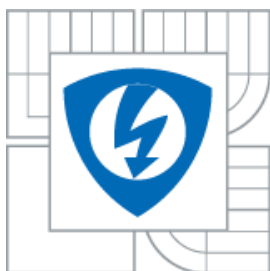




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODEL HVDC SPOJKY PRO LABORATORNÍ VÝUKU

THE MODEL OF HVDC LINE FOR LABORATORY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DOMINIK MIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL KRBAL

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Dominik Mička
Ročník: 3

ID: 134558
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Model HVDC spojky pro laboratorní výuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přehled HVDC technologií ve světě.
2. Výběr systému HVDC pro laboratorní úlohu.
3. Návrh modelu HVDC spojky.
4. Realizace modelu HVDC spojky.
5. Ověřování funkce a testování parametrů zrealizovaného modelu HVDC spojky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal
Konzultanti bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

MIČKA, D. *Model HVDC spojky pro laboratorní výuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.

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

Tímto bych také chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Krbalovi. Za jeho cenné rady, věcné připomínky a vstřícný přístup.

.....

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je poskytnout komplexní informace o HVDC vedení a vytvořit laboratorní model HVDC spojky. V první části práce jsou podány informace o jeho kladech, záporech a základní popis jednotlivých částí, které k tomuto přenosu elektrické energie patří. Dále je v práci uveden návrh modelu HVDC spojky jakožto vedení, pro práci v laboratorním prostředí. Je zde uveden výpočet parametrů a možnosti ovládání a provozování navrženého modelu. Následně je model zkonstruován a jsou porovnány naměřené výsledky s vypočtenými a simulovanými hodnotami.

KLÍČOVÁ SLOVA: HVDC; stejnosměrný proud; stejnosměrné napětí; přenos elektrické energie; střídač; vedení; usměrňovač; návrh

ABSTRACT

The objective of this bachelor thesis is to provide comprehensive information of HDVC transmission and to create laboratory model of HVDC connection. The first part of the thesis presents its pros and cons and provides basic description of individual parts related to the transmission of electrical energy. The thesis also shows proposed design model of HVDC connection, used as a guidance for work in lab environment. Provided are calculated parameters and operational options of working prototype model. Subsequently, the prototype is created and measured test results are compared against calculated and simulated values.

KEY WORDS: HVDC; direct current; direct voltage; transmission of electrical energy; inverter; transmission line; rectifier; proposal

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	11
2 KLADY A ZÁPORY POUŽITÍ DC PROUDU PRO PŘENOS VELKÝCH VÝKONŮ.....	12
3 KONFIGURACE	15
3.1 MONOPOLÁRNÍ.....	15
3.2 BIPOLÁRNÍ.....	15
3.3 BACK TO BACK SYSTÉM.....	16
3.4 SYSTÉM S VÍCE TERMINÁLY (MULTITERMINAL SYSTEM).....	16
4 MĚNIČE	17
4.1 SÍŤOVĚ KOMUTOVANÝ PROUDOVÝ ZDROJ (LINE-COMMUTATED CURRENT SOURCED CONVERTERS)	17
4.2 PŘIROZENĚ KOMUTOVANÝ NAPĚŤOVÝ ZDROJ (SELF-COMMUTATED VOLTAGE SOURCED CONVERTERS)	18
5 KABELY A VEDENÍ.....	19
5.1 NADZEMNÍ VEDENÍ.....	19
5.2 PODZEMNÍ A PODMOŘSKÉ KABELY.....	20
6 VLIV NA STATICKOU A DYNAMICKOU STABILITU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	22
7 OSTATNÍ ZAŘÍZENÍ	24
7.1 SYSTÉM MĚŘENÍ.....	24
7.2 VYHLAZOVACÍ CÍVKY	24
7.3 FILTRY VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	25
7.4 OCHRANA DC VEDENÍ	25
8 ZKUŠENOSTI S HVDC	27
8.1 NEJDELŠÍ VEDENÍ HVDC	27
8.2 NEJSTARŠÍ HVDC VEDENÍ	27
9 VÝBĚR TECHNOLOGIE PRO NÁVRH	28
9.1 VZOROVÉ HVDC VEDENÍ.....	29
9.2 POROVNÁNÍ SE STŘÍDAVOU TECHNOLOGIÍ	30
10 NÁVRH	33
10.1 USMĚRŇOVACÍ ČÁST.....	33
10.1.1 VÝPOČET PARAMETRŮ USMĚRŇOVAČE	33
10.2 STEJNOSMĚRNÉ VEDENÍ	36

10.3 STRÍDAČ.....	37
10.4 ŘÍZENÍ SPÍNANÝCH SOUČÁSTEK.....	39
11 ZÁVĚR.....	41
POUŽITÁ LITERATURA	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Schéma terminálu s rozložením jednotlivých částí[13]</i>	11
<i>Obrázek 2: Model vedení s jeho charakteristickými parametry</i>	12
<i>Obrázek 3: Snížení kapacity přenosu u 1000 kV AC vedení v závislosti na délce při 70 % kompenzaci a 30°[8]</i>	14
<i>Obrázek 4: Schéma monopolární technologie</i>	15
<i>Obrázek 5: Schéma bipolární technologie</i>	16
<i>Obrázek 6: Porovnání koridoru HVDC a HVAC vedení [9]</i>	19
<i>Obrázek 7: Řez podmořským kabelem spojující severní a jižní ostrov Nového Zélandu [10]</i>	20
<i>Obrázek 8: Složení podmořských a podzemních kabelů[20]</i>	20
<i>Obrázek 9: Ukázka závislosti zátěžného úhlu na reaktanci a proudu [6]</i>	23
<i>Obrázek 10: Princip Faradayova efektu [15]</i>	24
<i>Obrázek 11: Hybridní DC jistič[16]</i>	26
<i>Obrázek 12: Blokové schéma navrhované laboratorní úlohy Model HVDC spojky</i>	28
<i>Obrázek 13: Blokové schéma navrhované laboratorní úlohy Model HVDC spojky při poruše</i>	28
<i>Obrázek 14: Schéma bloku šesti-pulzního usměrňovače</i>	36
<i>Obrázek 15: Náhrada vedení, π článek</i>	37
<i>Obrázek 16: Schéma IGBT modulu jako střídače[26]</i>	38
<i>Obrázek 17: Sinusový průběh vytvořený pomocí PWM modulace [25]</i>	39
<i>Obrázek 18: Výstupní signál při využití úrovněového spínání tranzistorů</i>	39
<i>Obrázek A 1: Simulační model vytvořený v prostředí Simulink</i>	45
<i>Obrázek A 2: Průběh napětí za usměrňovačem</i>	46
<i>Obrázek A 3: Průběh napětí na konci vedení</i>	46
<i>Obrázek A 4: Fázový průběh napětí na jednom rezistoru zátěže</i>	47
<i>Obrázek B 1: Návrh krabicové fólie</i>	48
<i>Obrázek B 2: Víko krabice se dvěma moduly IGBT</i>	48
<i>Obrázek B 3: Rozložení IGBT modulů v modelové krabici</i>	49
<i>Obrázek B 4: Vyvedení napájecích kabelů od IGBT modulů k přední straně modelové krabice</i> ..	49
<i>Obrázek C 1: Průběh napětí na výstupu z usměrňovače bez zatížení</i>	50
<i>Obrázek C 2: Průběh napětí na výstupu z usměrňovače při zatížení 1A</i>	50
<i>Obrázek C 3: Proud jednou fází na vstupu do usměrňovače při zatížení 1A bez filtrace</i>	51
<i>Obrázek C 4: Proud jednou fází na vstupu do usměrňovače při zatížení 1A a při využití filtrace pomocí 10 mF kondenzátorem</i>	51

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Parametry reálného kabelového vedení HVDC [21].....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2: Parametry článku [21].....</i>	<i>36</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

HVDC	High Voltage Direct Current	Vysokonapětový stejnosměrný proud
HVAC	High Voltage Alternating Current	Vysokonapětový střídavý proud
VSC	Voltage Source Converter	Napětový zdroj
CSC	Current Source Converter	Zdroj proudu
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
AC	Alternating Current	Střídavý proud
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
GTO	Gate Turn Off	Tyristory vypínané hradlem
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor	Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou

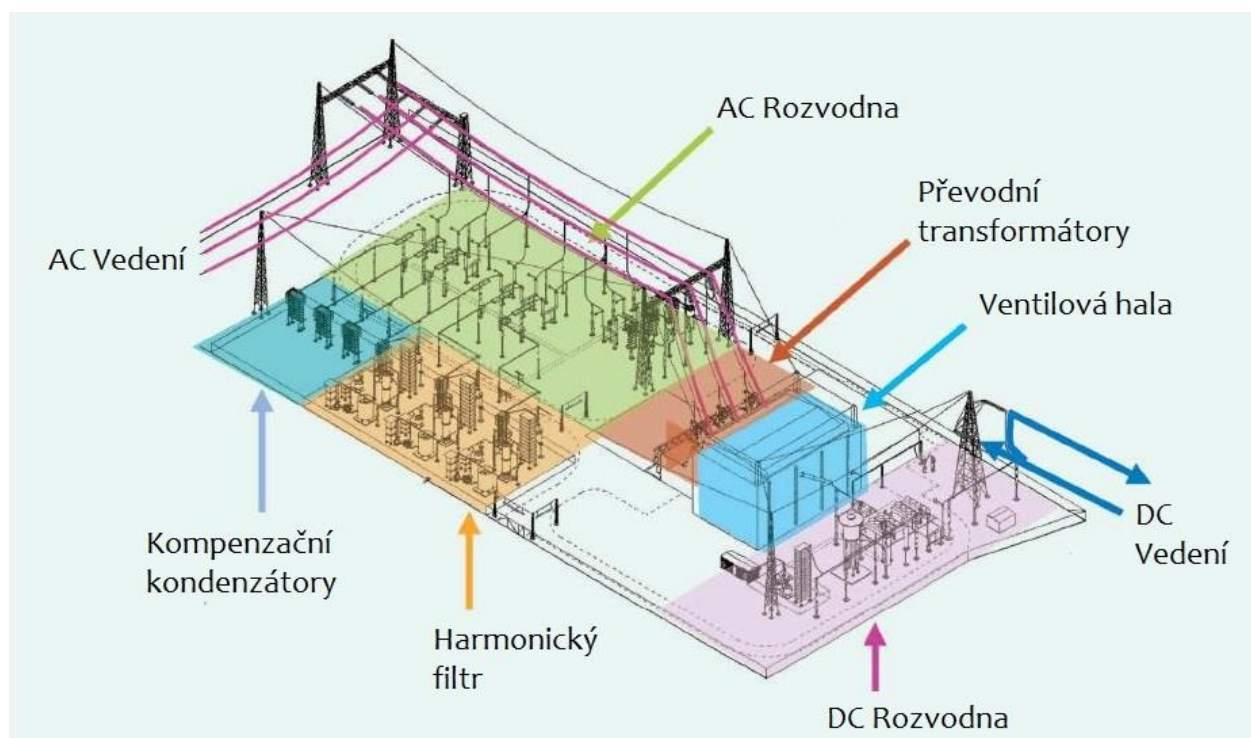
1 ÚVOD

Lidstvo od nepaměti využívá různé formy energie. Využívá je více i méně efektivně, dle toho, zda je této energie dostatek nebo nedostatek. Po objevení elektrické energie bylo nejdůležitější dostat tuto energii k odběrateli a efektivnost nehrála příliš roli. Postupem času docházelo k rozvoji elektrické energie a efektivnost výroby i přenosu začala být důležitým faktorem. S přibývajícím elektrifikací měst a následně i dopravních cest (železnic) bylo důležité přenést velké množství energie od místa její výroby až ke konečnému spotřebiteli za předpokladu co nejnižších ztrát. Dnes využíváme na krátké vzdálenosti, řádově několik desítek kilometrů, synchronní střídavou síť pracující na určité frekvenci. Na takto krátké vzdálenosti, kdy jde o zásobování elektrickou energií okolí elektrárny, není třeba využívat složitých metod přenosů, neboť zde pracuje střídavá síť kvalitně a spolehlivě. Naopak na velké vzdálenosti, jak si ukážeme dále, nastávají u střídavé sítě problémy spojené s přenosem a velikostí ztrát. V tomto okamžiku se vyhledává přenos pomocí stejnosměrné sítě, jež dokáže snížit ztráty a navíc stabilizovat spojené střídavé sítě.

Pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti se užívá technologie vysokonapěťového stejnosměrného proudu neboli HVDC (High Voltage Direct Current). Tato technologie si našla komerční využití už od roku 1954 a od té doby se neustále vyvíjí a zlepšuje svoji efektivnost. Velký rozvoj nastal pro potřeby propojení elektráren umístěných na vodní ploše či vzdálených od místa spotřeby či zásobování míst, kde klasická střídavá technologie selhává.

HVDC technologie je inovativní a moderní způsob přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti, ať už je realizováno pomocí nadzemního vedení či podmořských nebo podzemních kabelů. Díky snaze o snížení ztrát se chová „ekologicky“ a je vhodným „doplňkem“ k elektrárnám využívající obnovitelné zdroje energie.

Na Obrázek 1 jde vidět klasické rozložení rozvodny HVDC neboli terminálu a dále si vysvětlíme celý princip fungování HVDC technologie.



Obrázek 1: Schéma terminálu s rozložením jednotlivých částí[13]

2 KLADY A ZÁPORY POUŽITÍ DC PROUDU PRO PŘENOS VELKÝCH VÝKONŮ

Při rozvoji elektrické energie se zpočátku využíval stejnosměrný proud. Později bylo zjištěno, že pro malé přenášené výkony má příliš vysoké ztráty. Naopak střídavý proud měl oproti stejnosměrnému proudu, pro takto nízké přenášené výkony, daleko nižší ztráty. Jak lze vidět na modelu vedení (Obrázek 2), charakteristickými parametry vedení jsou následující – indukční reaktance (X), kapacitní susceptance (B), podélná impedance (Z) a příčná admitance (Y).

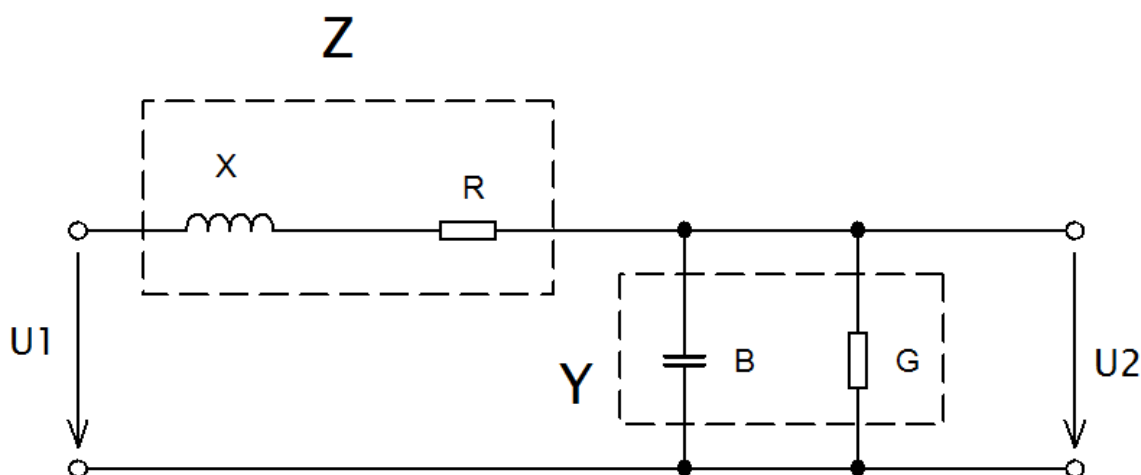
Na následujících rovnicích jde vidět závislost těchto parametrů vedení na frekvenci:

$$Z = R + jX \quad (\Omega; \Omega; \Omega) \quad (2.1.)$$

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (\Omega; \text{Hz}; \text{H}) \quad (2.2.)$$

$$Y = G + jB \quad (\text{S}; \text{S}; \Omega) \quad (2.3.)$$

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (\text{S}; \text{Hz}; \text{F}) \quad (2.4.)$$



Obrázek 2: Model vedení s jeho charakteristickými parametry

Tento jednofázový model je využíván pro výpočet parametrů, napětových a proudových poměrů u symetrického trojfázového střídavého vedení. Rovnice (2.2.) a (2.4.) se využívají buď pro modelový výpočet trojfázového střídavého vedení jako telegrafní rovnice nebo v diferenciálním tvaru pro výpočet rovnoměrně rozložených parametrů na vedení. Obvykle se parametry toho modelu udávají v jednotkách na kilometr, a proto s rostoucí délkou tyto parametry rostou.

Pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti, od přibližně 600 km u nadzemního vedení a 50 km u vedení podzemního nebo podmořského, se využívá vysoké napětí (HVDC), což umožňuje pro stejný přenášený výkon využít daleko nižšího proudu. Zároveň při snížení velikosti proudu pro přenášený výkon se zmenší ztráty na vedení dle vztahu:

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (\text{W}; \Omega; \text{A}) \quad (2.5.)$$

Pro příklad si uvedeme přenos výkonu 220 MW za využití napětí 110 kV a 500 kV stejnosměrného vedení:

Proud při využití napětí 110 kV a přenášeném výkonu 220 MW

$$I = \frac{P}{U} = \frac{220 \cdot 10^6}{110 \cdot 10^3} = 2000 \text{ A}$$

Proud při využití velmi vysokého napětí 500 kV a stejném přenášeném výkonu 220 MW:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{220 \cdot 10^6}{500 \cdot 10^3} = 440 \text{ A}$$

Když porovnáme ztráty u na modelu vedení 110 kV a 500 kV, při použití měděného kabelu o poloměru 10 mm, délce 1 km s rezistivitou mědi 0,01786 Ω.mm²/m:

U 110 kV vedení:

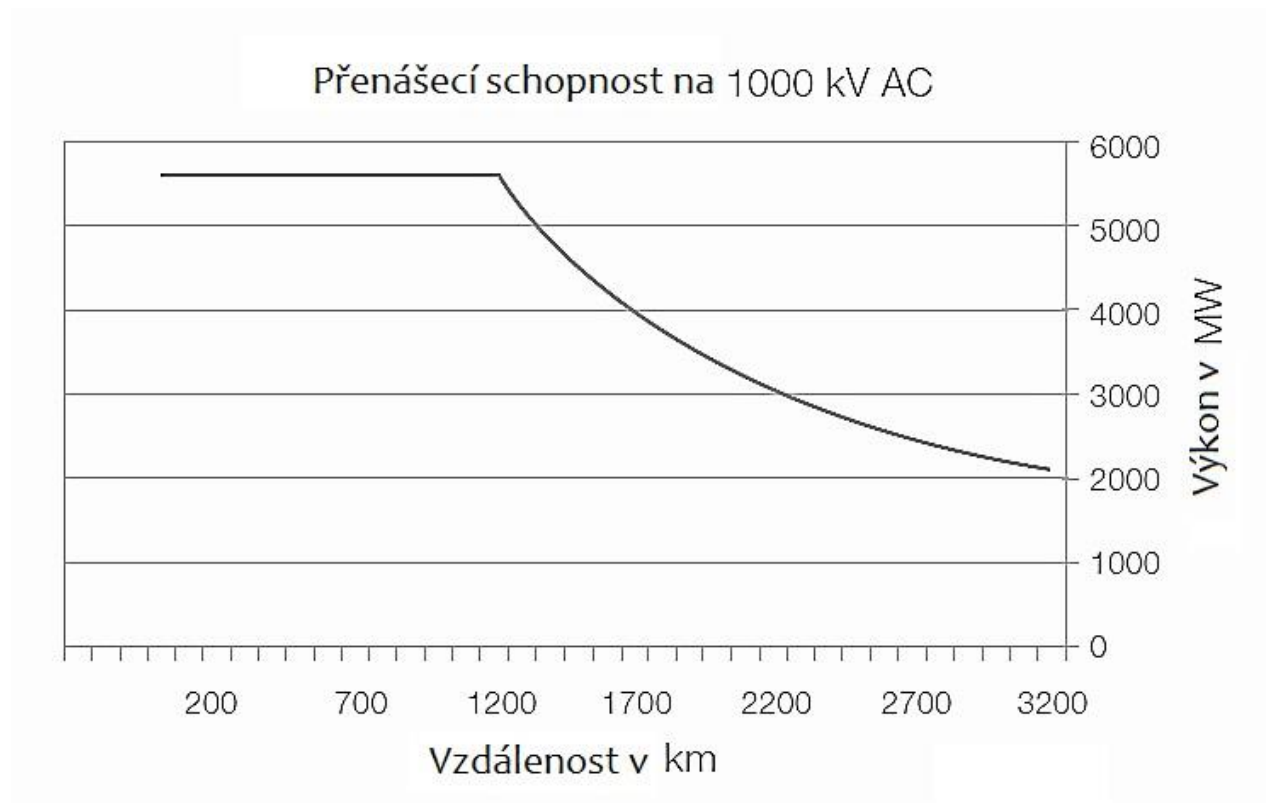
$$\Delta P = R \cdot I^2 = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 = 0,01786 \cdot \frac{1000}{\pi \cdot 10^2} \cdot 2000^2 = 227,4 \cdot 10^3 \text{ W} = 227,4 \text{ kW}$$

U 500 kV vedení:

$$\Delta P = R \cdot I^2 = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 = 0,01786 \cdot \frac{1000}{\pi \cdot 10^2} \cdot 440^2 = 11 \cdot 10^3 \text{ W} = 11 \text{ kW}$$

Když porovnáme tedy ztráty na těchto dvou vedení tak zjistíme, že při 4,5 násobném zvýšení napětí nám klesnou ztráty cca 20 x. Tohoto principu se tedy využívá u HVDC technologie pro přenos velmi vysokých výkonů.

Na velmi vysokém nebo ultra vysokém napětí pracuje i střídavá technologie High Voltage Alternating Current (HVAC) neboli vysokonapětový střídavý proud. Jedná se o technologii, která je stejně jako HVDC založena na využití vysokého napětí. Jde ale o střídavou síť pracující určitou danou frekvencí, což ovlivňuje parametry (2.1) - (2.4), s rostoucí délkou rostou ztráty mnohem výrazněji. Vzniklý jalový výkon, jenž na tomto vedení vznikne, je nutno kompenzovat a i přes takto kompenzované vedení dojde od určité její délky ke zvýšení ztrát na vedení. Zároveň zde dochází k omezení z hlediska statické stability, o které budeme hovořit dále. Tato závislost je jasně vidět na následujícím obrázku Obrázek 3. Díky tomu je efektivnější využít HVDC technologii, která má ve skutečnosti při přenosu 1000 MW na vzdálenost 1000 km ztráty přibližně 3 % + 0,6 % za terminál. [8]



Obrázek 3: Snížení kapacity přenosu u 1000 kV AC vedení v závislosti na délce při 70 % kompenzaci a 30°[8]

Pro porovnání 150 mm² jednožilový kabel s impregnovanou papírovou izolací určený pro 50 kV AC vedení. U trojfázového vedení s kapacitou 20 MW a délkou 100 km jsou ztráty 3,2 MW, což je cca 20% z přenášeného výkonu. Při použití stejného kabelu pracujícím na napětí 200 kV DC užitím bipolární technologie dosahuje přenášený výkon hodnoty 110 MW se ztrátami 2,9 MW, což je 2,6 % z přenášeného výkonu. [1]

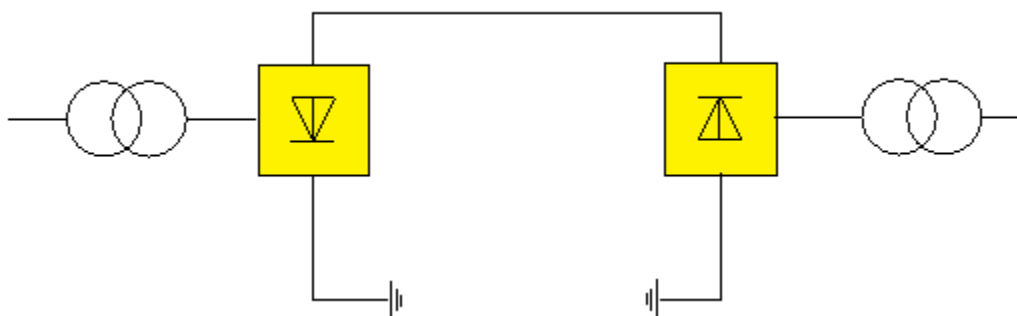
I při využití HVDC technologie se na kabelovém nebo nadzemním vedení objevují parazitní jevy, jako jsou indukčnost a kapacita. Tyto jevy ale nezpůsobují tak vysoké ztráty, neboť jsou omezeny pouze na jevy přechodové.

3 KONFIGURACE

Nejzákladnější dělení HVDC technologie, podle způsobu transformace a přenosu elektrické energie, je na monopolární (3.1) a bipolární (3.2) konfiguraci. Rozdíl mezi těmito konfiguracemi je hlavně v odlišných nákladech na výstavbu a spolehlivosti přenosu v případě poruchy. U monopolární konfigurace při poškození vedení dojde k úplnému výpadku přenášeného výkonu, neboť přenos byl realizován pouze jedním vedením nebo kabelem. U bipolární technologie při poruše jednoho pólu vedení klesne přenášený výkon na méně než 50 % přenášené kapacity. Běžně se využívá propojení těmito konfiguracemi mezi dvěma stanicemi tzv. terminály.

3.1 Monopolární

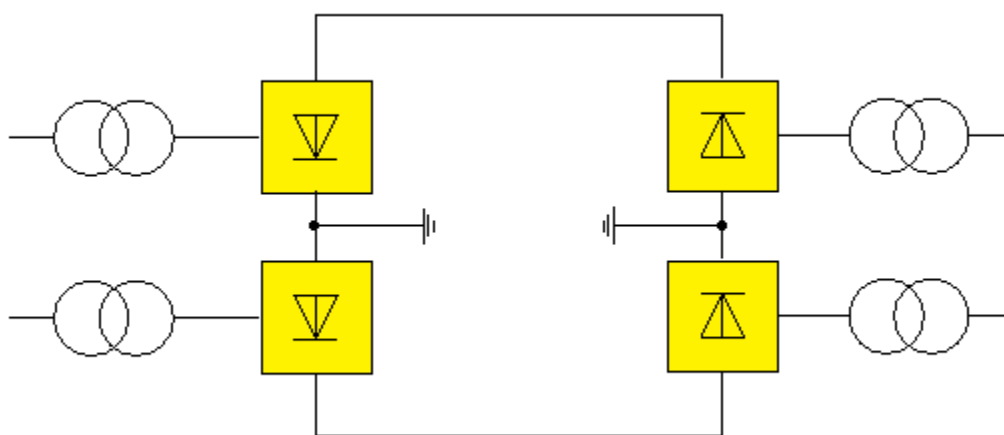
Monopolární konfigurace je jednou z verzí HVDC technologie a je založena na usměrnění střídavého proudu, a to pouze na kladnou složku, místo záporné složky je využit potenciál země nebo metalický kabel. Jedná se o nejjednodušší konfiguraci HVDC technologie, ve které se počítá pouze se dvěma měniči napětí. Výhodou této konfigurace je možnost využití pouze jednoho kabelu či vedení pro přenášený výkon. Nevýhodou vedení pomocí jednoho kabelu je změna chemických vlastností vody a koroze v oblasti terminálu z důvodu jejího uzemnění. Metalický kabel zde nezastupuje zápornou polaritu a není nutno tento vodič dimenzovat na plné napětí, které bude na tomto vedení využíváno, protože kabel zastupuje „nulový vodič“ a pouze propojuje stanice, aby vyrovnal případné odchylky v potenciálu země. Vysoké napětí se objevuje na kabelu či vedení, které přenáší výsledný výkon. Nevýhodou monopolární technologie využívající potenciál země je tedy změna chemických poměrů v místě uzemnění terminálu a zvýšení korozivity.



Obrázek 4: Schéma monopolární technologie

3.2 Bipolární

Bipolární konfigurace je dalším systémem HVDC technologie využívající jak kladný, tak záporný potenciál. Pro tento typ konfigurace je typické vedení pomocí dvou kabelů. Tato varianta je dražší než monopolární z důvodu nutnosti vést dva kabely a dimenzovat je na plné napětí, které bude na této konfiguraci provozováno. Naopak výhodou se stává již zmíněná možnost přenášení výkonu lehce pod 50 % přenosové kapacity v případě poškození nebo přerušení jednoho z pólů vedení. Dalším kladem této konfigurace je, díky dvojímu vedení, vyšší spolehlivost v oblasti dodávky elektrické energie.



Obrázek 5: Schéma bipolární technologie

3.3 Back to back systém

Další možnost HVDC technologie je pomocí tzv. Back-to-back systému, který je využíván na propojení asynchronních distribučních sítí neboli sítí o rozdílné frekvenci. Jedná se o stanici obsahující usměrňovač a střídač. Terminál může být připojen k distribuční síti nebo elektrárně pracující na frekvenci určující tuto síť. V terminálu je napětí usměrněno a následně střídačem převedeno na napětí o požadované frekvenci. Tato technologie dodává do sítě velice kvalitní elektrickou energii a pozitivně působí na síť.

3.4 Systém s více terminály (Multiterminal system)

Jedná se o systém, kdy jsou spojeny dva a více terminály. Toto spojení je možno provést sériově, paralelně nebo jejich kombinací, a to sérioparalelně. Z hlediska řízení tohoto systému je složitější využití síťově komutovaných měničů (kapitola 4.1) z důvodů přenášení výkonu oběma směry, který obrácením polaritu proudu působí na všechny převodníky zapojené v systému. S využitím samostatně komutovaných měničů (kapitola 4) je přenášení výkonu opačným směrem dosaženo změnou polarity napětí místo proudu, které neovlivňuje ostatní terminály. Díky těmto měničům se zde očekává velký rozvoj více terminálového systému.

4 MĚNIČE

Měniče elektrické energie, ať už se jedná o usměrňovač nebo střídač, jsou nedílnou částí HVDC technologie a elektrické sítě. Zajišťují jednak usměrnění střídavého proudu na stejnosměrný proud a také převod stejnosměrného na střídavý, dle potřebné frekvence. Dnes se obvykle využívají 12-ti pulzní měniče pro jeden pól (u bipolárního systému), což umožňuje mít dva stejnosměrné obvody, každý o stejném výkonu. Typický 12-ti pulzní měnič je realizován pomocí dvou 6-ti pulzních měničů navzájem posunutých o 30° elektrických. Tento fázový posun zajišťuje transformátor se dvěma sekundárními vinutími, z nichž jedno je zapojeno do trojúhelníku a druhé do hvězdy. Každý měnič je vybaven tzv. ventily z polovodičů, jež zajišťují regulaci výkonu a usměrnění napětí a proudu. Dnes se využívají hlavně IGBT nebo tyristory pracující na požadovaném vysokém napětí. Tyto součástky nejsou samy o sobě schopny pracovat na tak vysokém napětí a je tedy nutno je skládat do sério-paralelních kaskád, díky kterým je možné převést tak vysoké výkony a napětí jaké jsou u HVDC technologie typické.

Měniče lze rozdělit na síťově komutované CSCs (Current Source Converters – zdroj proudu), které se díky neustálé změně polarity v síti z této sítě komutují nebo přirozeně komutované VSCs (Voltage Source Converters – zdroj napětí), u kterých schopnost komutace obsahují už základní součástky. Pro síťově komutované měniče je typické použití tzv. tyristorových ventilů (dále jen tyristorů) pracujících na frekvenci střídavých sítí (50 – 60 Hz), přirozeně komutované měniče obvykle využívají IGBT a daleko větší frekvence. Dnešní tyristory pracují již také na principu přirozené komutace.

4.1 Síťově komutovaný proudový zdroj (Line-Commutated Current Sourced Converters)

Jedná se o jeden z prvních typů měničů používaný už v počátcích komerčního využití HVDC technologie. Pro usměrnění se používaly rtuťové usměrňovače, jež musely být komutovány pomocí střídavé sítě. Takto komutovaný usměrňovač měl nevýhodu, že potřeboval pro práci synchronní střídavé sítě (o stejné pracovní frekvenci) a byla u něj nutná stabilní dodávka jalového výkonu a fázového posuvu proudu vůči napětí k zajištění silného komutačního procesu. Toho bylo zajištěno pomocí mohutných kondenzátorů, které zvětšovaly velikost terminálu. Dnes se místo rtuťových usměrňovačů využívají tyristory, které jsou přirozeně komutovány díky vlastnímu složení součástky, a jsou schopny blokovat přepětí vzniklé v síti. Vzduchem izolované a vodou chlazené kaskády tyristorů jsou uloženy v tzv. ventilových halách, kde jsou zajištěny příhodné podmínky pro fungování takto zapojených tyristorů. S dalším vývojem tyristorů odpadala nutnost je zapojovat do paralelních větví a došlo i ke snížení počtu sériově zapojených tyristorů, neboť moderní tyristory pro vysokonapěťové přenosy disponují hodnotami 8500 V / 2000 A nebo 6500 V / 4250 A [7]. Tyristory využívají kompenzaci jalového výkonu sériově zapojenými kondenzátory na střídavé straně měniče.

Tento systém využití zdroje proudu není příliš rozšířen. Je využit hlavně pro ultra vysoká napětí a přenášení velmi velkých výkonu na velmi velké vzdálenosti. Díky nutnosti kompenzovat jalový výkon pro vyšší účinnost jsou tyto měniče robustnější a větší.

4.2 Přirozeně komutovaný napět'ový zdroj (Self-Commutated Voltage Sourced Converters)

Rozvoj měničů, jež se mohou samy komutovat díky vlastnímu složení použitých součástek, umožnil řídit měnicí cyklus za použití PWM (Pulse Width Modulation – pulzní šířková modulace). Základem takto řízených zdrojů jsou typicky tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem), dále se využívají speciální tyristory GTO (Gate Turn Off – vypínané hradlem) nebo IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor – tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou). Nejčastěji používanými součástkami jsou tedy moderní IGBT, které jsou ovládány pomocí PWM a disponují parametry 6500 V / 750 A nebo 4500 V / 1200 A [14]. Hlavní výhodou tedy je možnost zapnutí a vypnutí pomocí ovládacího signálu využívající PWM, který může mít frekvenci až 2000 Hz (omezení z hlediska spínacích ztrát). Díky takto vysoké frekvenci je možno zlepšit rychlost odezvy na změny v síti a plynulost kontroly měniče. Možnost ovládat amplitudu napětí a úhel bez ohledu na proud znamená, že VSC je schopen produkovat a také odebírat jalový výkon dle potřeb synchronní sítě. Tuto schopnost má každý VSC terminál v technologii HVDC a díky možnosti měnit poměry jalového výkonu v synchronních sítích zvyšuje jejich stabilitu. Takovým způsobem provozovaný měnič má provozní rozsah 0 - 100 % zatížení a má schopnost obnovit dodávky energie z výpadku bez potřeby prvotního impulsu. Na základě výborné ovládací schopnosti je VSC měnič ideální pro systém s více terminály. Nízká cena, kompatibilita připojení a modularita VSC měničů zvýšily použitelnost HVDC technologie u vedení s parametry začínajících na 200 MW a 60 km. Díky možnostem najetí z „nuly“ a zvýšení stability střídavých sítí, jsou tyto měniče ve velkém měřítku uplatňovány pro přenos energie vyrobené z obnovitelných zdrojů, zejména pobřežní větrné parky. Odpadající nutnost kompenzovat jalový výkon pomocí kondenzátorů a menší filtry pro střídavé sítě, díky možnosti řízení toků výkonu a nedostatku harmonických, snižují rozměry terminálu, a tedy je možné využít tuto technologii i na vrtných plošinách. Nevýhoda použití IGBT nastává ve formě vyšších ztrát vzhledem k vysoké modulaci a spínací frekvenci. Doba výstavby měniče typu VSC je odhadována na 1 rok, což je třikrát méně než u měničů založených na tyristorové technologii CSC.

Systémy využívající VSC technologii se ve světě využívají pod komerčními názvy HVDC Light (ABB) respektive HVDC PLUS (Siemens). Tyto komerční systémy jsou standardizované a nabízí uplatnění pro široké množství aplikací. Omezení této technologie v dnešní době je dána napět'ovými a proudovými parametry IGBT součástek a relativně vysokými spínacími ztrátami.

5 KABELY A VEDENÍ

U HVDC technologie je využíván jak přenos nadzemním vedením, tak podmořskými či podzemními kabely. Nadzemní vedení pro stejnosměrné napětí je srovnatelné s klasickým vedením provozovaném na střídavém napětí a liší se jen nutností využít méně vodičů pro přenos výkonu. Nejčastěji je využíváno kabelů tažených po mořském dně, které se podle toho nazývají podmořské kabely.

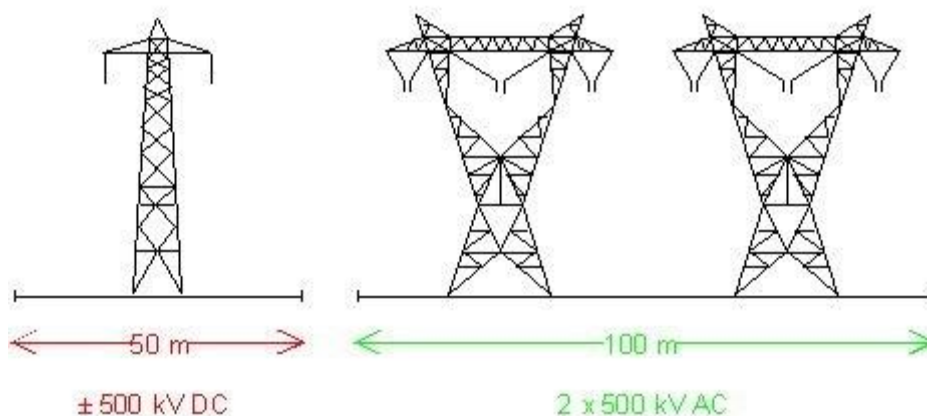
5.1 Nadzemní vedení

U nadzemního vedení je možno využít velmi vysokého nebo ultra vysokého napětí díky možnosti využití velké izolační vzdálenosti mezi jednotlivými linkami u bipolárního systému. Není zde nutné počítat s tak nepříznivými podmínkami jako u podmořských kabelů. Vedení nad zemí je dostupnější a poskytuje nižší ztráty. Nadzemního vedení je využito u přenosu velkých výkonů na velmi velké vzdálenosti díky rozumným nákladům v poměru k ztrátám na tomto vedení.

Zatím nejdelší vedení nacházející se v Číně mezi elektrárnou Xiangjiaba a městem Shanghai, funguje od července 2010, má délku 2000 km a kapacitu přenosu 7200 MW se ztrátami 7 %. Nutný koridor pro vedení tohoto vedení, jenž pracuje na napětí ± 800 kV s využitím bipolárního systému HVDC technologie, je 50 m. [3]

Využití takto vysokých napětí má za následek nutnost dodržení velkých izolačních vzdáleností. Pro vedení se využívají sloupky vysoké až 90 m nad zemí, což ale výrazně zvyšuje šanci zásahu blesku. Proto musí být sloupky navrhnuty tak, aby odolaly těmto zásahům. Nové metody výpočtu rizik zásahu blesku zjistily čtyřnásobně vyšší riziko zásahu blesku u kladného pólu než u pólu záporného, proto se využívají stínící vodiče, které mají ochránit hlavní vedení. Šance zásahu vedení bleskem není po celé délce vedení konstantní, a je tedy nutno provádět návrh pro jednotlivé úseky zvlášť.

Pro ukázkou je na obrázku Obrázek 6 porovnání koridoru nutného pro provozování HVDC a HVAC vedení s přenášeným výkonem 2000 MW. Lze tedy říct, že využití HVDC technologie snižuje nároky na zastavěný prostor v krajině oproti HVAC vedení a chová se k přírodě ohleduplněji.



Obrázek 6: Porovnání koridoru HVDC a HVAC vedení [9]

5.2 Podzemní a podmořské kabely

Mohlo by se zdát, že díky příznivým nákladům na realizaci nadzemního vedení bude trend pokračovat a nadzemní vedení se bude více a více využívat a vytlačí tak kabelové vedení. Ovšem s rozvojem větrných farem umístěných na vodní ploše a nutnosti zásobování ostrovů a ropných plošin elektrickou energií, se dnes rozvíjí právě podzemní a podmořské kabely.

V tomto ohledu poskytují kabely několik výhod:

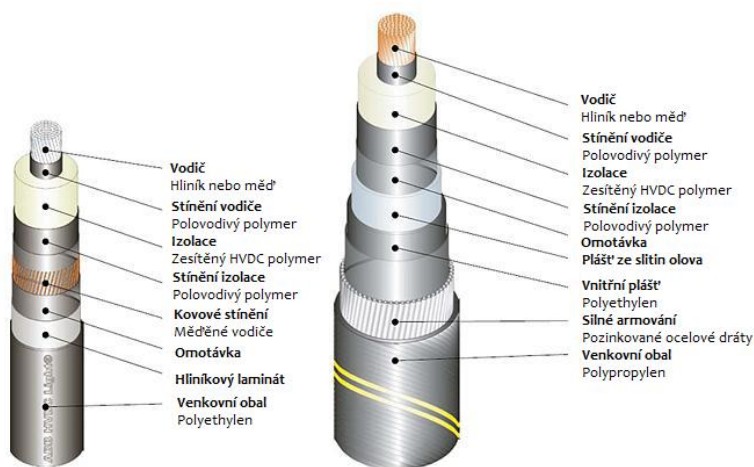
- Nižší provozní náklady (není zde námraza, není nutno čistit koridor, kudy vede vedení)
- Lepší odolnost proti nepříznivým podmínkám (bouřky, vítr, mráz, padající větve)
- Menší dopad na životní prostředí (není nutno udržovat tak velké koridory nebo stavět stožáry)
- Menší koridor
- Žádné akustické rušení
- Snížení intenzity elektrického pole
- Možnost využití prostoru nad kabelovým vedením (zalesnění, orná půda, parky, apod.)

Celosvětová poptávka po elektrické energii vzrůstá a je nutno zajistit dostatečné zásobování velkých odběratelů. Problém ovšem nastává v kapacitách dosavadních linek pro přenos této energie, které už nevyhovují nárokům. Řešením by bylo vytvořit masivní síť nadzemního vedení pro zásobování odběratelů, ale zde nastává problém s nutností vztyčit stožáry a vlastnit pozemky, na kterých budou postaveny. V Německu bylo například naplánováno až 800 km nadzemního vedení, které mělo být během posledního desetiletí realizováno. Ve skutečnosti bylo vybudováno pouze 10% z celkové plánované délky nadzemního vedení, což vytváří nátlak na energetickou síť. Z toho důvodu jsou podzemní kabely stejně vhodné k využití jako nadzemní vedení i přes vyšší ztráty a vyšší náklady na realizaci. Řádově se zde bavíme o 1-2,5 milionech eur za kilometr délky dvojitého kabelového podzemního vedení na napětí ± 350 kV a kapacitě 1100 MW, které je tedy 2-3x dražší, než běžné nadzemní vedení. [5]

Kabelovým vedením jsou přenášeny velmi velké výkony, zatímco první HVDC vedení mezi ostrovem Gotland a Švédskem bylo dimenzováno na 20 MW, dnes je vylepšeno původní vedení a jeho kapacita stoupla na 260 MW při 150 kV.



Obrázek 7: Řez podmořským kabelem spojujícím severní a jižní ostrov Nového Zélandu [10]



Obrázek 8: Složení podmořských a podzemních kabelů [20]

U kabelového vedení HVDC není oproti nadzemnímu vedení tak velký dopad na přírodu, neboť kabel je veden pod zemí a není pro něj nutno vést tak velké koridory (nutnost vykácet les, zabrat půdu pro orbu, apod.) jako u nadzemního vedení. Kabel je uložen v příkopu v písku hlubokém 1,5 m. Pro jeden pól HVDC technologie je nutná šířka příkopu cca 1 m, v případě nutnosti uložení více pólů tato šířka narůstá. Pro uložení do příkopu je nutno zajistit, aby se v okruhu 2 m okolo příkopu nenacházely žádné hluboce zakořeněné stromy, které by mohly kabelové vedení poškodit. Pokud porovnáme potřebné místo pro vedení o kapacitě 5 GW a napětí ± 800 kV, které je vedeno nad zemí, je potřebná šířka koridoru 50 m a v uložení v zemi o šířce příkopu 12 - 15 m v závislosti na použité konfiguraci HVDC technologie, zjistíme, že uložení kabelového vedení v zemi ušetří místo v krajině. Díky použité izolaci kabelu je elektromagnetické pole kolem něj téměř zanedbatelné a nemá tedy vliv na životní prostředí. Oteplování kabelu se neměří přímo na kabelu, ale všeobecně platí, aby se teplota povrchu nad kabelem neoteplila o více jak 1°C a neohrozila tak růst rostlin.[5]

Nejvíce se používají tyto dva typy kabelů – MIND a XLPE.

MIND je zkratka pro masivně impregnovanou, neodvodněnou, papírovou izolaci. Jádru kabelu je obaleno polovodivým karbonovým papírem. Hlavní izolační vrstva je poté tvořena tenkými papírovými vrstvami, které jsou vysušené a napuštěné izolačním olejem. Celý kabel je hermeticky uzavřený a mechanická odolnost je dána ocelovou páskou a armováním dvěma vrstvami ocelového drátu. Tato technologie kabelu se využívá již více než 40 let a je velmi dostupná. S rozvojem měničů se snižoval počet aplikací využívající kabely MIND díky využívání modernější polymerické izolace u kabelů XLPE. Kabely XLPE byly využívány pro přenos ve střídavých sítích už v roce 1960. Technologie zůstala stejná, jen se v průběhu let zlepšila polymerová izolace. V porovnání s MIND kabely, má kabel XLPE lepší mechanické a manipulační vlastnosti. [5]

Nižší energetické ztráty kabelů pro stejnosměrné vedení v porovnání se střídavým vedením byly zmíněny již v kapitole 2. Nicméně u kabelů XLPE lze provést více srovnání mezi využitím na střídavém a stejnosměrném napětí. Při použití kabelu XLPE na střídavém napětí je vyžadováno, aby armování kabelu bylo tvořeno nemagnetickým materiálem, a aby nedocházelo k magnetickým ztrátám, proto jsou využity k armování například nerezové ocelové dráty, měděné nebo hliníkové slitiny. Kabely XLPE využitě na stejnosměrném napětí nejsou tak závislé na materiálu armování kabelu a je tedy možno využít pozinkované ocelové dráty. Například pro přenesení stejného množství energie, pomocí podmořského kabelu pracujícího na střídavém napětí, jsou vyžadovány 3 vodiče s velkým průřezem, zatímco pro kabel pracující se stejnosměrným napětí je potřeba využít pouze 2 vodiče s menším průřezem. Tímto dojde ke snížení hmotnosti kabelu až o 60-70 % a také ke snížení nákladu spojených s dopravou a umístěním kabelu.

Kabely pro podzemní využití jsou podobné kabelům využívaným pod vodou, kdy je využita stejná technologie, jen je zajištěna větší mechanická odolnost kvůli hrozbě vnějšího poškození (například kotvou). Pro podzemní nebo podmořské kabely se využívají často kabely s hliníkovým jádrem, ale nevýhodou u nich je oproti kabelům s měděným jádrem o 25 % nižší kapacita přenosu. Pokud jsou tedy vysoké požadavky na kapacitu přenášeného výkonu, využívají se kabely s měděným jádrem.

6 VLIV NA STATICKOU A DYNAMICKOU STABILITU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

Stabilita elektrizační soustavy se rozděluje obecně na statickou stabilitu, která popisuje chod elektrizační soustavy v ustáleném stavu a dynamickou stabilitu, kdy dojde k neočekávaným nebo náhlým změnám výkonových poměrů v elektrizační soustavě. V případě statické stability se jedná o postupné snižování nebo zvyšování přenášených výkonů, kdežto v případě dynamické stability se jedná například o náhlé přerušení toků energie vlivem přírodní katastrofy.

Díky rychle rostoucímu počtu elektráren vyrábějící elektickou energii z obnovitelných zdrojů energie, zejména z větrných farem, je nutno dohlížet a kontrolovat statickou a dynamickou stabilitu elektrizační sítě. Tyto farmy mohou při nepříznivých povětrnostních podmínkách narušit svým výkonem nebo jeho absencí stabilitu celé sítě a mohou tak nastat problémy se zásobováním elektrickou energií odběratelům. Tato nestabilita může mít za následek až katastrofální dopad, dojde-li k ní u provozů, u kterých je nutno dodržet vyšší stupeň dodávky elektrické energie.

Dalším problémem u stability vznikají díky přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti. Tento problém se týká většinou velkých států nebo mezikontinentálních přenosů elektrické energie. Vlivem vzdálenosti a velkému počtu připojených odběrů či elektráren dochází k narušení řízení elektrické sítě a následnému kolapsu.

Obecně statickou a dynamickou stabilitu sítě posuzujeme dle velikosti zátěžného úhlu synchronního generátoru, který pracuje do tvrdé elektrizační sítě. Tento úhel závisí na maximálním možném výkonu, který lze přenést než se zátěžný úhel zvětší a soustava se dostane do nestability. Tento maximální výkon se vypočítá dle vztahu (6.1.) [6].

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin \beta \quad (W; V; V; \Omega; ^\circ) \quad (6.1.)$$

kde

P je výkon přenášený mezi sítěmi

U_1 je napětí první elektrizační soustavy

U_2 je napětí druhé elektrizační soustavy

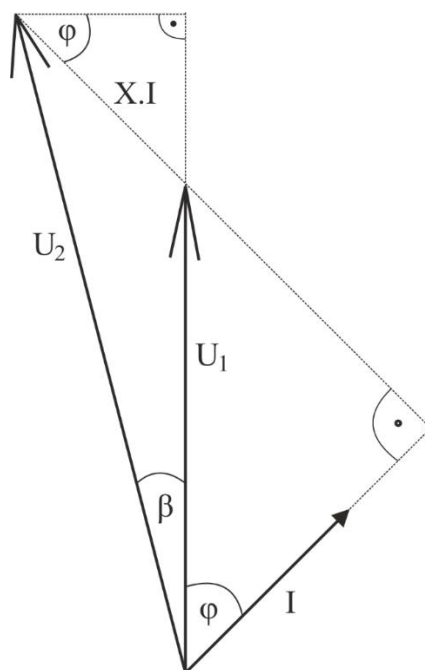
X je celková reaktance mezi dvěma soustavami nebo soustavou a generátorem, neboť se zanedbává činný odpor

β zátěžný úhel generátoru

Maximální výkon přenášený mezi elektrizačními sítěmi nebo mezi elektrárnou a elektrizační sítí pomocí vedení, tedy závisí na napětí na kterém jsou jednotlivé prvky provozovány, jakou reaktancí jsou od sebe odděleny a s jak velkým zátěžným úhlem aktuálně generátor pracuje. Maximální možný přenášený výkon nastává při $\beta = 90^\circ$. Tento úhel odpovídá čtvrtině vlnové délky impedance vedení při 50 Hz, což je přibližně 1500 km délky vedení mezi dvěma generátory. Do reaktance se počítá jak reaktance „propojovacího“ vedení, tak reaktance generátoru a ostatních prvků, které se na propojení podílejí. V praxi to znamená, že pokud generátor pracující na napětí, které je stejné jako napětí v elektrizační síti do které pracuje odděleno vedením o reaktanci tohoto vedení, reaktanci transformátorů a synchronní reaktanci či rozptylové reaktanci. V případě dvojnásobné délce „propojovacího“ vedení se sníží maximální přenášený výkon o více než polovinu dle vztahu (6.1.).

HVDC technologie tedy díky tomu, že se vlivem absence jakékoliv frekvence stejnosměrného proudu (při zanedbání zvlnění), a tedy díky tomu že samotné vedení reaktanci nevyvolává, je schopno propojovat generátor s elektrizační sítí nebo elektrizační sítě mezi sebou na velmi velkou vzdálenost.

HVDC technologie zvyšuje tuto stabilitu také díky možnosti regulovat jalový výkon a tím měnit zátěžný úhel na generátorů připojených k sítí společně s HVDC vedením. Jak je vidět na Obrázek 9, zátěžný úhel je závislý na reaktanci a velikosti proudu procházející mezi dvěma zdroji napětí (elektrizační sítí a generátorem nebo dvěma elektrizačními sítěmi). Pokud je tedy HVDC vedení provedeno jako páteřní síť ve velké zemi (například Rusko, Čína, Brazílie, apod.) tak je takto možno výrazně zvýšit stabilitu celé elektrizační sítě a zároveň se zvýhodní přenos velkých výkonů na větší vzdálenosti.



Obrázek 9: Ukázka závislosti zátěžného úhlu na reaktanci a proudu [6].

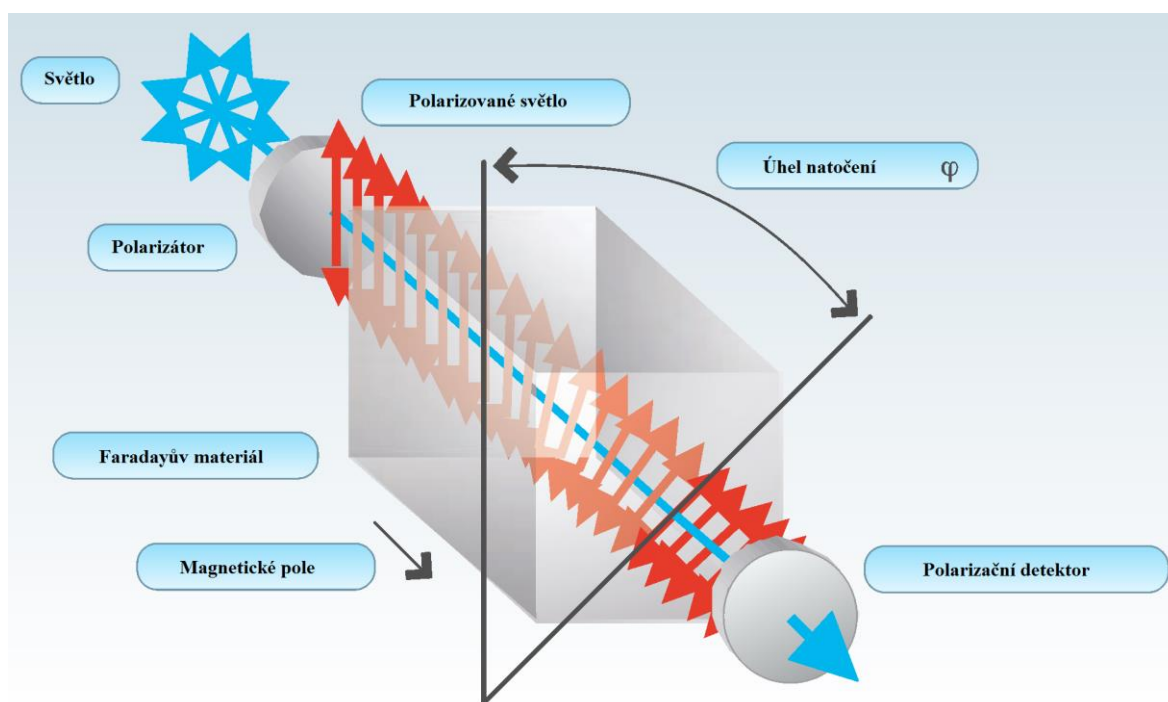
V případě dynamické stability je důležitý faktor, za jak dlouho je schopna soustava se vrátit zpět do synchronního stavu po neočekávaném nebo náhlém stavu jako je například zkrat, přerušení vedení, apod. Vlivem mechanické setrvačnosti soustavy je zvýšené nebezpečí „překmitu“ zátěžného úhlu přes únosnou mez stability a může dojít k „vytržení“ ze synchronismu a k celkové nestabilitě systému a následně celé elektrizační sítě, za předpokladu, že je generátor dostatečně velký k narušení stability sítě. Nebezpečí nastává i při náhlém vypnutí velkého generátoru pracujícího do elektrizační sítě, čímž se změní přenos výkonu (nutnost dodat více výkonu do sítě), což vede k zvětšení zátěžného úhlu u ostatních generátorů a riziku překročení bezpečné meze. Tato mez nebývá v praxi volena jako maximální teoretická 90° , ale jako hodnota a něco nižší z důvodu mechanických zákmitů a jiných setrvačných jevů. [6][7]

7 OSTATNÍ ZAŘÍZENÍ

Měniče a vedení nejsou jedinými součástmi technologie HVDC. Vlivem různých parazitních parametrů spojených s přenosem elektrické energie vznikají další ztráty a kolísání napětí vlivem jeho zvlnění při usměrnění. Proto jsou v terminálech obsaženy i obvody které mají tyto nepříznivé vlastnosti omezovat a zvyšovat bezpečnost této technologie.

7.1 Systém měření

Pro měření napětí je možno využít metodu kulového jiskřiště (laboratorně) nebo odporového děliče napětí, u kterého díky chybějící střídavé složce, nedochází tedy ke zkreslení napětíového signálu vlivem parazitních kapacit rezistorů. Tyto děliče ovšem nelze využívat pro jakékoliv napětí a tedy pro vyšší napětí jsou využity děliče kapacitní nebo kombinované. Pro měření proudu jsou využity bočníky. Měření se obvykle provádí na ventilové bázi nebo na zařízení a je zpracováváno systémem měniče. Snímače jsou připojeny pomocí optického kabelu k vyhodnocovacím jednotkám. Pro měření proudu se také využívá inovativní metoda s využitím optického proudového transformátoru (OPT). Tento transformátor pracuje na principu Faradayova efektu– „proud protékající vodičem vyvolává magnetické pole, které ovlivňuje šíření světla procházející přes optické vlákno, které obepíná vodič“ (Obrázek 10) [15]. Takto provedené měření je schopno u HVDC technologie měřit stejnosměrný proud až do ± 1200 A.



Obrázek 10: Princip Faradayova efektu [15]

7.2 Vyhlašovací cívky

Mezi hlavní funkce vyhlašovací cívky patří:

- Vyhlašení přerušovaného proudu
- Omezení stejnosměrného poruchového proudu
- Prevence proti rezonančnímu efektu v stejnosměrném obvodu
- Snížení harmonického proudu včetně omezení telefonní interference

Velikosti takových cívek jsou v rozmezí mezi 100 až 300 mH pro velké délky stejnosměrného vedení a 30 až 80 mH pro back-to-back systémy. Vyhlašovací cívky mohou být jak vzduchem chlazené tak také chlazené pomocí oleje. Hlavní roli při rozhodování jakou vyhlašovací cívku využít mají tyto faktory:

- Cena
- Indukčnost, která ovlivňuje její rozměry
- Údržba a umístění
- Požadavky na geologické podloží
- Napěťové a proudové hladiny na využívaném vedení

Dalším přínosem cívek pro vedení nastává při zkratu, kdy výrazně snižují hodnotu zkratového proudu.

7.3 Filtry vyšších harmonických

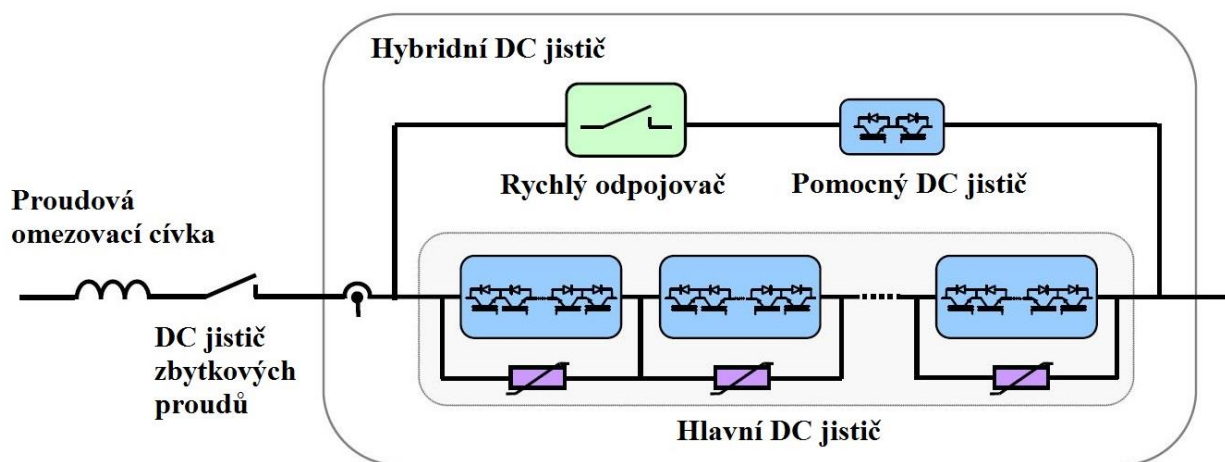
Měniče založené na využití tyristorů generují vyšší harmonické signály, které rušivě působí na střídavou síť. Dalším prvkem generující rušení je u spínaných součástek ovládaných za pomoci PWM regulace. Proto musí být součástí terminálu filtr vyšších harmonických a absorbovat harmonické proudy generované prvky HVDC vedení a nepropustit je do připojené střídavé sítě a tím nezdeformovat napětí. Tyto harmonické zároveň zvyšují ztráty a tím snižují účinnost měničů.

7.4 Ochrana DC vedení

S vysokými výkonovými poměry je zde i velké nebezpečí poruch a následného poškození celého systému vedení. Využití neosvědčených stejnosměrných jističů si žádá vyšší bezpečnost u HVDC technologie. Je nutno zamezit šíření poruchových jevů a zároveň učinit preventivní opatření, aby k takovým jevům nedocházelo. Díky rozsáhlým více terminálovým sítím u HVDC je nemožné definovat standardní vypínací podmínky pro vypnutí obvodu. Také nízké impedance u HVDC technologie vytvářejí příznivé podmínky pro šíření poruchových jevů a je nutno zajistit co nejrychlejší reakční dobu vypínacího systému a rychlé zhašení vzniklého oblouku.

Princip klasických vypínacích součástek u střídavých sítí je založen na přírodním zániku oblouku v okamžiku, kdy procházejí nulou a v prevenci proti znovu zapálení oblouku. Toho je dosaženo pomocí oddalování kontaktů, ochlazováním oblouku, využitím odporového plynu nebo rozdělením oblouku na menší oblouky s nižší energií, které je snadnější uhasit. Tento princip nelze využít u stejnosměrných sítí, neboť zde nedochází přirozený pokles na nulu, jako tomu je u sinusových střídavých sítí. Jednou z možností zhašení stejnosměrného oblouku je pomocí umělé nuly, která je vytvořena „vpuštěním“ střídavého proti proudu v okamžiku rozepnutí obvodu jističem a zapálením stejnosměrného oblouku. Tento proti proud je možno vytvořit pomocí paralelně zapojeného rezonančního obvodu. Tyto metody jsou ale příliš pomalé pro zajištění bezpečnosti, neboť k přerušení proudu dochází až za několik desítek milisekund. Další možností je využití polovodičových součástek (typicky IGBT), které výrazně zkracují časy vypnutí, ale zvyšují ztráty. Vznikl tedy hybridní jistič (Obrázek 11), který je složen z polovodičových součástek v hlavní větvi a rychlých pomocných mechanických odpojovačů a dalších pomocných polovodičových součástek ve větvi vedlejší. Za normálního provozu je hlavní vypínač odpojen a

je využita pomocná větev, což snižuje komutační ztráty. Dojde-li tedy k poruše, pomocná větev způsobí komutaci hlavní větve s hlavními polovodičovými jističi a proud je tímto jističem rychle přerušen. Zároveň je rychlý odpojovač otevřen v pomocné větvi, aby byl zajištěn průchod proudu přes hlavní větev. Tento hybridní jistič je schopen přerušit proud za několik milisekund. [16]



Obrázek 11: Hybridní DC jistič[16]

Ochrana vedení proti zásahu blesku je s využitím stínících vodičů, což bylo zmíněno už v kapitole 5.1 „Nadzemní vedení“.

Rozváděče a vybavení rozveden jsou často provedeny ve vnitřním provedení a využívají plynem izolované spínací přístroje. Vzduchem izolované spínací přístroje vyžadují venkovní použití díky nutnosti využít velké izolační vzdálenosti, což je dáno použitím velmi vysokého napětí.

8 ZKUŠENOSTI S HVDC

Dnes je využívána HVDC technologie v mnoha kombinacích téměř po celém světě. Využívá se pro propojení větrných farem, vrtných plošin, izolovaných ostrovů s pevninskou synchronní sítí. Dále pak pro spojení dvou a více asynchronních sítí nebo přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. Díky rozdílnosti zemí a soustav, ve kterých je HVDC využito vznikají výjimečné kombinace:

8.1 Nejdelší vedení HVDC

Nejdelší vedení je realizováno v současné době v Číně mezi vodní elektrárnou Xiangjiaba a městem Shanghai. Je zde využita technologie CSC měniče, aby bylo možno přenést vysoké výkony na velkou vzdálenost díky nadzemnímu vedení. Toto vedení je dlouhé 2000 km a disponuje přenosovou kapacitou až 7200 MW. S napětím ± 800 kV se řadí mezi tzv. UHVDC technologii (Ultra High Voltage Direct Current – ultra vysokonapěťový stejnosměrný proud). Ztráty se vzhledem k využití ultra vysokému napětí pohybují kolem 7 %. Tento projekt byl dokončen po 30 měsících prací a je v provozu od července 2010. [3]

Firma ABB vyhrála kontrakt na dodávku komponent pro nejdelší naplánované HVDC vedení, které bude postaveno v Brazílii mezi městem Sao Paulo a dvěma elektrárnami u města Porto Velho. Toto vedení je projektováno na délku 2500 km a bude pracovat na napětí ± 600 kV pro minimalizaci ztrát. [17]

Nejdelší vedení, jež je vedeno na mořském dně, má název NorNed a spojuje Norsko s Nizozemskem podmořským kabelem. Tento kabel, pracující na napětí ± 450 kV, je dlouhý 580 km a přenášený výkon činí 700 MW.[18]

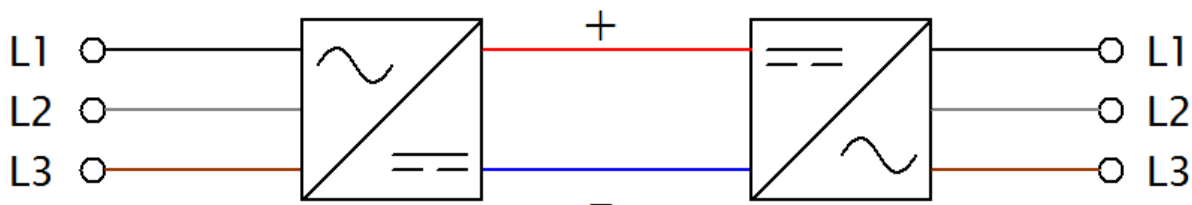
8.2 Nejstarší HVDC vedení

Prvním komerčně využívaným HVDC vedením bylo vedení pomocí podmořského kabelu mezi ostrovem Gotland a pobřežím Švédska. Toto vedení pracovalo na napětí ± 100 kV a bylo schopno přenášet výkon 20 MW. V dnešní době je toto vedení po modernizaci a pracuje na napětí ± 150 kV a přenáší výkon až 260 MW. Délka vedení je 96 km pod mořskou hladinou a je zde využito i 7 km nadzemního vedení. [19]

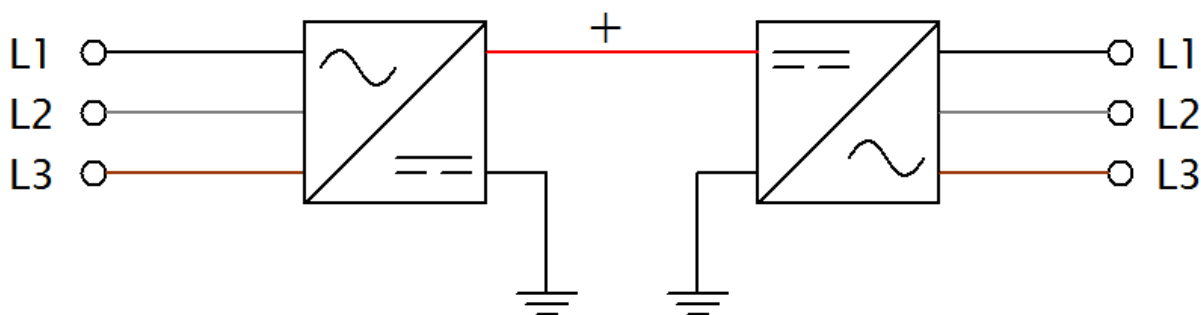
9 VÝBĚR TECHNOLOGIE PRO NÁVRH

Pro návrh bude nejvhodnější využít systém, který bude možno dále upravovat a přetvářet, a to velmi lehce a rychle s rozdílnými naměřenými výsledky na jednotlivých konfiguracích. Jako nejvhodnější se dle teorie jeví bipolární technologie, kdy bude možno jeden pól vedení odpojit a využít vedení jako monopolární. Tento postup by ukázal využitelnost bipolární technologie HVDC vedení při poruše a snížení přenášeného výkonu. Napájení bude zajištěno pomocí trojfázové sítě, která bude usměrněna pomocí 6-ti pulzního řízeného usměrňovače, pravděpodobně za pomoci tyristorů nebo IGBT tranzistorů, na dva protipóly. Následný převod stejnosměrného napětí a proudu na střídavý bude proveden za pomoci střídače, jenž bude proveden za pomoci IGBT tranzistorů nebo tyristorů a energie bude opět vrácena do sítě nebo mařena v rezistorech.

Pro měření bude nejvhodnější využít několik bodů v obvodu, které nejlépe vystihují přenos pomocí stejnosměrného proudu. Měření bude vhodné začít na napájecích svorkách z důvodu kontroly vstupních parametrů a pro pozdější výpočet ztrát. Další bod se nachází za usměrňovačem, kdy bude napětí a proud usměrněny, zde je vhodné využít i osciloskopu a průběhy zobrazit. Následující bod se nachází na konci vedení pro určení ztrát na vedení a poslední bod je za střídačem, kde bude měřena konečná výstupní energie, která je přes model vedení přenášena. Zde je dobré znovu využít osciloskop a porovnat výstupní průběh se vstupním průběhem. Z naměřených hodnot lze vypočítat ztráty na jednotlivých prvcích HVDC vedení a ztráty celkové.



Obrázek 12: Blokové schéma navrhované laboratorní úlohy Model HVDC spojky



Obrázek 13: Blokové schéma navrhované laboratorní úlohy Model HVDC spojky při poruše

9.1 Vzorové HVDC vedení

U modelu je nutno dodržet parametry vedení zmenšené v určitém poměru, aby vypovídací hodnota a věrnost byly co největší. Z toho důvodu bylo nutno vyhledat parametry reálných vedení. Tyto údaje pro návrh modelu jsou uvedeny v Tabulka 1.

Tabulka 1: Parametry reálného kabelového vedení HVDC [21]

Napájecí střídavé napětí	230 kV, 60 Hz
Parametry přenosového kabelu na kilometr	75 km, (0.2568 Ω + 2 mH + 8.6 nF) / km
Celkové hodnoty parametrů přenosového kabelu	19,26 Ω + 150 mH + 0,645 μ F
Napětí na stejnosměrné straně	250 kV
Přenosová kapacita	2000 MVA

Při uvažování HVDC technologie a typických ztrát na vedení, které disponují velikosti 3 %, jak již bylo zmíněno výše a 2 x 0,6 %, které náleží ztrátám na jednotlivých měničích, dostaneme hodnotu celkových ztrát, jenž je rovna 4,2 %. Z těchto parametrů a hodnot lze vypočítat proudové a napěťové poměry ve „vzorovém“ kabelovém vedení HVDC technologie.

Tedy při uvažování celkových 4,2 % ztrát na přenosu můžeme vypočítat výkon dodávaný z HVDC spojky:

$$P_2 = 0,958 \cdot 2000 \cdot 10^6 = 1916 \cdot 10^6 \text{ VA} = 1916 \text{ MVA}$$

když známe výkon, který HVDC spojka přenáší, a také příkon dodávaný do HVDC spojky, můžeme jednoduše vyčíslit ztráty na spojení

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2000 - 1916 = 84 \text{ MVA},$$

z těchto ztrát vyčíslíme hodnoty, které náleží vedení

$$\Delta P_{Ved} = \Delta P_{3\%} = 60 \text{ MVA},$$

a stanicím

$$\Delta P_{Stan} = 2 \cdot \Delta P_{0,6\%} = 24 \text{ MVA}.$$

Jelikož je vedení vedeno dvěma na sobě nezávislými kabely je nutno ztráty rozdělit na jednotlivé kabely

$$\Delta P_{Ved1} = \frac{\Delta P_{Ved}}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ MVA}$$

Z velikosti ztrát na vedení lze určit hodnotu úbytku napětí, když celková hodnota odporu kabelového vedení je rovna 19,26 Ω :

$$\Delta U = \sqrt{\Delta P_{Ved1} \cdot R_v} = \sqrt{30 \cdot 10^6 \cdot 19,26} = 24 \text{ kV}$$

Nyní určíme napětí na začátku stejnosměrného vedení HVDC spojky, kdy budeme počítat s dvojnásobným úbytkem napětí díky dvojitému kabelovému vedení:

$$U_1 = U_2 + \Delta U = 250 + 2 \cdot 24 = 298 \text{ kV}$$

Úbytek napětí vyjádřený procentuálně:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_1} \cdot 100 = \frac{48}{298} \cdot 100 = 16,1 \%$$

Je nutno podotknout, že se jedná o maximální a tudíž krajní hodnoty při, při kterém je vedení zatíženo a využíváno na 100 % své přenosové kapacity. V běžném provozu se k těmto hodnotám přenos nepřibližuje z důvodů rezerv a aktuální spotřeby elektrické energie. Pro modelaci a ukázkou technologie v rámci modelu jsou tyto hodnoty dostačující.

9.2 Porovnání se střídavou technologií

Pokud se stejný kabel rozhodneme provozovat na střídavém napětí je nutno ve výpočtu uvažovat frekvenčně závislé parametry. Střídavá síť je obvykle vedena jako trojfázová a tedy i ztráty na ni jsou vyšší. Dle analytického výpočtu lze snadno porovnat, jaké ztráty budou na střídavém vedení během jeho provozu. Napětí budeme považovat za střídavé o sdružené hodnotě napětí 400 kV a frekvenci 50 Hz.

Odpor vedení je shodný s odporem vedení pro stejnosměrné vedení a to $R_v = 19,26 \Omega$. Reaktance vedení se vypočítá dle vztahu (2.2):

$$X_v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_v = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 47,12 \Omega.$$

Dále je u vedení zanedbána svodová vodivost, a tedy je uvažována jen svodová kapacita, díky které je možno vypočítat příčný prvek dvojbranu a to susceptanci dle vztahu (2.4):

$$B_v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_v = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,645 \cdot 10^{-6} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ S} = 0,2 \text{ mS}.$$

Impedance a admitance náhradního dvojbranu bude tedy rovna dle rovnic (2.1) a (2.3):

$$Z_v = R_v + jX_v = (19,26 + j47,12) \Omega$$

$$Y_v = G_v + jB_v = (0 + j0,2) \text{ mS}$$

Když známe potřebné parametry náhradního dvojbranu vedení je nutno definovat výkon, který vstupuje do vedení. Tento výkon pro názornost budeme uvažovat shodný se stejnosměrným vedením a to $S = 2000 \text{ MVA}$. Nyní známe všechny potřebné údaje pro výpočet dvojbranu, definování ztrát a úbytku napětí na tomto 75 km dlouhém kabelovém vedení.

Pro proud vstupující do dvojbranu, který budeme uvažovat jako čistě činný je hodnota rovna:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{2 \cdot 10^9}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = 2887 \text{ A}$$

a vzhledem k tomu, že dvojbrany jsou jednofázové modely vedení, je hodnota fázového napětí na vstupu rovna

$$U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 230,9 \text{ kV}.$$

Ze znalosti Blondelových konstant lze dle jednoduchých vztahů určit proud a napětí na konci vedení reprezentovaného náhradním dvojbranem. Stejně jako u stejnosměrného vedení provedeme náhradu π článkem. Konstanty jsou označeny fázory **A**, **B**, **C**, **D**, které reprezentují přepočtení vztahy na článku [7]. Jejich výpočet je znázorněn zde:

$$A = 1 + \frac{Z_v \cdot Y_v}{2} = 1 + \frac{(19,26 + j47,12) \cdot j0,2 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,995 + j1,926 \cdot 10^{-3} [-]$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_v = (19,26 + j47,12) \Omega$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Y}_v \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{Z}_v \cdot \mathbf{Y}_v}{4}\right) = (j0,2 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(1 + \frac{(19,26 + j47,12) \cdot j0,2 \cdot 10^{-3}}{4}\right)$$

$$\mathbf{C} = (-1,926 \cdot 10^{-7} + j1,995 \cdot 10^{-4}) \text{S}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}$$

Rovnice popisující napětí a proud na konci vedení jsou dány jako

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}_1 - \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_1 \text{ (V; V; A)} \quad (9.1)$$

$$\mathbf{I}_2 = -\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_1 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}_1 \text{ (A; V; A)} \quad (9.2)$$

dosazením je napětí na konci vedení

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}_1 - \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_1$$

$$\mathbf{U}_2 = (0,995 + j1,926 \cdot 10^{-3}) \cdot 230,9 \cdot 10^3 - (19,26 + j47,12) \cdot 2887$$

$$\mathbf{U}_2 = (174,1 - j135,6) \text{ kV}$$

a proud na konci vedení

$$\mathbf{I}_2 = -\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_1 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}_1$$

$$\mathbf{I}_2 = -(-1,926 \cdot 10^{-7} + j1,995 \cdot 10^{-4}) \cdot 230,9 \cdot 10^3 + (0,995 + j1,926 \cdot 10^{-3}) \cdot 2887$$

$$\mathbf{I}_2 = (2872,6 - j40,5) \text{ A}$$

Z vypočítaných hodnot lze snadno určit úbytek na vedení jednoduchým odečtením modulu fázoru výstupního napětí od hodnoty modulu fázoru vstupního napětí.

$$\Delta U_s = |\mathbf{U}_1| \cdot |\mathbf{U}_2| = 230,9 \cdot 10^3 - 220,6 \cdot 10^3 = 10,3 \text{ kV}$$

Procentuálně bude tento úbytek vyjádřen jako

$$\Delta U_{s\%} = \frac{\Delta U_s}{U_1} \cdot 100 = \frac{10,3}{230,9} \cdot 100 = 4,5 \%$$

Ztráty na trojfázovém vedení jsou dány jak jalovou složkou výkonu, tak činnou složkou výkonu. Výpočet je poté dán vztahem (2.5), upraveným pro trojfázové vedení a respektující jak činnou tak jalovou složku proudu a odpor i reaktanci vedení:

$$\Delta P_s = 3 \cdot R_v \cdot (I_c^2 + I_j^2) = 3 \cdot 19,26 \cdot (2872,6^2 + 40,5^2) = 476,89 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_s = 3 \cdot X_v \cdot (I_c^2 + I_j^2) = 3 \cdot 47,12 \cdot (2872,6^2 + 40,5^2) = 1166,71 \text{ MVar}$$

Zdánlivá hodnota ztrát je poté dána jednotlivými složkami ztrát, a to jak činnými tak jalovými:

$$\Delta S_s = \Delta P_s + j\Delta Q_s = (476,89 + j1166,71) \text{ MVA.}$$

Procentuálně jsou ztráty na vedení dány podílem modulu zdánlivých ztrát na vedení s celkovým příkonem do trojfázového vedení:

$$\Delta S_{s\%} = \frac{|\Delta S_s|}{S} \cdot 100 = \frac{1260,4}{2000} \cdot 100 = 63 \%$$

Vlivem uvažování stejného vedení pro provozování na střídavém proudu o frekvenci 50 Hz a trojfázovém přenosu jako vedení stejnosměrné, stoupily ztráty na vedení, díky frekvenčně

závislým prvkům vedení jako je reaktance a susceptance, které zajišťují imaginární část ztrát na vedení, ztráty na velmi vysokých 63 %. Právě jalová část ztrát na vedení má největší podíl na velikosti celkových ztrát na vedení. Tyto ztráty jsou podstatně závislé na délce vedení a vzdáleností od země (případně uložení v zemi), kdy roste indukčnost a kapacita vedení. Při využití vedení střídavého je nutno jej, v každé třetině délky transponovat aby bylo dosaženo právě symetričnosti ztrát a úbytků a nedocházelo tak k různému namáhání fází.

Při porovnání výsledků výpočtu pro kabelové vedení využívané pro přenos pomocí stejnosměrného proudu a střídavého proudu je možné vidět několik výrazných odlišností. Tyto odlišnosti vznikají díky frekvenčně závislým prvkům a také díky nutnosti využít více vodičů či kabelů pro přenos výkonu u střídavého proudu. Pro vedení stejnosměrným proudem se využívá daleko menších průřezů než při technologii střídavého proudu, neboť zde nenastávají ztráty vlivem indukčnosti a kapacit nebo jen v omezené míře. Díky použití malého průřezu je odpor kabelového vedení poměrně veliký pro zvolený proud. Kdyby byl průřez kabelového vedení větší, odpor by byl menší a rozdíl mezi kabelovým vedením používaným k přenosu stejnosměrného proudu a střídavého proudu by byl daleko menší. Velikost průřezu kabelu či vedení závisí také na vlivu skin efektu na procházející proud.

10 NÁVRH

Zde si rozebereme postupně jednotlivé bloky modelu, tj. usměrňovací část, přenosovou část a střídací část připojenou k zátěži. Bude zde nastíněn postup výpočtu jmenovitých proudů a napětí a návržení jako určité „krabice“ připojitelné do obvodu.

10.1 Usměrňovací část

Pro napájení modelu bude využito laboratorní napětí 3x 100V plus zemnicí vodič. Na tuto konfiguraci je v laboratorní učebně optimalizován systém ochran a jištění, který zajistí bezpečnou práci na modelu.

Samotný usměrňovač bude proveden tedy jako 6-ti pulzní díky trojfázové napájecí síti a také tomu, že HVDC technologie je v drtivé většině napájena z trojfázové střídavé sítě. Dle potřebných účelů lze využít usměrňovač:

- Řízený – schopný regulovat tok výkonu, napěťové a proudové poměry na stejnosměrném vedení jednoduše pomocí řídicího úhlu, který lze na něm nastavit přivedením signálu na řídicí elektrodu polovodičové součástky, která provádí usměrnění
- Neřízený – s pevně nastaveným napětím na stejnosměrné straně (v praxi se nepoužívá), využívá hlavně diod, které nedisponují elektrodou pro možnost jejího řízení

Je nutno si uvědomit, že součástky pracující na usměrnění napětí a proudu mají své charakteristické parametry jako je jejich odpor, který na nich zapříčiňuje ztráty, úbytky napětí a jmenovité hodnoty na kterých pracují. Tyto hodnoty jsou uvedeny v dokumentacích u jednotlivých součástek.

Dnes využívané tyristory pro HVDC technologii jsou 6“ tyristory, pracující na napětí 8500 V a jmenovitém proudu 2000 A. Označení tohoto tyristoru od firmy ABB je 5STP 20Q8500. Jak bylo zmíněno v kapitole „4.1 Síťově komutovaný proudový zdroj (Line-Commutated Current Sourced Converters)“ tyristory jsou uloženy v tzv. ventilových halách, kde jsou zapojeny do série. Na napětí ± 250 kV je potřeba cca 30 těchto tyristorů pro jednu větev tyristorového usměrňovače. V případě využití IGBT se využívají moduly nazývané „Stakpak“, které disponují parametry napětí 4500 V a proudu 2000 A. Tyto moduly jsou stlačovány k sobě a tvoří potřebné celky, které jsou společně chlazeny a díky tomu zabírají daleko méně prostoru.

10.1.1 Výpočet parametrů usměrňovače

Jak bylo zmíněno výše, použité napájení bude 3x 100 V střídavých neboť na tuto hodnotu jsou nastaveny bezpečnostní prvky v laboratořích. Jedná se o hodnotu sdruženého napětí. Pro realizaci využijeme tyristory nebo triaky s řídicí elektrodou, která bude ovlivňovat velikost výstupního stejnosměrného napětí.

Je nutno určit tedy napětí na stejnosměrné straně usměrňovače. Pro tento výpočet lze využít vztah [22][23]:

$$U_d = \frac{p}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin \frac{\pi}{p} \cdot \cos \alpha \quad (\text{V}; \text{V}; ^\circ) \quad (10.1)$$

Kde:

U_d – střední hodnota stejnosměrného napětí

α – řídicí úhel ($0^\circ - 90^\circ$)

p – počet pulzů usměrňovače

U_s – sdružená hodnota střídavého napětí na napájecí straně

Zjišťujeme maximální hodnotu výstupního napětí z usměrňovače, a tedy budeme uvažovat řídicí úhel $\alpha = 0^\circ$ a $p = 6$, neboť se jedná o šesti pulzní usměrňovač. Poté bude střední hodnota stejnosměrného napětí za usměrňovačem rovna:

$$U_d = \frac{p}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \frac{\pi}{p} \cdot \cos \alpha = \frac{6}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \sin \frac{\pi}{6} \cdot \cos 0^\circ = 135 \text{ V}$$

Výstupní napětí z usměrňovače je mírně zvlněno díky procesu usměrnění, a proto je vhodné uvažovat jeho střední hodnotu místo hodnoty maximální. Při výpočtech ovšem uvažujeme naprosto vyhlazené napětí bez zvlnění. Stejnosměrné napětí na modelu bude tedy možno regulovat v rozsahu 0 – 135 V, dle zvoleného řídicího úhlu spínaných součástek. Pokud bude zvolen řídicí úhel $\alpha = 0^\circ$, potom se usměrňovač bude chovat jako neřízený a bude mít pevně daný poměr napětí a výkonu na vstupní a výstupní straně. V případě nastavování hodnot řídicího úhlu v rozmezí $90^\circ - 180^\circ$, se dostaneme do záporných hodnot stejnosměrného napětí, a tedy usměrňovač pracuje v tzv. invertorovém režimu.

Oproti „vzorovému“ vedení je nutno u modelu, jež má představovat toto vedení, odečíst od výstupního napětí z usměrňovače úbytky na polovodičových součástkách. Tyto hodnoty se pohybují okolo 1,7 V na součástku. V případě reálného HVDC, kde je těchto součástek několik desítek, se jedná o zanedbatelnou hodnotu oproti provoznímu napětí, na kterém HVDC vedení pracuje. V našem případě je napětí na výstupu usměrňovače tedy rovno:

$$U_d = 135 - 1,7 \cdot 2 = 131,6 \text{ V}$$

Jednoduchým vyjádřením ze vzorce (10.1) lze určit řídicí úhel „vzorového“ vedení:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{U_d}{\frac{p}{\pi} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \frac{\pi}{p}} = \cos^{-1} \frac{298 \cdot 10^3}{\frac{6}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 230 \cdot 10^3 \cdot \sin \frac{\pi}{6}} = 16,4^\circ$$

Proud, který bude dodáván do stejnosměrného obvodu usměrňovačem, je dán velikostí zátěže, která bude k usměrňovači připojena nebo úbytkem na vedení. Jelikož bude k usměrňovači připojen model vedení, lze vypočítat hodnotu proudu, který bude nutný pro dosažení vzorové hodnoty úbytku napětí. Před výpočtem tohoto proudu je nutno dodržet podmínky, za kterých je možno navrhnout proud na stejnosměrné straně usměrňovače. [22]

Pro střední hodnotu stejnosměrného proudu platí vztah:

$$I_{DC, st\check{r}} = \frac{I_d}{3} \text{ (A; A)} \quad (10.2)$$

pro efektivní hodnotu stejnosměrného proudu poté platí vztah:

$$I_{DC, ef} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \text{ (A; A)} \quad (10.3)$$

A jelikož obvykle anodové proudy tyristoru bývají pravoúhlého tvaru o výšce I_d , poté lze napsat, že špičková hodnota je rovna:

$$I_{DC, šp} = I_d \text{ (A; A)} \quad (10.4)$$

Na tento proud bude nutno polovodičové součástky dimenzovat v normálním režimu. Pokud dojde ke zkratu bude nutno součástky dimenzovat na několika násobek této hodnoty a to až na maximální proud dodávaný ze sítě.

Proud potřebný k napájení usměrňovače, který má výstupní proud roven proudu I_d , je roven hodnotě proudu efektivnímu s přepočtem dle vztahu [22]:

$$I_{AC,ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = 0,816 \cdot I_d \text{ (A; A)} \quad (10.5)$$

Tyristory nebo triaky bude tedy nutno dimenzovat na nejvyšší hodnotu stejnosměrného proudu a to na hodnotu I_d resp. I_{sp}

Při respektování úbytku napětí na modelovém vedení, cca 16,1 % dostaneme hodnotu tohoto napětí:

$$\Delta U = \frac{\Delta u_{\%} \cdot U_d}{100} = \frac{16,1 \cdot 131,6}{100} = 21,2 \text{ V}$$

Potřebný proud protékající stejnosměrným vedením v jednom kabelu bude v tomto případě roven

$$I_d = \frac{\Delta U}{2 \cdot R_v} = \frac{21,2}{2 \cdot 19,26} = 0,55 \text{ A}$$

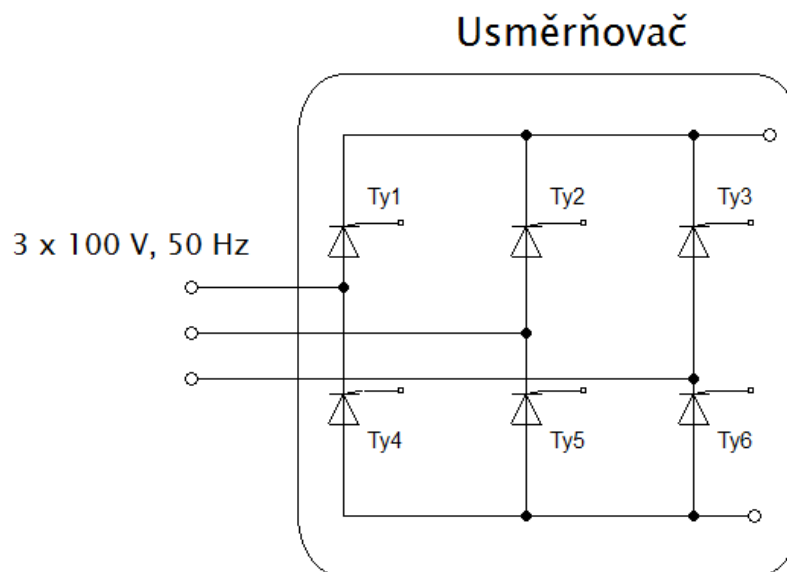
a při této hodnotě bude úbytek napětí odpovídat teoretickým výpočtům v kapitole 9.1.

Napájecí proud při tomto minimálním proudu tekoucím vedením, lze nyní díky vztahu (10.5) určit. Tento střídavý proud bude na vstupu do usměrňovače

$$I_{AC,ef} = 0,816 \cdot I_d = 0,816 \cdot 0,55 = 0,449 \text{ A}.$$

Proud je dán zátěží a tato hodnota je pouze modelová a při tomto proudu bude odpovídat teoretická hodnota úbytku s modelovou. Výpočet proudu zátěže bude řešen v kapitole 10.3, kdy bude řešen chod HVDC spojky do zátěže.

Zde je vidět schéma, jak bude vypadat zapojení tyristorů v usměrňovači.



Obrázek 14: Schéma bloku šesti-pulzního usměrňovače

10.2 Stejnosměrné vedení

Stejnosměrné vedení se v podstatě nijak neliší od vedení střídavého. Parametry dvou vedení, z nichž je jedno střídavé a druhé stejnosměrné o stejné délce, průřezu a materiálu vodiče jsou shodné. Rozdíl nastává ovšem ve využití daleko menších průřezů u stejnosměrného vedení a díky vysokému napětí, na kterých jsou HVDC vedení provozovány, vyšším svodovým kapacitám. Tyto kapacity jsou dány vzdáleností od země a vzdáleností vodičů mezi sebou. U HVDC se neuplatňuje vliv skin efektu a frekvenčně závislých parazitních jevů. Tyto jevy ovšem jsou zde přítomny a projevují se při změnách v síti v závislosti na aktuálním řízení sítě.

V našem případě bude vedení nahrazeno dvěma π články zastupující bipolární technologii HVDC. Každý článek bude zapojen na jeden pól usměrňovaného napětí na vstupu a ke střídači na výstupu. Jednotlivé články budou uzemněny přes kapacity, které reprezentují kapacitu vůči zemi.

Náhrada vedení článkem se využívá pro laboratorní účely. Jedná se vlastně o dvojbran s vstupními a výstupními parametry, který díky vnitřnímu uspořádání zastupuje zkoumanou nebo modelovanou část vedení [7].

Jak již bylo zmíněno výše, bude využit π článek, který má tyto parametry

Tabulka 2: Parametry článku [21]

R_v	19,26	Ω
L_v	150	mH
C_v	0,645	μF

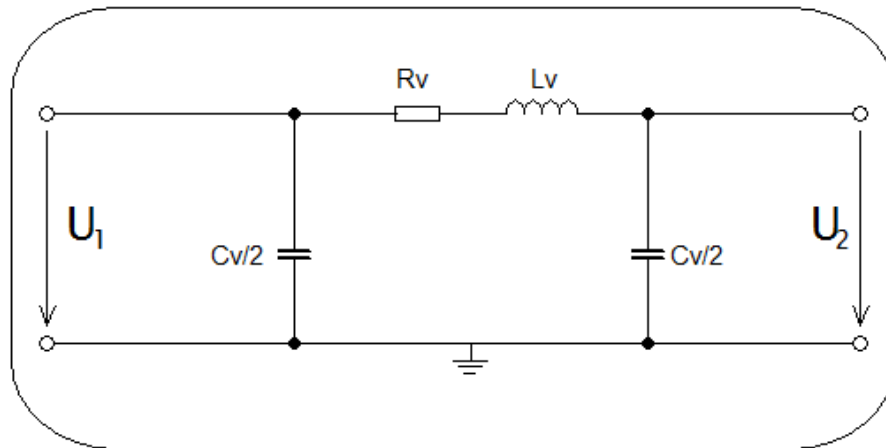
Jelikož se u stejnosměrného napětí neobjevuje frekvence, lze považovat vedení za čistý odpor. Z toho důvodu lze výpočet zjednodušit. Jak bylo vypočteno výše vstupní napětí do dvojbranu je rovno $U_1 = 131,6$ V, proud dvojbranem $I = 0,449$ A, a úbytek na vedení je roven $\Delta U = 10,6$ V, což je hodnota úbytku na jednom pólu vedení.

Z těchto hodnot lze vypočítat hodnotu napětí na výstupu dvojbranu:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = 131,6 - 10,6 = 121 \text{ V}$$

Zobrazení dvojbranu s vyznačeným vstupem a výstupem:

Náhradní model vedení



Obrázek 15: Náhrada vedení, π článku

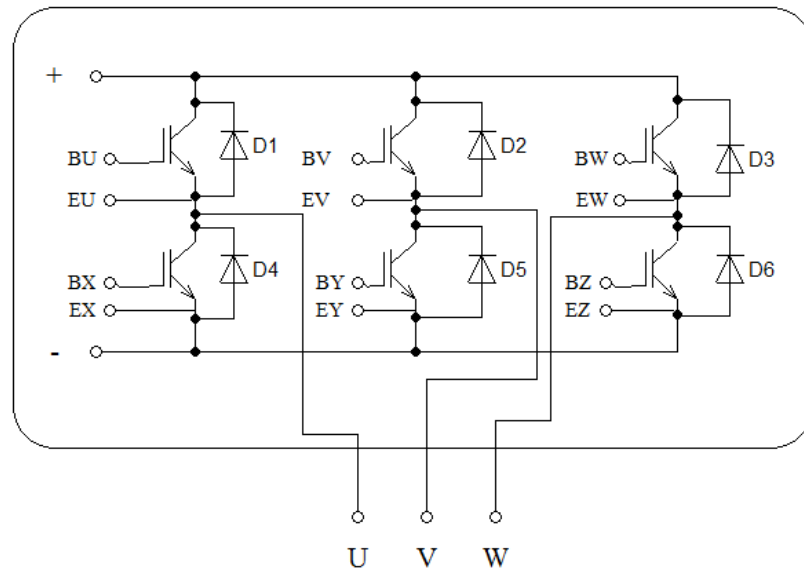
Náhradní dvojbran vedení je vlastně „krabice“ s potřebnými součástkami, které vytváří model vedení o potřebných parametrech. Tyto součástky musí být dimenzovány, jak na napájecí napětí obvodu, tak na maximální proud dodávaný do vedení. Důležité tedy je, aby součástky vydržely hodnotu stejnosměrného napětí 135 V, bez přetížení a proud minimálně 1 A. Vzhledem k tomu, že k modelu stejnosměrné spojky bude připojena zátěž je nutno proud dimenzovat, nejméně na trojnásobek. Při návrhu je dobré uvažovat i možnost, kdy nastane zkrat a obvodem modelu bude procházet proud roven maximálnímu proudu dodávaného ze sítě, než zapůsobí ochrana. Obvykle je tato hodnota rovna 16 A.

Jelikož se usměrňují obě polarity napětí, potom je stejnosměrné napětí mezi polaritami rovno 135 V na výstupu z usměrňovače. V případě odpojení jednoho pólu vedení vznikne vedení nazývané monopolární, které pracuje na napětí, jež je rovno přibližně polovině původního napájecího napětí, a to díky usměrnění, které se v tu chvíli chová jako trojpoluzní.

10.3 Střídač

Dalším blokem modelu bude střídač, který bude mít za cíl „rozkmitat“ stejnosměrné napětí a proud na požadovanou frekvenci. Tou frekvencí může být původní frekvence, z které bylo stejnosměrné vedení napájeno nebo jiná frekvence, kterou může být například 60 Hz. Tato změna frekvence se využívá u propojení dvou asynchronních elektrických soustav o různých frekvencích. Tento střídač je možno sestavit v mnoha variantách za použití polovodičových součástek. V praxi se nejčastěji využívají tyristory nebo IGBT tranzistory, které tvoří buď usměrňovač, nebo střídač. Tyto dva bloky jsou v praxi shodné jen otočené o 180° do tzv. antiparalelního zapojení, aby mohly plynule regulovat přenášený výkon oběma směry. V tomto zapojení jeden blok pracuje na konstantní napětí a druhý na konstantní proud. [23] Nám pro potřeby modelu vystačí střídač s IGBT tranzistory, který bude generovat trojfázové střídavé napětí a proud do zátěže. Schéma bloku střídače je znázorněno na Obrázek 16. Mezi svorkami pro připojení stejnosměrného napětí je připojen kondenzátor o velikosti $3,3 \mu\text{F}$, který má za úkol ochránit modul před přechodovými jevy, které mohou nastat při spínání tranzistorů. Tyto jevy obvykle disponují velkou strmostí napětí a tedy velkou energií. Cílem tohoto kondenzátoru je tuto energii vstřebat a nepoškodit IGBT modul.

Střídač



Obrázek 16: Schéma IGBT modulu jako střídače[26]

Výstupem tohoto střídače je napětí, které má vrcholovou hodnotu sdruženého střídavého výstupního napětí rovnu napětí stejnosměrnému, jež je na vedení. Tedy na výstupu ze střídače bude amplituda napětí mezi vodiči rovna

$$U_{vyst} = U_D = 121 \text{ V}.$$

Tato hodnota napětí platí, pokud bude provedeno řízení střídače pomocí sinusové PWM, při unipolárním řízení tranzistoru. Efektivní hodnota fázového napětí poté bude rovna

$$U_{Vyst,ef} = \frac{U_{vyst}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{121}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = 49,4 \text{ V}$$

Pro realizaci střídače bude využit modul 6MBI30L-060 se šesti IGBT tranzistory a šesti nulovacími diodami, které mají základní parametry 600 V / 30 A.

Střídač bude pracovat do odporové zátěže tvořené třemi potenciometry zapojenými do hvězdy a střed bude uzemněn ochranným vodičem. Na těchto potenciometrech bude nastaven odpor 100 Ω. Při tomto nastavení odporů bude proud do zátěže roven hodnotě

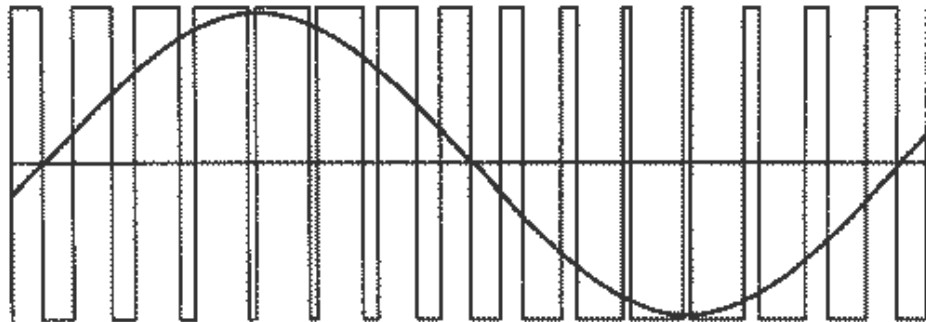
$$I_z = \frac{U_{Vyst,ef}}{R_z} = \frac{49,4}{100} = 0,494 \text{ A}.$$

Díky malým výkonům, na kterých bude IGBT modul ve funkci střídače provozován není třeba navrhovat žádné speciální chlazení a modul se vystačí uchlazení vlastní plochou a okolní teplotou. Maximální proud procházející modulem bude roven v krajních případech 1 A.

10.4 Řízení spínaných součástek

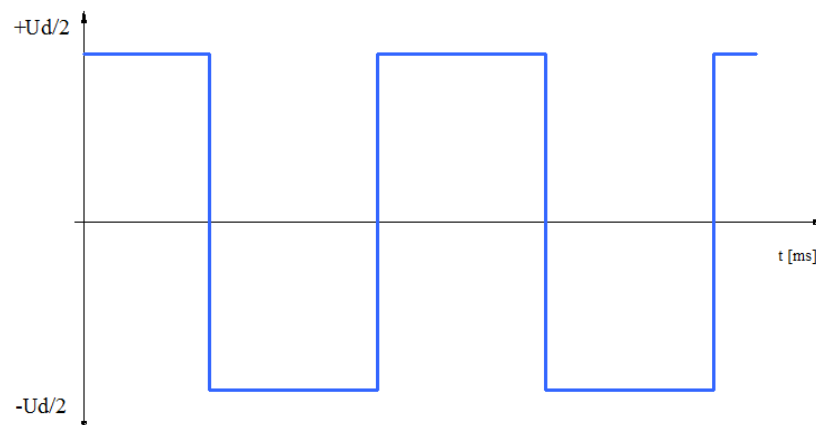
Spínané součástky ke své práci vyžadují řídicí obvody, které jim dávají pokyn, kdy se má která součástka sepnout a vést proud a napětí. Požadavky na tato spínání jsou různá dle svého účelu a zvolené spínané součástky. Pro spínání usměrňovačů je důležité nastavení řídicího úhlu, který ovlivňuje jak odebíraný jalový výkon ze sítě (případně jej lze dodávat), tak proudové a napěťové parametry na výstupu usměrňovače.

Pro námi použitý tranzistorový IGBT modul využitý jako střídač se obvykle využívá řídicí signál nazývaný pulzní šířková modulace neboli PWM. Jedná se vlastně o diskrétní signály, které nabývají kladných a záporných hodnot pulzu, které mají představovat kladnou a zápornou půlvlnu sinusoidy. Velikost pulzu je dána napětím stejnosměrného meziobvodu. Jedná se tedy o spínání a odpojování stejnosměrného obvodu k a od zátěže. Toto spínání samo o sobě sinusový průběh neobsahuje, chová se pouze jako střídavý obdélníkový průběh. Pokud vyžadujeme sinusový průběh, poté je nutno spínání a vypínání provádět častěji a s různou dobou trvání neboli s různou střídou obdélníkového průběhu na výstupu jak jde vidět na Obrázek 17. Tato střída se mění pro kladnou a zápornou půlvlnu sinusového signálu. Obvykle se využívá pro tvarování nosné frekvence, která má podstatně větší frekvenci než obvyklá sinusoida s 50 Hz. Tam kde potřebujeme dosáhnout kladných hodnot, tam je sepnuto delší dobu kladné napětí stejnosměrného meziobvodu a tam kde je potřeba záporných hodnot sinusoidy, tam na delší dobu (střídu) sepneme zápornou hodnotu stejnosměrného meziobvodu. Tento výstupní signál nemá tvar dokonalé sinusoidy, ale právě tvar demodulovaného signálu za pomoci PWM regulace [23].



Obrázek 17: Sinusový průběh vytvořený pomocí PWM modulace [25]

Jednou z možností je i pouhé spínání kladného a záporného napětí. V našem případě by se jednalo pouze o sepnutí poloviny stejnosměrného obvodu pro jednu a druhou polaritu jak je znázorněno na Obrázek 18.



Obrázek 18: Výstupní signál při využití úrovněového spínání tranzistorů

Obdobně jako je zobrazeno na Obrázek 18, lze využít spínání, kdy bude sepnuto plné kladné napětí v jednu dobu a záporné plné napětí v druhou dobu. Tyto stavy mohou ještě být od sebe posunuty o určitý úhel, aby simulovaly přibližný sinusový průběh.

Další možností je postupní spínání více úrovní, tzv. více úroňové spínání, kdy dochází k sepnutí k různým úrovním napětí v daný okamžik. K tomuto spínání je nutné kaskádní uspořádání střídacích modulů, kdy každý dokáže sepnout určitý stupeň napětí. Pro náš případ tento způsob nelze využít, neboť disponujeme pouze jedním stupněm střídače.

Pro spínání polovodičových součástek existuje několik pravidel, které je nutno dodržet k jejich správnému ovládání a aby nedocházelo k náhodným sepnutím, které nejsou žádoucí. Z toho důvodu je potřeba zajistit u řídicích obvodů několik podmínek [21]:

- Galvanické oddělení řídicích signálů
- Galvanické oddělení silových napájecích přívodů
- Kvalita ovládacího signálu
- Ochrana před poškozením tranzistoru

Tyto podmínky je nutno dodržet k bezproblémovému chodu obvodu a ochraně před zkratem či poškozením spínaných součástek. V dnešní době jsou využívány optické kabely, přes které je přiváděn řídicí signál do budícího obvodu pomocí světelných pulzů. Signál je přiváděn k mikroprocesoru, který vyhodnotí situaci a sepne či rozepne tranzistor, k němuž je připojen.

Budicí obvody s možností řízení, jsou dnes často tvořeny mikroprocesory, které jsou schopny generovat pulzy a průběhy dle potřeby a lze je snadno ovládat. Díky velkému rozsahu použití těchto mikroprocesorů je možno využívat řízený můstek k různým účelům.

11 ZÁVĚR

Práce poukazovala na klady a zápory při přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti. V dnešní době se pro tyto aplikace stále více využívá technologie stejnosměrného proudu neboli HVDC, která má své pozitivní dopady na tuto problematiku, ale také své negativa. Největší přítěží této technologie je její cena, která značně ovlivňuje, zda bude tato technologie přednější než technologie střídavá. Výhodou naopak je vliv na statickou a dynamickou stabilitu elektrizační sítě a úspora v materiálu na vedení, kdy není třeba provádět vedení s více fázemi. Díky možnosti různých úprav a konfigurací je pro HVDC technologii velké uplatnění. Z hlediska bezpečnosti dodávky je výhodné využití bipolární konfigurace HVDC technologie s možností, v případě poškození jednoho pólu vedení, stále přenášet přibližně polovinu původního přenášeného výkonu. Tento fakt výrazně zvyšuje spolehlivost dodávky energie pro spotřebitele. S novými technologiemi v oblasti polovodičových výkonových součástek se stále zvyšuje účinnost a spolehlivost měničů, které jsou důležitou součástí HVDC vedení a bez jejich existence by nebyl tento přenos možný. Zároveň se ale zvyšuje riziko jejich poškození díky zkratům, které mohou na vedení nastat. Měření stejnosměrného proudu na vedení a také jištění vedení proti zkratům v oblasti stejnosměrného proudu stále nedosahuje té nejvyšší úrovně a je zde ještě dost prostoru k nalezení efektivnějších řešení ochrany proti zkratům a přechodovým jevům na stejnosměrném vedení. S rostoucím počtem aplikací HVDC technologie ve světě se dá očekávat prudký vývoj směrem kupředu, jak v oblasti bezpečnosti, kapacity přenášeného výkonu tak v celkové účinnosti. Právě díky rozvoji HVDC aplikací je nutno studenty o této technologii informovat a seznámit s jejím fungováním a principy. Podkladem pro praktickou část se tedy stala, díky rostoucím aplikacím HVDC technologie ve světě, právě nutnost seznámit i studenty s touto problematikou a poukázat na chování celé soustavy při přenosu. Díky tomu byl v této práci vytvořen návrh na laboratorní úlohu pro simulaci a modelování základního ovládání a přenosu elektrické energie pomocí HVDC technologie. Návrh je proveden pro laboratorní podmínky a jejich parametry. Důležitou součástí modelu byly typické základní části HVDC vedení, bez kterého by nebyl přenos pomocí vysokonapětového stejnosměrného proudu možný. Mezi tyto části patří usměrňovač, samotné vedení, střídač a zátěž či jiné vedení, ke kterému je model připojen. Pro usměrňovač je důležitým prvkem jeho řízení, ovšem i neřízený usměrňovač lze provozovat při jmenovitých hodnotách na tomto modelu, ačkoliv bez možnosti vrácení energie do sítě, ale to v případě provozu do zátěže nevádí. Pro obyčejný neřízený usměrňovač lze využít i nulovací diody použitého IGBT modulu. Vedení bylo nahrazeno modelem vedení, které představuje π článek s rovnoměrně rozloženými parametry. Tyto články se běžně používají pro nahrazení a vyšetřování ustáleného chodu vedení. Konečným navrhovaným prvkem byl střídač, který udává výstupní parametry modelu HVDC spojky. Pro jeho realizaci byl využit IGBT modul, který obsahuje šest IGBT tranzistorů a nulovacích diod a je umístěn do modelové krabice. Návrh modelové krabice a její realizace je přiložena v příloze B. K celému navrhovanému vedení byl vytvořen model v prostředí Simulink a vypočtené teoretické hodnoty byly ověřeny se skutečností i se simulací. Závěrem bylo provedeno základní měření na usměrňovací části modelu a výsledky jsou přiloženy v příloze C. Vzniklé odlišnosti nastaly vlivem zidealizování některých podmínek při výpočtu a nemožnosti nastavit zcela symetrické napájecí napětí.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] CHODURA, P. *Super Grids Conception*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 60 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Paar, Ph.D..
- [2] Kim, Chan-Ki; Sood, Vijay K.; Jang, Gil-Soo; Lim, Seong-Joo; Lee, Seok-Jin (2009). *HVDC Transmission - Power Conversion Applications in Power Systems..* Wiley - IEEE Press. Online version available at:
http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3344&VerticalID=0
- [3] Xiangjiaba - Shanghai ± 800 kV UHVDC transmission project. ABB. *ABB.com* [online]. 2012 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z:
<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/148bff3c00705c5ac125774900517d9d.aspx>
- [4] HE, J. L.; ZENG, R., "Lightning Strike Characteristics of ± 800 -kV DC UHV Transmission lines," in *CIGRE Symposium Bologna 2011*, Bologna, 2011, Paper 294.
- [5] An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Underground Cables. In: *Eurocapable* [online]. Brusel, 2011 [cit. 28.11.2012]. Dostupné z:
http://www.europacable.com/images/Document_Uploads/Introduction_to_HVDC_Underground_Cables_October_2011.pdf
- [6] *Cvičení z elektroenergetiky*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003.
- [7] Blažek, V., Skala, P.: *Distribuce elektrické energie*, elektronický text, FEKT VUT v Brně, 2003.
- [8] ASPLUND, G., "Ultra high voltage transmission," *ABB Review*, pp. 22-27, February 2007.
- [9] ABB. *ABB.com* [online]. 2012 [cited 30 November 2012]. Fázově řízené tyristory (PCT). Available from Internet:
<http://www.abb.com/product/db0003db004291/c125739900722305c12573950020a140.aspx?productLanguage=cz&country=00&tabKey=2>.
- [10] High Voltage Direct Current Transmission: Proven Technology for Power Exchange. In: *Energy.Siemens.com* [online]. 2011 [cit. 30.11.2012]. Dostupné z:
http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology_.pdf
- [11] Solar, Wind, HVDC and the Smartgrid. In: *Daily Kos* [online]. 2011 [cit. 2012-12-13]. Dostupné z: <http://www.dailykos.com/story/2011/08/09/1001465/-Solar-Wind-HVDC-and-the-Smartgrid>
- [12] HVDC Inter-Island. In: *Wikipedia* [online]. 2011 [cit. 2012-12-13]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/HVDC_Inter-Island
- [13] BAHRMAN, M. P.; JOHNSON, B. K., "The ABCs of HVDC Transmission Technologies," *IEEE power & energy magazine*, pp. 32-44, March/April 2007.
- [14] ABB. *ABB.com* [online]. 2012 [cited 13 December 2012]. HiPak™ Moduly s IGBT a diodami s SPT čipy. Available from Internet:
<<http://www.abb.com/product/db0003db004291/c125739900722305c12573950022c1a0.aspx?productLanguage=cz&country=00&tabKey=2>>.

- [15] Alstom. *Alstom.com* [online]. 2010 [cited 20 December 2012]. COSI-NXCT - Optical Current Transformer. Available from Internet: <http://www.alstom.com/Global/US/Resources/Documents/IEEE%20TD%2012/DIT_OpticalCurrentTransformers.pdf>.
- [16] HÄFNER, J.; JACOBSON, B., "Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids," in CIGRE Symposium Bologna 2011, Bologna, 2011, Paper 264.
- [17] ABB wins contract for world's longest HVDC link. *ReCharge* [online]. 31.July 2009 [cit. 2012-12-24]. Dostupné z: http://www.rechargenews.com/energy/wave_tidal_hydro/article184870.ece
- [18] *NordNed Auction* [online]. 2007 [cit. 2012-12-24]. Dostupné z: <http://www.norned-auction.org/default.aspx>
- [19] The Gotland HVDC link. ABB. *ABB.com* [online]. 2012 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/8e63373c2cdc1cdac125774a0032c5ed.aspx>
- [20] ABB, It's time to connect - Technical description of HVDC Light® technology. Ludvika, Sweden: ABB AB, 2008.
- [21] LING XU a LINGLING FAN. System identification based VSC-HVDC DC voltage controller design. *2012 North American Power Symposium (NAPS)* [online]. IEEE, 2012, 1,6,9-11, s. 1-6 [cit. 2013-05-06]. DOI: 10.1109/NAPS.2012.6336361. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6336361>
- [22] Patočka M.: Výkonová elektronika, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí, skriptum FEKT, Brno, 2010 (cs)
- [23] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 2, skriptum FEKT, VUT Brno (cs)
- [24] Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT. *Elektrorevue* [online]. 2004, roč. 2004, č. 30 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html#kap1>
- [25] Pulse Width Modulation. *Power Electronics Design: A Practitioner's Guide* [online]. 2005 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://masters.donntu.edu.ua/2007/fema/rudenko_y/library/art9/pwr_el_des.htm
- [26] IGBT(600V/30A): 6MBI30L-060 Datasheet. FUJI ELECTRIC. *Alldatasheet.com* [online]. 2008 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/61073/FUJI/6MBI30L-060.html>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: SIMULACE.....	A45
PŘÍLOHA B: MODEL	B48
PŘÍLOHA C: MĚŘENÍ NA MODELU	C50