***Propojování střídavých sítí***

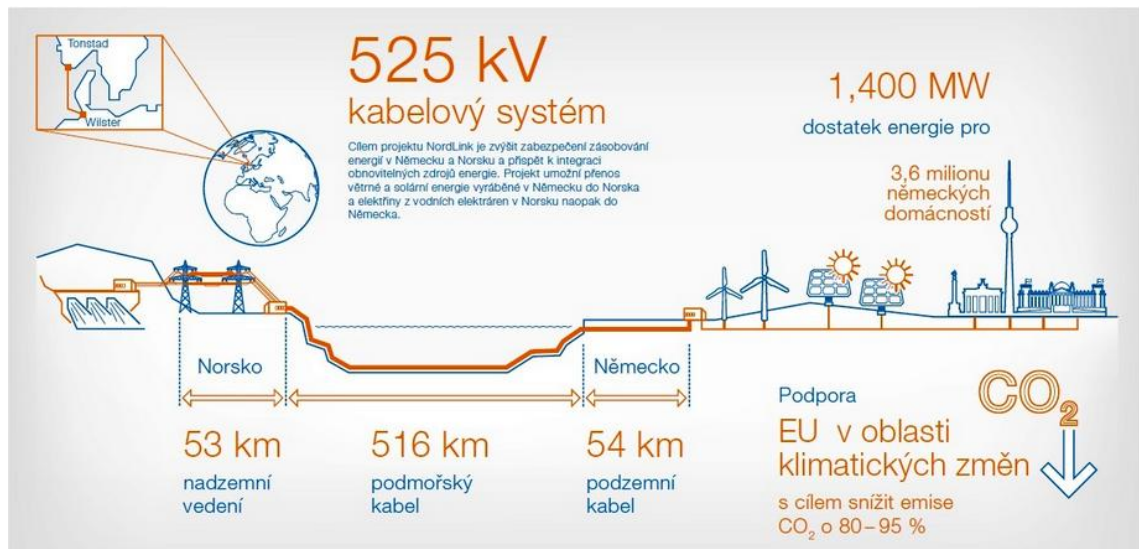
1.9 Nejdelší HVDC přenosové spojení v Evropě (NordLink)

Připravovaný projekt NordLink představuje první přímé propojení přenosových sítí mezi Norskem a Německem. Jeho délka dosáhne 623 km, což z něj činí nejdelší spojení HVDC v Evropě. Svému zprovoznění se toto přenosové spojení významně přiblížilo v polovině března 2015, kdy společnost ABB Group získala od konsorcia tvořeného provozovateli přenosových soustav Statnett a TenneT a bankou KfW objednávky v hodnotě cca 900 milionů dolarů na dodávku pevninských měníren a kabelových systémů HVDC pro německou stranu projektu. Podle plánu by toto spojení mělo začít fungovat v roce 2020. Součástí smlouvy je rovněž pětiletá servisní smlouva [7].

NordLink představuje klíčový prvek propojení norských a německých přenosových sítí a jako takový získal statut projektu společného zájmu Evropské komise, jehož cílem je pomoci vytvořit integrovaný evropsko-unijní energetický trh. Pomůže rovněž zvýšit energetickou bezpečnost v obou zemích a podpoří integraci obnovitelných zdrojů energie

do energetické sítě obou zemí. Konkrétně umožní přenos větrné a solární energie vyrobené v Německu do Norska, z Norska bude naopak do Německa proudit elektřina vyrobená v norských vodních elektrárnách. Toto spojení umožní přenos rekordních 1 400 MW elektrické energie, což odpovídá spotřebě 3,6 milionu německých domácností [7].

Pro projekt NordLink firma ABB navrhne, zkonstruuje, dodá a uvede do provozu dvě měničky s přenosovým napětím 525 kV a přenášeným výkonem 1 400 MW, v nichž bude využita technologie konvertorových zdrojů napětí. Jedna měnička bude umístěna v blízkosti města Tonstad v jižním Norsku, druhá nedaleko severoněmeckého Wilsteru. Kromě toho ABB také navrhne, vyrobí a nainstaluje systém 525 kV kabelů napuštěných impregnantem, který bude využit v německém sektoru a povede 154 km pod mořem a 54 pod zemí [7].



Obr. 1.6 Nejdelší HVDC přenosové spojení v Evropě [7]

2 Hybridní vypínač

U koncepce přenosu stejnosměrného proudu velmi vysokého napětí (HVDC) byly dosud mezi sebou elektricky propojovány vždy dva koncové body sítě bez vypínače, který v uplynulých sto letech představoval chybějící důležitý článek ve vývoji přenosových sítí stejnosměrného proudu. Tuto významnou technickou překážku nyní odstraňuje převratná inovace z dílny firmy ABB – hybridní vypínač HVDC. Jeho hybridní koncepce v sobě spojuje výhody menších ztrát mechanického vypínače UFD (Ultra Fast Disconnect) a větší rychlosti výkonové elektroniky na polovodičové bázi. Hlavními charakteristikami hybridního vypínače HVDC jsou malé ztráty a velmi rychlé operace v řádu několika milisekund – což je třicetkrát rychleji než mrknutí oka. Vypínač si poradí s toky výkonů v řádech tisíců megawattů, což stačí k napájení celých měst. Hybridní vypínač HVDC je konstruován pro současné standardní parametry soustav velmi vysokého napětí, a to do 320 kV a 2 kA, přičemž celé řešení lze rozsahově upravit jak pro nižší, tak i vyšší napětí. Hybridní vypínač HVDC může být navržen pro vypínání poruchového proudu o velikosti až 16 kA [3].

2.1 Popis hybridního vypínače

Smysl slova „hybridní“ spočívá v tom, že tento systém kombinuje dva přístupy. První z nich je klasický mechanický vypínač a druhý představují polovodiče. Hlavní vypínač tohoto přístroje se skládá z 80 kV modulů obsahujících sériově zapojené polovodiče a paralelně zařazené omezovače přepětí. Schopnost vypínaného napětí se zvyšuje přidáním dalších modulů do série. Dosavadní konstrukce je založena na tranzistorech IGBT pro stejnosměrný proud velmi vysokého napětí (HVDC). Hybridní vypínač má interní monitorovací, řídicí a ochranný systém založený na standardní technologii HVDC Light MACH. Pro zajištění správné funkce jsou vnitřní proudy a další signály monitorovány a použity k ovládní vypínače jak za normálních podmínek, tak i při poruše. Zhášení elektrického oblouku, který vznikne při vypínacích procesech, je zde řešeno jinak než u střídavých vypínačů, kde se využívá okamžik průchodu proudu nulou. To u stejnosměrného proudu není možné. U hybridního vypínače se proud nejprve komutuje do hlavního vypínače, nato se rozepne ultra rychlý vypínač (UFD), který je díky tomu vystaven pouze malému svodovému proudu při zanedbatelném elektrickém oblouku. Jakmile je ultra rychlý vypínač v rozepnutém stavu, hlavní vypínač pomocí výkonových

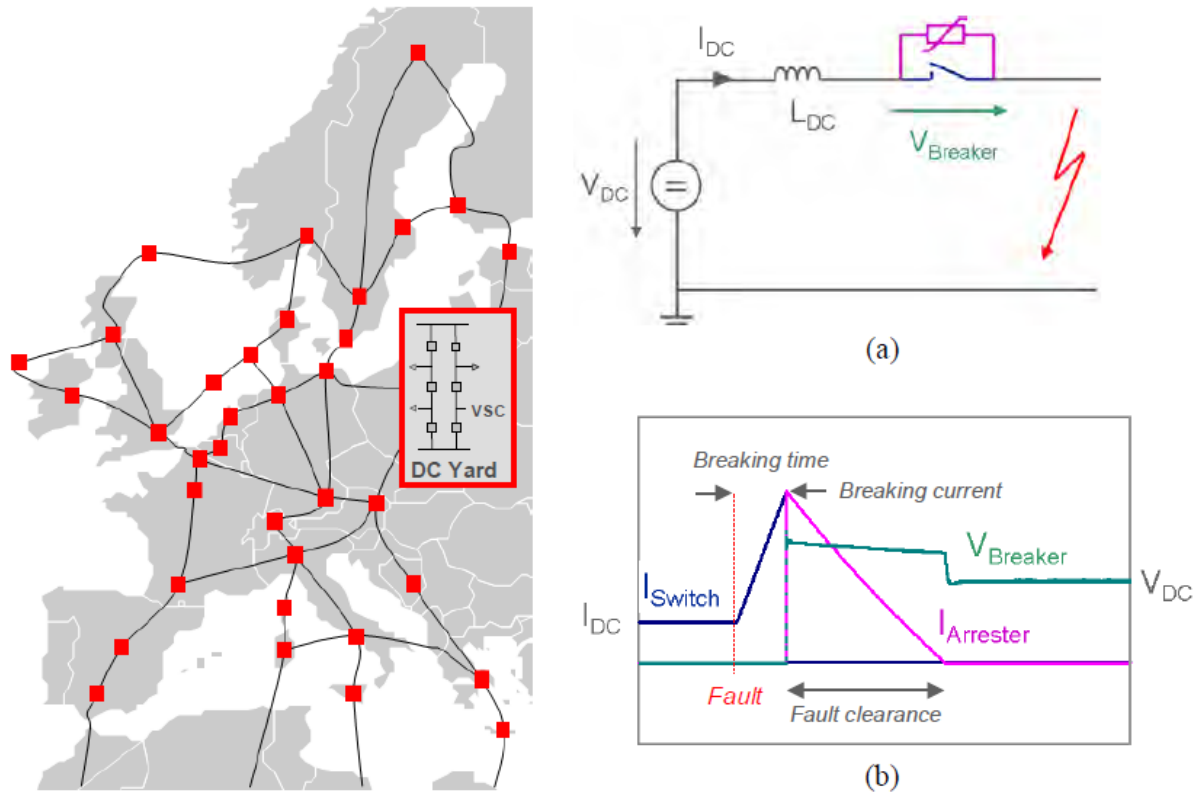
polovodičů přeruší proudovou cestu. Ultra rychlý vypínač je konstruován a odzkoušen na nejméně 2000 spínacích cyklů (rozepnuto-sepnuto). Skutečný počet možných operací hybridního vypínače je však větší, neboť sekvence rozepnutí a opětovného sepnutí může vykonávat hlavní vypínač sám, zatímco UFD zůstává v rozepnuté poloze [3].

Hybridní vypínač HVDC tak významnou měrou přispívá k využití dálkového přenosu stejnosměrného proudu velmi vysokého napětí (HVDC). Umožňuje rozdělit přenosovou síť HVDC na různá ochranná pásma. Funguje také jako ochranné zařízení tím, že umožňuje odpojit části sítě (pásma) vystavené poruchám stejnosměrného proudu, např. při závadách kabelů. To zajišťuje stálý a nepřetržitý přenos energie ve zbytku sítě a pomáhá předcházet ztrátám napětí a výpadkům. Velikost pásem závisí na požadavku přenosové sítě. Přenosová vedení stejnosměrného proudu VVN vybavená technologií hybridního vypínače HVDC tak nemají žádná omezení s ohledem na délku chráněného vedení [3].



Obr. 2.1 Hybridní vypínač [3]

Technické požadavky na vypínací procesy jsou velmi náročné. Čas k přerušení proudu je kratší než u AC sítí vzhledem k nižší impedanci vedení (což znamená, že pokles napětí způsobený poruchou se může šířit rychleji). Ochrana při vzniku poruchy má obvykle zareagovat do 5 ms, aby nedocházelo k ovlivnění rozvodny vzdálené do 200 km. Aby rozvodné stanice zajistily normální provoz, musí mít napětí sítě alespoň 80 % jmenovité hodnoty. V tomto případě musí být porucha vypnuta v řádech milisekund [1].



Obr. 2.2 Princip mechanického vypínání [1]

2.2 Princip mechanického vypínání

HVDC síť je zobrazena na Obr. 2.2. Červené body představují rozvodné stanice. Na Obr. 2.2a je zobrazen obvod s mechanickým HVDC vypínačem a na Obr. 2.2b jsou vyznačeny přechodové jevy při vypínání. Proud začíná stoupat, když nastane porucha (rychlost, při které se proud zvedá je určena indukčností). Když se otevře mechanický vypínač, proud je komutován na svodiči přepětí a začne klesat. Poruchový proud ve svodiči přepětí vytváří protinapětí. Toto napětí snižuje poruchový proud na nulu prostřednictvím rozptylu energie uložené v tlumivce a v cestě poruchy proudu [1].

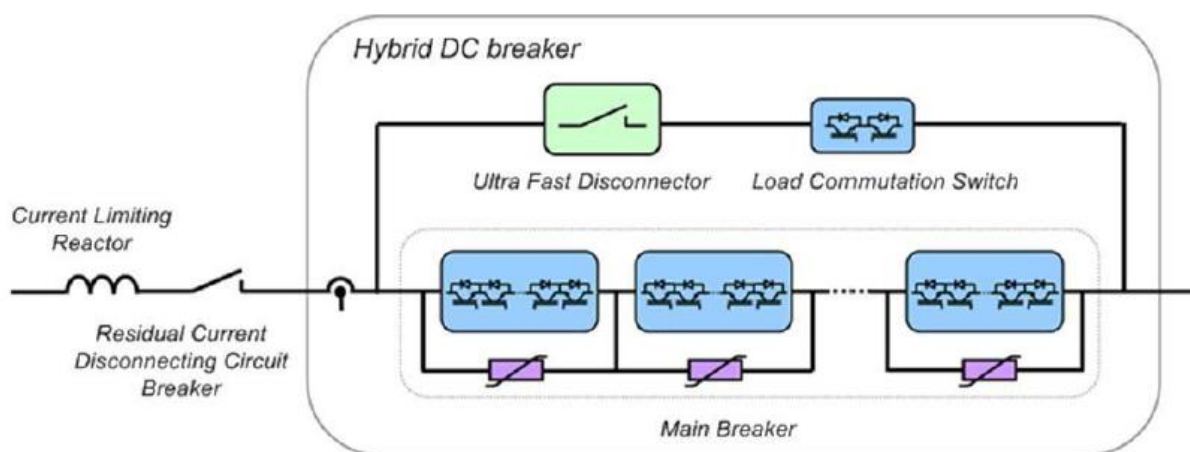
Celkový čas odstranění závady se skládá z:

- doby, po kterou proud stoupá před komutací do svodiče přepětí
- doby klesání proudu, zatímco je mechanický vypínač v rozepnutém stavu

Oba časové intervaly jsou důležité aspekty, co se týče návrhu a nákladů HVDC vypínače a také linky.

V praxi je dán vypínací čas dobou odezvy ochrany a dobou působení DC vypínače. Delší vypínací čas k přerušení proudu vyžaduje zvýšení maximální stávající vypínací schopnosti DC vypínače a zvýšení energie svodiče přepětí. To má za dopad zvýšení ceny DC vypínače. Proto je velmi důležité, aby vypínací čas byl co nejkratší. Za předpokladu, že je dán vypínací čas a maximální vypínací schopnost, je jediným volitelným parametrem indukčnost tlumivky, která udává strmost nárůstu proudu v případě poruchy [1].

2.3 Princip činnosti hybridního vypínače

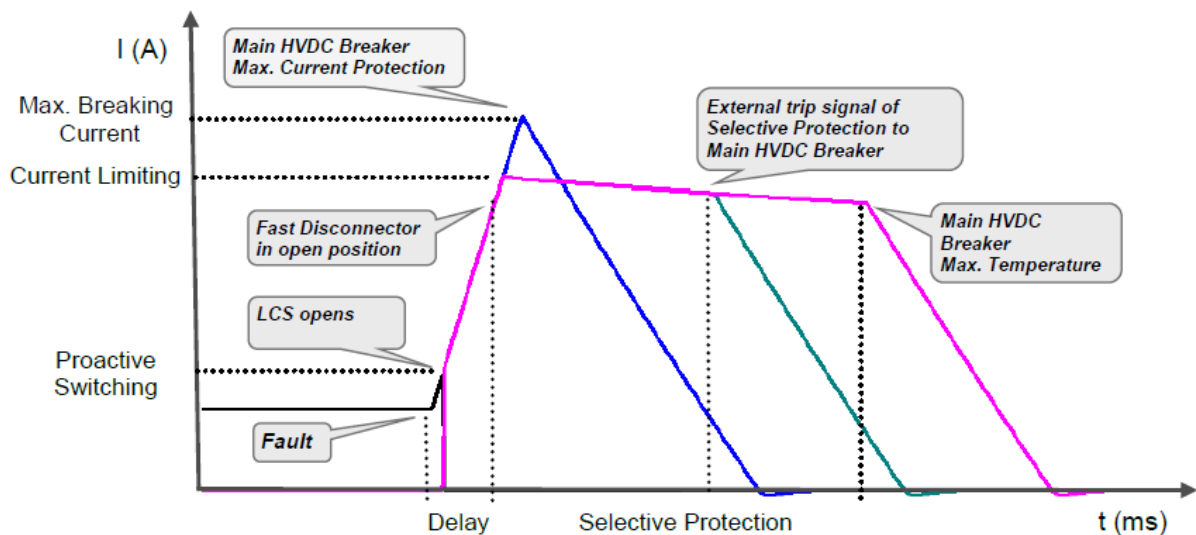


Obr. 2.3 Činnost hybridního vypínače [1]

Hybridní HVDC vypínač je založen na uspořádání z Obr. 2.3. To je založeno na polovodičové bázi komutačního spínače, který je zapojen v sérii s rychlým mechanickým vypínačem. Během normálního provozu teče proud pouze v horní větvi a proud v hlavním vypínači je nulový. Pokud nastane v síti porucha, komutační spínač okamžitě komutuje proud do hlavního vypínače a ultra rychlý vypínač se otevře. V případě otevřeného mechanického vypínače, hlavní vypínač vypíná proud. Mechanický vypínač izoluje komutační spínač od primárního napětí, které prochází přes hlavní vypínač během vypínání proudu. Napěťové namáhání na komutačním spínači je sníženo. Úspěšná komutace proudu do hlavního vypínače požaduje napětí na komutačním spínači překračující hodnotu napětí hlavního vypínače, což je typicky 320 kV. V tomto důsledku se pohybuje napětí na komutačním spínači v jednotkách pouze několika voltů. Ztráty vypínače jsou významně sníženy na procento ztrát vzniklých polovodičovým spínačem [1].

2.4 Proactive control

Proactive control hybridního vypínače dovoluje kompenzovat vypínač pro časové zpoždění ultra rychlého vypínače, pokud je otevírací čas vypínače kratší, než je doba požadovaná pro danou ochranu [1].



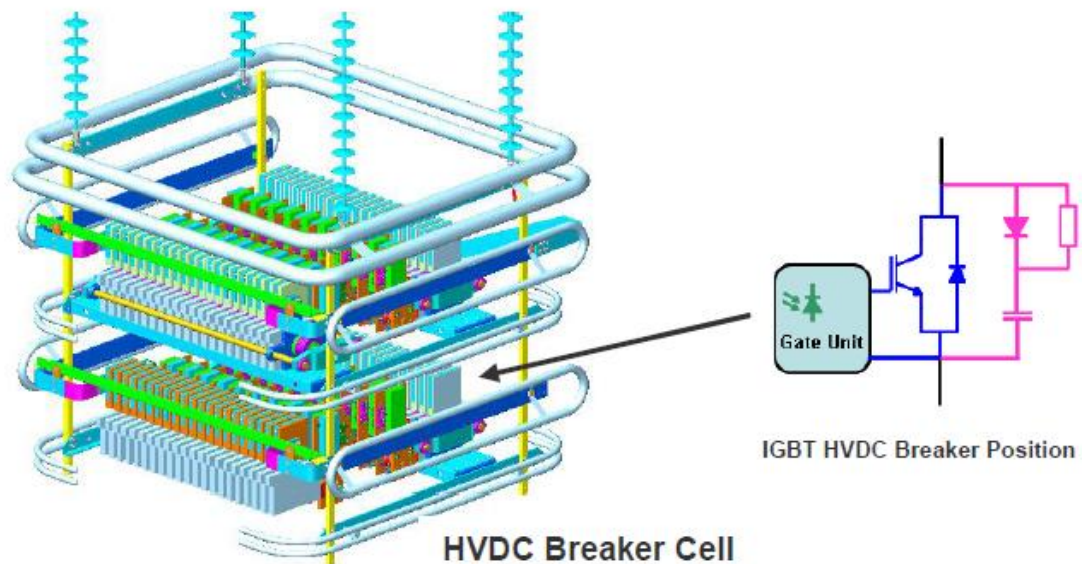
Obr. 2.4 Proactive control hybridního vypínače HVDC [1]

Jak je ukázáno na Obr. 2.4, komutace proudu je zahájena ochranou hybridního vypínače hned, jak se objeví úroveň nadproudu v síti. Hlavní DC vypínač podrží vypínání proudu, dokud není přijat vypínací signál ochrany nebo pokud se proud blíží k maximální hodnotě, na kterou je dimenzován vypínač. K prodloužení času před samo ochranným systémem hlavního DC vypínače může hlavní DC vypínač pracovat v omezeném stavu, kterému se přidělí prioritní vypnutí. Hlavní DC vypínač ovládá pokles napětí na tlumivce na nulu, aby se předešlo dalšímu zvýšení proudu v síti. On-line dohled umožňující údržbu na základě požadavku je dosažen plánovaným převodem proudu do hlavního DC vypínače během normálního provozu, bez jakéhokoliv rušivého účinku přenosu energie ve stejnosměrné síti HVDC. Rychlou záložní ochranu, podobnou jako u polovodičových vypínačů, je možno aplikovat pro hybridní vypínače na stejnosměrných rozvodnách. Vzhledem k tomuto režimu, kvůli nadproudům v síti nebo pro lepší ochranu rozveden se aktivuje převod proudu do hlavního vypínače, nebo je možná záloha vypínačů na principu vypínacích signálů záložní ochrany. V případě selhání vypínače je záložní ochrana aktivovaná téměř okamžitě, typicky v kratším čase než 0,2 ms. Toto zálohování zajistí možné vyskytující se problémy ve stejnosměrné síti a udrží požadovanou vypínací

schopnost proudu záložního vypínače v rozumných mezích. Pokud se nevyužívá zálohování dalšími ochranami, hybridní vypínač se automaticky vrátí do normálního stavu provozu poté, co bude závada odstraněna [1].

2.5 Provedení hybridního vypínače

Hybridní vypínač je navrhován tak, aby dosáhl proudové přerušovací schopnosti 9 kA ve stejnosměrné síti se jmenovitým napětím 320 kV a jmenovitým proudem 2 kA. Maximální proudová přerušovací schopnost je nezávislá na jmenovitém proudu, ale závisí pouze na provedení hlavního vypínače. Hlavní vypínač obsahuje několik článků obsahujících svodiče přepětí, které omezují napětí objevující se na každém článku na určitou úroveň v průběhu vypínání proudu [1].



Obr. 2.5 Provedení hybridního vypínače [1]

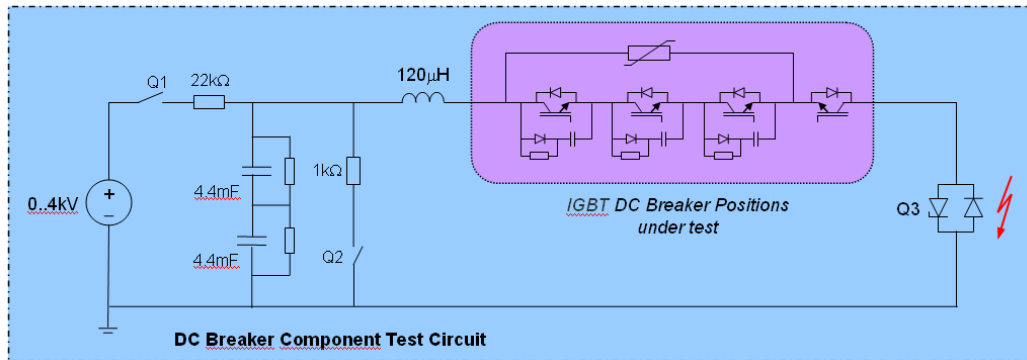
Každý vypínací článek obsahuje čtyři vypínací prvky, které jsou zobrazeny na Obr. 2.5. Dva prvky jsou požadovány na přerušování proudu v jednom ze dvou směrů. Každý prvek je složen z 20 sériově zapojených IGBT tranzistorů. Vzhledem k obrovskému di/dt namáhání během vypínání proudu je požadovaný mechanický návrh s nízkou rozptylovou reaktancí. Aplikace IGBT tranzistorů se jmenovitým napětím 4,5 kV umožňuje kompaktní provedení a zajišťuje stabilní stav při zkratu, který může být způsoben poruchou sítě. Individuální RCD snuberry, zařazené paralelně ke každé pozici IGBT tranzistorů, zajišťují rovnoměrné rozdělení napětí v průběhu vypínání proudu. Není potřeba chladicí systém pro IGBT, jelikož nejsou hlavní prvky vypínače vystaveny proudu vedení během normálního

stavu. Pro návrh pomocného vypínače je jedna pozice IGBT prvku pro oba směry proudu dostatečná při splnění požadavků na jmenovité napětí. Paralelně spojené IGBT moduly navyšují vypínací schopnost proudu hybridního vypínače. Sériově spojené IGBT moduly zlepšují spolehlivost pomocného vypínače. Matrice 3x3 IGBT poloh pro každý směr proudu je volena pro současné návrhy. V případě pomocného vypínače, který je vystavován proudu, je vyžadován chladič systém. Kromě vodního chlazení je možné používat vzduchové chlazení vzhledem k nízkým ztrátám v rozsahu několika desítek kilowattů [1].

2.6 Teoretické testování hybridního vypínače

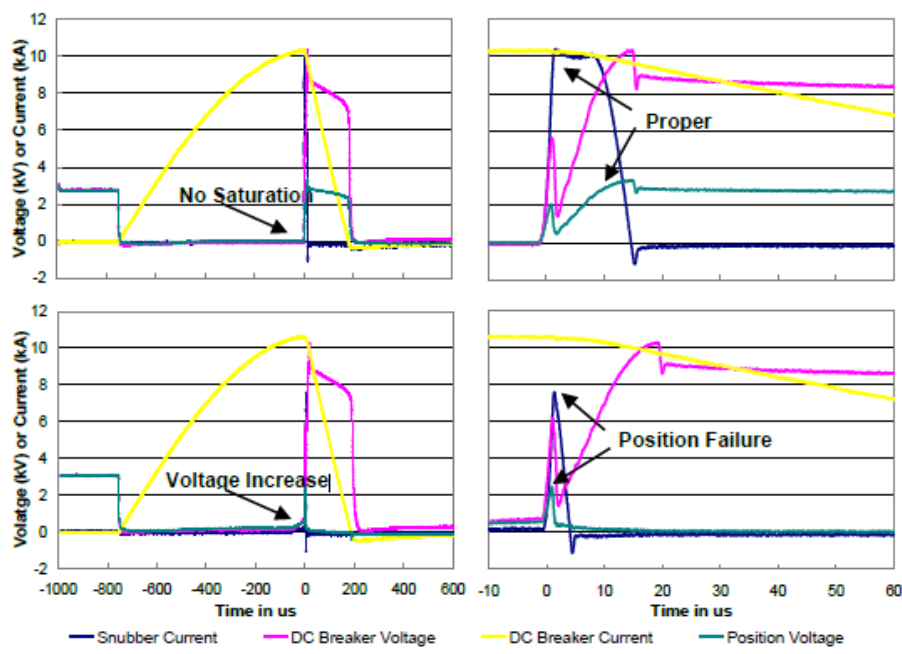
2.6.1 Testování IGBT prvků

V průběhu návrhu prototypu hybridního vypínače jsou provedeny rozdílné testy za účelem ověření očekávaného výkonu. První testy se zaměřují hlavně na ovládání polovodičových součástí a jejich proudovou vypínací schopnost. Druhé nastavení testů ověřují jak napěťovou, tak proudovou schopnost jednoho článku hlavního vypínače. Následující proces nastavení tohoto testu se bude zaměřovat na celkový výkon hybridního vypínače. Vzhledem k velkým rozdílům v úrovni napětí v nastavení testu je konstrukce testových obvodů trochu jiná, ale zkušební postup je podobný. Zmenšený prototyp hlavního vypínacího článku, kde jsou sériově připojeny tři IGBT moduly se společným svodičem přepětí, je použit ke zjištění hodnoty vypínacího proudu ze 4,5 kV IGBT tranzistorů v prvním testovacím obvodu na Obr. 2.6. Čtvrtý IGBT modul je připojen dále, kvůli odzkoušení funkčnosti antiparalelně zařazené diody. Vybíjení kapacitoru po sepnutí tyristoru, omezeným pouze tlumivkou, reprezentuje chybu ve stejnosměrné síti. Úroveň stejnosměrného napětí zaměřenou na poruchu a po poruše je méně kritické než napěťové namáhání, které se objeví na IGBT vypínacích pozicích během vypínání proudu. Toto napěťové namáhání záleží pouze na aplikovaných svodičích přepětí [1].



Obr. 2.6 Testovací obvod vypínání [1]

Jak je ukázáno na Obr. 2.7, maximální schopnost vypínaného proudu IGBT článku je stanovena saturací proudu, aplikovanou IGBT moduly. Pozice sériově zapojených IGBT článků komutují proud s $2 \mu\text{s}$ rychlostí do RCD snubberů, které omezují nárůst napětí na součástkách na $300 \text{ V}/\mu\text{s}$ [1].

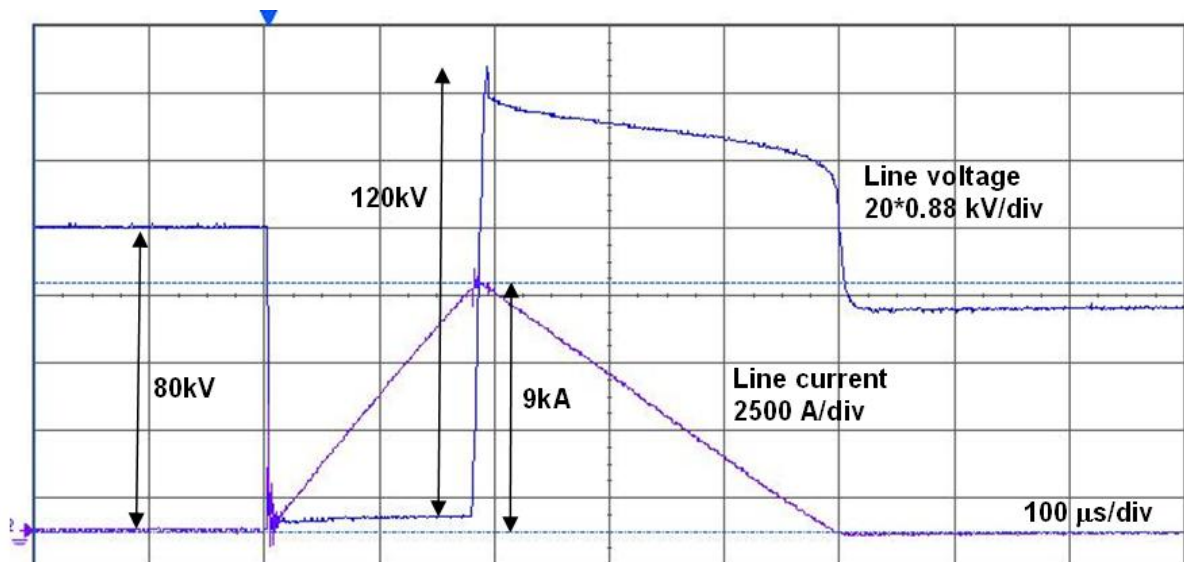


Obr. 2.7 Maximální zátěžový test na IGBT modulech [1]

Proud komutuje z RCD snubberů do svodičů přepětí až poté, když dojde k překročení napětí na IGBT modulech. To nastane tehdy, když by se mělo na součástce objevit napětí, které by překračovalo hodnotu napětí dimenzované na svodičích přepětí [1].

V tomto případě IGBT moduly prošly zátěžovým testem pro vypínání proudu pro hodnotu menší než 10 kA . Pro vyšší proudy je úroveň saturace proudu dosažena pomocí vnitřní omezovací schopnosti proudu ve vypínači, obsahující okamžitý pokles napětí na

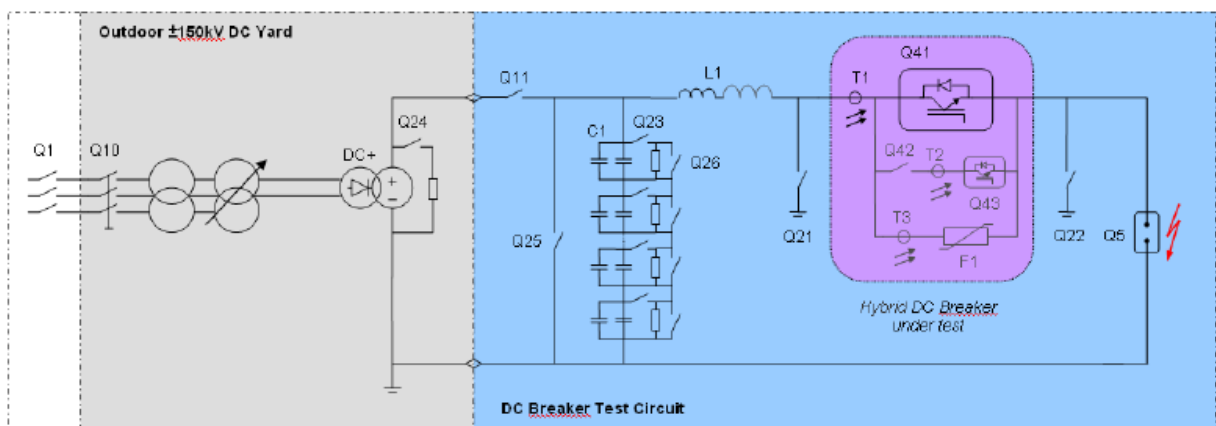
IGBT modulech. Během úmyslně destruktivnímu testu hodnota teploty překračuje dané meze a ničí zapouzdřené IGBT části. V případě použití více IGBT modulů netvoří vzniklý zkrat na jednom z modulů neřešitelnou situaci. Pokud jeden z IGBT modulů selže během testu, vzniklá chyba může být stále odstraněna za pomoci zbývajících dvou modulů [1].



Obr. 2.8 Maximální zátěžový test na IGBT modulech [1]

Na Obr. 2.8 je zobrazen typický výsledek testu. Maximální dovolená proudová schopnost 9 kA je zcela ověřena. Napětí na vypínacích IGBT modulech překračuje 120 kV v průběhu komutace proudu. Vypínací schopnost jednoho 80 kV IGBT modulu překračuje výkon 1 GVA [1].

2.6.2 Testování hybridního vypínače

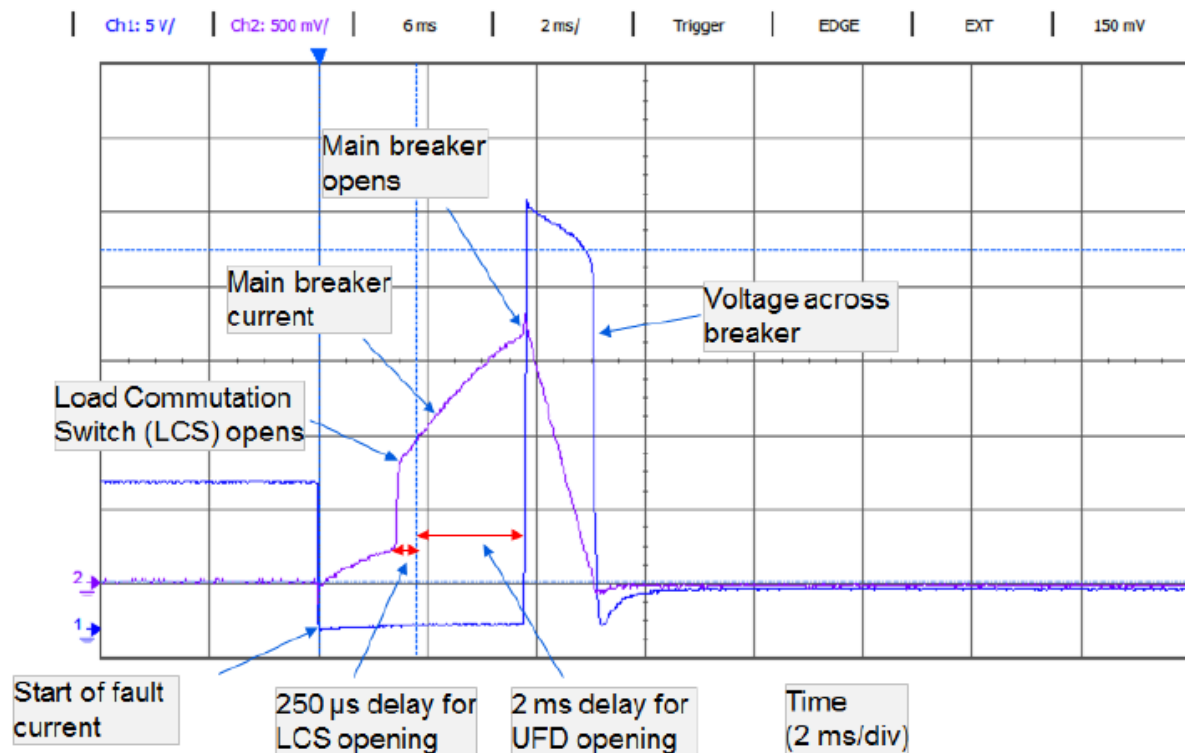


Obr. 2.9 Testovací obvod hybridního vypínače od firmy ABB [1]

Dle nastavení testů hybridního vypínače popsaných výše bylo provedeno kompletní

odzkoušení vypínače z důvodu ověření daného návrhu. Přidané kapacitory a velké indukčnosti v obvodu jsou zařazeny z důvodu omezení nárůstu proudu v síti po poruše. Ultra rychlý vypínač a komutační spínač jsou zahrnuty v systémové konfiguraci [1].

Kompletní úspěšné ověření testů prokázalo výkonnost komponent zařazených v obvodu. Na *Obr. 3.0* jsou zobrazeny průběhy vypínacího procesu s maximálním proudovým zatížením 9 kA a 2 ms zpožděním pro otevření ultra rychlého vypínače v paralelně zařazené větvi k hlavnímu vypínači. Maximální proudová zatížitelnost 9 kA je limitem pro použitou generaci výkonových součástek. Další generace výkonových součástek umožní vypínací výkon až na 16 kA proudy. Důvodem těchto testů bylo ověření vypínacího výkonu výkonových součástek a ověření otevírací rychlosti mechanického ultra rychlého vypínače. Testovaný objekt je sestavený s jednoho 80 kV modulu společně s ultra rychlým vypínačem a komutačním spínačem [1].



Obr. 3.0 Vypínací proces hybridního vypínače [1]

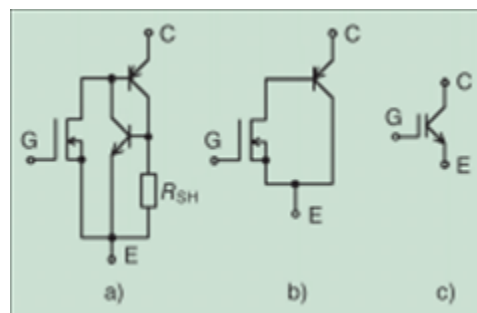
Popis *Obr. 3.0* jasně potvrzuje teoretické předpoklady vypínání. Před poruchou teče stejnosměrný proud. Při výskytu poruchy reaguje LCS (Load Commutation Switch) a v má tomto případě 250 μ s zpoždění na otevření. Následně je proud komutován do hlavního vypínače, kde proud narůstá na hodnotu dimenzovanou vypínačem, což je v tomto případě 9 kA. Poté se zpožděním 2 ms otevírá ultra rychlý vypínač. Při dosažení hodnoty 9 kA výkonové součástky bezpečně vypínají poruchový proud [1].

3 IGBT tranzistory

3.1 Princip činnosti IGBT tranzistorů

Nezbytnou součástí hybridních vypínačů stejnosměrných sítí jsou tranzistory IGBT. Vývoj tohoto typu tranzistoru byl veden snahou o spojení výhod bipolárních tranzistorů a tranzistorů FET ve výkonových aplikacích. Vlastnosti bipolárních tranzistorů se vyznačují tak, že mají poměrně vysokou injekci nosičů náboje z emitorové vrstvy, což vede k získání malých hodnot odporu součástky v sepnutém stavu. U tranzistorů FET závisí odpor v sepnutém stavu na tloušťce polovodičové vrstvy. Pokud má být tranzistor schopen velkého napěťového namáhání, musí být tloušťka vrstvy dostatečně velká. Výkonové bipolární tranzistory se vyznačují malým proudovým zesilovacím činitelem (10-20). Požadavek na buzení bipolárního tranzistoru relativně velkým proudem komplikuje budiče těchto tranzistorů. Tranzistor FET je řízen napěťovým signálem, který má velmi malý výkon, protože jeho řídicí elektroda má v podstatě vlastnosti kondenzátoru – proud v řídicí elektrodě slouží k nabíjení a vybíjení kapacity řídicí elektrody [4].

Součástky IGBT mají na vstupní straně vlastnosti tranzistoru FET, na výstupní straně, která zabezpečuje vedení silového proudu, má vlastnosti bipolárního tranzistoru. Z toho vyplývá, že prvek IGBT je říditelný pouze napěťovými signály a přitom je na výstupní straně dostatečně proudově i napěťově zatížitelný [4].



Obr. 3.1 IGBT tranzistor [4]

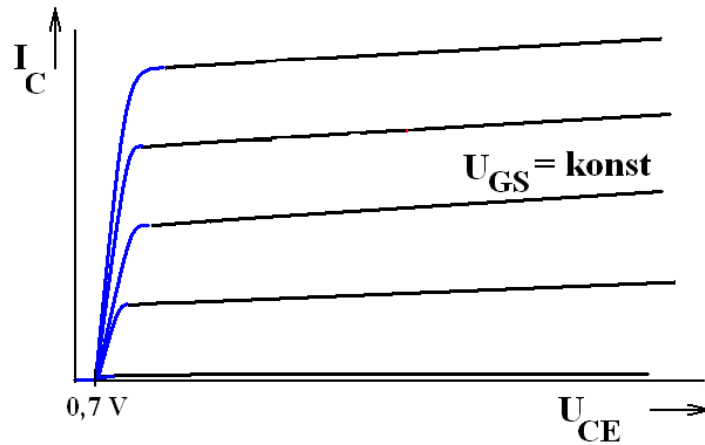
Principiálně lze náhradní schéma IGBT znázornit podle Obr. 3.1a, popřípadě podle Obr. 3.1b. Nejčastěji používaná schematická značka je vyjádřena na Obr. 3.1c. Prvek pracuje jako kaskádní zapojení bipolárního tranzistoru PNP, jehož proud báze je řízen sepnutím vstupního FET tranzistoru. Z vnitřní struktury vyplývá, že pokud se uvažuje $R_{SH} > 0$ (Obr. 3.1a) je možné modelovat IGBT v sepnutém stavu jako sériovou kombinaci diody a odporu sepnutého FET tranzistoru (Obr. 3.1b). Úbytek napětí na diodě se skládá

s prahového napětí a na úbytku diferenciálního odporu. Pokud se zvyšuje teplota, tak klesá prahové napětí a vzrůstá diferenciální odpor. Celkový úbytek napětí v sepnutém stavu se u IGBT pohybuje v rozpětí 1,5 až 4 V v závislosti na typu prvku a na protékajícím proudu. Pokud se zvětšuje proud, úbytek klesá. Zatím je tento poznatek diskutován [4], pokud je možné zanedbat úbytek napětí na odporu R_{SH} . Pokud se zvětší proud kolektoru, může dojít ke zvýšení úbytku napětí na odporu, čímž se zvýší napětí na bázi tranzistoru NPN (*Obr. 3.1a*) a část proudu kolektoru IGBT poteče bázi a emitorem zmíněného tranzistoru. Dojde-li ke zvětšení proudu kolektoru nad kritickou hodnotu, uplatní se kladná zpětná vazba, která představuje dva bipolární tranzistory (*Obr. 3.1a*). Díky této vazbě začne mít tato struktura vlastnosti tyristoru, poklesne úbytek napětí na IGBT a prvek již nelze vypnout zásahem do řídicí elektrody. Předností prvků IGBT je možnost dosáhnout poměrně velké spínací frekvence díky krátkým spínacím časům. Rychlost sepnutí je velká – řádově desítky μs , a je ovlivněna rychlostí nabíjení kapacity řídicí elektrody. Rychlost spínání je jedním z parametrů, proč se IGBT používá ve vypínačích stejnosměrných sítí. Rychlost vypínání je ale nižší než rychlost zapínání, protože vysoké hodnoty di/dt při vypínání vedou ke vzniku posuvných proudů, které mohou ovlivnit parazitní tyristorovou strukturu, a může dojít k nežádoucímu sepnutí součástky. Řešení potřebného napětí při vypínání spočívá ve výrobě. Vnějšími obvody je zabezpečeno, aby odpor zařazený v sérii s řídicí elektrodou byl při zapínání nižší než při vypínání [4].

Jsou důvody, proč se v tomto případě nemohou použít například tyristory. Je to dáno tím, že běžný tyristor nelze vypnout. Zůstává otevřený, dokud je na něm napětí. Mohly by se použít GTO (Gate Turn Off) tyristory, které lze vypnout impulzem záporného napětí přivedeného do řídicí elektrody. Ovšem při vypínání vznikají značné výkonové ztráty a hrozí zničení součástky.

3.2 Proudová a napěťová zatížitelnost IGBT tranzistorů

V současné době jsou na trhu k dispozici IGBT součástky s maximální napěťovou hladinou 6500 V a s maximálním proudem 600 A. IGBT součástky jsou pro proudy do 2500 A k dispozici v napěťových hladinách do 2000 V. Zde je patrné, že prvky pro vyšší napěťovou zatížitelnost jsou k dispozici pouze pro menší proudy a prvky pro velké proudy jsou napěťově méně zatížitelné [4].

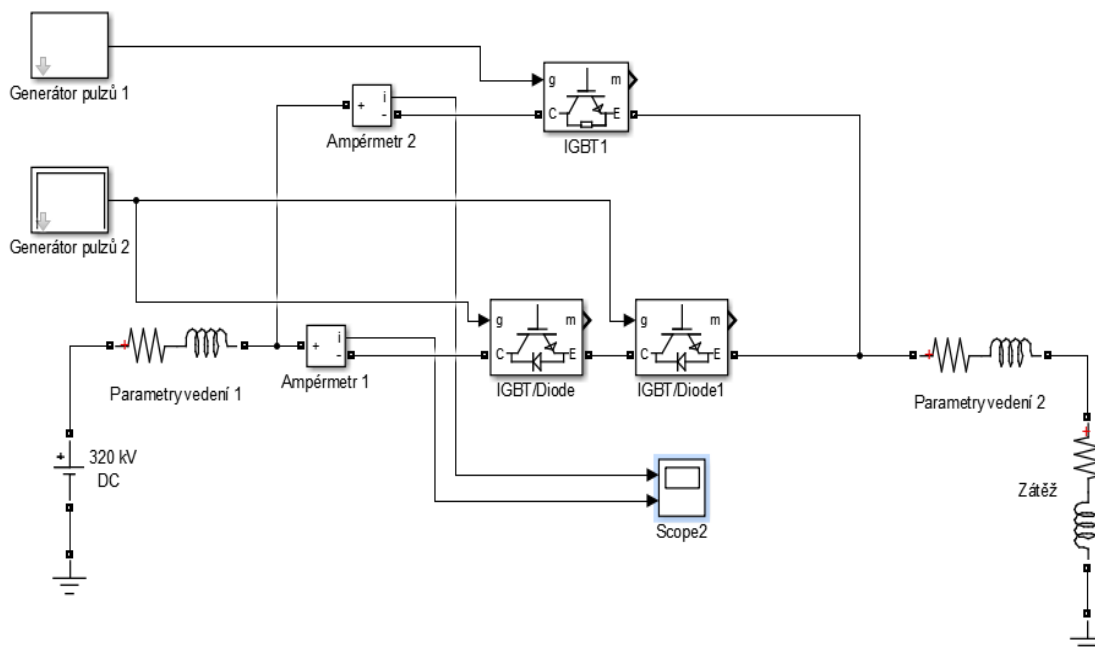


Obr. 3.2 Výstupní charakteristika IGBT tranzistoru [4]

4 Simulace HVDC hybridního vypínače

4.1 Vypínací proces vypínače v bezporuchovém stavu

Tato část práce se zaměřuje na praktickou simulaci hybridního vypínače pomocí programu MATLAB Simulink. Snahou je vytvořit obvod stejnosměrné sítě s hybridním vypínačem a pokusit se ověřit teoretické předpoklady vypínání a funkčnost sítě.



Obr. 4.1 Obvod stejnosměrné sítě s hybridním vypínačem v bezporuchovém stavu

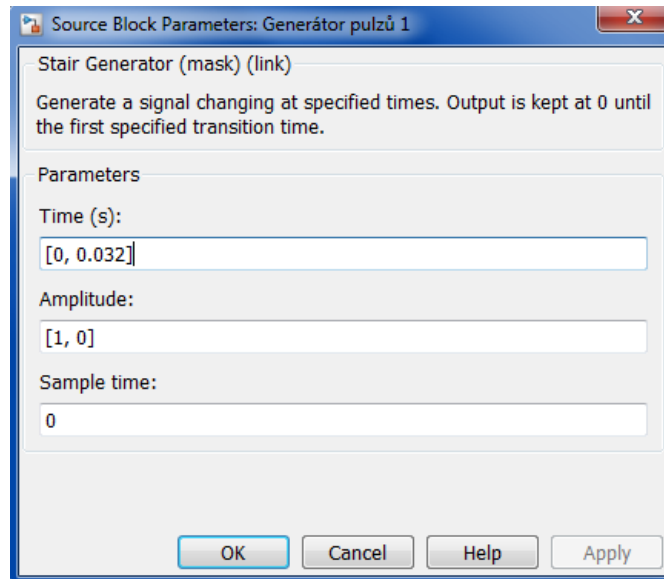
Hlavní vypínač má ve skutečnosti zapojeno v sérii velké množství polovodičových součástek. S ohledem na jednoduchost a princip vypínacího procesu se v simulaci objevují

pouze dva polovodičové prvky v hlavním vypínači. Na *Obr. 4.1* je zobrazen obvod, který reprezentuje 320 kV síť se jmenovitým proudem 2 kA. Obvod představuje řadu prvků, kde má každý svojí specifickou funkci.

Popis prvků v obvodu:

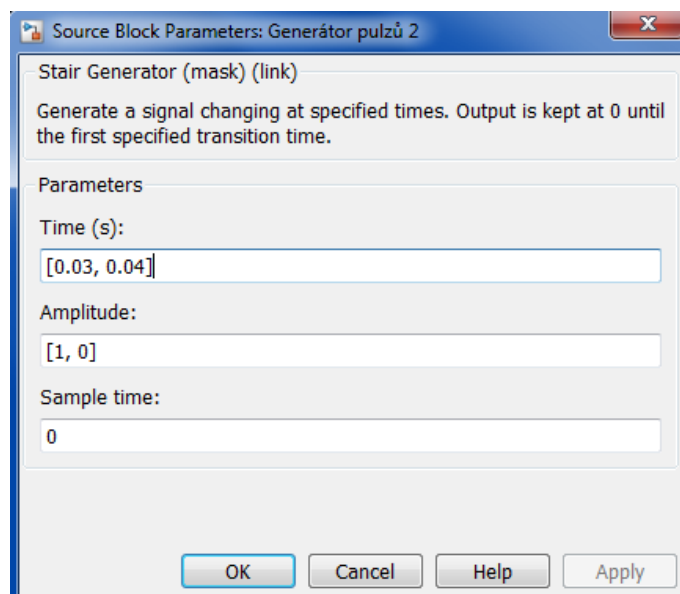
- **320 kV DC** – napájecí stejnosměrný zdroj o napětí 320 kV
- **Parametry vedení 1** – odpor a indukčnost vedení za zdrojem
- **Ampérmetr 1** – přístroj na měření velikosti proudu procházející přes součástky IGBT a IGBT2
- **Ampérmetr 2** – přístroj na měření proudu procházející ultra rychlým vypínačem
- **IGBT1** – polovodičová součástka, která slouží jako ultra rychlý vypínač (program MATLAB Simulink má mechanický vypínací prvek, ale z důvodu nesprávného fungování vypínacího prvku po nastavení parametrů používám jako vypínací prvek součástku IGBT1 a vypínání funguje pomocí přiváděných impulsů na tento prvek)
- **IGBT/Diode, IGBT/Diode1** – polovodičové součástky, které jsou vnitřkem hybridního vypínače sloužící k přerušení proudové cesty
- **Parametry vedení 2** – odpor a indukčnost vedení za vypínačem
- **Zátěž** – zátěž dané sítě
- **Generátor pulzů 1** – tento generátor slouží k odesílání pulzů k ultra rychlému vypínači (IGBT1) pro otevření a zavření
- **Generátor pulzů 2** – tento generátor slouží k odesílání pulzů na IGBT a IGBT2 tranzistory pro jejich otevření a zavření, představuje komutační spínač
- **Scope2** – slouží pro vykreslení průběhu proudu

Funkce simulace je následovná. Přivedením pulzu na IGBT1 se v čase 0 zajistí okamžité otevření IGBT1 vypínače. Polovodičové součástky ve vypínači jsou zavřené. Proud začne procházet přes součástku IGBT1 do zátěže. V případě potřeby přerušení proudové cesty se otevřou pomocí přivedených pulzů obě IGBT součástky ve vypínači a součástka IGBT1 se vypne pomocí Generátoru pulzů 1. Proud nyní přebírá hlavní vypínač a přivedením vypínacího pulzu na obě IGBT součástky pomocí Generátoru pulzů 2 se proud přerušuje a klesne na nulu.



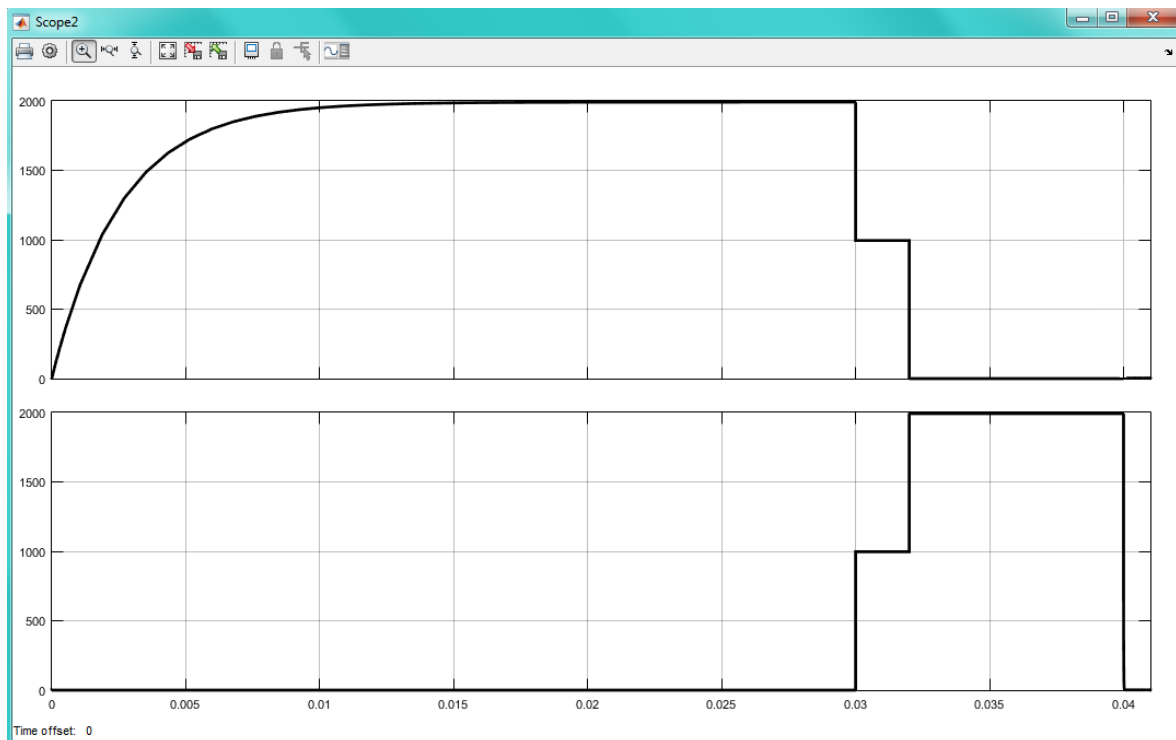
Obr. 4.2 Generátor pulzů 1

Na Obr. 4.2 je tabulka s parametry generátoru pulzů 1. V čase 0 s přivedeme kladný impuls na součástku IGBT1, která ihned po spuštění simulace otevírá. V tomto případě součástku IGBT1 vypínáme přivedením záporného impulsu v čase 0.032 s.



Obr. 4.3 Generátor pulzů 2

Na Obr. 4.3 je tabulka s parametry generátoru pulzů 2. V čase 0.03 s se otevírají IGBT součástky v hlavním vypínači a proud se komutuje do hlavního vypínače. V čase 0.04 s se na tyto součástky přivádí záporný impuls z důvodu přerušení proudové cesty. U generátoru pulzů 1, který ovládá součástku IGBT1 představující ultra rychlý vypínač, je nastaven vypínací parametr na 0.032 s. To znamená, že má ultra rychlý vypínač 2 ms zpoždění na zavření z důvodu komutace proudu do hlavního vypínače.

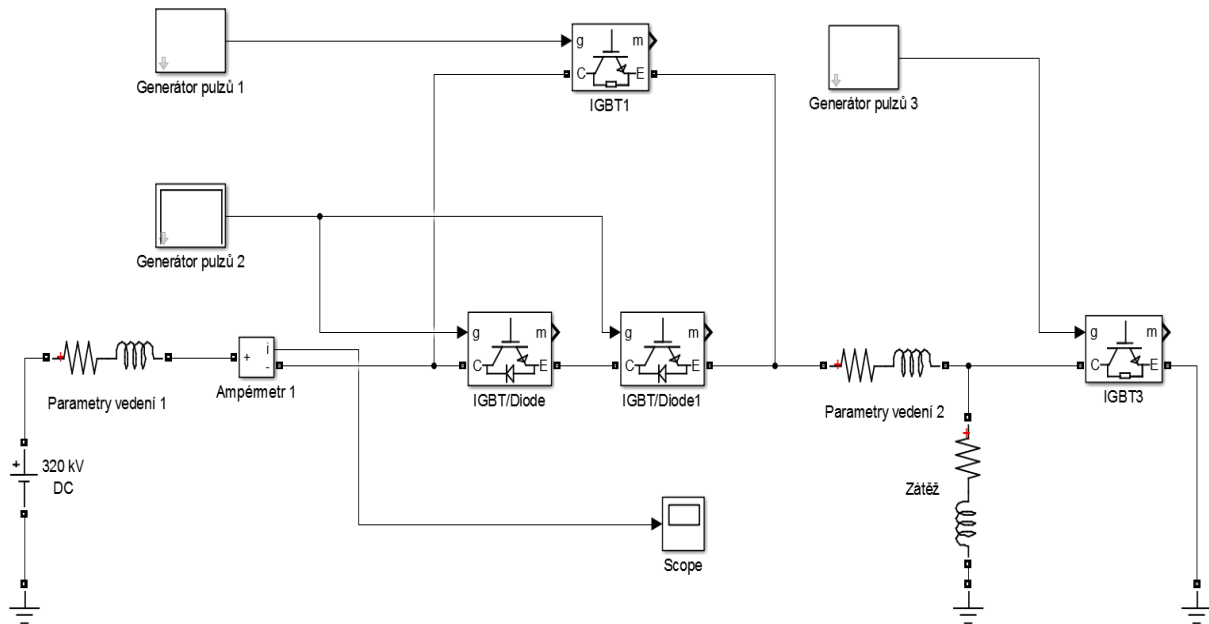


Obr. 4.4 Průběh proudu v bezporuchovém stavu

Na Obr. 4.4 je zobrazen průběh proudu. V horní polovině je zobrazen jmenovitý proud 2 kA, který prochází obvodem přes sepnutý ultra rychlý vypínač do zátěže a následně přerušení proudové cesty přes ultra rychlý vypínač. Ve druhé polovině je zobrazen proud, který je komutován do hlavního vypínače a následně dochází ke kompletnímu vypnutí proudové cesty.

4.2 Vypínací proces vypínače v poruchovém stavu

V této části práce je popsán proces a následný obvod, kde nastane v síti porucha a vypínač musí po zjištění této poruchy neprodleně vypnout.



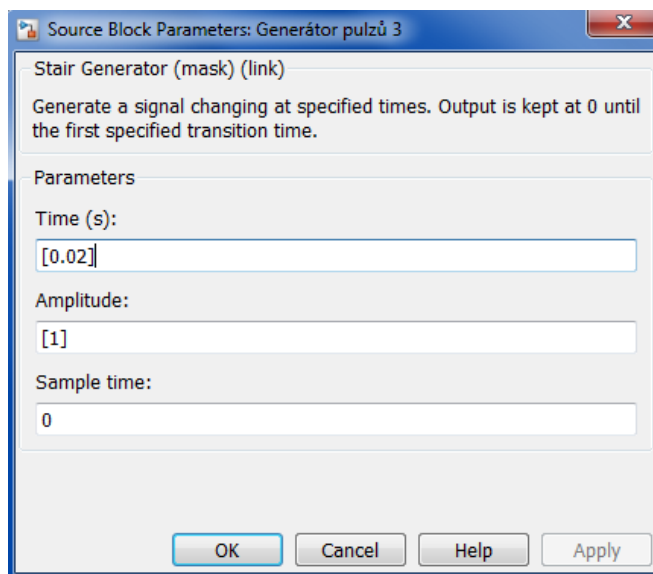
Obr. 4.5 Obvod stejnosměrné sítě s hybridním vypínačem v poruchovém stavu

Obvod je postaven téměř stejně, jako tomu bylo v případě bezporuchového stavu. V poruchovém stavu je obvod obohacen o Generátor pulzů 3 a polovodičovou součástku IGBT3.

Popis nově přidaných prvků v obvodu (funkce již použitých prvků, které se objevují v bezporuchovém stavu je stejná):

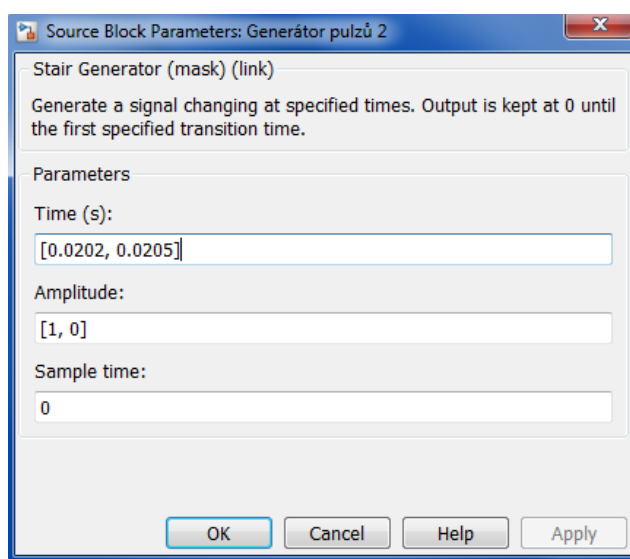
- Generátor pulzů 3 – přivádí impuls na součástku IGBT3
- IGBT3 – součástka, která v určitém čase vytváří v obvodu zkrat

Funkce simulace je následovná. V první řadě se obvod chová stejně jako v bezporuchovém stavu. Proud prochází ze zdroje přes ultra rychlý vypínač do zátěže. V síti nastává porucha tím, že sepneme součástku IGBT3, která představuje zkrat v síti. Obvod reaguje tak, že se proud komutuje do hlavního vypínače, na to se rozepíná ultra rychlý vypínač a IGBT součástky v hlavním vypínači přerušují proudovou cestu.



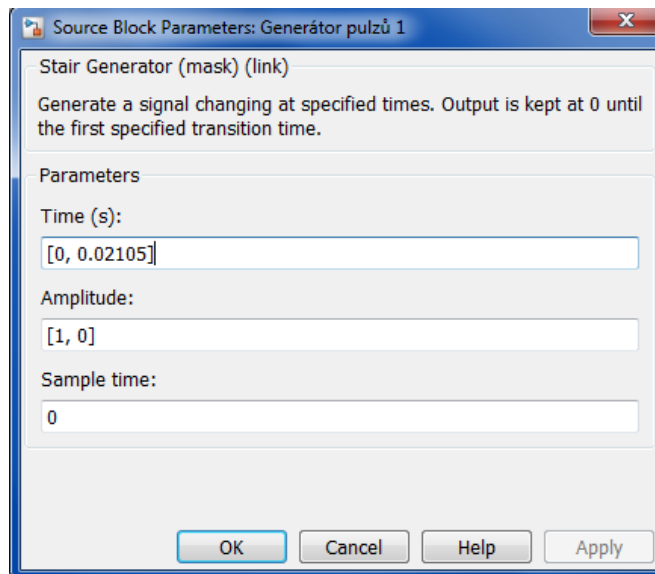
Obr. 4.6 Generátor pulzů 3

Na Obr. 4.6 jsou zobrazeny parametry generátoru pulzů 3. Ten přivádí impuls pro otevření součástky IGBT3 a vytváří v obvodu zkrat po 0.02 s.



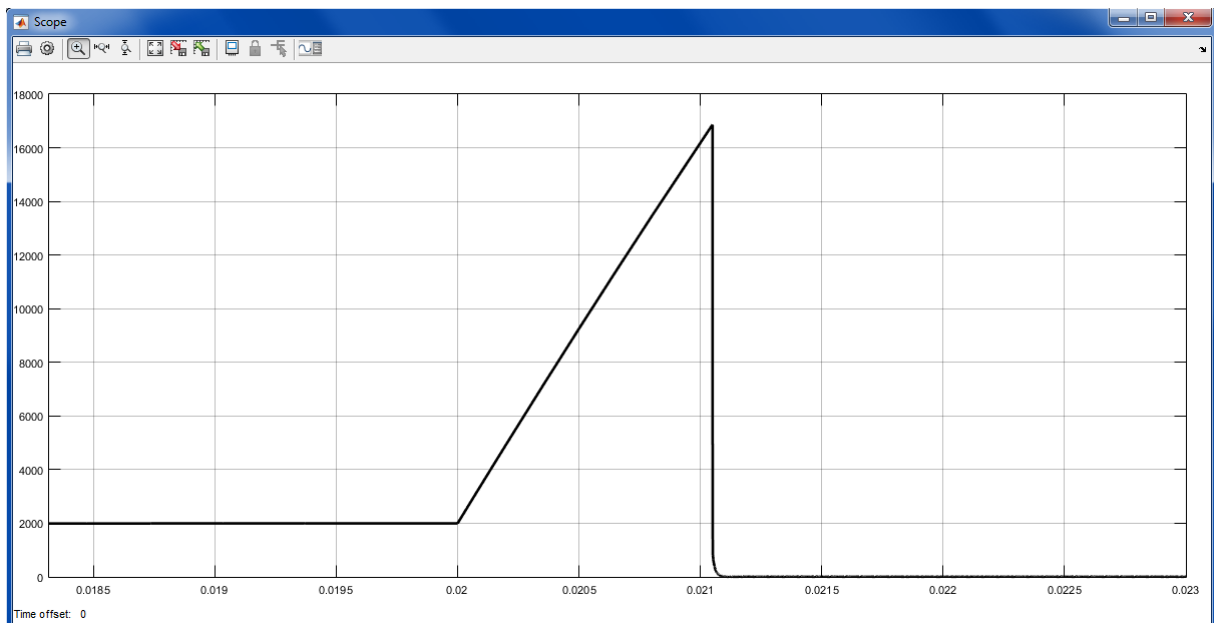
Obr. 4.7 Generátor pulzů 2

Na Obr. 4.7 je zobrazena reakce hybridního vypínače. Těsně po zjištění zkratu, což je po 0.0202 s se otevírají součástky v hlavním vypínači a ten po čase 0.0205 s přerušuje proudovou cestu.



Obr. 4.8 Generátor pulzů 1

Na Obr. 4.8 je zobrazena reakce ultra rychlého vypínače. Těsně po sepnutí součástek hlavního vypínače se zavírá a proudová cesta ultra rychlým vypínačem je přerušena.



Obr. 4.9 Průběh proudu v poruchovém stavu

Na Obr. 4.9 je zobrazen průběh proudu v obvodu. Na začátku teče jmenovitý proud 2 kA přes ultra rychlý vypínač do zátěže. V případě výskytu zkratu po sepnutí součástky IGBT3 proud vzrůstá na hodnotu dimenzovanou vypínačem, která je v tomto případě zvolena na 17 kA. Po dosažení této hodnoty vypínač reaguje a okamžitě přerušuje proudovou cestu na nulu. Z grafu vyplývá, že použité součástky v obvodu mají za důsledek velmi strmý sklon proudu z poruchové hodnoty na nulu. Ovšem změnou parametrů součástek se sklon proudu nezměnil.

4.3 Problémy v simulaci a jejich řešení

V průběhu simulace se vyskytly některé problémy, se kterými by obvod nefungoval správně. Proto muselo být nalezeno řešení, jak tyto problémy vyřešit a nahradit tak, aby se bylo možné přiblížit k teoretickým předpokladům a průběhům veličin. Problémy byly následující:

- ***Vypínací prvek***

Původně se proudová cesta v horní větvi obvodu měla přerušovat pomocí mechanického vypínacího prvku sloužící jako ultra rychlý vypínač, ale po nastavování parametrů tohoto vypínače se prvek nechoval podle představ. Proto je použit jako ultra rychlý vypínač polovodičový spínací prvek IGBT1, na který přivádíme impulzy pro otevření a zavření. V případě nesprávného fungování mechanického vypínacího prvku jsem hledal v knihovně MATLAB Simulink jiný vypínací prvek. Ovšem další typy těchto vypínacích prvků jsou obsaženy v jiné podskupině knihovny. MATLAB Simulink umožňuje pouze propojování prvků ze stejné podskupiny. V simulaci jsou všechny prvky použity z podskupiny SimPowerSystems. Pokud je vybrán prvek z jiné podskupiny než SimPowerSystems a vložen do obvodu obsažených prvků poskládaných z této podskupiny, součástky pak nelze mezi sebou propojovat. Proto nahrazuji mechanický vypínací prvek polovodičovou součástkou IGBT1, která je obsažena v této podskupině a jde bez problémů spojit s ostatními prvky.

- ***Omezovače přepětí***

V obvodu nejsou zapojeny omezovače přepětí, které by měly být zařazeny paralelně k součástkám v hybridním vypínači z důvodu omezení přepětí na IGBT součástkách při velkém napět'ovém namáhání. Pokud se tyto omezovače přepětí zařadily paralelně k těmto prvkům a nastavily se na nich parametry pro ochranu součástek, program nepracoval správně. Průběh simulace se zastavil na 97 % a nedošlo k jejímu dokončení. V tomto případě jsem zkoušel přidat pouze jeden svodič přepětí, zařazený paralelně k hlavnímu vypínači a upravoval hodnoty v celé síti, ale simulace nebyla taktéž dokončena.

Závěr

Průběhy simulací vypínacího procesu byly provedeny a ověřeny úspěšně. V obvodu sestaveném pomocí programu MATLAB Simulink se zanedbaly určité prvky z důvodu nesprávného fungování simulace. Simulace by měla obsahovat svodiče přepětí, zařazené paralelně k hybridnímu vypínači, které chrání součástky uvnitř vypínače. Ovšem po jejich přidání do obvodu a následném spuštění nebyla simulace úspěšně dokončena. Po nastavení hodnoty ochranného napětí a proudu na svodičích přepětí by v případě překročení těchto hodnot na součástkách ve vypínači měly zareagovat a proud by se měl uzavřít přes tyto svodiče. Po různém nastavování tohoto prvku se simulace při vyhodnocení zastaví a nedoběhne do konce.

V simulaci je také jinak řešen ultra rychlý vypínač, který je zařazen paralelně k hybridnímu vypínači. Pokud je do simulace přidán z knihovny mechanický vypínací prvek sloužící jako vypínač, po nastavení jeho parametrů pro vypnutí se tento prvek neustále po určité době spíná a nezůstává ve vypnuté poloze. Proto se obvodem proudová cesta nepřerušuje a proud protéká přes tento prvek do zátěže. Vzhledem k těmto okolnostem je nahrazen ultra rychlý vypínač spínacím prvkem IGBT, který po přivedení dvou impulzů napřed otevírá a poté se zavře a zůstává v zavřené poloze. Takto řešeným způsobem nedochází k opětovnému sepnutí a proudová cesta se může přerušit přes hlavní vypínač na nulu. S takto řešeným postupem je možné nasimulovat vypínací proces.

Průběh proudu v poruchovém stavu je trochu jiný než podle teoretických předpokladů. Přejít proudu z poruchové hodnoty dimenzovanou vypínačem na hodnotu nulovou je velice strmý. Podle teoretických předpokladů by tento přechod měl klesat lineárně. Je to dáno použitými prvky v obvodu. V tomto případě jsem tento problém řešil změnami parametrů součástek, zejména změnou napětí sítě a změnou hodnot odporů a indukčností v obvodu. Ovšem i po jejich změně tento sklon zůstal stejný. Dle mého názoru by tuto situaci měly vyřešit svodiče přepětí, které vytvářejí protinapětí, a tím by měly průběh proudu z poruchového do nulového stavu linearizovat z důvodu uložené energie na tlumivce. Jelikož je ale se svodiči přepětí problém v simulaci, který je zmiňovaný výše, takto řešeným způsobem se nelze dopracovat k teoretickému výsledku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CALLAVIK, M., BLOMBERG, A., HAFNER, J., JACOBSON, B. *An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids*. ABB Grid Systems, Technical Paper November 2012.
- [2] Why HVDC?. [online]. [Cit. 13.4.2015]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc>
- [3] Hybridní vypínač HVDC od ABB. [online]. [Cit. 13.4.2015]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/03/Elektro_03_2013_output/web/Elektro_03_2013_opf_files/WebSearch/page0067.html
- [4] Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti. [online]. [Cit. 20.4.2015] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-vykonove-polovodicove-prvky-a-jejich-aplikacni-moznosti--14473>
- [5] PRAMAYON, P., GUERARD, S., AANHAANEN, G., BAKIC, K., CATCHPOLE, P., NORTON, M., PUFFER, R., SORENSEN, A., WEIBEL, M. *Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines – Needs and Solutions*. Cigre JWG B2/C1.19, August 2010. ISBN 978-2-85873-113-8
- [6] ABB, *The high voltage DC breaker, the power grid revolution.*, November 2012
- [7] NordLink: nejdelší HVDC přenosové spojení v Evropě. [online]. [Cit. 20.5.2015] Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/73.php>
- [8] Nejvýkonnější kabelová technologie pro podzemní a podmořský přenos energie na světě. [online]. [Cit. 20.5.2015] Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/kabelova-technika/11.php>
- [9] HVDC Classic (LCC). [online]. [Cit. 1.5.2015] Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-classic>
- [10] HVDC Light (VSC). [online]. [Cit. 1.5.2015] Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-light>
- [11] Pohyb oblouku ve vypínači ss proudu se šterbinovou keramickou zhášecí komorou. [online]. [Cit. 15.5.2015] Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/pracoviste/pracoviste_soubory/e213/cz/ukazky/sterbina.htm