

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika HVDC konvertorového transformátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **František LANDA**  
Osobní číslo: **E11B0133P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika HVDC konvertorového transformátoru**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište princip činnosti a výrobu HVDC transformátoru.
2. Uveďte využití HVDC transformátoru v praxi.
3. Zpracujte přehled HVDC transformátorů od vybraných výrobců.
4. Navrhňte možnosti diagnostiky HVDC transformátorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. V.Mentlík a kol. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
2. M. Heathcote - J&P Transformer Book, 13th edition, Newnes 2007, ISBN-10: 0750681640
3. Elektronické informační zdroje
4. Internetové databáze (sciencedirect.com, IEEE, CIGRE)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Dončuk**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou HVDC transformátorů. V první části je popsán HVDC přenos, technologie, schéma a vedení. Dále jsou v první části uvedeny výhody, nevýhody a důsledky použití HVDC technologie. Druhá část je zaměřena na konstrukci a technologii výroby transformátorů se zaměřením na HVDC konvertorové transformátory. Dále jsou ve druhé části uvedeny komponenty HVDC transformátoru. Ve třetí části jsou uvedeny použité HVDC systémy od výrobců ABB, Siemens a Alstom, se zaměřením na jmenovitý výkon a rok instalace. Čtvrtá část se zabývá diagnostikou a monitoringem transformátorů se zaměřením na HVDC transformátory.

## **Klíčová slova**

HVDC technologie, HVDC transformátor, jmenovitý výkon

**Abstract**

This bachelor thesis deals with the HVDC transformers. The first part describes the HVDC transmission, technology, scheme and the electric grid. In the first part are also listed the advantages, disadvantages and the consequences of using HVDC technology. The second part is focused on the design and technology of manufacture of transformers, focusing on HVDC converter transformers. The second part also describes the components of the HVDC transformers. The third section describes HVDC systems used by manufacturers ABB, Siemens and Alstom, focusing on nominal power and year of installation. The fourth part deals with the diagnosis and monitoring of transformers focusing on HVDC transformers.

**Key words**

HVDC technology, HVDC transformer, nominal power

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Dončukovi za cenné profesionální rady, odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

## Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD.....	11
<b>1 HVDC.....</b>	<b>12</b>
1.1 PŘENOS HVDC.....	12
1.2 PROČ HVDC.....	12
<i>Výhody a nevýhody HVDC.....</i>	<i>14</i>
1.3 SCHÉMA HVDC.....	14
1.4 HVDC SYSTÉMY.....	15
1.4.1 HVDC Classic.....	15
1.4.2 HVDC Light.....	16
1.4.3 HVDC Ultra.....	16
1.5 HVDC TECHNOLOGIE.....	16
1.5.1 Monopolární.....	17
1.5.2 Bipolární.....	17
1.5.3 Back to back.....	18
1.5.4 Systém s více terminály.....	18
<b>2 HVDC TRANSFORMÁTORY.....</b>	<b>19</b>
2.1 KONSTRUKCE HVDC TRANSFORMÁTORU.....	20
2.2 JÁDRO TRANSFORMÁTORU.....	20
2.2.1 Stavění jádra.....	22
2.3 VINUTÍ TRANSFORMÁTORU.....	22
2.3.1 Transpozice.....	24
2.3.2 Izolační provedení.....	24
2.3.3 Stav izolace.....	27
2.4 NÁDOBA TRANSFORMÁTORU.....	27
2.5 PRŮCHODKY.....	27
<b>3 PŘEHLED HVDC KONVERTOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....</b>	<b>28</b>
3.1 HVDC TRANSFORMÁTORY OD FIRMY ABB.....	28
3.2 HVDC TRANSFORMÁTORY OD FIRMY SIEMENS.....	32
3.3 HVDC TRANSFORMÁTORY OD FIRMY ALSTOM.....	35
<b>4 ZKOUŠKY.....</b>	<b>36</b>
4.1 ZKOUŠKY V PRŮBĚHU VÝROBY.....	36
4.1.1 Zkoušky transformátorových plechů.....	36
4.1.2 Měření ztrát v jádře.....	37
4.1.3 Zkouška měděného vinutí.....	37
4.1.4 Zkouška nádoby transformátoru.....	37
4.2 ZÁVĚREČNÉ ZKOUŠKY.....	38
4.3 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK.....	38
4.3.1 Zkouška transformačního poměru a správnosti zapojení.....	39
4.3.2 Zkouška izolace.....	39
4.3.3 Zkouška kontrolních zařízení a kontrola zapojení.....	39
4.3.4 Zkouška elektrické pevnosti.....	39
4.3.5 Pracovní charakteristiky.....	40
4.3.6 Ostatní zkoušky.....	40
4.4 ZKOUŠKY PRO HVDC TRANSFORMÁTORY.....	40
4.4.1 Zkouška DC napěťového zdroje.....	41



4.4.2	Zkouška obrácené polarity.....	41
4.4.3	Provozní proud při zátěži.....	41
4.5	MONITORING .....	42
4.5.1	On-line monitoring pro HVDC transformátory .....	42
4.5.2	Systém pro monitorování průchodů.....	43
4.5.3	Systém pro měření částečných výbojů.....	43
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>44</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>		<b>45</b>

## Seznam symbolů a zkratk

<b>AC</b>	alternating current – střídavý proud
<b>CGO</b>	cold-rolled grain-oriented – válcování za studena a orientace domén
<b>CSC</b>	current source converters – konvertor zdroje proudu
<b>DC</b>	direct current – stejnosměrný proud
<b>HVDC</b>	high-voltage direct current – Vysokonapěťový stejnosměrný proud
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission - Mezinárodní elektrotechnická komise
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
<b>OPŠPP</b>	epoxy-resin-impregnated paper – impregnovaný papír s epoxidovou pryskyřicí
<b>UHVDC</b>	ultra high-voltage direct current – ultra vysokonapěťový stejnosměrný proud
<b>VSC</b>	voltage source converters – konvertor zdroje napětí

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na HVDC transformátory a HVDC technologii. Popisuje HVDC systémy Classic, Light a Ultra, jejich výhody, nevýhody a použití. Dále je v práci HVDC technologie popsána z hlediska vedení, které se rozděluje na monopolární, bipolární, back-to-back a systém s více terminály. V práci jsou popsány technické výhody a nevýhody HVDC technologie.

Z hlediska HVDC transformátorů je v práci uvedena technologie výroby a používané materiály. Práce se zaměřuje na jádro, vinutí, nádobu a průchodky. Z hlediska jádra na technologie výroby, materiály a ztráty, které vznikají v jádře transformátoru. Z hlediska vinutí na rozdělení, na ztráty a na izolační provedení. Z hlediska nádoby na konstrukční požadavky pro HVDC transformátory. V oblasti průchodek a tlumivek se práce zaměřuje na používanou technologii a oblast použití.

V práci jsou uvedeny HVDC projekty od vybraných výrobců ABB, Siemens a Alstom. U projektů je uvedeno místo instalace, rok, jmenovitý výkon a důvod použití HVDC systému. V závěru je práce zaměřena na diagnostiku transformátoru a zkoušky, které se provádí u HVDC transformátorů.

# 1 HVDC

Jedná se o vysoko napěťový přenos stejnosměrného proudu na velké vzdálenosti nadzemním, podzemním, nebo podmořským vedením. Nebo se technologie využívá pro propojení asynchronních elektrických sítí.

## 1.1 Přenos HVDC

V současné době globální růst civilizace ovlivňuje poptávku po elektrické energii. Hlavní zdroj elektrické energie se nemusí nacházet v blízkosti civilizace a infrastruktury.[1] Takže elektrická energie musí být přenášena i na velké vzdálenosti. Vysoko napěťový přenos HVDC je alternativní ke klasickým střídavým přenosům.[2]

Jedná se o, velmi účinnou, alternativu k hospodárnému přenosu velkého množství elektrické energie. S rozvojem získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů je spojen i rozvoj HVDC přenosu, který je využíván k nízko ztrátovému přenosu získané, elektrické energie.[3]

## 1.2 Proč HVDC

AC vedení bylo jedinou variantou pro přenos elektrické energie do domácností a podniků, jako první variantou pro přenos elektrické energie bylo ale stejnosměrné vedení. Ale AC přenos při vysoké úrovni napětí má určitá omezení, například přenosová kapacita, omezení vzdálenosti a nemožnost propojení dvou střídavých vedení, které pracují na rozdílných frekvencích. HVDC se hodí pro přenos elektrické energie, zabezpečení stabilního a účinného přenosu elektrické energie, možnosti propojení dvou asynchronních elektrických sítí. HVDC přenos elektrické energie i na velké vzdálenosti se vyznačuje nízkými elektrickými ztrátami. Z těchto důvodů je tato technologie důležitá při přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti a při přenosu elektrické energie z obnovitelných zdrojů z větrných, slunečních a vodních elektráren, protože tyto zdroje se jen zřídka nacházejí v blízkosti osídlených center. HVDC technologie se používá hlavně díky svým technickým výhodám, které jsou ovladatelnost, nižší celkové náklady oproti AC vedení, nižší ztráty při přenosu elektrické energie, šetrnost k životnímu prostředí.[3]

Díky HVDC lze propojit asynchronní sítě, které pracují na rozdílných frekvencích nebo jsou jinak neslučitelné. Aby mohly být střídavě sítě propojeny, musí být synchronizovány, musely by tedy pracovat na stejné napěťové úrovni a frekvenci, což by u velkých střídavých systémů bylo obtížné dosažitelné. Z tohoto důvodu se na propojení asynchronních sítí používá HVDC vedení, protože je ho možno použít pro jakékoliv střídavé vedení o různých napětích a frekvencích.[3]

HVDC vedení nemá žádné technické omezení na délce vedení. To je velkým přínosem oproti AC vedení, které je omezeno na maximální přenosovou vzdálenost, vzhledem ke kapacitě vedení a přenášení jalového výkonu. Z těchto důvodů je HVDC technologie jedinou ekonomickou alternativou pro přenos velkého množství elektrické energie na velmi velké vzdálenost.[3]

Mezi další velmi důležitou výhodou patří ovladatelnost. Většina HVDC technologie je založena na konstantním přenosu výkonu. To je velmi důležité pro distribuci, nebo obchodování s elektrickou energií. HVDC vedení může být využito i pro zlepšení přenosu výkonu u AC vedení. Automatické ovládání HVDC napomáhá rozdělení toku energie přes AC vedení, pomáhá při výkonových výkyvech a dovoluje bezpečné navýšení kapacity přenášeného výkonu. [3]

Technické výhody HVDC: [4]

- HVDC vedení může být použito pro jakékoliv jmenovité napětí a frekvenci
- HVDC vedení dovoluje hospodárněji a efektivněji přenášet elektrickou energii na delší vzdálenosti, než u tradičního AC vedení, HVDC vedení lze přenášet vyšší jmenovitý výkon 5000 MW - 6400 MW
- Požívají se pro přenos elektrické energie z vodních, větrných, solárních elektráren, tedy z obnovitelných zdrojů
- Tok elektrické energie je rychle a přesně ovladatelný, obsluha nebo automatický ovladač stanovuje množství elektrické energie vedením.

## Výhody a nevýhody HVDC

Stejnoseměrný přenos: [5]

Výhody:

- DC linky jsou levnější
- Bez omezení vzdálenosti
- Žádný přenos jalového výkonu = bez zvýšení zkratového výkonu
- Ovladatelnost
- Asynchronní připojení

Nevýhody:

- Drahé DC stanice
- Přechodové rozvodny

### 1.3 Schéma HVDC

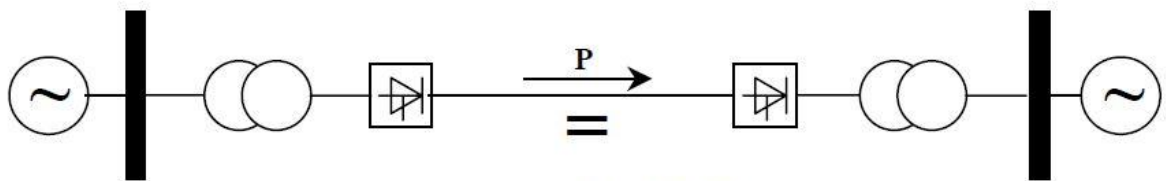
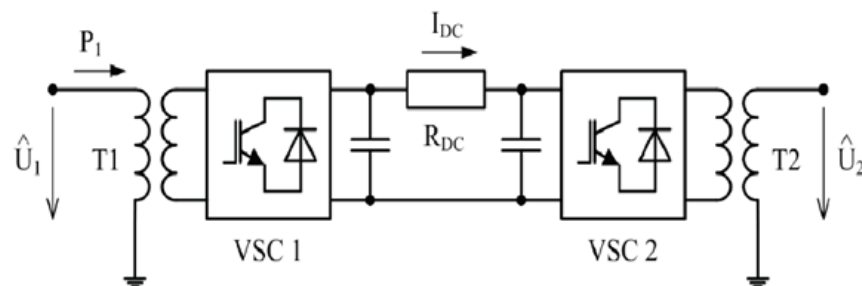


Figure 2-17

Obr. 1.1 Schéma HVDC (převzato z[5])



Obr. 1.2 Schéma HVDC s VSC měniči (převzato z[6])

Dle schématu na obr 1. 1 se HVDC se pro přenos používají dva VSC měniče, kde jeden funguje jako usměrňovač a druhý jako střídač. [6]

V HVDC technologii se používají dva základní typy konvertorů. Konvertor zdroje proudu CSCs se síťovou komutací a konvertor zdroje napětí VSCs s vlastní komutací. Konvertor CSCs vyžaduje silný synchronní zdroj napětí pro správnou funkčnost. Konvertor VSCs pracuje s vysokou frekvencí pulzní šířkové modulace PWM, má tedy možnost rychlého ovládání. VSC-HVDC umožňuje přenášet elektrický výkon podzemním a podmořským vedením na velké vzdálenosti. Mezi výhody patří neutralita magnetického pole a použití bezolejových kabelů.[7]

## 1.4 HVDC Systémy

Technologii HVDC můžeme rozdělit do tří základních typů:[3]

- HVDC Classic
- HVDC Light
- HVDC Ultra

### 1.4.1 HVDC Classic

Jedná se o základní technologii HVDC, tedy přenos elektrické energie na velkou vzdálenost od nadzemního vedení až po podmořské kabely. Používá se také pro propojení nezávislých energetických systémů, kde nelze použít, nebo je klasické střídavé vedení ekonomicky nevýhodné. V systému HVDC také lze rychle a přesně kontrolovat tok energie, k zajištění požadované úrovně výkonu a směru toku energie. Tato možnost se také používá ke zlepšení výkonnosti a efektivnosti střídavých sítí.[3]

V systému HVDC je elektrická energie přijata z jednoho místa v třífázové síti. Potom je převedena do DC konvertorové měnicí stanice, kde se dále přenáší pomocí stejnosměrného vedení do AC konvertorové měnicí stanice a nakonec je přivedena zpět do třífázové sítě. Obvykle má HVDC přenos jmenovitý výkon více než 100 MW a mnoho z nich v rozmezí 1000 – 5000 MW. [3]

### 1.4.2 HVDC Light

HVDC Light se používá pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. Nabízí řadu přínosů, mezi které patří šetrnost k životnímu prostředí, nebo elektromagnetická neutralita, zvyšuje spolehlivost přenosových sítí. Přenosové hladiny se pohybují kolem desítek MW. HVDC Light dosahuje maximálně 1800 MW při  $\pm 500$  kV. HVDC Light technika musí splňovat nároky na regulovatelnost a na vysokou kvalitu přenosu elektrické energie. [3]

Příklady instalací:[3]

- Zajištění elektrické energie na pobřeží a pro plošiny pro těžbu ropy a zemního plynu
- Připojení asynchronních sítí
- Podzemní elektrické vedení
- Připojení větrných elektráren do elektrických sítí

Rozšiřování AC přenosové kapacity je často omezeno předpisy pro plánování nových přenosových sítí. Proveditelná alternativa je použití podzemních HVDC kabelů pro navýšení přenosové kapacity. [3]

### 1.4.3 HVDC Ultra

Mezi nejnovější patří technologie HVDC Ultra tedy UHVDC, zde se jedná o přenos ultra vysokého napětí.[2] V současné době s rostoucí zájmem o výrobu a distribuci elektrické energie z obnovitelných zdrojů bylo potřeba zvýšit úroveň stejnosměrného napětí z používaných 600 kV na velmi vysoké napětí 800 kV. 800 kV síť je velmi ekonomicky výhodná pro velké výkonové přenosy elektrické energie, přenášené výkony se pohybují v rozmezí 5000 – 8000 MW na vzdálenosti 1000 – 1500 km. Proto byla napěťová hladina 800 kV stanovena pro velké výkonové přenosy na velké vzdálenosti.[3, 8]

## 1.5 HVDC Technologie

Rozdělení dle přenosu elektrického proudu a transformace na monopolární, bipolární, back to back systém a systém s více terminály.[9]



### 1.5.1 Monopolární

Jedná se o technologii, při které se usměrňuje střídavý elektrický proud. Střídavý elektrický proud se usměrňuje pouze na kladnou polaritu, jako záporná polarita se používá potenciál země, nebo metalický kabel. Tato základní technologie HVDC používá pouze dva měniče napětí. Mezi výhody patří, že pro přenos elektrické energie se používá jen jeden kabel, nebo vedení. Mezi nevýhody patří možnost vzníkání koroze v oblasti terminálu, z důvodu uzemnění. Pokud se pro zápornou polaritu používá metalický kabel, je nutný jej dimenzovat z hlediska požadovaného napětí, metalický kabel se používá jako „nulový vodič“ a k propojení stanic, aby nevznikal rozdíl potenciálu země. Proud prochází jen vodičem nebo vedením, který přenáší přenášený výkon. Při používání zemního potenciálu patří také k nevýhodám technologie v místě uzemnění zvyšování korozivity v důsledku změny chemického složení. [9]

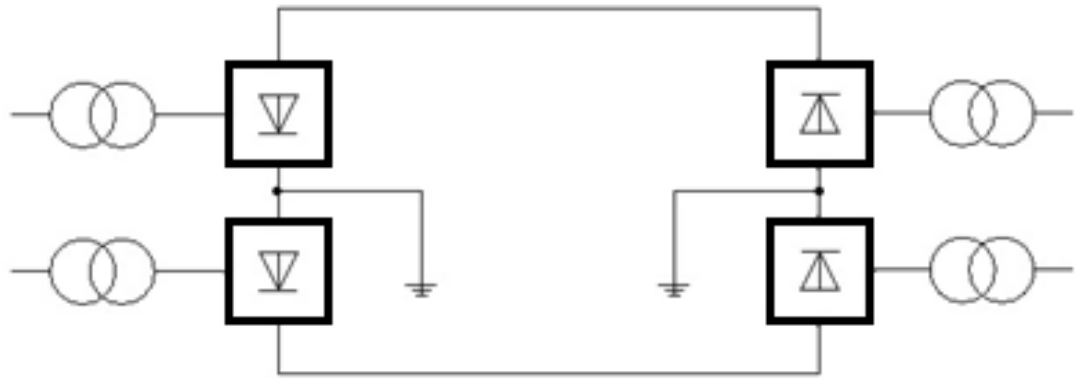


Obr. 1.3 Schéma Monopolární technologie[9]

### 1.5.2 Bipolární

Jedná se o HVDC Bipolární technologii, u které se používá při přenosu usměrněného elektrického proudu kladná i záporná polarita. Pro přenos elektrické energie se využívá dvojice kabelů, tato varianta se projeví z finančního hlediska, protože zde musí být vedení realizováno dvojicí kabelů a použití čtyř měničů napětí, oproti levnější monopolární technologii které využívá jedno vodičové vedení a dva měniče napětí. U bipolární technologie, která je realizované dvouvodičovým vedením, musí být oba vodiče dimenzovány na požadované napětí, na které má soustava pracovat. Mezi výhody patří, že v případě

poruchy nebo poškození jedné z polarit je možné přenášet část elektrické energie, přenášet tedy výkon menší než 50% původního přenášeného výkonu. Kvůli dvojici kabelů je tedy tato technologie spolehlivější z hlediska přenášeného výkonu.[9]



Obr. 1.4 Schéma Bipolární technologie[9]

### 1.5.3 Back to back

Při propojování asynchronních přenosových sítí u HVDC přenosu se využívá Back to back technologie. Tato technologie obsahuje střídač a usměrňovač, přenosové vedení bývá co nejkratší, aby mohl být usměrňovač a střídač ve stejné budově a kvůli minimalizování ztrát. Distribuční síť, nebo elektrárna pracuje na určité frekvenci, která stanovuje danou síť. K dané síti se následně připojuje stanice. Ve stanici se napětí usměrní usměrňovačem, poté je střídačem upraveno na napětí s frekvencí vhodné pro přivedení do distribuční sítě. Tento terminál dodává do distribuční sítě napětí s požadovanou frekvencí, na které pracuje daná distribuční síť.[9]

### 1.5.4 Systém s více terminály

U této technologie se využívá propojení dvou a více terminálů, terminály lze propojovat paralelně, sériově nebo různými kombinacemi těchto zapojování. U této technologie se používají komutované měniče, kvůli složitému řízení, i z hlediska přenosu elektrické energie. Přenášený proud, když mění svoji polaritu, má vliv na všechny převodníky, které v systému pracují. Pomocí komutovaných měničů se mění polarita napětí

místo proudu, pro požadovaný výkon. V terminálovém systému se očekává rozšiřující používání komutovaných měničů.[9]

## 2 HVDC transformátory

Pomocí elektronických obvodů lze elektrický proud převést ze střídavé do stejnosměrné podoby a naopak. Tyto obvody se nazývají usměrňovače, nebo střídače. Oba tyto obvody se nazývají převodníky. U HVDC transformátoru se jedno vinutí připojuje k jednomu z těchto obvodů pro převedení elektrického proudu.[10]

HVDC transformátory podléhají jiným provozním parametrům, než klasické konvenční výkonové transformátory. Mezi tyto parametry patří:[10]

- Kombinované napěťové namáhání AC a DC
- Velký počet harmonických proudů v provozním stavu
- DC pre-magnetizaci jádra

Konvertor podléhá kombinovanému namáhání AC a DC napětím. Je nutné zohlednit i možné riziko způsobené úderem blesku. Namáhání vzniká i při přepínání různých provozních činností.[10]

Vyskytuje se zde i vysoký obsah harmonických složek v provozní činnosti, současně mezi bloky převodníku. Jedná se o liché harmonické, které způsobují další ztráty ve vinutí a jiných konstrukčních částech transformátoru. Z těchto důvodů se materiály, které jsou použity na výrobu komponentů HVDC transformátorů, musí testovat, podrobovat teoretickým rozborům a experimentům.[10]

Z hlediska pořizovacích nákladů je HVDC transformátor považován za velkou investici, z tohoto důvodu musí být zajištěna jeho funkčnost a spolehlivost. Funkčnost a spolehlivost má velký význam i z důvodu, že zajišťuje distribuci elektrické energie pro větší množství odběratelů.[10]

## 2.1 Konstrukce HVDC transformátoru

Návrh a řešení projektu HVDC transformátoru je ovlivněna požadovaným výkonem a požadavky zákazníka. Konstrukce HVDC transformátoru je ovlivněna především jmenovitým napětím a jmenovitým požadovaným výkonem. Při návrhu a řešení HVDC transformátoru je potřeba zohledňovat i způsob dopravy, z důvodu jeho hmotnosti a velikosti, protože mnoho HVDC transformátorů se umísťuje do venkovské oblasti s omezenou infrastrukturou. HVDC transformátory je možné přepravovat i po železnici za splnění daných požadavků na přepravu.[10, 14]

## 2.2 Jádro transformátoru

U HVDC technologie se transformátory vyrábějí většinou jednofázové. Jádro transformátorů se staví z transformátorových plechů. Tak aby sloupky, na které se nasazuje vinutí, co možná nejlépe vyplňovaly kruhový průřez, kvůli efektivnímu využití prostoru. Teoreticky lze vyplnit až 95% kruhového průřezu vinutí. Transformátorové plechy mají tedy různé délky a šířky, podle velikosti transformátoru mají transformátorové plechy 7-11 šířek, které jsou od 200 mm do 1 m. Délka transformátorových plechů je dána konstrukcí a použitou metodou pro stavění jádra. Kvalita jádra je dána kvalitou plechů, materiálem ze kterého jsou plechy vyrobeny a jmenovitou indukci. Konstrukce musí splňovat speciální požadavky na krytí ztrát, požadované hladiny hluku, přebuzení. Speciální pozornost musí být věnována DC přemagnetizaci jádra, dopady stejnosměrné přemagnetizace je potřeba kompenzovat vhodnou konstrukcí při výrobě.[10, 11, 14]

Schopnost vést magnetický tok je ovlivněn tzv. permeabilitou, čím vyšší permeabilita tím materiál lépe vede magnetický tok. Magnetické oceli pro moderní transformátory mají permeabilitu okolo 1500, to je v porovnání se vzduchem, který má permeabilitu 1, mnohem vyšší hodnota. To znamená, že schopnost železa a oceli vést magnetický tok je mnohem lepší než u vzduchu.[10]

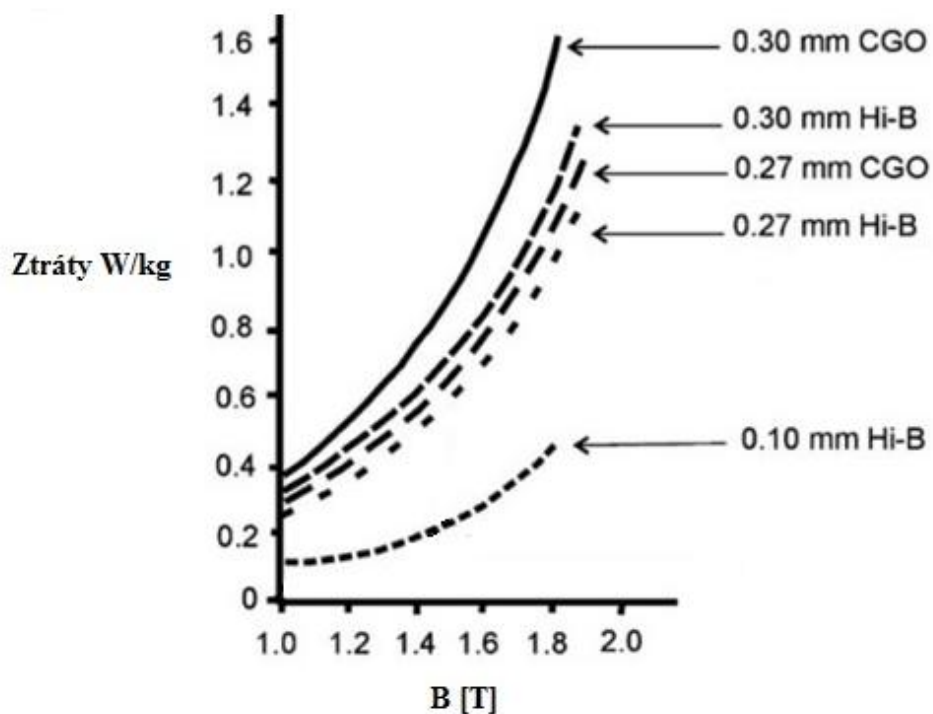
Proud v primárním vinutí transformátoru vytváří magnetický tok. Ten prochází jádrem transformátoru. Při průchodu magnetické toku jádrem vznikají ztráty. Mezi nejhlavnější patří ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Hysterezní ztráty jsou způsobené periodickým

přemagnetováním jádra. Ztráty vířivými proudy jsou vyvolány prouděním magnetického toku jádrem. Jádro transformátoru se skládá z tenkých izolovaných plechů o různých tloušťkách a rozměrech kvůli snížení ztrát. Magnetické plechy CGO se válcují za studena, dojde k orientaci magnetických domén a zlepšení magnetických vlastností ve směru válcování. Tloušťka izolace plechů je přibližně 1  $\mu\text{m}$  a provádí se po řezání a děrování. Ztráty výkonu se uvádějí ve wattech na kilogram.[10]

Jádra fungují se jmenovitou magnetickou indukcí 1,6 až 1,8 T díky magnetickým plechům válcovaných za studena. Magnetické plechy CGO se vyrábějí o tloušťkách: 0,23 0,27 0,30 a 0,35 mm.

Transformátorové plechy:[10]

- Hi-B materiál, tloušťka 0,23 mm o ztrátách 0,92 W/kg pro 1,7 T a 50 Hz. Nebo o ztrátách 1,2 W/kg pro 1,7 T a 60 Hz. Označení 23ZDKH.
- CGO plechy, tloušťka 0,3 mm o ztrátách 1,3 W/kg pro 1,7 T a 50 Hz. Nebo o ztrátách 1,72 W/kg pro 1,7 T a 60 Hz. Označení M097-30N.
- Hi-B materiál, tloušťka 0,27 mm o ztrátách 0,98 W/kg pro 1,7 T a 50 Hz. Nebo o ztrátách 1,3 W/kg pro 1,7 T a 60 Hz. Označení M103-27P.



Obr. 2.1 Ztrátové charakteristiky magnetických materiálů pro transformátorové plechy

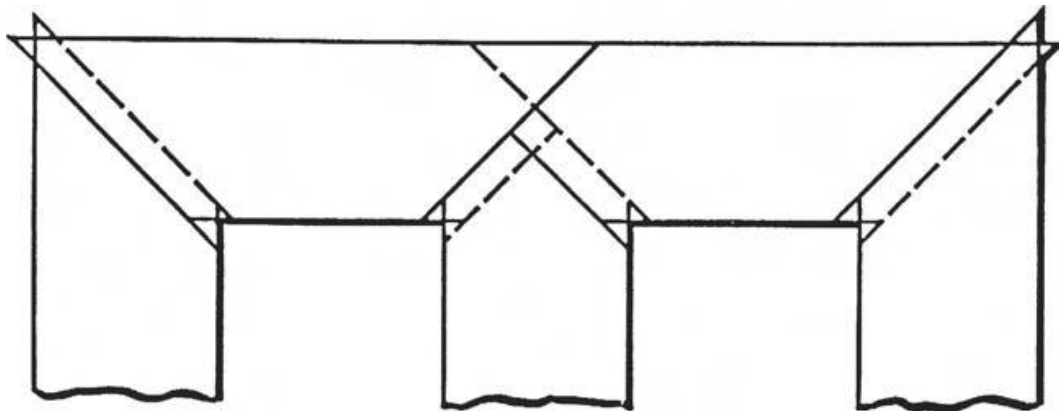
[10]

## 2.2.1 Stavění jádra

Jádro se staví vodorovným skládáním transformátorových plechů. Při skládání jádra se mohou používat speciální plechy, nebo komponenty pro vytvoření kanálu pro olej, to napomáhá při chlazení transformátoru. Výsledné jádro musí být staženo speciálními rámy, svorníky a ocelovými pásky. U větších transformátorů mají plechy stři 45°, dochází tak k efektivnějšímu uzavírání magnetického toku.[11]

### 2.2.1.1 Step-lapp

Nejmodernější metoda stavění jádra se nazývá Step-lapp. Tato metoda byla vytvořena z důvodu snížení ztrát, které vznikají ve spojích plechů. Spočívá v přeložení transformátorových plechů v místě spoje a tím dochází k plynulejší přenos magnetické toku. Nevýhodou metody je složitější výroba jádra a jsou kladeny i větší nároky na stahovací ústrojí. Tato metoda se využívá ve velké míře u distribučních transformátorů.[11]



Obr. 2.2 Metoda Step-lapp (převzato z E[11])

## 2.3 Vinutí transformátoru

Hlavními materiály pro vodiče ze kterých se zhotovuje vinutí je měď a hliník. Měď má ovšem lepší mechanické a elektrické vlastnosti než hliník a proto se používá u většiny transformátorů. Vinutí je, u velkých transformátorů, navinuto a následně nasazeno na jádro transformátoru. Musí být dobře izolováno izolačním systémem. U vinutí se vytváří chladicí

cesty pro účinné chlazení olejem. Vinutí musí být navrženo a realizováno, aby vydrželo provozní a zkušební podmínky.[10]

Vinutí můžeme rozdělit na primární a sekundární. Vinutí se nasazuje na sloupky jádra transformátoru, do určité míry ovlivňuje konstrukci jádra.[11]

Konstrukce vinutí musí umožňovat značnou flexibilitu z důvodu velkého počtu parametrů, mezi které patří transformační poměr, ztráty a jmenovitý výkon. Vinutí montováno v radiálním směru s odbočkami. Speciální vinutí se zkouší na vysoké napětí a velké množství harmonických vln, aby splňovalo konkrétní parametry na konstrukci a kvalitu. Speciální vinutí může být zapojeno do hvězdy, nebo do trojúhelníka. Vinutí jsou sestavena buď pro jedno jádro, nebo samostatně pro dvě jádra.[10]

U výkonových transformátorů je vinutí obvykle vyrobeno z obdélníkového vodiče, aby se efektivně využíval prostor. Při příliš velkém průřezu vodiče se vinutí realizuje ze dvou nebo více vodičů o menším průřezu, které jsou zapojeny paralelně, kvůli snížení ztrát vířivými proudy ve vodiči.[10]

Materiál vodiče by měl být mechanicky měkký. Pro nezbytné zvýšení pevnosti materiálu se vodič tváří za studena, aby odolal zkratovým silám.[10]

Typy vinutí:[10]

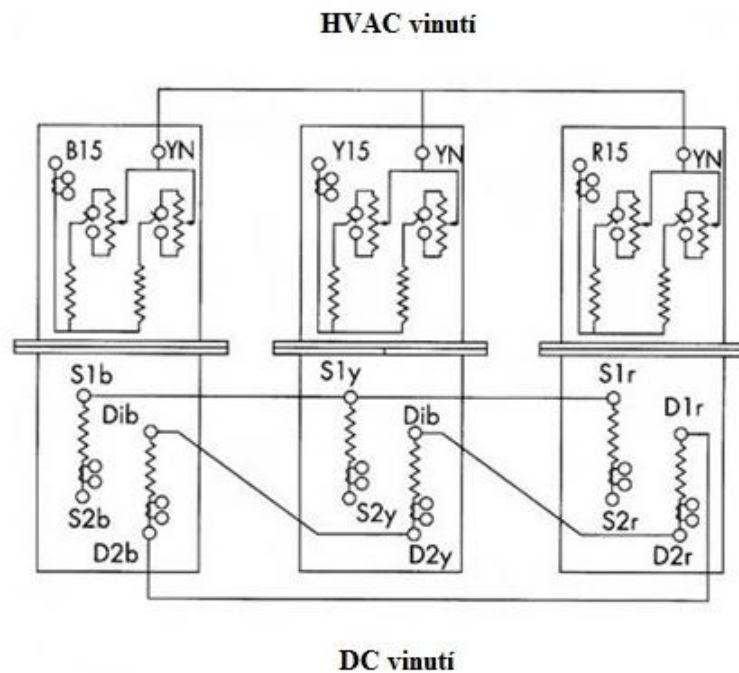
- Vrstvené vinutí
- Šroubovitě vinutí
- Kotoučové vinutí
- Metalické vinutí

Při návrhu vinutí se musí brát v úvahu daný prostor pro vinutí, chladicí kanály a potřebná izolace. Ztráty ve vinutí transformátoru:[11]

- Odporové ztráty, označované jako  $I^2R$  ztráty
- Ztráty vířivými proudy ve vinutí

Možné způsoby snížení ztrát ve vinutí transformátoru:[11]

- Použití nízko odporových materiálů, to v praxi znamená použití mědi s vysokou vodivostí
- Použití nejnižších možných počtů závitů vinutí.



Obr. 2.3 Vinutí HVDC transformátoru [11]

### 2.3.1 Transpozice

Transpozice neboli záměrné prohození místa vodičů ve vinutí se provádí z důvodu, že mohou být vodiče v různé vzdálenosti od jádra transformátoru a indukovalo by se do něj jiné napětí. To by způsobilo, že by ve vinutí začal procházet nežádoucí vyrovnávací proud. Při použití transpozice se vyrovnávací proud vůbec nevytváří, nebo je značně omezen. Prohození místa vodičů se vytváří při výrobě vinutí.[10, 11]

### 2.3.2 Izolační provedení

Izolační systém má velký vliv na správný chod transformátoru. Poruchy izolace transformátoru může způsobit velké škody na transformátoru. Následné opravy transformátoru mohou být velmi rozsáhlé a nákladné. V důsledku s rostoucími nároky na dodávku elektrické energie, rostou i nároky na jmenovité výkony transformátorů a tedy i na izolační systémy. Konstrukcí transformátoru a izolačního systému je dána životnost transformátoru. S tím jsou spojeny zkoušky izolace prováděné výrobcem. U dřívějších transformátorů se používal azbest, bavlna a lepenka. Tato varianta by byla ovšem pro dnešní



vysokonapěťové transformátory nedostačující. Pro dnešní transformátory se v izolačním systému používá olej, sulfátový a impregnovaný papír a lepenka, syntetická pryskyřice.[11]

Každý vodič je izolován papírovou lepenkou, nebo lakován glazurou. Pokud je vodič rozdělen do dvou nebo více vodičů, mohou mít společnou papírovou izolaci. Ze dvou nebo více izolovaných vodičů se společnou papírovou izolací se stává kabel. Papírová lepenka je několik desítek silná a několik centimetrů široká. Papírová lepenka je navinuta kolem vodiče po celé jeho délce. Papírová lepenka může být navinuta v několika vrstvách, aby tloušťka izolace vyhovovala elektrickému a mechanickému namáhání.[11]

V problematice izolační konstrukce se HVDC transformátory velmi liší od konvenčních transformátorů. Hlavně tak, aby vydržely AC napěťové namáhání a aby speciální vinutí vydrželo DC napěťové namáhání. Pro AC napětí se používají izolační materiály papír, lepenka a olej, ale u DC napětí se reakce izolačních materiálů velmi liší. Olej má dielektrickou pevnost nedostačující pro vysokou úroveň stejnosměrného napětí, proto musí být zábrany a překážky tvarovány tak, aby omezovali namáhání izolačního systému. V systému s AC namáháním napětí určuje parametry izolačních materiálů.[11]

Jako kompozitní izolační struktura se vytváří systém olej lepenka. V případě DC namáhání se systémy rozdělují z hlediska rozměrů materiálu a jeho rezistivity. Lepenka má vyšší měrný odpor a může být tedy vystavena většímu namáhání. Obecně platí, že lepenka má také nejvyšší elektrickou pevnost. Nutno pečlivě zvážit konstrukci lepenka olej z hlediska izolační nespojitosti a rozhraní. Konstrukce izolačního systému je složitější, ale kombinace AC a DC namáhání se vyskytuje v praxi. Protože AC a DC namáhání převážně určují různé parametry. Musí tedy být zohledňovány při návrhu izolačního systému.[11]

### 2.3.2.1 Sulfátový papír

Jedná se o levný a velmi dobrý elektroizolační materiál. Elektroizolační papíry musí splňovat určité chemické, fyzikální vlastnosti, technické parametry a musí mít dané elektrické vlastnosti. Mezi důležité elektrické vlastnosti pro papír patří:[11]

- Vysoká elektrická pevnost
- Relativní permitivita, pokud je použit i olej tak by měla být co nejblíže k relativní

permitivitě oleje

- Dielektrické ztráty
- Nepřítomnost vodivostních částic.

Relativní permitivita sulfátového papíru je přibližně 4,4. Sulfátový papír se vyrábí výhradně z měkkého dřeva sulfátovým procesem.

### 2.3.2.2 Bavlněná celulóza

Jedná se o bavlněná vlákna, které kombinují dobře elektroizolační a mechanické vlastnosti. Jde o dražší materiál v porovnání se sulfátovým papírem. Bavlněná celulóza se už tak často nevyužívá, protože obsahuje nežádoucí nečistoty. [11]

### 2.3.2.3 Papír pro speciální aplikace

Existuje více druhů elektroizolačního papíru, které mají každé své vlastnosti a dané použití.

Speciální typy papíru, pro speciální aplikace:[11]

- Krepový papír
- Vysoce flexibilní papír
- Tepelně upravovaný papír
- Papír s diamantovými částicemi.

### 2.3.2.4 Lepenka

Lepenka se skládá z více vrstev papíru. Lepenková izolace je založena na stejném principu jako izolace papírová, lepenka má ale větší tloušťku. Lepenka je rozdělena, do dvou kategorií: [11]

- Lepenka složená z papírových vrstev bez lepení
- Spojení papírových vrstev za pomoci vhodného lepidla

### 2.3.3 Stav izolace

Izolační systém se posuzuje z hlediska izolačního materiálu. Na izolační materiál má velký vliv vlhkost z hlediska snížení izolačního odporu, kvůli iontové vodivosti. Proto je velmi důležité udržovat v izolačním systému vysokou úroveň suchosti. To je velmi důležité, když je transformátor v provozu, ale i ve výrobě, když je transformátor testován, z důvodu testování reálných parametrů. V případě použití oleje v izolačním systému musí být zajištěna velmi vysoká čistota oleje. Vysoká čistota se zajišťuje filtrováním oleje.[11]

Jakákoliv kontaminace oleje, ať ve formě celulózových vláken, nebo kovových částic může díky vlivu stejnosměrného napěťového pole způsobit korónové výboje, nebo dokonce zhroucení izolačního systému a následné poškození transformátoru.[11]

## 2.4 Nádoba transformátoru

Nádoba transformátoru plní ochranou funkci a funguje jako nádoba na olej. Slouží také jako nosná konstrukce pro vybavení a příslušenství transformátoru. Před naplněním oleje je nádoba hermeticky uzavřena, aby bylo omezeno zanášení nečistot. Těsnost nádoby se testuje vhodnými zkouškami.[11, 10]

Používají se netradiční nádoby pro HVDC transformátory, které musí splňovat požadavky:[11]

- Chladicí systém se umísťuje na bok nádoby, což umožňuje rychlejší výměnu transformátoru.
- Vložky mezi vinutími musí být uspořádány v souladu s geometrií napájecího převodníku. Toto vede k velmi vysoké výšce připojení a je tedy potřeba namontovat expanzní nádrž olejové nádoby do dané výšky.
- Speciální průchodky na straně speciálního vinutí.

## 2.5 Průchodky

Průchodky se používají na propojení HVDC transformátoru a převodníku, který je obvykle umístěn v budově, která poskytuje ochranu vůči počasí. Proto se průchodky montují

horizontálně na stranu transformátoru. Usnadňují tak lepší spojení HVDC transformátoru a převodníku. Toto připojení zabraňuje vysokofrekvenčnímu rušení. Další možností je připojení s plynnou izolací. Při použití průchodek s izolací epoxidová pryskyřice-impregnovaný papír způsobuje riziko úniku oleje a kontaminaci haly.[11]

Průchodky používané pro stejnosměrný proud vyžadují jinou konstrukci než pro průchodky pro střídavý proud. Vnější povrch průchodky je velmi náchylné k vnějším vlivům. Vysoké stejnosměrné napětí vede k dlouhým průchodkám, které mají dlouhou povrchovou plochu, nejsou tedy náchylné jen na elektrické namáhání ale i ve větší míře na mechanické a atmosférické namáhání.[11]

Je možno použít průchody s porcelánovým, nebo silikonovým povrchem. Ve srovnání s porcelánovými poskytují vyměnitelné silikonové kryty účinnější ochranu proti prachu a nečistotám.[12]

Používají se průchodky s izolací epoxidová pryskyřice v kombinaci s epoxidovým papírem OPŠPP, protože u průchodek s olejovou izolací je nebezpečí úniku oleje a kontaminace okolí.[11]

### **3 Přehled HVDC konvertrových transformátorů**

V tomto bodu jsou uvedeny HVDC transformátory, které jsou již v provozu, nebo budou do provozu uvedeny. Vybraní výrobci: ABB, Siemens, Alstom.

#### **3.1 HVDC transformátory od firmy ABB**

Firma ABB disponuje dlouholetými zkušenostmi v oblasti HVDC technologie. Patří mezi přední dodavatele a poskytuje vylepšení pro stávající projekty HVDC systému. Firma ABB dodává také komponenty nejen pro projekty ABB ale i pro projekty jiné.[3]

Afrika:

Tab. 3-I Namibii: Caprivi vedení [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2010	300	950	HVDC Light	330/400	350

Důvod použití: Dlouhá vzdálenost vedení, stabilizace elektrické sítě, zajištění dodávky elektrické energie.

Tab. 3-II Inga-Kolwezi [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
1982 (Aktualizace 2014)	560	1700	Unipolární vedení	220	±500

Důvod použití: Dlouhá vzdálenost vedení. Dvě monopolární vedení se čtyřmi rozvodnami, provozovány paralelně. Zajišťuje efektivní přenos elektrické energie z vodní elektrárny.

Asie:

Tab. 3-III Xiangjiaba – Shanghai [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2010	6400 (7200)	1980	UHVDC	525	±800

Důvod použití: Dlouhá vzdálenost vedení. Přenáší se výkon z vodní elektrárny. Je použito 28 vysoko a ultra vysoko napěťových transformátorů. Zásadní průlom v technologii přenosu elektrické energie.

Tab. 3-IV Vizag II [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2005	500	back-to-back	400	176

Důvod použití: Propojení asynchronních sítí

Tab. 3-V Tři soutěsky – Shanghai [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2006	3000	1060	500	±500

Důvod použití: Dlouhá vzdálenost vedení, stabilizace elektrické sítě, snížení ztrát.

Austrálie a Oceánie:

Tab. 3-VI Murraylink [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2002	220	2·180	Bipolární vedení	Light	132/220	±150

Důvod použití: Kontrolované propojení, obchodování s elektrickou energií, zajištění dodávky elektrické energie. Získalo několik státních a národních ocenění za ochranu životního prostředí.

Tab. 3-VII jižní Queensland: Terranora vedení [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2000	180	6·59	HVDC Light	110	±80

Důvod použití: Propojení asynchronních sítí, obchodování s elektrickou energií, výhodné použití podzemních kabelů.

Evropa:

Tab. 3-VIII Irsko- Wales: East West vedení [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení podzemní [km]	Přenosové vedení podmořské [km]	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2013	500	2·75	2·186	HVDC Light	400	±200

Důvod použití: Možnost realizace podmořských a podzemních kabelů, distribuce přebytečné energie, podpora výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, zabezpečení elektrické sítě.

Tab. 3-IX Norsko-Holandsko překlenující vedení [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení podmořské [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2008	700	2·580	Monopolární vedení (dvoukabelové)	300 /400	±450

Důvod použití: podmořské kabely, propojení asynchronních sítí, zvýšená bezpečnost dodávek elektrické energie, lepší využití elektráren, rozvoj elektráren s obnovitelnými zdroji.

Tab. 3-X Německo: BorWin1 [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení podzemní [km]	Přenosové vedení podmořské [km]	Technologie	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2012	400	2·75	2·125	HVDC Light	170 /380	±150

Důvod použití: Použití podzemních a podmořských kabelů, přenos elektrické energie z větrné farmy na pobřeží.

Severní Amerika:

Tab. 3-XI Železniční DC spojení Texas [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2007 (2014)	150 → 300	back-to-back	138	±21

Důvod použití: propojení asynchronních sítí, zabezpečení dodávky elektrické energie.

Jižní Amerika:

Tab. 3-XII Argentina - Brazílie HVDC propojení [3]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
1999 (2002)	2200	490	back-to-back	500	±70

Důvod použití: Asynchronní propojení mezi 50Hz a 60Hz sítí.

### 3.2 HVDC transformátory od firmy Siemens

Firma Siemens je mezinárodním lídrem v oblasti přenosu elektrické energie. Poskytuje úplné technické vybavení pro vysokonapěťový přenos elektrické energie. Firma Siemens se zabývá HVDC technologií, která je řešením pro hospodárný dálkový přenos elektrické energie, propojení asynchronních sítí, nebo sítí s rozdílnou frekvencí. HVDC přenos elektrické energie jako alternativu k AC přenosu elektrické energie.[15]

Tab. 3-XIII Francie – Španělsko [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2014	2·1000	65	400	±320

Důvod použití: přenos elektrické energie, použití VSC měničů.

Tab. 3-XIV USA: Hudson přenosový projekt[15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2013	660	11	Monopolární vedení back-to-back	345/230	±180

Důvod použití: Propojení asynchronních sítí, stabilizace elektrické sítě, zabezpečení dodávky elektrické energie do New Yorku.



Tab. 3-XV Čína: Nuozhadu-Guangdong [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2013	5000	1451	Bipolární vedení	525	±800

Důvod použití: Zabezpečení dodávky elektrické energie do velkoměst v Guangdong regionu.

Tab. 3-XVI Bangladéš [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2013	550	Monopolární vedení back-to-back	230/400	158

Důvod použití: Propojení asynchronních sítí.

Tab. 3-XVII Gruzie: Přenosová síť Černé moře [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2013	2·350	Monopolární vedení back-to-back	500/400	96

Důvod použití: propojení asynchronních sítí, zabezpečení dodávky elektrické energie, zabezpečení rostoucí poptávky po elektrické energii.

Tab. 3-XVIII Indie: Mundra–Haryana [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2012	2500	960	Bipolární vedení	400	±500

Důvod použití: Distribuce elektrické energie s nízkými ztrátami.

Tab. 3-XIX Španělsko: COMETA [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2012	2·200	250	Bipolární vedení	400/230	±250

Důvod použití: Distribuce elektrické energie.

Tab. 3-XX Dánsko: Storebælt [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2010	600	56	Monopolární vedení	400	400

Důvod použití: Propojení sítí Jutland-Zealand, které mají rozdílný systém (UCTE-NORDEL).

Tab. 3-XXI Indie: Ballia–Bhiwadi [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2010	2500	800	Bipolární vedení	400	±500

Důvod použití: Zabezpečení rostoucí poptávky po elektrické energii.

Tab. 3-XXII Čína: Yunnan–Guangdong [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2009	5000	1418	Bipolární vedení	525	±800

Důvody použití: Dálkový přenos elektrické energie.

Tab. 3-XXIII Austrálie: Basslink [15]

Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]	Přenosové vedení [km]	Typ vedení	AC napětí [kV]	DC napětí [kV]
2006	500 až 625	295	Monopolární vedení	220/500	400

Důvod použití: Propojení elektrických sítí ve státech Tasmánie (220 kV) a Victoria (500 kV), Zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie.

### 3.3 HVDC transformátory od firmy Alstom

Firma Alstom patří mezi průkopnickou firmu v oblasti přenosových sítí HVDC. Firma Alstom řeší projekty dle individuálních potřeb a požadavků zákazníků. Patří mezi ně zejména přenos elektrické energie na dlouhé vzdálenosti a propojení asynchronních sítí. Poskytuje kompletní projektování, analýzy, uvedení do provozu a provoz sítí pro přenos elektrické energie.[4]

Tab. 3-XXIV HVDC systémy od firmy Alstom[4]

	Rok instalace	Jmenovitý výkon [MW]
Rio Madeira, Brazil: point-to-point 600 kV síť	2013	
Jižní Korea	2013	400
IFA 2000: Francie-Velká Británie	2011	2000
Melo-Uruguay: propojení asynchronních sítí 50/60 Hz	2011	500
Čína: Ningdong-Shangdong	2010	4000
Čína: Tři soutěsky-Shanghai	2010	3000
Lingbao II, China: asynchronní propojení sítí	2009	750
Čína-Rusko	2009	750
GCCIA: propojení Saúdské Arábie (380 kV 60 Hz) a státy Perského zálivu (400 kV 50 Hz)	2008	1800
Hydro-Quebec	2008	300
Konti-Skan: 400 kV síť	2006	
Sasaram, Indie	2002	500
Rivera-Uruguay: propojení asynchronních sítí 50/60 Hz	2000	
Visakhapatnam, India: propojení jižní a východní sítě	1999	500
Chandrapur, India	1997	1000
Chandrapur, Indie	1997	1000
Jižní Korea: 100 km	1997	300
Canada	1993	334
McNeill back-to-back stanice	1989	150

## 4 Zkoušky

U většiny transformátorů se komponenty vyrábějí ručně a následně je transformátor kompletován. Nelze se tedy spoléhat na výstupní typové zkoušky. Je tedy nutné dané komponenty testovat i v průběhu výroby, aby byla zajištěna správná funkčnost a požadovaná životnost transformátoru, to se týká především vysokonapěťových transformátorů. Velké nároky jsou kladeny i na přístroje, kterými se zkoušky provádějí. Musí být pravidelně kontrolovány (ve lhůtě nepřesahující 12 měsíců), aby byla zajištěna požadovaná přesnost měřících přístrojů.[11]

Všeobecné požadavky na zkoušky:[5]

- Zkoušky se provádějí při teplotách 10 až 40 °C
- Zkoušky provádí výrobce, není-li stanoveno jinak
- Všechny součásti a komponenty, které mají na zkoušky vliv musí být při zkouškách použity
- Základní zkouškou je test izolace, pokud není stanoveno jinak
- Měřicí systémy, kterými se provádí zkoušky, musí být povolené a kalibrované v souladu s ISO 9001.

### 4.1 Zkoušky v průběhu výroby

K zajištění správné funkčnosti a životnosti transformátoru je nutné testovat komponenty transformátoru i při jejich výrobě před kompletací.[11]

#### 4.1.1 Zkoušky transformátorových plechů

Z transformátorových plechů se skládají jádra transformátoru. U plechů se kontroluje tloušťka a kvalita izolačního nátěru. Dále se kontroluje vzorek materiálu, ze kterého je plech vyroben. Vzorek je umístěn do tzv. Epsteinovi smyčky a měří se specifické ztráty a magnetické vlastnosti. Měří se i izolační odpor, aby byly zajištěny požadavky pro jádro transformátoru. Izolační odpor se měří dvěma metodami dle EN 10282.[11]

Izolační odpor měří po složení jádra, testovací napětí je 2 kV r. m. s, nebo 3 kV DC. Měření se opakuje po nasazení vinutí a horního třmenu. Obdobný test se provádí pro měření elektrostatického stínění. Pokud existuje podezření, že testovací napětí není dostatečné pro ověření izolačního odporu, tak se izolační napětí zvyšuje. A to na 8 kV r. m. s. Tyto zkoušky se opakují i po napuštění oleje. Pro testovací napětí 16 kV r. m. s.[11]

#### **4.1.2 Měření ztrát v jádře**

Pokud existuje riziko, že nejsou zaručeny požadované ztráty v jádře. Výrobce může provést měření ztrát v jádře, tím že použije měřicí vinutí pro vytvoření daného magnetického toku. A provést měření ztrát v jádře. Měření ztrát v jádře se provádí před nasazením vinutí.[11]

#### **4.1.3 Zkouška měděného vinutí**

Kontrola izolace vinutí musí být provedena před uvedením vinutí do provozu.[11]

#### **4.1.4 Zkouška nádoby transformátoru**

Nádoby transformátoru se zkoušejí na těsnost. Aby se zabránilo únikům oleje. Transformátory 275 a 400 kV je odpovídající tlak 25 mbar po dobu nezbytnou pro měření. Pro transformátory 132 kV je odpovídající tlak 330 mbar. Měří se i deformace nádrže, do 13 mm je považována za přijatelnou.[11]

Všude, kde je to možné by měly být nádrže testovány na těsnost také naplněním kapalinou, která má nižší viskozitu než olej. Při použití tlaku 700 mbar po dobu 24 hodin. Sváry jsou natřené barvou, která napomáhá při detekci netěsností.[11]

## **4.2 Závěrečné zkoušky**

Závěrečné zkoušky transformátoru:[10, 5]

- Zkoušky kontroly zapojení
- Zkoušky izolačního odporu
- Zkoušky provozního napětí
- Zkoušky indukovaného napětí a měření částečných výbojů
- Měření ztrát naprázdno a budícího proudu
- Zkoušky konečného transformačního poměru a sledu fází
- Zkouška izolace a ztrátového činitele
- Zkouška impulzním napětím
- Měření odporu vinutí
- Měření ztrát při zatížení a impedance
- Teplotní zkoušky
- Zkoušky akustického tlaku
- Zkoušky měřidel a příslušenství
- Další zkoušky, dle požadavků.

## **4.3 Rozdělení zkoušek**

Důležité zkoušky:[10]

- Zkouška transformačního poměru a správnosti zapojení
- Zkouška izolace
- Zkouška kontrolních zařízení a kontrola zapojení
- Zkouška elektrické pevnosti
- Pracovní charakteristiky
- Další zkoušky.

### 4.3.1 Zkouška transformačního poměru a správnosti zapojení

Úkolem zkoušky je ověření transformačního poměru. Dochází ke kontrole počtu závitů vinutí, správné orientaci a sledu fází. Rozděluje se na samostatné zkoušky: zkouška napěťového poměru, zkouška polaritý a zkouška sledu fází. Tyto zkoušky se provádí během výrobních zkoušek. [10]

### 4.3.2 Zkouška izolace

Úkolem zkoušky je posouzení změn stavu izolace transformátoru. Důvodem je posouzení izolace a účinků vlhkosti na izolaci transformátoru. Cílem zkoušky je posouzení změn izolačního odporu. Mezi tyto zkoušky patří:[10]

- Zkouška izolační výkonový faktor: měření kapacitního a ztrátového činitele, nebo napětí, proudu a výkonu
- Zkouška izolačního odporu: měření izolačního odporu vinutí proti zemi.

### 4.3.3 Zkouška kontrolních zařízení a kontrola zapojení

Distribuční transformátory bývají vybaveny komponenty pro kontrolu správné funkčnosti. U těchto komponentů je velmi důležitá funkčnost, proto se musí podrobovat testování. Mezi tyto zařízení patří například: kapalinové teploměry, teploměr vinutí, přístroje pro měření kapalinových hladin, tlakoměry, relé konzervátor Buchholz, zařízení pro vyrovnávání tlaku, apod. [10]

### 4.3.4 Zkouška elektrické pevnosti

Za provozních podmínek je transformátor namáhán z hlediska elektrické pevnosti. Proto musí transformátor pracovat při 105% až 110% jmenovitého napětí bezporuchově. Transformátor však může být vystaven i mimořádnému namáhání, které mohou vznikat v důsledku systémových poruch, změn, nebo za jiných podmínek. Například v důsledku přechodových dějů při přepínání systémových činností, nebo riziko dané možným úderem blesku. [10]

### 4.3.5 Pracovní charakteristiky

V této zkoušce se měří ztráty transformátoru. Skládá se z dílčích zkoušek, které jsou: měření ztrátového a budícího proudu na prázdno, měření ztrát při zatížení, měření odporu vinutí a zkoušky na oteplení. [10]

### 4.3.6 Ostatní zkoušky

Mezi ostatní zkoušky patří zkratové zkušební zkoušky. Tyto zkoušky vystavují transformátor nejhorším provozním podmínkám, jsou například vyvolávané poruchové proudy a možné poruchy. Při těchto testech je potřeba brát zřetel na izolaci transformátoru, která je vystavována těmto nepříznivým podmínkám. Mezi ostatní zkoušky patří i speciální zkoušky, které jsou:[10]

- Přetěžování teplotních průběhů
- Odebírání a testování vzorků oleje
- Rozšíření ztrátových zkoušek naprázdno
- Měření nulové impedance
- Zkouška odboček
- Zkouška zkratové odolnosti
- Zkouška proudového poruchového zatížení
- Zkouška elektrického frekvenčního šumu
- Zkouška funkčnosti.

## 4.4 Zkoušky pro HVDC transformátory

HVDC transformátory se musí dle platných mezinárodních norem podrobit speciálním zkouškám pro ověření provozní funkčnosti a bezpečnosti, dané normy se stále rozvíjí. Samostatné testy: se stejnosměrným napětím, přepínání, bleskové impulzní napětí pokrývají rozsah s různým napěťovým zatížením.[14]

Zkoušky pro transformátory popisuje norma EN 60076. Dodatečné zkoušky pro HVDC transformátory specifikuje norma IEC 61378-2. Mezi běžný test dle ČSN EN 60076



patří: poměry napětí, ztráty a proud naprázdno, odpory vinutí, a pokud je to možné tak impulzní testy. Bleskové impulzní testy, testy tepoty, testy hladin akustického výkonu a testy chladicích systémů jsou popsány v normě EN 60076. Dodatečné zkoušky pro kontrolu parametrů jsou popsány v normě EN 61738-2.[11]

#### 4.4.1 Zkouška DC napětového zdroje

Vhledem ke změně odporu v závislosti na teplotě musí tato zkouška být prováděna za teploty  $20 \pm 10$  °C. Transformátor musí být 2 hodiny uzemněn pře použitím zkušební napětí, které má kladnou polaritu a je připojeno na svorky transformátoru. Svorky, na které není připojeno zkušební napětí, se uzemňují. Přivedené zkušební napětí je udržováno 2 hodiny. Výboje jsou sledovány po celou dobu zkoušky. Zkouška se považuje za vyhovující, pokud za posledních 30 minut nemá více než 30 pulsu 2 nC a ne více než 10 z nich v posledních 10 minutách.[11]

#### 4.4.2 Zkouška obrácené polarity

Stejně podmínky pro teplotu a uzemnění transformátoru 2 hodiny před zkouškou jako u zkoušky DC napětového zdroje. Zkouška se provádí ze dvou změn polarit. První zkušební napětí je připojeno se zápornou polaritou a je připojeno 90 minut, poté je dojde k obrácení polarity zkušební napětí a je také připojeno 90 minut. Druhá změna je provedena stejným způsobem, ale zkušební napětí je připojen 45 minut. Obě změny polarity musí být provedeny během 2 minut. Částečné výboje musí být sledovány po celou dobu zkoušky. Zkouška se považuje za vyhovující, pokud není více než 30 pulsů 2 nC do 30 minut od každé změny polarity a ne více než 10 z nich v posledních 10 minutách.[11]

#### 4.4.3 Provozní proud při zátěži

Účelem zkoušky je ověření proudové kapacity. Zkouška se provádí při provozu při plném zatížení transformátoru. Norma IEC 61378-3 určuje ztráty ve vinutí, které vznikají přivedením sinusového proudu. Používají se senzory s optickými vlákny, aby se zabránilo problémům s tepelnými účinky na vinutí, které jsou vyšší než při běžném provozu. Vzorky

olejů se odbírají před oteplením oleje, když olej má provozní teplotu a když olej opět zchladne. Na vzorcích se provádí dielektrické testování.[11]

## **4.5 Monitoring**

Většina transformátorů je vybavena ochrannými systémy, aby nedošlo k poškození transformátoru, nebo jiného zařízení. Mezi ochranné prvky patří: transformátory proudu, spínací relé, plynové a olejové relé, ukazatel teploty oleje a vinutí. Tyto systémy jsou společné pro výkonové a některé distribuční transformátory. Monitoring je většinou zaměřen na strategicky důležité transformátory například i HVDC konvertorové transformátory. Hlavním účelem monitoringu je předcházet poruchám transformátorů a následným výpadkům sítí.[5]

### **4.5.1 On-line monitoring pro HVDC transformátory**

Úkolem monitoringu je zajištění správné funkce a životnosti HVDC transformátoru. Monitoring napomáhá předcházení poruch u transformátorů. Nebo může sloužit k jejich rychlejší identifikaci. [16]

#### **4.5.1.1 Systém včasného varování**

Systém kontroluje vodík v oleji, který zhoršuje jeho izolační vlastnosti. Pro kontrolu využívá systém kalibrované snímače. Společně s měřením teploty oleje a proudu zátěží je signál ze snímačů pro kontrolu vodíku v oleji používán pro základní přehled o stavu transformátoru. [16]

#### **4.5.1.2 Plynová analýza**

Systém analyzuje plyn v oleji. Napomáhá určit povahu poruchy, nebo ji předchází. Slouží tedy k indikaci, nebo pozdější identifikaci poruchy. V závislosti na vážnosti poruchy

může být transformátor v provozu po připojení odplynovacího zařízení. [16]

#### **4.5.2 Systém pro monitorování průchodek**

Analyzuje se proud, který zastupuje kapacitu a ztrátový výkon průchodky. [16]

#### **4.5.3 Systém pro měření částečných výbojů**

Systém měří částečné výboje v provozu, i při výrobě HVDC transformátorů, tato technologie je ve fázi výzkumu. Pro AC transformátory se systém běžně používá. [16]

## **Závěr**

Bakalářská práce pojednává o HVDC transformátorech a HVDC technologii. Kvůli rostoucí potřebě elektrické energie se u HVDC technologie předpokládá velký růst. Kvůli svým technickým výhodám. Mezi tyto výhody patří přenos elektrické energie na velké vzdálenosti s nízkými ztrátami, ovladatelnost a snadné řízení přenášeného výkonu. Přenos elektrické energie na velké vzdálenosti je výbornou variantou pro podmořské vedení. Mezi nespornou výhodou patří propojování AC sítí, které jsou asynchronní, protože HVDC systém lze použít pro jakékoliv AC vedení. HVDC vedení také může pracovat na velkých napěťových úrovních např. 800 kV, což umožňuje přenos velkých výkonů. Nevýhoda technologie je pořizovací cena.

HVDC konvertorové transformátory jsou náročnější na výrobu, zejména nároky které se kladou na izolační systém z důvodu AC a DC namáhání na speciální vinutí. Velké nároky se kladou i na komponenty HVDC transformátoru například průchodek, protože většina z nich pracuje na velkých napěťových hladinách např. 800 kV. HVDC transformátory mají obvykle velké rozměry, z toho plyne, že při projektování se musí brát v úvahu nároky na nádobu transformátoru a způsob dopravy, protože HVDC transformátory se většinou nachází v oblastech s omezenou infrastrukturou.

V práci jsou nadále uvedeny HVDC systémy, které jsou již v provozu, nebo budou do provozu uvedeny. Z uvedených HVDC systémů je patrný rozvoj HVDC technologie a oblasti použití. Některé systémy slouží pro dodávku elektrické energie, jiné pro propojení asynchronních sítí, nebo slouží pro zabezpečení dodávky elektrické energie, tedy jako záložní síť. Nebo mohou mít kombinaci těchto použití. Závěr práce je věnován diagnostice transformátorů se zaměřením na HVDC transformátory. Z toho je patrné, že transformátory se testují i v průběhu výroby. Transformátory jsou podrobovány řadě zkoušek pro ověření funkčnosti, aby mohla být zajištěna dlouhá životnost transformátoru. Mezi zkoušky HVDC transformátoru například patří zkouška napěťového zdroje, zkouška obrácené polarity, provozní prou při zátěži.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PG MLPT HVDC Brochure (English - pdf - Brochure). ABB. [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/transformers/power/hvdc-converter>
- [2] ADENSAM, Tomáš. *Moderní technologie pro přenos elektrického výkonu*. Pleň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] HVDC. ABB. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc>
- [4] HVDC. ALSTOM. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/grid/produits-et-services/Solution-d-ingenierie-electrique/systemes-de-transport-HVDC/>
- [5] ABB. *Transformer Handbook*. Švýcarsko, 2004.
- [6] WIMMER, Dr. René. HVDC Transformers - Siemens. HVDC Transformers. 2014, s. 35.
- [7] PAN, Jiuping, Reynaldo NUQUI, Kailash SRIVASTAVA, Tomas JONSSON, Per HOLMBERG a Ying-Jiang HAFNER. AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery. 2008, s. 7.
- [8] CARLEN, Martin a Patrick ROHAN. ABB REVIEW. 2012. Dostupné z: [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)
- [9] MIČKA, Dominik. *Model HVDC spojky pro laboratorní výuku*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně
- [10] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, c2004, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-1704-5.
- [11] HEATHCOTE, Martin J a D FRANKLIN. *The J: a practical technology of the power transformer*. 13th ed. Burlington, MA: Newnes, c2007, xiv, 974 p. ISBN 978-075-0681-643.
- [12] Transformers for HVDC Transmission Systems. SIEMENS. [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: [https://www.cee.siemens.com/web/slovakia/sk/corporate/portal/produkty/divizie/energetika/ponuka/transformatory/Pages/transformatory\\_jednosmerne\\_vvn\\_prenosove\\_systemy.aspx](https://www.cee.siemens.com/web/slovakia/sk/corporate/portal/produkty/divizie/energetika/ponuka/transformatory/Pages/transformatory_jednosmerne_vvn_prenosove_systemy.aspx)
- [13] Výkonové transformátory a tlumivky. ALSTOM. [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/czech-republic/cs/products-and-services/grid-produkty/>

- [14] brozura-transf-pre-jednosmerne-en\_2000001263939
- [15] HVDC. SIEMENS. [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc>
- [16] W. McDermid, D. H. Grant, A. Glodjo and J.C. Bromley, " Analysis of Converter Transformer Failures and Application of Periodic On-Line Partial Discharge Measurements", Proceedings EIC/EMCW, Cincinnati, Ohio, Oct 2001.