

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysokonapěťové stejnosměrné izolační systémy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef RAJTMAJER**

Osobní číslo: **E16N0023P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Vysokonapěťové stejnosměrné izolační systémy**

Zadávací 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 současný stav vysokonapěťových izolačních systémů v rozdělení na střídavé a stejnosměrné systémy napětí
2. Proveďte analýzu současného využití kompozitních izolačních prvků v systémech AC a DC napětí v přenosových a distribučních systémech
3. Proveďte rešerši technických požadavků na kompozitní izolační prvky v přenosových a distribučních systémech AC a DC napětí
4. Popište diagnostické metody využitelné v oblasti prokazování technické způsobilosti kompozitních izolačních prvků v přenosových a distribučních systémech AC a DC napětí



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
2. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
3. Elektronické informační zdroje, Databáze Sciecedirect, Wiley Interscience, Ieeexplore
4. Bouda, V.: Materiály pro elektrotechniku, ČVUT 2000
5. High Voltage Engineering and Testing, Hugh M. Ryan, 2013

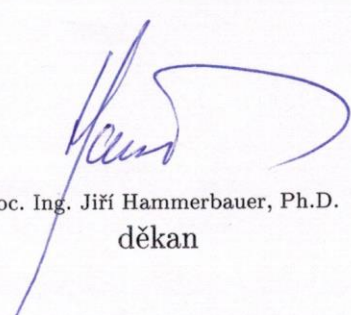
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Pihera, Ph.D.


Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na popis vysokonapětových stejnosměrných izolačních systémů. Pro ucelenost tématu je také představen vysokonapětový stejnosměrný přenos HVDC, od popisu technologie po konkrétní funkční instalace. Další část klade důraz na popis současných elektrických izolací. Konkrétně jsou popsány kabelové izolace a izolátory pro přenosová vedení AC i DC. Druhá polovina práce se zabývá popisem elektrických i neelektrických vlastností a technických požadavků na izolační prvky. Závěr práce je pak věnován diagnostickým metodám zkoumajícím jejich technickou způsobilost.

Klíčová slova

Izolační systém, přenos elektrické energie, HVDC, stejnosměrný přenos, kabely, izolátory, XLPE, kompozity, elektrické vlastnosti, diagnostické metody

Abstract

The diploma thesis is focused on description of High-Voltage Direct Current insulating systems. For the compactness of the topic is also introduced a High-Voltage DC transmission, from the description of the technology to the specific functional installation, The following part emphasizes the description of current electrical insulating systems. Specifically, cable insulation and AC and DC transmission lines insulators are described. The second half of the thesis deals with the description of electrical and non-electrical properties and technical requirements for the insulating elements. The conclusion of the thesis is then dedicated to diagnostic methods examining their technical capability.

Key words

Insulating system, power transmission, HVDC, Direct Current transmission, cables, insulators, XLPE, composites, electrical properties, diagnostic methods

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 19.5.2018

Bc. Josef Rajtmajer

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Piherovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 HISTORIE	14
2 STEJNOSMĚRNÉ VYSOKÉ NAPĚTÍ - HVDC	16
2.1 VÝHODY STEJNOSMĚRNÉHO PŘENOSU.....	16
2.2 NEVÝHODY STEJNOSMĚRNÉHO PŘENOSU.....	17
2.3 KONFIGURACE HVDC	18
2.3.1 <i>Monopolární</i>	18
2.3.2 <i>Bipolární</i>	18
2.3.3 <i>Systém s více terminály</i>	19
2.3.4 <i>Back to Back systém</i>	19
2.4 TECHNOLOGIE HVDC.....	20
2.4.1 <i>HVDC Classic</i>	20
2.4.2 <i>HVDC Light</i>	20
2.4.3 <i>HVDC Ultra</i>	20
3 PRVKY ROZVODNY STEJNOSMĚRNÉHO VEDENÍ	21
3.1 MĚNIČOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	21
3.2 MĚNIČE.....	21
3.2.1 <i>LCC – Síťově komutovaný proudový zdroj</i>	22
3.2.2 <i>VSC – Přirozeně komutovaný napěťový zdroj</i>	22
3.3 VYHLAZOVACÍ TLUMIVKY.....	23
3.4 FILTRY.....	23
4 ELEKTRICKÁ VEDENÍ	24
4.1 STRÍDAVÉ ELEKTRICKÉ VEDENÍ	24
4.1.1 <i>Nadzemní vedení</i>	24
4.1.2 <i>Podzemní vedení</i>	25
4.2 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKÉ VEDENÍ	25
4.2.1 <i>Nadzemní vedení</i>	25
4.2.2 <i>Podzemní kabely</i>	26
4.2.3 <i>Podmořské kabely</i>	27
5 NAPĚŤOVÉ HLADINY	28
5.1 NAPĚŤOVÉ HLADINY PRO HVDC.....	30
5.1.1 <i>Příklady HVDC vedení</i>	32
6 VYSOKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY	34
6.1 IZOLACE KABELŮ.....	34
6.1.1 <i>Impregnovaná izolace</i>	34
6.1.2 <i>Extrudovaná polymerní izolace</i>	37
6.1.3 <i>GIL – Plynem izolované vedení</i>	39
6.2 IZOLÁTORY.....	40
6.2.1 <i>Keramické izolátory</i>	42
6.2.2 <i>Skleněné izolátory</i>	43
6.2.3 <i>Kompozitní izolátory</i>	45
6.2.4 <i>Hybridní izolátory</i>	47

7	VLASTNOSTI A TECHNICKÉ POŽADAVKY KOMPOZITNÍCH IZOLAČNÍCH PRVKŮ	48
7.1	KOMPOZITNÍ IZOLAČNÍ PRVKY	48
7.2	ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI.....	51
7.2.1	<i>Elektrická pevnost</i>	51
7.2.2	<i>Dielektrické ztráty</i>	52
7.2.3	<i>Relativní permitivita</i>	53
7.2.4	<i>Dielektrická vodivost</i>	54
7.2.5	<i>Elektrický odpor</i>	55
7.2.6	<i>Prostorový náboj</i>	55
7.2.7	<i>Částečné výboje</i>	56
7.2.8	<i>Odolnost proti elektrickému oblouku</i>	58
7.3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	58
7.3.1	<i>Pevnost v tahu</i>	58
7.3.2	<i>Pevnost v tlaku</i>	58
7.3.3	<i>Pevnost v ohybu</i>	59
7.4	OSTATNÍ VLASTNOSTI	59
7.4.1	<i>Navlhavost a nasákavost</i>	59
7.4.2	<i>Teplotní požadavky</i>	59
7.5	STÁRNUTÍ IZOLACE	60
8	VYBRANÉ DIAGNOSTICKÉ METODY	61
8.1	PEA – METODA ELEKTROAKUSTICKÉHO PULZU	62
8.2	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	64
8.2.1	<i>Elektrické metody detekce</i>	66
8.2.2	<i>Neelektrické metody detekce</i>	67
8.3	NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY	68
8.4	MĚŘENÍ REZISTIVITY A VODIVOSTI	69
	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	1

Seznam symbolů a zkratek

ČSN	Československá Státní Norma
EN	Evropská technická norma
AC	střídavý proud (Alternating Current)
DC	stejnosměrný proud (Direct Current)
HVDC	stejnosměrné vysoké napětí (High Voltage Direct Current)
HVAC	střídavé vysoké napětí (High Voltage Alternating Current)
UHVDC	ultra vysoké stejnosměrné napětí (Ultra-High Voltage Direct Current)
LCC	síťově komutovaný proudový zdroj (Line Commutated Converters)
CSC	přirozeně komutovaný proudový zdroj (Current Sourced Converters)
VSC	přirozeně komutovaný napěťový zdroj (Voltage Sourced Converters)
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
SCFF	samoplnitelná olejová izolace (Self Contained Fluid Filled)
MI	tlakem impregnovaná izolace (Mass Impregnated)
GIL	plynem izolovaná vedení (Gass Insulated Lines)
PEA	metoda elektroakustického pulzu (Pulse Electro-Acoustic method)
PVDF	membránový převodník tlaku
PIPS	metoda piezoelektricky indukovaného tlakového skoku
LIPP	metoda laserem indukovaného tlakového pulzu
TP	metoda tepelného pulzu
TSP	metoda tepelného roztažení osvětlením
PP	polypropylen
PE	polyetylen
PVC	polyvinyl-chlorid
XLPE	příčně zesíťovaný polyetylen
EPR	etylenpropylenová guma (Ethylene Propylen Rubber)
SF ₆	fluorid sírový
N ₂	dusík
UV	ultraviolet záření
RTV	za normální teploty vytvrzovaná guma (Room Temperature Vulcanizing)
GFC	kompozit vyztužený skleněným vláknem (Glass Fibre Composite)

SiR	silikonová guma (Silicone Rubber)
EPDM	etylen-propylen dienový monomer
PTFE	polytetrafluoretylen
HTV	za vysoké teploty vytvrzovaná guma (High Temperature Vulcanizing)
LSR	nízkoviskózní silikonová guma (Liquid Silicone Rubber)
LDPE	nízkoviskózní polyetylen (Low Density Polyethylene)
HDPE	vysokoviskózní polyetylen (High Density Polyethylene)
P [W]	elektrický výkon
U [V]	elektrické napětí
I [A]	elektrický proud
Q [J]	Jouleovo teplo
t [s]	čas
R [Ω]	elektrický odpor
L [H]	indukčnost
C [F]	kapacita
E_p [kV]	elektrická pevnost
U_p [kV]	průrazné napětí
d [m]	tloušťka materiálu
h [m]	tloušťka vzorku
P_z [W]	ztrátový výkon
p_z [W/m ³]	měrné dielektrické ztráty
tg δ	ztrátový činitel
ϵ [F/m]	permitivita
ϵ_0 [F/m]	permitivita vakua
ϵ_r [-]	relativní permitivita
ρ [Ω m]	měrný elektrický odpor
ρ_p [Ω m]	měrný povrchový odpor
γ [S/m]	měrná elektrická vodivost

Úvod

Dnešní svět se stává stále více závislým na elektrické energii, což přináší vysoké požadavky na její výrobu, přenos a ukládání. Rostoucí poptávka se musí pokrývat ze stále větších energetických zdrojů, přičemž je kladen stále větší důraz na využívání obnovitelných zdrojů elektrické energie. V roce 2014 shromáždění světových energetických ministerstev (Energy Ministerial gathering) největších světových ekonomických velmocí definovalo deset průlomových energetických technologií [1], od kterých se v budoucnu očekává, že povedou k revoluci v energetickém průmyslu. Součástí tohoto desatera byl stejnosměrný vysokonapětový přenos energie HVDC, vyspělé/pokrokové ukládání energie, ultra efektivní solární elektrárny, vyspělé pobřežní větrné farmy, micro sítě, hybridní energetický systém a internet věcí energetického managementu. Bez pochyby je také to, že tyto nové technologie přinesou nové a striktnější požadavky na elektrické izolační systémy.

Tato práce se zaměřuje právě na popis první zmiňované energetické technologie HVDC a jejich izolačních systémů. Systém vysokonapětového stejnosměrného přenosu elektrické energie je zde představen a jsou popsány základní technické aspekty s tím spojené. Zaměřuje se především na popis jednotlivých systémů, na představení výhod a nevýhod stejnosměrného přenosu elektrické energie a na popis prvků rozvodu stejnosměrného vedení. Dále jsou zde ukázány možnosti přenosu elektrické energie na dlouhé vzdálenosti, jako je přenos pomocí venkovního vedení a přenos pomocí vysokonapětových podzemních či podmořských kabelů. Současně jsou uvedeny i některé příklady již existujících světových HVDC elektrických vedení.

Hlavním úkolem práce je však představení vysokonapětových izolačních systémů, jak pro střídavé systémy, tak pak především pro systémy stejnosměrné. Je pravdou, že v současné době nejsou přílišné rozdíly v izolačních systémech obou forem přenosu napětí, proto je důraz kladen převážně na popis základních vysokonapětových izolací. Jako základní izolační systémy vysokonapětových přenosových vedení jsou vybrány izolace kabelů a izolátory venkovních vedení. Z kabelových izolací jsou zde popsány klasické papírové impregnované izolace, stále více se rozmáhající polymerní extrudované izolace, ale i méně rozšířené plynem izolované kabelové systémy. Vodiče venkovních vedení nepotřebují vlastní izolaci, proto jsou zde základním izolačním prvkem izolátory, které elektricky oddělují vodič a konstrukční části stožárů elektrického vedení. Pozornost je věnována jak dnes už klasickým keramickým a skleněným izolátorům, tak i modernějším

kompozitním izolátorům. Jsou popsány jejich výhody a materiály, z nichž se izolátory vyrábějí.

Kompozitní materiály pro elektroizolační využití jsou dalším tématem práce. Stručně je zde sepsáno současné využití kompozitních izolačních prvků a následně jsou přestaveny vlastnosti a technické požadavky. Vlastnosti a technické požadavky jsou opět brány z obecného hlediska pro AC i DC systémy. Proto jsou zde popsány vlastnosti jako elektrická pevnost izolace, elektrický odpor, dielektrické ztráty, ale také velmi důležité vlastnosti, které se týkají hrozeb vysokonapětových izolačních systémů a jejich správného a bezchybného fungování. Tím jsou na mysli hlavně problémy s částečnými výboji, s vodivostí izolace a se vznikem prostorového náboje. Pro úplnost jsou ještě doplněny požadavky na mechanickou a tepelnou odolnost.

Na závěr jsou popsány vybrané diagnostické metody pro zkoumání stavu elektrické izolace. Obecně jsou popsány metody diagnostiky částečných výbojů a metody napětových zkoušek. Z ostatních diagnostických metod byla vybrána metoda elektroakustického pulzu PEA, zabývající se zkoumáním rozložení prostorového náboje v dielektriku, který je významným problémem především u polymerních izolací stejnosměrných kabelů. Dále pak měření elektrické rezistivity a vodivosti izolačních materiálů. Dielektrická vodivost totiž představuje velký problém u všech izolací, proto jsou stále zkoumány její příčiny a možnosti jejího omezení.

1 Historie

Počátky pokusů s přenosem stejnosměrného proudu sahají až ke konci 19. století, kdy Werner von Siemens (1816 - 1892) vyřešil nedostupnost zdrojů stejnosměrného napětí sestrojením prvního dynama. Tento vynález vedl k možnosti výrazného navýšení výkonu generátorů, a tak bylo umožněno zavedení průmyslové výroby elektřiny a její hromadné distribuce. Problém nastal poté, co vznikl požadavek na přenos elektrické energie na delší vzdálenosti. To vyžadovalo navýšení přenosové hladiny napětí, které ovšem není u stejnosměrného napětí tak snadné a efektivní, jako tomu je u napětí střídavého. Rovněž se také projevíly nevýhody přenosu stejnosměrného napětí na velké vzdálenosti, kterými jsou především výrazný pokles napětí a vysoké ztráty. Konec 19. století se tedy nesl v duchu souboje stejnosměrného a střídavého proudu. Tento souboj, známý jako „Válka proudů“, se odehrával mezi zastáncem stejnosměrného proudu Thomasem Alvou Edisonem (1847 - 1931) a zastánci střídavého proudu, kterými byli Nikola Tesla (1856 - 1943) a George Westinghouse (1846 - 1914). I přes Edisonovo dlouholeté prosazování stejnosměrného proudu bylo v roce 1893 stvrzeno vítězství střídavého proudu výstavbou elektrárny na Niagarských vodopádech. O té doby se pro přenos elektrické energie používalo výhradně střídavé napětí. [2] [3]

I přes dobře známé výhody přenosu střídavého proudu nadále probíhaly testy stejnosměrných systémů. Nejvýznamnějším badatelem v této oblasti se stal Švýcar René Thury (1860 - 1938), známý jako „Král DC“, který ve 20. a 30. letech minulého století přišel se stejnosměrným systémem dodávajícím výkon 20 MW o napětí 125 kV na vzdálenost přes 230 km. Přenos stejnosměrného proudu se dále rozvíjel díky sestrojení rtuťových usměrňovačů, které nahradily do té doby převážně používané rotační měniče. Finální rozvoj stejnosměrného přenosu přineslo sestrojení tyristorových a tranzistorových měničů umožňujících snazší změnu hladiny napětí u stejnosměrných systémů. [3]

Zvrat v pohledu na přenos vysokého stejnosměrného napětí přineslo spuštění první komerční HVDC linky ve Švédsku. V roce 1954 zde byl položen podmořský kabel s kapacitou 20 MW při napětí 100 kV, který spojoval švédské pobřeží s 96 km vzdáleným ostrovem Gotland. [4]

Od té doby bylo realizováno několik dalších dálkových HVDC vedení po celém světě. Tato vedení nejčastěji spojují pevninu a odlehlé ostrovy s nedostatečnou výrobní kapacitou elektrické energie, jako je například pomořský kabel spojující australské pobřeží s Tasmánií. Kabel o délce 290 km pracující na napětové hladině 400 kV je nejdelším HVDC podmořským kabelovým vedením na světě. HVDC systémy se používají i pro venkovní vedení a to především v místech, kde je potřeba spojit velmi odlehlé zdroje elektrické energie s oblastmi s velkou spotřebou. Takové venkovní vedení může dosahovat délky až několika stovek kilometrů a přenášet výkony o stovkách až tisících MW. Například systém přenášející vodní energii mezi provinciemi Kung-tung a Jün-nan v Číně pokrývá přenosovou vzdálenost téměř 1500 km a pracuje s přenosovou kapacitou 5000 MW při napětí 800 kV [5]. Další systémy pracující na napětových hladinách UHVDC jsou uváděny do provozu v Americe, Kanadě a Číně. Systémy s přenosovou kapacitou téměř 7000 MW dokáží přenést elektrickou energii na vzdálenost více než 2000 km se ztrátami menšími než 10 procent. [3] [6]

2 Stejnosměrné vysoké napětí - HVDC

Vysokonapětový přenos stejnosměrného proudu, neboli HVDC (z anglického High-Voltage Direct Current), je systém umožňující přenos velkého množství elektrické energie na velké vzdálenosti. HVDC systémy mohou pracovat jak s podzemním nebo podmořským vedením, tak i s vedením venkovním. Rozšíření stejnosměrného přenosu elektrické energie je způsobeno hlavně kvůli budování zdrojů elektrické energie ve stále odlehlejších místech, kde je možnost plošnějšího využití obnovitelných zdrojů energie. Významným faktorem je také fakt, že obnovitelné zdroje energie produkují stejnosměrné napětí, proto není potřeba napětí převést na střídavé a dále transformovat, čímž se eliminuje vznik dalších ztrát. Především ale díky lepším přenosovým vlastnostem vysokého stejnosměrného napětí na dlouhé vzdálenosti se jedná o ekonomičtější alternativu ke klasickým střídavým přenosům.

Vedení pro přenos stejnosměrného vysokého proudu na velké vzdálenosti má v porovnání se stejnými vedeními pro přenos střídavého proudu své výhody i nevýhody.

2.1 Výhody stejnosměrného přenosu

Nižší ztráty - V porovnání se střídavými přenosovými systémy mají stejnosměrné systémy nižší ztráty. S rostoucí přenosovou vzdáleností se tento rozdíl ještě zvětšuje. Například pro 2000 km dlouhé vedení na napětíové hladině 800 kV jsou ztráty přibližně 5 %, zatímco ztráty na stejně dlouhém střídavém vedení jsou při napětíové hladině 765 kV až 10 %. [7]

Vyšší účinnost – Nižší ztráty na vedení samozřejmě znamenají vyšší účinnost dálkových stejnosměrných přenosových systémů. Tyto systémy mohou přenášet vyšší výkony s nižšími ztrátami, než ekvivalentní střídavá vedení [8].

Nižší náklady – I přes vyšší náklady na koncové stanice stejnosměrných přenosových systémů, se od určité vzdálenosti vedení tyto náklady smazávají a celkové náklady na dlouhá stejnosměrná vedení jsou mnohem nižší, než náklady na vedení střídavá. Vzdálenost, od které jsou stejnosměrné systémy výhodnější, je přibližně 600 – 800 km u venkovních vedení,

u podmořských kabelů se jedná o výhodnější řešení už od vzdálenosti 50 km [9]. Nižší náklady jsou spojeny především s možností použití pouze jednoho přenosového kabelu s dvěma vodiči, oproti ekvivalentním střídavým vedením, která vyžadují tři kabely každý se třemi vodiči. [7]

Vyšší stabilita přenosové soustavy – Běžné dvoupólové uspořádání vodiče umožňuje při poruše jednoho vodiče provoz vedení o poloviční kapacitě. S tím je spojená i snadná kontrola nad tokem energie. [2]

Ovladatelnost soustavy - HVDC technologie je založena na konstantním přenosu výkonu, což je důležitý faktor pro distribuci energie skrz přenosovou síť. Možnost automatického ovládání linek HVDC pomáhá rozdělení toku energie přes klasická střídavá vedení. To výrazně pomáhá při výkonových výkyvech, ke kterým může dojít v důsledku nestálého a nepravidelného přísunu energie z obnovitelných zdrojů. [9]

Možnost propojení asynchronních sítí – Pomocí HVDC lze propojit asynchronní sítě pracující na rozdílných frekvencích. [9]

Žádná technická omezení na délce vedení - Při přenosu na velké vzdálenosti je HVDC systém jedinou ekonomickou volbou. Střídavé systémy jsou totiž omezeny maximální přenosovou vzdáleností z důvodů přenášení jalového výkonu a kapacitě vedení. [9]

Ekologičnost – Vzhledem k potřebě nižšího počtu kabelů jsou vedení nejen méně ekonomicky náročná, ale také ekologicky přívětivější. Venkovní vedení zabírá menší prostor s čímž je spojeno i menší ochranné pásmo v okolí vedení. Nehledě na to, že HVDC vedení se často umísťuje pod povrch, kde kabely neruší ráz přírody.

2.2 Nevýhody stejnosměrného přenosu

Nevýhodné na krátké vzdálenosti - HVDC systémy jsou velmi neekonomické pro krátká vedení. Pořizovací náklady měřičů jsou několikrát vyšší než náklady na transformátory pro střídavé systémy. [2]

Vhodné pouze pro přímá spojení – Náklady na vybudování odboček vedení jsou vysoké z důvodů nutnosti vybudování odbočovacích stanic. [2]

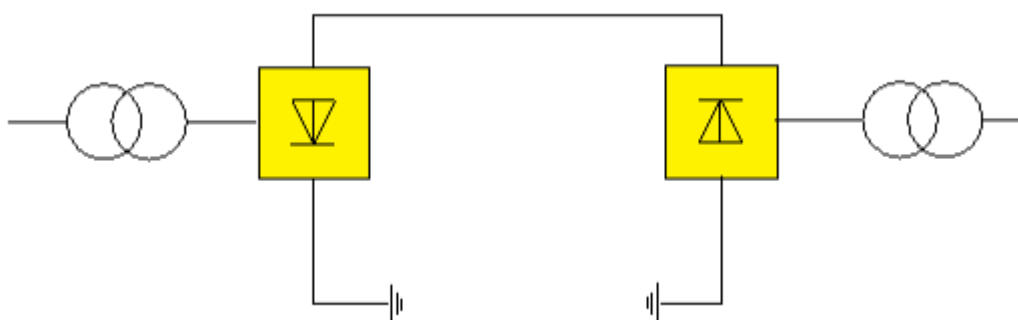
Méně spolehlivé – Ačkoli jsou HVDC systémy pro stabilitu přenosu výhodnější, problémem může být spolehlivost koncových zařízení. Vybavení měření jsou velmi složitá a často může docházet k poruchám.

2.3 Konfigurace HVDC

Systémy HVDC mohou pracovat v několika konfiguracích, které se od sebe liší způsobem transformace a přenosu elektrické energie. Systémy se také odlišují náklady na výstavbu a svojí spolehlivostí. Výchozí stanice propojené těmito technologiemi se nazývají terminály. [10]

2.3.1 Monopolární

Dva terminály spojené touto technologií jsou vybaveny usměrňovači střídavého proudu, které propouští pouze kladnou složku. Kladná složka je vedena kabelem do druhého terminálu, zatímco záporná složka je zpět vedena přes potenciál země či moře nebo metalický kabel. Nevýhodou uspořádání bez zpětného metalického kabelu je přítomnost zemního proudu v okolí terminálu, který může způsobovat korozi kovových konstrukčních částí v okolí. [11]

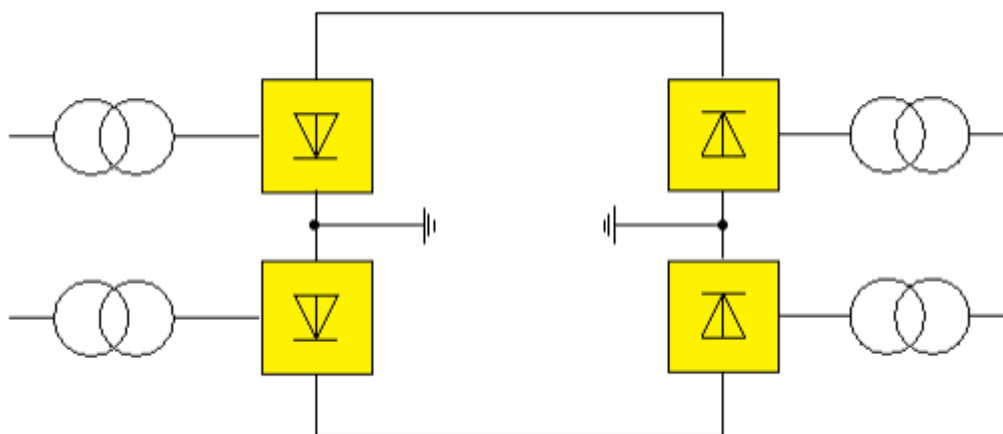


Obr. 2.1-Monopolární technologie
(převzato z [10])

2.3.2 Bipolární

Bipolární rozložení je podobné monopolárnímu. Rozdíl je pouze v tom, že jsou na každém terminálu dva usměrňovače, které propouští proud obou polarit. Každá polarita je

přítom vedena jiným kabelem. To znamená, že takto nakonfigurovaný systém může pracovat i při poruše jednoho vedení jako monopolární systém, dojde pouze k omezení přenášeného výkonu na 50 %. [11]



Obr. 2.2-Bipolární konfigurace
(Převzato z [10])

2.3.3 Systém s více terminály

Jedná se o takzvaný Multiterminal system, tedy systém s více terminály, které jsou mezi sebou propojeny ať už sériově, paralelně nebo kombinovaně. Jedná o nejsložitější systém z hlediska řízení a využití síťově komutovaných měničů kvůli přenášení výkonu oběma směry. [10]

2.3.4 Back to Back systém

Terminál využívající tento systém je vybaven usměrňovačem i střídačem. Proto může být využit pro propojení asynchronních sítí nebo sítí s rozdílnými frekvencemi. Terminál si totiž přivedené napětí nedříve usměrní a následně ho střídačem převede na napětí o požadované frekvenci. Do sítě je tak dodáváno požadované napětí s požadovanou frekvencí. [10]

2.4 Technologie HVDC

HVDC technologie se dělí na tři následující kategorie, lišící se konstrukcí systému a množstvím přenášené energie s ohledem na napět'ové hladiny.

2.4.1 HVDC Classic

Klasický systém používaný pro všechny druhy vedení o napět'ových hladinách do 800 kV. Slouží k přenosu výkonů o stovkách až tisících MW na vzdálenost stovek kilometrů nebo k propojení nezávislých energetických systémů, kde není možné, nebo je ekonomicky nevýhodné pro přenos použít klasické střídavé systémy. Mezi výhody také patří snadná kontrola a ovládání toku energie. Princip HVDC Classic technologie je následující. Do stejnosměrné konvertorové stanice je přivedeno střídavé vedení, jehož energie je usměrněna a vysílána do HVDC vedení. Po průchodu vedením je energie přivedena do střídavé konvertorové stanice, kde je stejnosměrný proud opět převeden na střídavý proud a poslán zpět do klasického střídavé sítě. [9]

2.4.2 HVDC Light

Řešení HVDC Light je v základu stejné jako řešení HVDC Classic. Jedná se tedy o technologii přenosu velkého množství energie na velké vzdálenosti. Ovšem díky použití výhradně jako kabelová podzemní nebo podmořská vedení, přináší systém Light ekologické výhody oproti ostatním systémům. Mezi hlavní výhody patří „neviditelnost“ vedení, neutrální magnetické pole, bezolejové kabely a kompaktní koncové stanice. [9]

2.4.3 HVDC Ultra

HVDC Ultra, neboli UHVDC, je zkratka pro Ultrahigh-Voltage Direct Current, tedy přenos ultra vysokého stejnosměrného napětí. Vedení využívající tuto technologii slouží k přenosu energie o napět'ových hladinách 800 kV a více z velkých a vzdálených zdrojů obnovitelné energie. Příkladem může být přenos elektrické energie z čínské vodní elektrárny Xiangjiaba, která dodává výkon téměř 6500 MW. [9]

3 Prvky rozvodny stejnosměrného vedení

Stejně jako u střídavých typů je potřeba i u stejnosměrných vedení před přivedením energie do samotných vodičů energii nějakým způsobem upravit. K těmto účelům slouží rozvodny, u stejnosměrných vedení nazývané jako měnirny, neboť jejich hlavním prvkem jsou měniče napětí. V závislosti na topologickém umístění měnirny jsou děleny na usměrňovače, na začátku vedení, a na střídače, umístěné na konci vedení.

3.1 Měničový transformátor

Vzhledem k tomu, že většina přenosové sítě je provozována na střídavém napětí, je nezbytnou součástí výbavy měniren měničový transformátor. Jedná se o střídavý transformátor pracující na napěťové hladině střídavé přenosové soustavy, transformující energii na hodnotu napětí požadovanou na vstupu měniče. V koncové měnirně poté měničový transformátor transformuje výstupní napětí měniče na velikost střídavého napětí použitého v navazující distribuční síti.

Měničový transformátor má zpravidla dvě vinutí, přičemž jedno je zapojené do hvězdy a druhé do trojúhelníka. Takovým uspořádáním dochází k eliminaci dominantních harmonických složek na výstupu. Další funkcí měničového transformátoru je galvanické oddělení střídavých a stejnosměrných soustav, naopak nevýhodou je nutnost dimenzování izolace s ohledem na zvýšené namáhání stejnosměrným napětím. [2]

3.2 Měniče

Měniče jsou zařízení sloužící ke změně parametrů elektrické energie, a jak už bylo napsáno v úvodu této kapitoly, lze je dělit do dvou skupin.

Usměrňovače – slouží k usměrnění střídavých proudů na stejnosměrné s využitím různého zapojení polovodičových diod a vlastností jejich PN přechodu. Podle zapojení diody v propustném nebo závěrném směru vzniká stejnosměrný proud o kladné nebo záporné polaritě.

Střídače – už podle názvu je zřejmé, že tento typ měniče převádí stejnosměrný proud na proud střídavý s využitím různého zapojení tyristorů nebo tranzistorových prvků.

Na počátku HVDC přenosů byly používány mechanické **rotační měniče**, což je vlastně soustrojí složené z elektromotoru a generátoru. Později byly mechanické měniče nahrazeny měniči s elektronickými systémy pracující s polovodičovými součástkami.

3.2.1 LCC – Síťově komutovaný proudový zdroj

Technologie LCC (Line-Commutated Converters) bývá také nazývána jako CSC (Current Sourced Converters), jedná se tedy o síťově komutovaný proudový zdroj. První typy LCC měničů používaly pro usměrnění proudu rtuťové usměrňovače, které byly komutovány pomocí střídavé sítě. Nevýhodou byla potřeba synchronní střídavé sítě, stabilní dodávky jalového výkonu a fázového posuvu proudu vůči napětí. Tím se zajistilo správného a silného komutačního procesu. Takové požadavky mohly být zajištěny jen pomocí mohutných kondenzátorů. [10]

V dnešní době byly rtuťové usměrňovače nahrazeny tyristory, které se dokáží přirozeně komutovat a navíc dokáží blokovat přepětí vzniklé v síti. Tyto polovodičové prvky lze jednoduše sepnout do vodivého stavu, pro přechod do nevodivého stavu ale potřebují změnu polaritu ve vnější střídavé síti. Platí tedy, že pokud je potřeba změna toku výkonu, je nutné změnit polaritu napětí v obou koncových měnících. Stále se jedná o prostorově náročné zařízení, protože tyristory je potřeba spojovat do kaskád, které navíc musí být neustále chlazeny. Pro tyto účely se proto musí stavět speciální tzv. ventilové haly, kde je zajištěno vodní chlazení celého zařízení. Jde tedy o systém využívající se převážně pro přenosové systémy Ultra HVDC, kde nejsou tak vysoké požadavky na kompaktnost systému, jako tomu je například u systému HVDC Light. [2]

3.2.2 VSC – Přirozeně komutovaný napět'ový zdroj

VSC (Voltage Sourced Converters) měniče, neboli přirozeně komutovaný napět'ový zdroj, jsou měniče používající tranzistory, nejčastěji IGBT, díky čemuž se mohou sami komutovat. Není tedy potřeba komutace pomocí připojené střídavé sítě. Lze také řídit měnicí cyklus za použití PWM (Pulse Width Modulation – Pulzně šířková modulace), to přináší možnost zapnutí a vypnutí pomocí ovládacího signálu. Spínací frekvence může dosahovat až hodnot 2000 Hz, vyšší frekvence se nepoužívají z hlediska vyšších ztrát. Výhodou je také ovládání amplitudy napětí a úhlu bez ohledu na proud, to znamená možnost produkování a odebrání jalového výkonu dle potřeb synchronní sítě, čímž dochází ke zvýšení její stability. Společně s vyšší stabilitou a schopností měniče „najat z nuly“, jsou tyto systémy

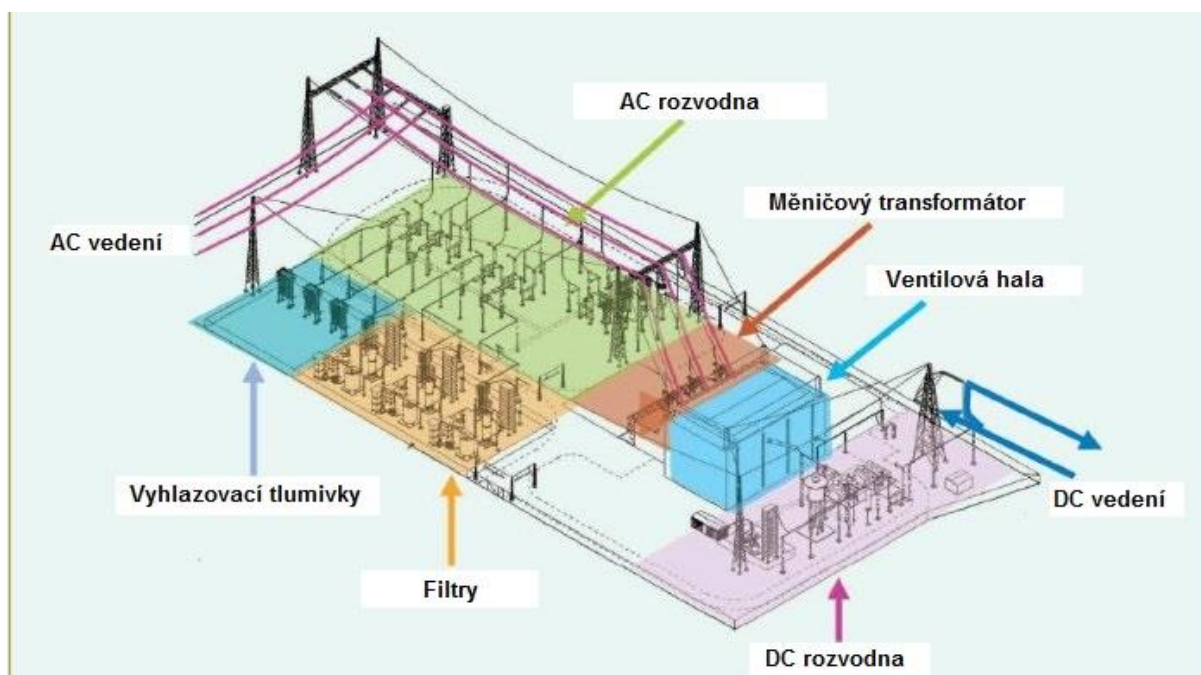
používány pro připojení obnovitelných zdrojů energie, kde dochází k nepravidelným dodávkám energie, které mají nepříznivý vliv na celkovou stabilitu sítě. Odpadající potřeba kompenzovat jalový výkon pomocí kondenzátorů, menší filtry a možnost řízení výkonů snižuje rozměry měníren až na polovinu oproti LCC. Proto je systém VSC využíván především u technologie HVDC Light. [2], [10]

3.3 Vyhlazovací tlumivky

Vyhlazovací tlumivky jsou nezbytnou výbavou měníren HVDC, protože redukují proudové zvlnění na stejnosměrné straně systému. Velikost tlumivek pro HVDC vedení může být 100 až 300 mH, a tak musí docházet k jejich aktivnímu chlazení vzduchem nebo olejem. Dalšími vlastnostmi vyhlazovacích tlumivek jsou omezení přerušovaných proudů, prevence proti rezonanci a potlačení vyšších harmonických složek, což přispívá k omezení rušení. V neposlední řadě tlumivky také snižují hodnotu zkratového proudu. [2], [10]

3.4 Filtry

Další součástí měníren jsou filtry vyšších harmonických, které jsou umístěny na počátečních a koncových stranách vedení. Měníče LCC pracující s tyristorovou technologií, i měniče technologie VSC generují vyšší harmonické průběhy proudu, které mají rušivé účinky na připojenou síť. Úkolem filtrů je zabránit průchodu vyšších harmonických do sítě, aby nedošlo k nežádoucímu rušení. [2]



Obr. 3.1 – HVDC měnírna
(Převzato a upraveno z [12])

4 Elektrická vedení

Elektrická vedení jde jednoduše rozdělit na dva typy. Na vedení distribuční a přenosové. Distribuční vedení jsou téměř výhradně používány na střídavém napětí do 100 kV, neboť při distribuci energie mezi koncové zákazníky je nutné energii často transformovat na nižší napěťové úrovně a to je ve střídavé soustavě snazší. Pro přenosovou soustavu se tento problém smazává a hlavním kritériem pro výběr typu přenášeného napětí se stává přenosová vzdálenost a množství energie.

4.1 Střídavé elektrické vedení

Byl to historický vývoj událostí, který zapříčinil současné využívání střídavého přenosu ve většině elektrických vedení. Tesla totiž dokázal svůj střídavý proud přenášet na větší vzdálenosti s nižšími ztrátami díky snazší transformaci, než tomu bylo u proudu stejnosměrného. AC přenos se tak díky vysoké účinnosti transformátorů začal používat jak pro přenos, tak i pro lokální distribuci. Dalším faktorem byla možnost pohánět třífázové motory, které byly pro průmysl lepší variantou než motory stejnosměrné. V neposlední řadě je důležitý také fakt, že většina klasických zdrojů elektrické energie stále vyrábí střídavý proud.

4.1.1 Nadzemní vedení

Nadzemní AC vedení se využívá pro přenos i distribuci hlavně díky nižším ztrátám a nákladům u krátkých vedení. U napěťových hladin nad 765 kV na trasách delších než 600 km už vyvstávají nevýhody přenosu střídavého napětí. Jednou z nevýhod je nutnost tažení tří vodičů, které musí být zavěšené na izolátorech dimenzovaných na špičkové hodnoty napětí. Nežádoucí je také přítomnost skin efektu, jenž u silnějších vodičů, které jsou efektivnější, neumožňuje vyžití celého průřezu pro přenos proudu. Další nevýhodou je potřeba širokých ochranných pásem v okolí vedení kvůli elektromagnetickému poli a mohutnost použitých stožárů. Ovšem hlavní nevýhodou spojenou s přenosem střídavého napětí na dlouhé vzdálenosti je elektrická kapacita vodičů. Kapacita totiž omezuje, jak rychle reaguje napětí na vzdálenějším konci vedení na změnu napětí na bližším konci. Před samotným průchodem proudu se vodič musí nejdříve nabít, a až pak může proud začít procházet. Kvůli střídající se polaritě proudu u střídavého přenosu se toto nabíjení musí neustále opakovat a u dlouhých vodičů to působí problém se zpoždováním napětí na opačném konci vedení. Zejména pak u kabelových vedení, které mají díky izolaci mnohem

větší kapacitu než venkovní vedení. U vedení pracujících s 50 Hz se napětí změní 100 krát za vteřinu, tzn. vodič se musí také nabít 100 krát za vteřinu. Dlouhá vedení mají ale kapacitu tak obrovskou, že vodič se nestíhá nabíjet a proud pak nemůže prakticky skrz vodič procházet. Takový problém se u stejnosměrného přenosu nevyskytuje, neboť vodič se nabije pouze jednou a proud pak už může bez problémů procházet. [13]

4.1.2 Podzemní vedení

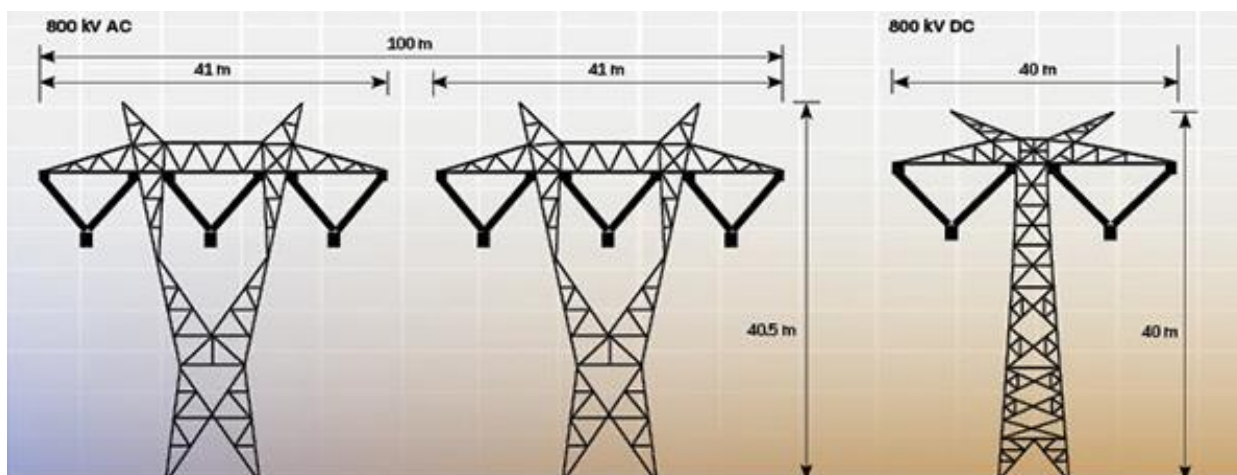
Střídavý přenos se u podzemních vedení příliš neuplatňuje, protože elektrická kapacita vodiče je kvůli přítomnosti izolace a okolní půdy mnohonásobně větší, než je tomu u nadzemního vedení. Problém s nabíjením vodiče se tak objevuje už na mnohem kratších vzdálenostech. AC přenos kabelovým vedením se proto používá jen u kabelů do délky přibližně 50 km. Pro přenos podmořskými kabely se střídavé napětí prakticky nepoužívá.

4.2 Stejnosměrné elektrické vedení

Stejnosměrné HVDC vedení řeší problém s elektrickou kapacitou, protože přechodný efekt nabíjení vodiče je malý a proběhne jen jednou při připojení vodiče ke zdroji [13]. Proud tak může bez problémů procházet i vedením o délce několikaset kilometrů a to i v případě podzemních kabelových vedení, kde je kapacita ještě mnohem větší. Stejně tomu je i u podmořských HVDC kabelů.

4.2.1 Nadzemní vedení

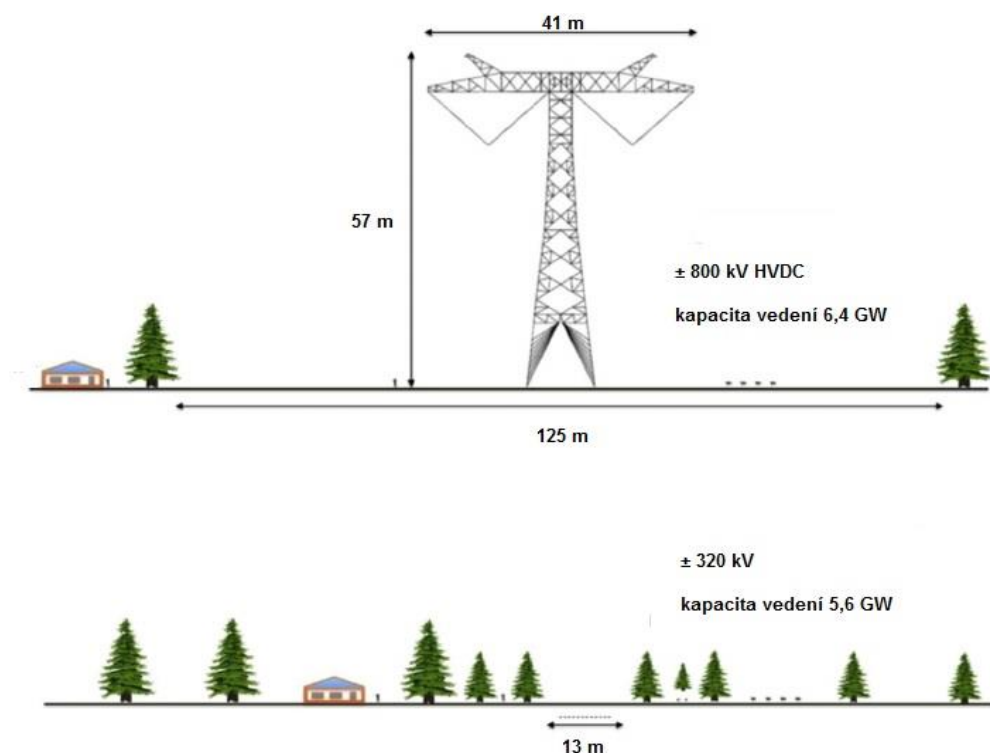
Nadzemní vedení HVDC systémů je stejně jako u střídavých systémů provozováno pomocí venkovních vodičů zavěšených na stožárech elektrického vedení. Ovšem už na první pohled se obě vedení od sebe dost liší. Především počet potřebných vodičů je u stejnosměrných systémů nižší. Například pro jedno bipolární vedení HVDC je potřeba pouze dvou vodičů, oproti tomu pro přenos stejného objemu energie u střídavého systému je potřeba šesti vodičů (viz *Obr. 4.1*). Nadzemní vedení HVDC a UHVDC se využívá pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. Příkladem může být UHVDC bipolární vedení mezi čínskou vodní elektrárnou Xiangjiaba a Šanghají, které na vzdálenost 1980 km přenáší výkon 6400 MW, ± 800 kV [14]. Vysoké napěťové hladiny u systémů HVDC si vyžadují dodržení velkých izolačních vzdáleností mezi vodiči, na druhou stranu potřebné ochranné pásmo okolí vedení je poloviční oproti stejně výkonným střídavým systémům. Je zde také vyšší riziko úderu blesku do stejnosměrného vedení, protože výška stožáru může být od 40 do 90 metrů. Je proto důležité vedení správně odstínit pomocí zemních lan. [10]



Obr. 4.1 - Porovnání stožárů AC a DC vedení
(Převzato z [15])

4.2.2 Podzemní kabely

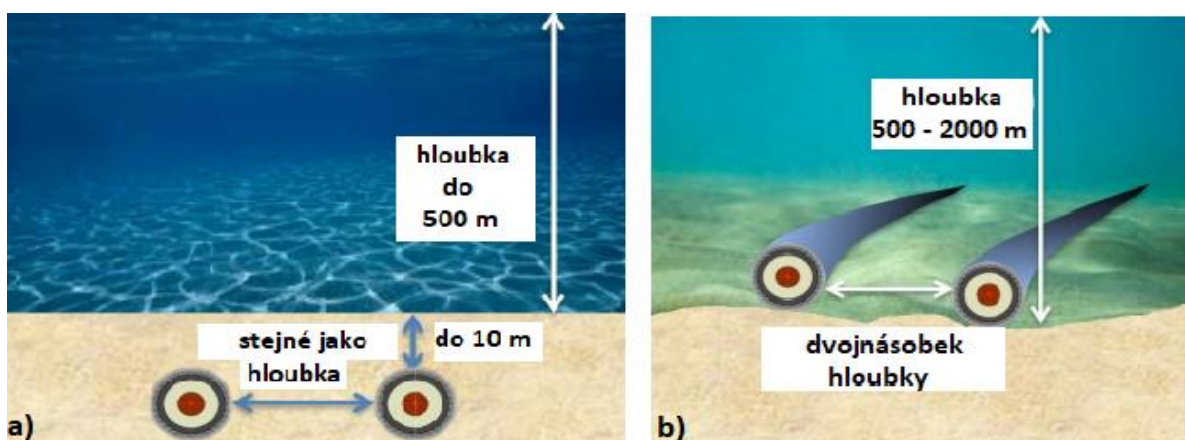
Podzemní HVDC vedení je sice ekonomicky náročnější než vedení nadzemní, především z důvodů vyšších nároků na izolaci a ochranu kabelů, ale v některých případech je použití podzemního umístění kabelů nezbytné. Kabely se ukládají na volno do výkopů, do trubek nebo do kabelových tunelů. Při volném uložení je požadována hloubka okolo 120 cm, vzdálenost mezi dvěma kabely 30 cm a bezprostřední okolí kabelu (± 25 cm) musí být vysypáno pískovou směsí, aby se zajistilo stabilní uložení kabelů a předešlo se mechanickému poškození kameny. Podzemní a podmořské kabely také nelze provozovat na tak vysokých napětových hladinách, jako je tomu u nadzemního vedení. Příkladem může být HVDC Light bipolární podzemní vedení na jihu Švédska, přenášející výkon 660 MW, ± 300 kV na vzdálenost 200 km [16]. Největší výhodou podzemního uložení vedení je šetrnost k přírodě, neboť není potřeba stavět stožáry a vytvářet velké ochranná pásma. Je pravda, že i u HVDC podzemních kabelů je požadavek na určité ochranné pásmo nad uloženým vedením, toto pásmo ale nenabývá takových rozměrů, jako je tomu u nadzemních vedení. Další výhodou jsou nižší provozní náklady, díky například nepřítomnosti námrazy, lepší odolnost proti nepříznivým venkovním podmínkám, s tím spojená vyšší stabilita provozu a v neposlední řadě i snížení intenzity elektrického pole. [17]



Obr. 4.2 - Porovnání ochranných koridorů pro nadzemní a podzemní HVDC vedení
(Převzato a upraveno z [18])

4.2.3 Podmořské kabely

Podmořské HVDC kabely nejčastěji slouží k propojení energeticky nesoběstačných ostrovů s kontinentální pevninou, připojení mořských těžebních plošin nebo pro svod elektrické energie vyrobené v rozlehlých mořských větrných farmách. Kabely spojují pobřežní terminály a jsou tažené po mořském dně. Podkládání kabelů probíhá pomocí speciálně upravené lodi, ze které je kabel pomalu odvíjen a pomocí úložných zařízení je ukládán na mořské dno. Spojování podmořských kabelů je obtížné, nikoli však nereálné.



Obr. 4.3 – Uložení podmořských kabelů, a) hloubka do 500 m, b) hloubka nad 500 m
(převzato a upraveno z [19])

Délka jednoho souvislého kabelu může být až 200 km, celková délka pak může dosahovat až několika stovek km (více viz *Tab. 5.6*). Důležitým faktorem při podmořské instalaci je hloubka, ve které jsou kabely umístěny. Od hloubky se odvíjí způsob ukládání kabelů na mořském dně. Při pokládání v hloubce do 500 m je kabely nutné do mořského dna zakopat, aby nedošlo k případnému mechanickému poškození od rybářského náčiní nebo lodních kotev. Výkop na mořském dně je prováděn pomocí speciálních rypadel, dálkově ovládaných bagrů nebo pomocí vodních tlakových trysek, který v měkkém mořském dně vyhloubí požadovaný zákop. Je možné použít jeden zákop pro více kabelů, pokud jsou ale kabely pokládány jednotlivě, vzdálenost mezi dvěma zákopy musí být minimálně stejně velká, jako je podmořská hloubka uložení. Pro kabely uložené v hloubkách 500 až 2000 m, pokládání ve větších hloubkách by bylo technologicky a ekonomicky příliš náročné, není výkop potřeba. Kabel se jednoduše položí na mořské dno, protože v takových hloubkách se nepředpokládá mechanické poškození od námořní činnosti. Důležité je kabel pokládat správnou rychlostí a pod správným úhlem, aby nedošlo k poškození izolace při samotné instalaci. Vzdálenost mezi jednotlivými kabely je pak v této hloubce minimálně dvojnásobek podmořské hloubky. [19]

5 Napět'ové hladiny

Pro přenos a distribuci elektrické energie byly stanoveny napět'ové hladiny, které podle elektrotechnických norem a předpisů dělí elektrické napětí, v závislosti na velikosti, do následujících napět'ových stupňů: [20]

Tab. 5.1 – Napět'ové hladiny v ČR

	<i>Značka</i>	<i>Napětí</i>	<i>Napět'ové hladiny</i>
Malé napětí	mn	0 – 50 V	24, 48 V
Nízké napětí	nn	50 – 1000 V	230/400, 690 V
Vysoké napětí	vn	1000 V – 50 kV	6, 10, 22, 35 kV
Velmi vysoké napětí	vvn	50 – 399 kV	110, 220 kV
Zvlášť vysoké napětí	zvn	400 – 800 kV	400 kV
Ultra vysoké napětí	uvn	> 800 kV	-

Hladiny do 110kV se používají výhradně pro distribuční soustavu, zatímco hladiny nad 110kV, tedy velmi, zvláště a ultra vysoká napětí, jsou využívány v soustavách přenosových. V zahraničí mohou být napěťové hladiny děleny jinak. Například ve Spojených státech amerických se přenosové napěťové hladiny dělí následovně: [21]

Tab. 5.2 – Napěťové hladiny v USA

<i>Napěťová hladina</i>	<i>Napětí</i>
Low voltage	do 34 kV
Medium voltage	34 kV - 69 kV
High voltage	115 kV - 230 kV
Extra high voltage	345 kV - 765 kV
Ultra high voltage	nad 765 kV

Přenosové soustavy jsou distribučním soustavám nadřazené, neboť zajišťují dálkový přenos elektrické energie na velké vzdálenosti, kdežto distribuční síť rozvádí energii pouze na lokální úrovni. Pro přenosové soustavy se v ideálním případě využívá co nejvyšší možné napětí, protože s rostoucím napětím dochází ke snížení ztrát při přenosu. To platí jak pro přenos vysokého střídavého napětí, tak i pro systémy HVDC. Důvodem je fakt, že i nejlepší vodiče stále kladou elektrickému proudu odpor, kvůli kterému se vodič zahřívá a to způsobuje ztráty. Zvýšení napětí pro přenos je tak žádoucím stavem, protože s rostoucím napětím klesá proud. Pro přenášený pak výkon platí vztah

$$P = U * I \quad (W; V; A) \quad (5.1)$$

a ztráty vzniklé přeměnou elektrické energie na teplo, známé jako Jouleovo teplo, se poté vyjádří ze vztahu

$$Q = R * I^2 * t \quad (J; \Omega; A) \quad (5.2)$$

Ze vzorců je vidět, že například při přenosu výkonu 10 000 W, lze použít malé napětí 10 V, v tom případě bude ale vodičem procházet proud 1 000 A. Naopak pokud bude pro přenos použito napětí 10 000 V, procházející proud bude jen 1 A a tepelné ztráty tak mnohonásobně klesnou díky druhé mocnině proudu ve vzorci pro výpočet Jouleova tepla. [22]

Proto je cílem přenášet elektrickou energii na co nejvyšších napětových hladinách. Střídavé systémy pracují nejčastěji na napětové hladině maximálně 400 kV, ovšem mohou také pracovat na napětových hladinách vyšších. Takovým systémům se poté říká HVAC (High Voltage Alternating Current), neboli vysokonapětový střídavý proud, a přenášená velikost napětí může být až 765 kV. U těchto systémů ale s rostoucí délkou rostou ztráty výrazněji, než je tomu u systémů HVDC. Je to dáno především nutností kompenzovat vzniklý jalový výkon, dále kvůli omezení z hlediska statické stability, elektrické kapacity a problémům spojeným s elektrickým polem kolem vodičů, které je při vysokých napětích tak silné, že vzniká korona. Díky těmto problémům je výhodnější u velmi dlouhých vedení využití HVDC technologie, kde není potřeba kompenzovat jalový výkon a ztráty korunou jsou také nižší. [10]

5.1 Napětové hladiny pro HVDC

Napětové hladiny pro HVDC systémy nemusí být striktně dodržovány, protože přenos probíhá mezi dvěma terminály, kde je stejnosměrné napětí poté stejně převedeno zpět na střídavé napětí požadované v navazující síti. Ovšem s ohledem na ekonomická a technická kritéria, existuje řada napětových hladin, které je doporučeno využívat. Dodržování určitých napětových hladin je především ekonomicky výhodnější. Pokud vedení pracuje s doporučenou řadou napětových hladin, nemusí se vybavení jednotlivých vedení stále upravovat. To přináší užitek už ve fázi plánování, protože není potřeba zaměřovat úsilí na návrh vybavení vedení, které již bylo navrženo pro jiné vedení se stejnou napětovou hladinou. Další výhodou využívání doporučených HVDC napětových hladin je jejich podobnost s napětovými hladinami pro střídavé systémy. Při konverzi napětových hladin podobné velikosti totiž dochází ke vzniku nižších ztrát, než je tomu u více rozdílných hladin. [23]

Doporučené napětové hladiny se liší také v závislosti na typu vedení, protože ne všechny hladiny se mohou používat, nebo jsou výhodné, pro všechny typy vedení. Nadzemní venkovní vedení pracují častěji na vyšších hladinách, napětí do ± 250 kV se tak u tohoto typu spíše nepoužívají. Důvodem je také pořád více rozšířené používání AC přenosu na těchto hladinách a fakt, že nižší napětové hladiny se využívají spíše pro kratší vedení, takže použití HVDC technologie by bylo ekonomicky nevýhodné. Napětí podzemních kabelových vedení může nabývat hodnot do ± 600 kV. Vyšší hodnoty jsou nevýhodné především

z hlediska ceny, neboť podzemní vedení je nutno důkladně izolovat a jsou také kladeny vyšší nároky na odstínění elektrického pole. Problémem může být také zpětné zemní spojení u monopolární technologie, kde se v okolí terminálu vyskytují velké zemní proudy. Na konstrukci a izolaci podmořských kabelů jsou kladeny ještě větší nároky, proto se zde nejčastěji vyskytují napětí do ± 320 kV, výjimečně až ± 500 kV.

Tab. 5.3 – Doporučené DC napětové hladiny [23]

<i>Doporučené DC napětové hladiny</i>
$\pm 100, 150, 200$ kV
± 250 kV
± 320 kV
± 400 kV
± 500 kV
± 600 kV
± 800 kV
± 1100 kV

Samotný výběr napětové hladiny dále záleží na mnoha dalších faktorech. Jedním z nejdůležitějších faktorů při výběru vhodné napětové hladiny je právě forma vedení. Jiné požadavky budou kladeny na nadzemní vedení a jiné zase na podzemní a podmořské kabely. S tím je spojená i délka vedení. Obecně se k návrhu přistupuje tak, že čím delší je vedení, tím vyšší napětová hladina se použije. Vše však musí být bráno s ohledem k nákladům. Dalším důležitým faktorem je již zmiňované napojení na předcházející nebo navazující AC síť a neméně důležitá je také i použitá technologie HVDC koncových stanic. Pro přenos určitého objemu výkonu je nutné také skrz vedení přenášet i velké proudy, které jsou technologií měření omezovány. VSC technologie založená na IGBT tranzistorech je schopná pracovat s proudy do 2000 A, zatímco technologie na tyristorové bázi může pracovat až s proudy okolo 5000 A. Velký vliv při výběru využívaných systémů má také ekologický a estetický dopad vedení na okolní krajinu. [23]

5.1.1 Příklady HVDC vedení

V následujících tabulkách je představeno několik realizovaných projektů elektrického vedení využívající systémy HVDC nebo UHVDC.

S takovými projekty je možné se setkat po celém světě, přičemž největší a nejdelsí projekty jsou realizovány pomocí nadzemních vedení, které nejčastěji spojují velké odlehle zdroje obnovitelné energie s terminály poblíž velkých měst.

Tab. 5.4 – Příklady HVDC nadzemních vedení [24]

<i>Název</i>	<i>Stanice 1</i>	<i>Stanice 2</i>	<i>Délka (km)</i>	<i>Napětí (kV)</i>	<i>Výkon (MW)</i>	<i>Rok</i>
Rio Madeira	Porto Velho (Brazílie)	Araraquara (Brazílie)	2 375	600	7 100	2013
Pacific DC Intertie	Celilo (USA, OR)	Sylmar (USA, CA)	1 362	500	3 100	1970
Yunnan – Guangdong	Yunnan (Čína)	Zengcheng (Čína)	1 418	800	5 000	2010
Xinjiang – Anhui	Wuicaiwan (Čína)	Anhui (Čína)	3 333	1 100	10 000	2018
Hami – Zhengzhou	Hami (Čína)	Zhengzhou (Čína)	2 192	800	8 000	2014

Podzemní systémy nejsou tolik rozšířené a většinou se jedná o systémy menších rozměrů, co se týče délky i použitých napěťových hladin. Využívají se především jako přívod elektrické energie z přepojovacích terminálů do velkých městských aglomerací. Další využití podzemních HVDC kabelů je v oblastech, kde je nepřipustné použití nadzemního vedení z ekologických důvodů.

Tab. 5.5 – Příklady HVDC podzemních vedení [24]

<i>Název</i>	<i>Stanice 1</i>	<i>Stanice 2</i>	<i>Délka (km)</i>	<i>Napětí (kV)</i>	<i>Výkon (MW)</i>	<i>Rok</i>
Murraylink	Red Cliffs (Austrálie)	Berri (Austrálie)	176	150	200	2002
INELFE	Baixas (Francie)	Santa Llogaia (Španělsko)	65	320	1 000	2014
Terranora Interconnector	Mullumbimby (Austrálie)	Bungalora (Austrálie)	59	80	180	2000

Posledním využitím jsou podmořské kabely nejčastěji spojující energeticky nesoběstačné ostrovy s kontinentální pevninou nebo kabely přenášející elektrickou energii přes velké zálivy. Vedení jsou tvořena dvěma pevninskými terminály a kabelovým vedením vedeným po mořském dně. Při využití HVDC podmořského kabelu v menších hloubkách je nutné kabel na mořském dně zakopat, aby nedošlo k případnému poškození lodními kotvami. Dalším častým využitím je spojení mořských větrných farem s pevninou.

Tab. 5.6 – Příklady HVDC podmořských kabelů [24]

<i>Název</i>	<i>Stanice 1</i>	<i>Stanice 2</i>	<i>Délka (km)</i>	<i>Napětí (kV)</i>	<i>Výkon (MW)</i>	<i>Rok</i>
NorNed	Eemshaven (Nizozemsko)	Feda (Norsko)	580	450	700	2008
NordBalt	Nybro (Švédsko)	Klaipéda (Litva)	450	300	700	2015
SAPEI	Latina (Itálie)	Fiume Santo (Itálie)	435	500	100	2011
Basslink	LoyYang, Vic (Austrálie)	George Town (Tasmánie)	370	400	500	2006

6 Vysokonapětové izolační systémy

Izolační systémy pro vysokonapětové stejnosměrné a střídavé přenosy lze v současnosti rozdělit do dvou základních skupin. Pro podzemní a podmořské instalace se uvažují hlavně izolace samotných kabelů, zatímco u nadzemních vedení to jsou hlavně izolační materiály izolátorů. V případě kabelů se jedná o izolace impregnované, jejichž základem je impregnovaný dielektrický papír navinutý na vodivém jádře, a izolace extrudované, které jsou nejčastěji tvořeny různými modifikacemi polymerních sloučenin. Méně rozšířené jsou pak izolace plynové, které se zatím využívají spíše na kratších experimentálních vedeních. Pro izolátory se pak nejčastěji používají materiály jako je keramika a sklo. Přičemž v poslední době se klade velký důraz na rozšiřování kompozitních materiálů.

6.1 Izolace kabelů

Co se týče izolace kabelů, tak ta se se vysokonapětové technice využívá výhradně u podzemních a podmořských kabelů. Nadzemní vedení si vystačí pouze s izolačními vlastnostmi okolního vzduchu. Základní design vysokonapětových izolací je pro AC a DC přenosové systémy, při frekvenci 50 Hz, stejný [25]. Nejvýraznější změnou je potřebná tloušťka izolace, která je pro stejné napětové hladiny vyšší u střídavých systémů. To je dáno nutností dimenzovat izolaci na špičkové hodnoty napětí a ne na střední hodnotu, zatímco u stejnosměrných je hodnota napětí v celém svém průběhu konstantní.

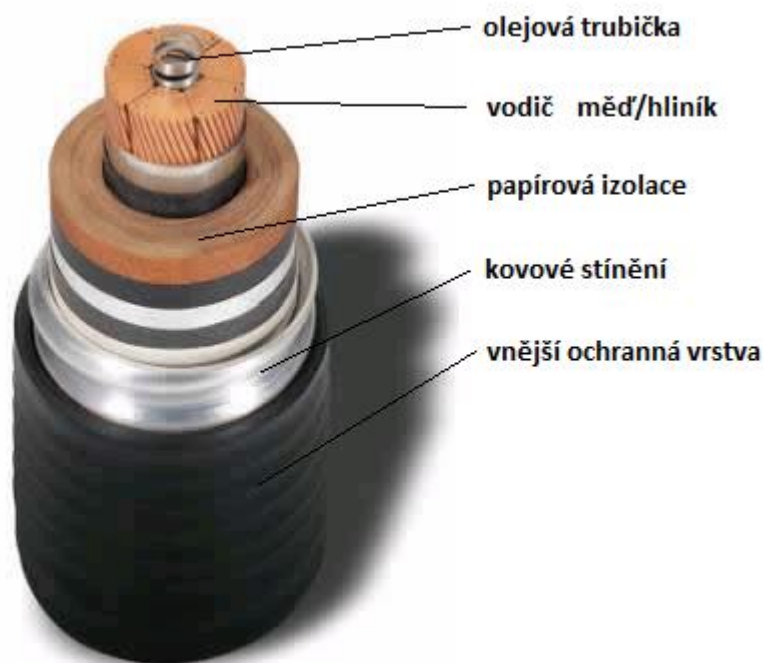
6.1.1 Impregnovaná izolace

Základem impregnovaných izolací je papír, který sám o sobě nemá příliš dobré izolační vlastnosti. Pokud je ale impregnován minerálními nebo syntetickými oleji, jeho izolační schopnosti se výrazně zvětší. V několika na sobě nabalených vrstvách proto může být používán jako izolace pro vysokonapětové instalace. V základu se impregnované izolace dělí na dvě skupiny, SCFF a MI, která se od sebe liší viskozitou použitého oleje.

SCFF – Olejem plněná izolace

SCFF systém (z anglického Self Contained Fluid Filled) lze používat jak pro HVAC tak pro HVDC technologie, ovšem jsou limitovány maximální délkou kabelu, která je přibližně 50 km. Důvodem je potřeba napojení kabelu na zdroj nízko viskózního oleje, který

je do kabelu pumpován. Olej se díky své nízké viskozitě dostane ze středové trubičky až k papírové izolaci, kterou impregnuje. Tím je zajištěno dokonalé vyplnění celého prostoru v jádru kabelu olejem, který společně s vrstvou papíru zajišťuje požadované izolační vlastnosti kabelu. Samotný papír je při výrobě kabelu impregnován a je postupně namotáván na vodivé jádro. Z důvodů vyššího elektrického namáhání, je blíže k jádru kabelu použit tenčí papír s vyšší dielektrickou pevností. S narůstajícím průřezem je možné použít i papír s nižší dielektrickou pevností. Výsledná tloušťka vrstvy papírové izolace pak odpovídá předepsaným izolačním požadavkům dané napěťové hladiny. Napětí přenášené SCFF kabely může dosahovat hodnot až 525 kV. Nevýhodou této technologie je omezená délka, potřeba olejového hospodářství a samotná přítomnost oleje, který může být problémem při případném poškození vnější ochrany kabelu. [26][27]



Obr. 6.1 - Průřez kabelem s SCFF izolací
(převzato a upraveno z [28])

Plyneplněná izolace

Plyneplněná papírová izolace pracuje na stejném principu jako SCFF. Rozdíl je pouze v izolačním médiu, kterým je zde dusík. Ten se do kabelu přivádí pod tlakem a stejně jako olej v SCFF systému vyplňuje mezery mezi vrstvami předem impregnované papírové izolace. [26]

MI – Olejem impregnovaná izolace

Rozdíl v konstrukci MI a SCFF kabelů je pouze v jádru vodiče. MI (z anglického Mass Impregnated) kabel nemá ve středu vodiče olejovou trubičku, kterou by protékal olej. Izolace je zde také papírová, je i stejně stavěná jako v případě SCF systému, ovšem impregnace papírových pásek probíhá až po samotném navinutí na vodivé jádro. Jádro, společně s papírovou izolací, se po dobu několika měsíců impregnuje v lázni vysoce viskózního oleje. Olej pak s papírem vytvoří tuhou neprostupnou vrstvu, která tvoří nejen izolační vrstvu, ale i ochrannou vrstvu pro případ poškození vnější izolace vodiče. Při provozu MI kabelu pak není potřeba olejového hospodářství, které by do kabelu dodávalo potřebný olej, proto není tento typ kabelu nijak konstrukčně omezen, co se týče délky. Dříve se tato technologie používala i pro střídavé kabely, dnes se využívá výhradně pro HVDC systémy v podmořských instalacích. Především díky své prakticky neomezené délce, mechanické pevnosti a možnosti přenášet napětí až 600 kV. [26]



Obr. 6.2 – Průřez kabelem s MI izolací
(převzato a upraveno z [29])

6.1.2 Extrudovaná polymerní izolace

Základem extrudované izolace jsou polymerní materiály, mezi které patří, polyethylen (PE), polypropylen (PP) a polyvinyl-chlorid (PVC), přičemž nejhojněji využívaným polymerem pro vysokonapětové izolace je právě polyethylen. PE je nepolární, termoplastický materiál s nízkými dielektrickými ztrátami, díky čemuž je vhodný pro vysokonapětové izolační systémy. [26]

Extruze je proces, při kterém je za pomoci teploty a tlaku původní materiál roztaven a vytlačen do výsledného tvaru. Vznikne tak kompaktní izolační vrstva, vhodná pro AC i DC systémy. Tloušťka izolační vrstvy se odvíjí od napětové hladiny, na kterou je kabel dimenzován. Na rozhraní mezi vodičem a izolací je ještě nanášena slabá vrstva polovodičového materiálu, která svými elektrickými a mechanickými vlastnostmi přispívá k lepší adhezi jednotlivých vrstev, lepšímu rozložení elektrického pole a zabraňuje vzniku částečných výbojů. Podobná polovodičová vrstva je také na vnější straně izolace, kde zajišťuje lepší přechodové vlastnosti mezi izolací a kovových ochranným štítem kabelu. [30]

Extrudovaná PE izolace se dělí do několika skupin, lišících se přísadami polymerních směsí: [26]

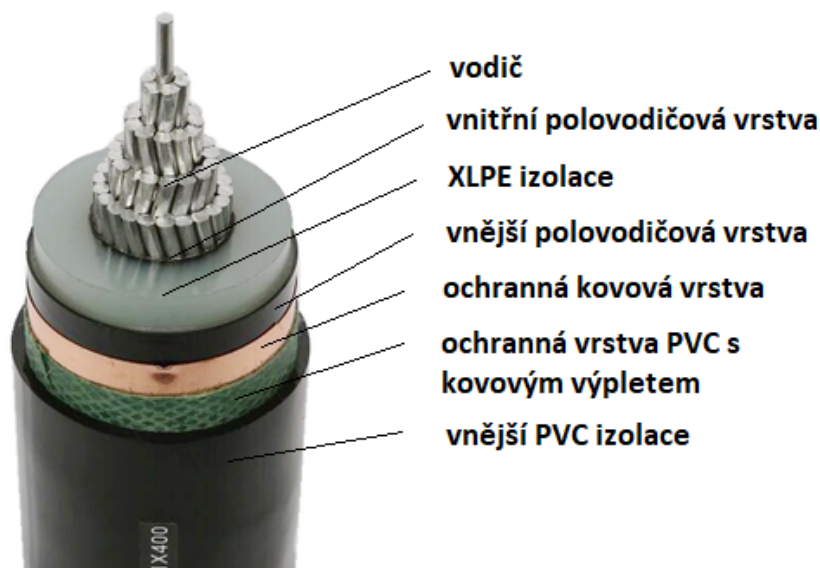
XLPE – Příčně zesíťovaný polyethylen se získá spojením polyethylenu a organického peroxidu za pomoci vysoké teploty a tlaku. Vznikne tak trojrozměrně zesíťovaný polymer, který se podobá reaktoplastům a má dobré fyzikální i chemické vlastnosti. Výsledkem je zvýšená teplotní odolnost, se kterou je spojena i schopnost přenášení vyšších výkonů. XLPE odolává teplotám až 300°C, přičemž během normálních provozních podmínek může být tento systém provozován při teplotách 90°C. Při takovýchto teplotách má XLPE izolace nízké dielektrické ztráty a díky příčnému provázání také nepodléhá tak rychlému stárnutí jako je tomu u obyčejného polyethylenu. Nevýhodou této izolace je lehce pórovitá struktura, která je náchylná k navlhání. To může způsobovat problémy především u podmořských kabelů, kde je tento izolační systém často využíván.

EPR – Zkratka pro Ethylene Propylene Rubber představuje kopolymer ethylenu a propylenu. Jedná se o flexibilnější verzi extrudované izolace, která má horší dielektrické vlastnosti než XLPE. I přes tuto nevýhodu se používá u podmořských instalací, protože stejně jako XLPE izolace dokáže běžně pracovat při teplotách okolo 90°C, tudíž je vhodná pro přenos vysokých výkonů. Navíc díky své struktuře není náchylná na navlhání, proto se

kabely nemusí opatřovat extra ochrannou nepromokavou vrstvou, což samozřejmě snižuje výrobní náklady.

PVC – Měkčený polyvinyl chlorid se díky své nízké ceně a snadné výrobě používá pro izolace nízkého napětí. Oproti XLPE izolaci má termoplastický PVC horší teplotní odolnost, proto není vhodný pro vysokonapětové systémy, kde právě kvůli vyšší teplotě rychleji podléhal stárnutí. Výhodou je ale lepší chemická odolnost a také fakt, že není náchylný k navlhavosti.

Konstrukce extrudovaných kabelů pro AC a DC použití se neliší. Liší se pouze ve výsledné tloušťce izolační vrstvy. Polymerní izolace se může dokonce použít i pro více žilové kabely a není ani problém s implementací optických vláken. Díky vyšší teplotní odolnosti mohou být více elektricky namáhané a jejich velkou výhodou je absence oleje. Podzemní XLPE kabely jsou schopné přenášet napětí až 500 kV. Při použití v podmořských přenosech je možné přenášet až 380 kV AC. Polymerní DC systém může být používán jen ve spojení s VSC technologií bez možnosti reverzace napětí a kvůli přítomnosti prostorového náboje má napětíové omezení. [26]

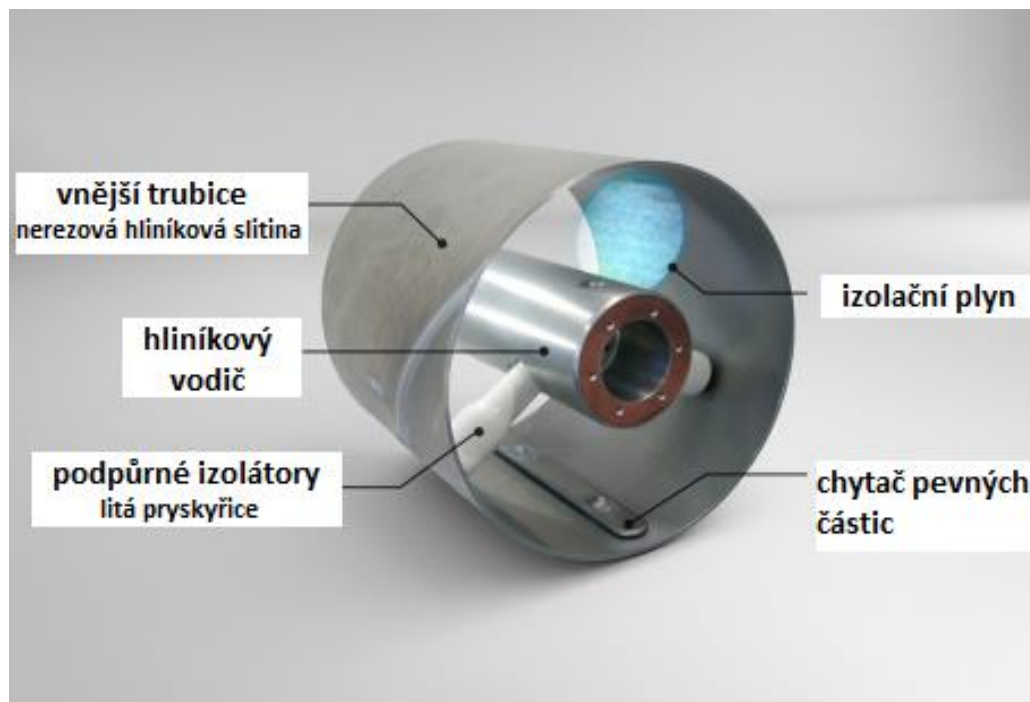


Obr. 6.3 – jednožilový kabel s XLPE extrudovanou izolací
(převzato a upraveno z [31])

6.1.3 GIL – Plynem izolované vedení

Gas-insulated lines – GIL, zatím není příliš rozšířeno. Jedná se o vysokonapětové kabely, přenášející elektrickou energii hliníkovými vodiči, které jsou umístěny v plynem izolované trubici. GIL instalace mohou spojovat dvě nadzemní vedení v oblastech, kde je potřeba vedení na několik set metrů skrýt pod povrch. Příkladem může být 500 m dlouhé HVAC vedení v Mnichově, přenášející energii o napětí 420 kV. Přestože HVDC systémy technologii GIL zatím komerčně nevyužívají, jejich design se od střídavých plynem izolovaných vedení nijak neliší. Díky svým výborným izolačním vlastnostem a díky rostoucímu množství obnovitelných zdrojů energie, především mořských větrných farem, se předpokládá nárůst využití GIL kabelů právě i u stejnosměrných vysokonapětových vedení [32].

Plynem izolované vedení se skládá ze dvou soustředných trubic z nerezové hliníkové slitiny. Vnější uzemněná trubice s poloměrem okolo 500 mm, nese ve svém středu hliníkový vodič ve tvaru mezikruží s vnějším poloměrem 180 mm a průřezem mezikruží 5400 mm². Tento tvar vodiče zajišťuje snížení ztrát skin efektem. Vodič je ve středu trubice držen dvěma podpůrnými izolátory z lité pryskyřice, umístěných v rozmezí 12ti m. Poslední výbavou GIL vedení je chytač pevných částic, který zachytává případné nečistoty. Vnitřní prostor vodiče je vyplněn plynovou směsí skládající se z 20% SF₆ a 80% N₂, udržovanou pod tlakem 0,7 MPa. Celkové vedení se skládá z dvacetimetrových bloků, které je nutné vzduchotěsně spojit. GIL vedení je možné vést na povrchu, pod zemí nebo v industriálních tunelech pod povrchem, tato možnost je brána jako nejvhodnější z hlediska provozu, bezpečnosti a ekologičnosti. Výhodou GIL systému jsou nižší ztráty, než mají systémy s pevnou izolací, malá elektrická kapacita vedení, zanedbatelné elektromagnetické pole v okolí vedení, žádné tepelné stárnutí a vyšší bezpečnost díky plynnému dielektriku, s čímž je spojená i vysoká spolehlivost. [33]



Obr. 6.4 - Průřez plynem izolovaného vedení
(převzato a upraveno z [33])

6.2 Izolátory

Při přenosu elektrické energie pomocí nadzemního vedení nejsou samotné vodiče vysokého napětí opatřeny izolací, hlavními izolačními systémy se zde proto stávají izolátory. Funkcí izolátorů je elektricky odizolovat konstrukčních části stožárů a vodičů, a zároveň je mechanicky spojit a zajistit tak bezproblémový chod celého elektrického vedení. Konstrukce izolátorů musí bezproblémově odolávat neustálému elektrickému a mechanickému namáhání, které způsobují zavěšené vodiče. Dále musejí odolávat různým klimatickým vlivům, od slunečního záření po vichřice a sněhové přeháňky, a to vše po dobu až několika desetiletí bez ztráty svých izolačních a mechanických vlastností. Jejich tvar je tomu přizpůsoben a velikost závisí na napěťové hladině vedení, kde jsou použity. Izolátory se mohou dělit podle použitého materiálu nebo podle způsobu upevnění vodičů. V druhém případě dělení se mluví o izolátorech podpěrných, závěsných nebo o průchodkách, které slouží k nevodivému protažení vodičů skrz zdi budov nebo skrz stěny transformátorů.

Mechanické síly působící na izolátor jsou vyvolávány především vahou samotného vodiče, kdy hodnota působící síly může dosahovat až desítek kN. Izolátory ovšem musí být naddimenzované, především z důvodů vyššího mechanického namáhání během silného

větru nebo námrazy. Předimenzování mechanické výdrže izolátorů také slouží jako bezpečnostní opatření při případném stržení vedení tak, aby se zabránilo dalšímu strhávání vedení o okolí poruchy.

Hlavní elektrické vlastnosti izolátorů jsou velikost přeskokového a průrazného napětí, které se liší v závislosti na velikosti (délce) izolátoru, která je úměrná hodnotě napětíové hladiny vedení. [34]

Průrazné napětí – Takové napětí, které způsobí vznik elektrického oblouku uvnitř izolátoru, kde vlivem vzniku tepla spojeného s průchodem velkých proudů dojde k destrukci izolace. Po průchodu průrazného napětí je izolátor zničen a už nemůže bezpečně vykonávat svoji funkci.

Přeskokové napětí – Nejkratší vzdušná vzdálenost mezi vodičem a stožárem. Při nadměrném napětí mezi vodivými konci izolátoru dojde k přeskoku a vzniku elektrického oblouku podél vnější strany izolátoru. Přeskokové napětí není pro izolátor destruktivní, proto je jeho hodnota nižší, než je hodnota průrazného napětí. Tím se ve většině případů výskytu nadměrného napětí zabrání poškození izolátoru vlivem průrazného napětí.

Další nepříznivou vlastností je přítomnost malých svodových proudů, které procházejí po povrchu izolátoru a způsobují další ztráty na vedení. Svodové proudy využívají vodivé cestičky vzniklé díky přítomnosti nečistot nebo vody na povrchu izolátoru. Souvislá vrstva znečištění může mít za důsledek vznik nemalých ztrát a snížení přeskokového napětí až na 50 % původní hodnoty. Proto se izolátory vyrábějí ve tvaru diskovitých, speciálně tvarovaných stříšek, které prodlužují délku svodové cestičky a zabraňují vzniku celistvé vodivé vrstvy nečistot. Dalším opatřením proti svodovým proudům může být nanesení nízko adhezní vrstvy na povrch izolátoru, nebo jejich mytí v oblastech se zvýšeným výskytem nečistot.

Co se týče použití daných typů izolátorů na jednotlivých napětíových hladinách, tak pro nově budované UHV AC (1000 kV a 750 kV) i DC (± 800 kV a ± 500 kV) se nejčastěji používají kompozitní izolátory. Stojí za tím především fakt, že kompozitní materiály lépe odolávají přeskokovým napětím, jsou méně náchylné na znečištění a také jsou rozměrově kompaktnější, což je výhodou při stavbě stožárů, které mohou být konstruovány na nižší

zatížení. Pro nižší napětíové hladiny využití kompozitních izolátorů tolik nepřevyšuje izolátory keramické a skleněné. [35]

Z hlediska konstrukce se izolátory dělí na tyčové a diskové. Tyčové izolátory tvoří jeden kus izolačního materiálu, který je zpravidla tenký a lehčí. Vyrábí se z kompozitu nebo keramiky a často bývají opatřené přídatnou silikonovou ochrannou vrstvou. Diskové izolátory se skládají z jednotlivých izolátorových disků, které se na sebe navěšují a v součtu poté tvoří izolátor pro danou izolační hladinu. Výhoda těchto izolátorů je možnost tvorby téměř libovolně dlouhého řetězce, tím pádem i možnost volby izolační hladiny. V případě poruchy není potřeba měnit celý izolátor, lze vyměnit pouze poškozený disk. Nevýhodou je váha a náchylnost k mechanickému poškození, protože materiálem pro diskové izolátory je výhradně keramika nebo sklo. Pokud je potřeba odizolovat vyšší napětí, než na které je izolátor dimenzovaný, skládají se izolátory do izolátorových řetězců. Podobně se dají izolátory složit i v paralelním uspořádání a to v místech, kde je zvýšené mechanické namáhání. [36]

6.2.1 Keramické izolátory

Keramické, nebo také porcelánové izolátory, jsou historicky nejpoužívanějším druhem izolátorů, které se už osvědčily na mnoha elektrických instalacích po celém světě. Výhodou je jejich trvalá mechanická i elektrická odolnost i po mnoha desetiletích provozu. Keramický izolační materiál je anorganický materiál, jehož hlavní složky jsou polykrystalické křemičitany, hlinitokřemičitany nebo různé sloučeniny oxidů. Materiál je nejdříve nutné vytvarovat do požadovaného tvaru, který se následně vypaluje, za účelem dosažení požadovaných fyzikálních vlastností. Jejich hlavními přednostmi je vysoká pevnost v tahu a tlaku, tepelná a chemická stálost a odolnost proti účinkům svodových proudů.

Častější design keramických izolátorů vysokého napětí je pomocí disků, které se skládají do řetězců. Řetězce pro 400 kV vedení se mohou skládat až z 22 jednotlivých disků. Jednotlivé disky jsou na sebe zavěšeny pomocí pozinkovaných háčků. Samotné tělo keramického izolátoru může být kvůli zlepšení povrchových vlastností glazurováno. Výsledný tvar izolátoru pak připomíná stříšku, přičemž spodní část izolátoru může být ještě dodatečně žebrována tak, aby se prodloužila délka proudové cestičky. Dojde také ke zmenšení možnost znečištění pevnými částicemi a i při silném dešti nedojde vlivem vody ke

vzniku spojitě vodivé cestičky. Tyčové keramické izolátory tvoří z jednoho kusu tvrdého izolátoru, který je opatřen stříškovými výstupky. Výhodou tyčových izolátorů oproti diskovým je jejich menší velikost na stejných izolačních hladinách a vyšší elektrická pevnost díky nepřítomnosti kovových závěsných háčků. Vyrábějí se jen pro napětové hladiny přibližně do 110 kV, pokud je potřeba izolování vyšších napětí, není problém je spojovat do řetězců. [36]

Mezi keramické izolační materiály nejčastěji využívané pro výrobu elektrických izolátorů vysokého napětí se řadí alkalické hlinitokřemičitany označované jako C110 a C130. C110 je plasticky tvářený křemičitý porcelán, jehož základem je křemen a živcové tavivo. Je možné ho používat i bez glazovaného povrchu. Nežáruvzdorný živcový porcelán s plnivem ve formě oxidu hlinitého, se označuje jako C130. Jedná se o materiál s možností glazování povrchu, který se využívá pro součástky vysokého i nízkého napětí s vysokou pevností. [37]

6.2.2 Skleněné izolátory

Podobné vlastnosti jako keramické izolátory mají i izolátory skleněné. Na rozdíl od keramických se však dělají převážně jen ve formě disků. Výhodou je vysoká dielektrická pevnost a možnost tvorby složitějších tvarů žebrování, proto se uplatňují hlavně v oblastech s vysokým výskytem pevných částic v ovzduší. Povrch skleněných izolátorů je možné ještě opatřit ochrannou silikonovou vrstvou. Izolátor je pak více odolný vůči znečištění. Nevýhodou je nižší mechanická pevnost, nižší odolnost proti účinkům svodových proudů a přítomnost vnitřního napětí, které může při námraze způsobit popraskání. Skleněný izolační materiál je anorganický materiál vytvořený ze směsi oxidů, které se nejdříve roztaví a následně rychlým ochlazením vznikne amorfní materiál bez krystalické mřížky. [36]

Materiálem skleněným izolátorů může být tvrzené alkalicko-vápenato-křemičité sklo, které se hodí pro izolátory střídavých vedení. Nebo borito-křemičité sklo vhodné jak pro vysoké, tak i pro nízké napětí. Jeho velkou výhodou jsou nízké ztráty a vysoká rezistivita. Někdy se může používat i sklokeramický materiál, což je polykrystalický materiál vytvořený ze skleněného prášku, který je ovšem podrobený tuhnutí za vzniku určitého množství krystalizace. Uplatňují se pak jako izolátory s teplotní roztažností přizpůsobenou kovům. [37]



Obr. 6.5 – Keramický tyčový izolátor
(převzato z [38])



Obr. 6.5 – Skleněný diskový izolátor
(převzato z [39])

Nevýhodou keramických a skleněných izolátorů je jejich náchylnost ke znečištění a hydrofilnost povrchu. Znečištěním se snižuje elektrická pevnost izolátoru, zvyšují se povrchové proudy, větší vrstvy nečistot pak zadržují vodu a zvyšují riziko elektrických přeskoků, které poškozují povrch izolátorů a výrazně snižují jeho funkčnost a životnost. Aby se tomuto předešlo, je nutné izolátory vystavené silně znečištěnému prostředí často mýt. To ovšem není technicky ani finančně jednoduchá záležitost. Pro ochranu skleněných a keramických izolátorů proti znečištění se proto používá tenká vrstva silikonu nanesená na jejich očištěný povrch. RTV silikon (z anglického Room-Temperature Vulcanizing) se nanese na povrch izolátoru a díky svým vlastnostem slouží jako štít proti vodě a nečistotám. Navíc se silikonové vrstvy svými vlastnostmi podobají polymerním kompozitním materiálům, takže pomáhají i zlepšovat povrchové elektrické vlastnosti původních izolátorů. Vzniklý hydrofobní povrch pak zajistí, že veškerá voda okamžitě steče a s sebou vezme i případné nečistoty. Výsledkem je tak téměř dokonale čistý povrch, který prodlužuje životnost izolátorů až o desítky let. [40]

Znečištění se dá předejít i samotným uspořádáním izolátorů. Svislé uspořádání vykazuje vyšší míru znečištění zároveň s nižší možností samovolného oplachu deštěm, než je tomu u vodorovných izolátorů nebo skupin izolátorů uspořádaných do tvaru písmene V.

Uspořádání do V se pak díky svým samočisticím schopnostem využívá hlavně u DC systémů, kde je akumulace znečištění výraznější, než je tomu u AC systémů. Střídavé systémy jsou ale na druhou stranu agresivnější vůči povrchu izolátorů a způsobují rychlejší ztrátu hydrofobicity. Dalším faktorem je také velikost povrchové vzdálenosti, která by s ohledem na snížení možnosti průchodu povrchových proudů měla být co největší. Například u kompozitních izolátorů UHV AC i DC aplikací se velikost povrchové vzdálenosti pohybuje v okolí až čtyřnásobku celkové délky izolátorového tělesa. Tyto hodnoty se ovšem vyskytují u izolátorů instalovaných v oblastech s vysokou mírou znečištění, v méně znečištěných oblastech se mohou použít jednodušeji tvarované izolátory s kratší povrchovou vzdáleností. [41] [42]

6.2.3 Kompozitní izolátory

Izolátory z kompozitních materiálů jsou stále častější volbou při výstavbě nových elektrických vedení. Jsou použitelné jak u AC vedení, tak i u DC, a svými vlastnostmi lépe vyhovují stále přísnějším požadavkům. Díky povrchové struktuře jsou méně náchylné na znečištění, které je obecně pro izolátory velkým problémem, ale také díky modernějším materiálům je možné dosáhnout na stejných napětových hladinách mnohem menší velikosti, tloušťky a váhy než u klasických keramických nebo skleněných izolátorů. Úspora váhy je v tomto ohledu nejvýraznější, některé izolátory mohou být oproti keramickým lehčí až o 90 %, což se pozitivně projevuje na konstrukci nosných stožárů a samozřejmě i na ceně celkového vedení. Nevýhodou může být nižší teplotní a chemická odolnost, než mají keramické izolátory, a náchylnost degradace některých materiálů působením UV záření. [43]

Konstrukce izolátorů se pak skládá z pevného tyčového jádra a izolačního obalu vytvářejícího výsledný stříškovitý tvar. Jádro zajišťuje mechanickou pevnost izolátorového systému, ať už se jedná o pevnost v tahu, tlaku nebo ohybu a pevné uchycení koncových kovových armatur. Při použití izolátorů v chemicky agresivnějších prostředích jsou armatury ještě dodatečně galvanizovány, aby lépe odolávaly korozivním účinkům. Podobně je tomu i při instalaci na DC vedeních, neboť stejnosměrný proud také urychluje korozivní pochody. Materiálem jádra pak jsou nejčastěji vyztužené GFC (z anglického Glass Fibre Composite) tyče ze skleněných vláken spojených epoxidovou pryskyřicí. [44]

Z hlediska elektrických vlastností je důležitější materiál vnějšího izolačního obalu nosné tyče, který tvoří výsledný stříškovitý tvar izolátoru. U většiny kompozitních izolátorů je tento obal tvořen silikonovou gumou SiR (z anglického Silicon Rubber), vyskytují se však

i EPDM (ethylen-propylen-dienový monomer) či PTFE (polytetrafluoretylen) izolátory a jejich směsi. Hlavním zástupcem SiR kompozitů je HTV (z anglického High Temperature Vulcanizing), tuhá silikonová guma obohacená trihydrátem hliníku s velmi nízkou vodivostí, hydrofobním povrchem s odolností proti povrchovým proudům a elektrickým obloukům. Méně používané silikonové gemy jsou nízkoviskozní LSR (z anglického Liquid Silicone Rubber) a RTV (z anglického Room-Temperature Vulcanizing). U EPDM materiálů, které mají oproti SiR materiálům vyšší mechanickou pevnost a lépe odolávají účinkům elektrického oblouku, se vyskytuje problém spojený s účinky vysokých teplot a UV záření na povrch izolátoru. Tento materiál při dlouhodobém vystavení slunečním paprskům rychleji stárne, jeho povrch podléhá mechanické i fyzikální erozi a stává se hydrofilním, což způsobuje problémy spojené se znečištěním povrchu [45]. Dobrou alternativou k těmto materiálům je jejich směs skládající se z 50 % SiR a 50 % EPDM, která vykazuje dobré elektrické vlastnosti současně s vysokou mechanickou pevností, povrchová degradace slunečního záření není tak vysoká jako u čistého EPDM a především cena je mnohem nižší, než je cena čistého SiR [46]. [43] [44]



**Obr. 6.7 – Kompozitní izolátory, první zleva 15kV/70kN, poslední 220kV/160kN
(převzato z [47])**

Kompozitní izolátory lze také využít pro tzv. kompaktní linky, což jsou nadzemní vedení tažená na stožárech s menším záběrným prostorem, než mají klasické stožáry. Jedná se tedy o elektrický sloup, jehož příčná ocelová ramena jsou nahrazena kompozitními tyčovými izolátory. Vzhledem k vodorovnému uložení zde působí velké mechanické namáhání na těla izolátorů, které by bylo pro keramické tyčové izolátory neúnosné. Proto je potřeba využít kompozitní izolátory s lepšími mechanickými vlastnostmi, jako je právě vyšší pevnost v ohybu, nelámavost a i jistá míra elasticity v oblasti maximální pevnosti. [48]

6.2.4 Hybridní izolátory

Dnes již klasické materiály, jako jsou sklo, keramika a kompozit, nejsou jedinou možností pro výrobu elektrických izolátorů. Nejen že je možné tyto izolátory opatřit ochrannou vrstvou, nebo použít duté izolátory s plynným izolačním médiem, je také možné vytvořit kombinované, hybridní, izolátorové systémy.

Kombinací keramiky a kompozitu se získá izolátor, který využívá mechanických výhod keramiky pro své jádro a elektrických výhod kompozitů pro vnější strukturu. Keramické jádro se vyrábí stejně jako klasických keramických izolátorů z oxidů hliníku a hybridnímu systému tím dodává mechanickou pevnost v tahu a krutu, čímž zvyšuje jeho odolnost proti tahovému namáhání. Keramické jádro je ovšem křehké, proto je opatřeno vrstvou z kompozitního materiálu tvarovaného do výsledného stříškovitého tvaru. Kompozit pak dodává mechanickou odolnost proti vnějším vlivům, zlepšuje elektrické vlastnosti a v případě opatření dodatečnou silikonovou vrstvou pak vytváří prakticky bezúdržbový systém i ve velmi znečištěných prostředích. Výsledkem je izolátor mechanicky stejně odolný, ale mnohem lehčí a menší než jsou keramické izolátory, který navíc vykazuje výborné elektrické vlastnosti jako kompozitní izolátor. [49]

7 Vlastnosti a technické požadavky kompozitních izolačních prvků

Požadavky na kompozitní izolační prvky se nijak zvláště neliší od požadavků na běžné jednosložkové izolanty. Dalo by se říct, že se neliší téměř vůbec, protože stále se požadují především výborné elektroizolační vlastnosti. Ovšem díky základní podstatě kompozitů, kterou je spojení více látek s různými vlastnostmi, je možné vytvořit materiál, který bude ještě mnohem lépe vyhovovat technickým požadavkům pro konkrétní použití.

7.1 Kompozitní izolační prvky

Kompozitní materiály se využívají na elektrické izolační prvky především kvůli svým vynikajícím elektrickým vlastnostem, mezi které patří hlavně dobrá elektrická pevnost, odolnost proti elektrickému oblouku a vysoká vnitřní i povrchová rezistivita. Díky tomu našly uplatnění nejen jako elektrická izolace strojů a přístrojů, ale také jako izolace v AC a DC přenosových a distribučních systémech, kde nahrazují klasické jednosložkové materiály pro izolaci kabelů, při výrobě izolátorů nebo izolačních systémů řídicích zařízení a výkonových transformátorů. Vytvořením kompozitu se však dosáhne i lepších mechanických vlastností, tvarové stálosti, vyšší chemické i teplotní odolnosti. Použitím vhodným složek lze také zvýšit odolnost proti navlhání či omezit hořlavost materiálu.

Kompozitem se označuje dvou a více složkový materiál, který využívá odlišných vlastností všech svých složek tak, aby bylo dosaženo žádaného výsledku. Základem kompozitu je pevná nespojitá fáze, která se označuje jako výztuž a spojitá poddajná fáze, označována jako matrice. Výztuž kompozitnímu materiálu udává mechanické vlastnosti jako je pevnost a tvrdost, zatímco matrice slouží jako pojivo a ochrana výztuže. [50]

Hlavními složkami kompozitních materiálů dnes využívaných ve vysokonapěťových systémech jsou polymerní sloučeniny. Polymery mají výborné dielektrické vlastnosti, jsou dobře zpracovatelné a mají dobrou odolnost proti stárnutí. Polymerními zástupci jsou elastomery, reaktoplasty a termoplasty. Reaktoplasty se vytvrzují teplem, čímž dojde k zesíťování řetězců, které ani po následném ohřátí nedovolují změnu tvaru. Jsou tedy teplotně stálé a mezi hlavní zástupce se řadí epoxidové a polyesterové pryskyřice s elektrickou pevností dosahující hodnot až 1800kV/cm. Pryskyřice se využívají především

jako lepidla nebo zalévací hmoty výztuží kompozitů, jejichž zástupci jsou tvrzené skleněné, syntetické nebo organické tkaniny. Pro izolace elektrických kabelů se používají různé druhy termoplastů jako je polyetylén PE, polypropylén PP a polytetrafluoretylén PTFE, přičemž nejrozšířenější je polyetylén, který se používá v nízkohustotní LDPE i vysokohustotní HDPE formě. Zesíťováním PE se získá XLPE, který se pak používá pro izolace vysokonapětových kabelů pro podzemní i podmořské instalace, kde nahrazují tradičnější papírové izolace. Papírové izolace se dají také považovat za kompozitní materiál, protože jde o spojení vrstveného papíru a plnicího oleje. Nejvýznamnějším zástupcem termoplastů u nízkonapětových instalací je pak polyvinylchlorid PVC, který je s elektrickou pevností 300kV/cm a nízkým ztrátovým činitelem dobrou volbou pro nízkoteplotní aplikace do 70°C. Elastomery se uplatňují především v izolačních systémech kompozitních izolátorů. Hlavní zástupci jsou silikonové gumy SiR a syntetické EPDM kaučuky, které společně s výztužemi ze skleněných vláken výrazně zlepšují jejich elektrické a mechanické vlastnosti oproti klasickým keramickým a skleněným izolátorům. [50] [51] [52]

Velká pozornost se zaměřuje na nanokompozity, které by měly mít ještě výrazně lepší elektrické a mechanické vlastnosti, než obyčejné kompozity. Základem nanokompozitů jsou polymerní látky obsahující příměsi částic nanometrických rozměrů. Například u izolátorů mají nanokompozitní příměsi výborný vliv na elektrickou pevnost nebo třeba na odolnost proti elektrickému oblouku a v neposlední řadě i na povrchové vlastnosti látek, jako je třeba hydrofobnost. Ta je u venkovních izolátorů důležitým parametrem, protože hydrofobní povrch odpuzuje vodu. Tím je snížena možnost vzniku vodivých kanálků na povrchu izolátoru zapříčiněných přítomností vody. Nehledě na fakt, že na hydrofobním povrchu se také hůře usazují nečistoty, které mají stejný dopad jako zmíněná voda. Důležité je také, že nanomateriály nijak negativně neovlivňují potřebnou velikost, naopak je možné izolátory zmenšovat. Další výhodou je možnost použití nanometrických materiálů jen k povrchové úpravě stávajících izolačních systémů. Už samotná tenká vrstva nanomateriálu dokáže výrazně zlepšit mechanické vlastnosti povrchu nebo povrchovou odolnost vůči částečným výbojům. [53]

Stejně jako u vodivých materiálů, tak i u jednoduchých nebo kompozitních izolantů se vlastnosti a technické požadavky dají rozdělit na elektrické a neelektrické, mezi které se řadí mechanické vlastnosti, teplotní odolnost, chemická stálost a další fyzikální parametry.

Kompozitní materiály jsou specifické tím, že tyto vlastnosti jsou dány vlastnostmi jednotlivých složek. Jádro kompozitů, výztuž, udává především mechanické vlastnosti. Při výběru materiálu výztuže se musí brát ohled na budoucí aplikaci izolačního prvku. V silnoproudé elektrotechnice často izolace zastávají i funkce mechanické podpory, jako je tomu například u izolátorů venkovního vedení. Proto se využívají různé vláknové výztuže, které mají výborné mechanické vlastnosti při tahovém a tlakovém zatížení. Správnou volbou plniva lze také zvýšit teplotní odolnost materiálu. Právě teplotní odolnost a schopnost dobře odvádět vzniklé teplo je jedním z nejdůležitějších požadavků, neboť rostoucí teplota izolačních prvků má negativní vliv na jejich vodivost a nabíjecí charakteristiky. Z hlediska materiálových vlastností je také potřeba počítat s tím, v jakém prostředí bude izolační systém používán. Izolace je totiž hlavní ochranou vodivých částí a je v přímém kontaktu s okolním prostředím. UV záření, vlhkost, chemické látky, mechanické namáhání, počasí, to vše neustále působí na povrch izolace, která proto musí být dostatečně odolná až po dobu několika let. Povrchová odolnost materiálů se dá zařídit už samotným výběrem materiálu, použitím vhodných přísad nebo také použitím povrchových vrstev, které zajistí dostatečnou ochranu pro zbytek izolaci. Povrchovou vrstvou se neřeší pouze mechanická ochrana izolačního prvku, ale je možné s ní zlepšit i povrchové elektrické vlastnosti materiálu.

Elektrické vlastnosti zajišťují základní funkci izolačních systémů, kterou je samozřejmě elektrické oddělení míst s různými potenciály. Vysoký izolační odpor a nízká elektrická vodivost jsou proto hlavními požadavky na elektroizolační materiály. Dále je žádoucí, aby měl materiál co nejvyšší elektrickou pevnost a nízké dielektrické ztráty. Elektrická pevnost zabraňuje vzniku elektrického průrazu, což by způsobilo zničení izolace, a dielektrické ztráty je potřeba mít co nejmenší, protože i ony se podílejí na celkových ztrátách při přenosu elektrické energie. Podstatnou roli hraje také rozložení elektrického pole uvnitř materiálu izolace. Problém s nerovnoměrným rozložením pole se vyskytuje u DC i AC systémů, kde způsobuje vznik dalších nežádoucích jevů. Společně s nerovnoměrným rozložením také hraje svoji roli i neznalost chování izolací během dlouhodobého působení elektrického pole. U obou systémů nerovnoměrné rozložení intenzity elektrického pole způsobuje vznik částečných výbojů, které negativně působí na stárnutí izolace. DC izolační systémy se pak potýkají s problémem prostorového náboje.

7.2 Elektrické vlastnosti

Pro všechny vodivé a izolační materiály jsou nejdůležitější elektrické vlastnosti a jejich hodnoty. Obecně se dá říct, že pro izolanty jsou ideální obrácené hodnoty, než kterých dosahují vodiče. To znamená vysoký odpor a nízká elektrická vodivost.

7.2.1 Elektrická pevnost

Schopnost elektroizolačního materiálu vzájemně od sebe oddělovat místa s různým elektrickým potenciálem se nazývá elektrická pevnost. Izolační vlastnosti materiálu jsou zachovány jen do určité hodnoty intenzity elektrického pole. Pokud dojde k překročení této kritické meze, v izolantu dojde k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů náboje a jejich pohyblivosti. Následkem je prudký pokles rezistivity materiálu a vznik výboje, který původně izolovaná místa spojuje dokonale vodivým kanálem. Při vysoké intenzitě elektrického pole může být výboj doprovázen vznikem elektrického oblouku, jehož vysoká teplota má nepříznivé účinky na danou izolaci. Mechanismus výboje se liší v závislosti na skupenství izolačního materiálu, vždy ale dochází k poklesu přiloženého napětí a prudkému zvýšení proudu.

U pevných izolantů se mluví o průrazu, který zapříčiní trvalé poškození izolace. Z hlediska charakteru lze průraz pevných izolantů ještě rozdělit do následných skupin. **Čistě elektrický průraz**, při kterém je energie elektrického pole v daném okamžiku tak vysoká, že způsobí okamžitou destrukci izolace v jejím nejslabším místě, takže vznik průrazu nezávisí na teplotě a délce působení přiloženého napětí. **Tepelný průraz** naopak silně závisí na délce působení přiloženého napětí, jehož následkem je přehřátí izolace a následný průraz. Posledním typem elektrického průrazu je **průraz elektrochemický**, který je zapříčiněn dlouhodobým působením elektrického pole, které postupně zhoršuje izolační vlastnosti materiálu.

Pouze k dočasnému poškození izolačních vlastností materiálu dochází u plyných a kapalných izolantů, které mají schopnost regenerace. V tomto případě se výboj označuje jako přeskok.

Kritická úroveň napětí, při které dochází k průrazu, respektive přeskoku, se nazývá průrazné napětí. Jeho velikost je závislá na několika faktorech, mezi které patří zejména materiál izolace, tloušťka izolace a časový průběh elektrického namáhání. Svůj vliv na velikost průrazného napětí mají také okolní podmínky jako teplota, tlak, vlhkost

a v neposlední řadě i čistota daného izolačního materiálu. Hodnota elektrické pevnosti se pak získá ze vzorce

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ [kV/m]} \quad (7.1)$$

kde U_p [kV] je průrazné napětí a d [m] je tloušťka materiálu v místě průrazu, respektive přeskočků. Výsledná elektrická pevnost se udává v kV/m, v praxi pak častěji ve formě kV/cm nebo kV/mm, neboť reálné tloušťky izolací se pohybují v těchto velikostech. Elektrická pevnost by měla být ideálně co nejvyšší, u běžných izolantů se pohybuje v rozmezí 30 – 1500 kV/cm a většinou platí, že stejnosměrná elektrická pevnost stejného materiálu je větší, někdy až dvojnásobná, než střídavá. [51]

Aby se vůbec elektrický průraz mohl uskutečnit, je potřeba vzniku vodivého kanálu, indukovaného elektrickým polem napříč celým izolačním materiálem. U kompozitních materiálů se tvar vodivého kanálu liší v závislosti na vodivosti příměsí. Pokud jsou příměsí vodivé, kanál vede nejkratší cestou skrz materiál. V případě izolačních příměsí bude kanál hledat cestu nejmenšího odporu a ta nemusí být zásadně tou nejkratší. Mechanismus rozvoje kanálu je stejný jako u normálních izolantů. Elektrické pole vytváří kolmé mechanické napětí, to překonává lokální vazebné síly a vytváří prasklinky ve směru působení pole, které předcházejí vzniku průrazu. Při vysoké koncentraci částic se budou vodivá rozhraní prasklinek překrývat a to podpoří přenos náboje vodivým kanálem. Tento předpoklad byl podpořen experimentem, kdy byl prokázán pokles elektrické pevnosti při zvýšení koncentrace plniva u kompozitu epoxidové pryskyřice. Výsledný vodivý kanál pak byl rozvětvenější, než je tomu u klasických jednofázových izolantů. [54]

7.2.2 Dielektrické ztráty

Vzhledem k tomu, že žádný izolant není dokonale nevodivý a většinou obsahuje různé příměsí a nečistoty, tak po přiložení elektrického pole začnou uvnitř materiálu vznikat nestacionární energetické přesuny, pohyb volných a vázaných nosičů elektrického náboje. Ty způsobují vznik dielektrických ztrát, které jsou provázeny ohřevem dielektrika. Ztráty, představující celkovou energii rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce, jsou vyvolány působením jak stejnosměrného, tak i střídavého elektrického pole. Jejich výsledná hodnota je pak součtem všech vznikajících ztrát, které se od sebe liší fyzikálním základem. **Vodivostní ztráty**, lépe známé jako Jouleovo teplo, závisí na vnitřní a vnější vodivosti a jejich podstatou jsou srážky volných nosičů s kmitajícími se strukturními částicemi, tedy

průchod proudu dielektrikem. Jelikož jsou podmíněny jen vodivostí materiálu, tak se vyskytují jak při působení střídavého, tak i u stejnosměrného pole. **Polarizační ztráty** jsou podmíněné polarizačními pochody v dielektriku a jsou teplotně i frekvenčně závislé. Proto se vyskytují jen u střídavých polí. Podmínkou vzniku posledních **ionizačních ztrát** je překročení prahu ionizace plynu působením elektrického pole s velkou intenzitou. To znamená, že tyto ztráty se mohou vyskytovat jen u plyných dielektrik nebo pevných či kapalných dielektrik obsahujících plynnou příměs. [55]

Dielektrické ztráty jsou popsány pomocí následujících veličin. **Ztrátový výkon** P_z [W], který odpovídá energii přeměněné na teplo a nejčastěji vyjadřuje ztráty ve stejnosměrném poli. **Měrné dielektrické ztráty** p_z [W/m³] jsou ztrátovým výkonem převedeným na jednotku objemu látky a **ztrátový činitel** $\tan \delta$ slouží především pro určení ztrát ve střídavém poli.

Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je společně s relativní permitivitou důležitým materiálovým parametrem dielektrik, podle něhož jsou vybírány pro různé aplikace. Dielektrické ztráty jsou doprovázeny ohřevem dielektrika a také jsou příčinou změny fázového úhlu mezi proudem a napětím. Dielektrikum se vlastně chová jako kondenzátor, v případě ideálního kondenzátoru je fázový posun mezi proudem a napětím roven 90°. To znamená nulový ztrátový úhel δ a nulové ztráty. Ovšem u skutečného kondenzátoru, tedy i u dielektrika, je fázový posun proudu a napětí menší než 90°. Zmenšení fázového posunu odpovídá ztrátovému úhlu a ztrátový činitel je pak roven $\tan \delta$. Tangens ztrátového úhlu je bezrozměrný a odpovídá dielektrické ztrátě v izolantu. [56]

7.2.3 Relativní permitivita

Je fyzikální veličina vyjadřující, kolikrát je permitivita daného prostředí větší než permitivita vakua ϵ_0 a její velikost závisí jak na druhu dielektrika, tak i na okolních podmínkách.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (7.2)$$

Přičemž permitivita ϵ popisuje závislost intenzity elektrického pole a elektrické indukce. Relativní permitivita je bezrozměrná látková konstanta, značí se ϵ_r a byla definována M. Faradayem jako poměr kapacity kondenzátoru vyplněného dielektrikem a kapacity

kondenzátoru vyplněného vakuem. Také vyjadřuje, kolikrát se zmenší elektrická síla, pokud jsou tělesa s elektrickým nábojem umístěna v látkovém prostředí a ne ve vakuu. [57]

7.2.4 Dielektrická vodivost

Pouze ideální dielektrika jsou dokonale nevodivá a mají jen vázané nosiče. Reálná dielektrika ale kromě vázaných nosičů elektrického náboje obsahují i volné nosiče, které svým pohybem způsobují slabou elektrickou vodivost. Tato vodivost je závislá na druhu elektrických nosičů (elektrony nebo ionty), na jejich koncentraci a také na příměsích a nečistotách obsažených v dielektriku. Dalšími faktory ovlivňujícími dielektrickou vodivost jsou samozřejmě okolní podmínky a intenzita elektrického pole, do něhož je dielektrikum umístěno. Silně závislá je na teplotě. Pro hodnocení materiálů z hlediska dielektrické vodivosti se používá měrný elektrický odpor ρ [Ωm] a měrná elektrická vodivost γ [S/m], což jsou na jednotku objemu přepočítané materiálové hodnoty. U pevných látek se rozlišuje vodivost vnitřní a povrchová. **Vnitřní vodivost** je závislá na vnitřní struktuře látky a platí, že ve slabém poli se projevuje především iontová vodivost příměsí, zatímco v silném vnějším elektrickém poli (10^1 - 10^2 kV/mm) dochází k vlastní elektronové vodivosti. **Povrchová vodivost** je podmíněná povrchovými nečistotami, především pak absorbovanou vlhkostí. [51] [54]

U pevných izolantů se ještě dielektrická vodivost liší podle typu izolačního materiálu. Pro anorganické amorfni látky, jimiž jsou především různé druhy skel, je dielektrická vodivost v rozsahu od 10^{-3} - 10^{-17} S/m. Nejnižší vodivostí se pak vyznačují křemičitá a boritá skla, které mají ionty (potencionální nosiče náboje) pevně zachycené ve své struktuře. Pouze za účinku silného elektrického pole se ionty mohou uvolnit a svým pomalým pohybem mohou způsobovat mírné zvýšení vodivosti. Organické látky, které jsou v izolačních systémech představovány hlavně polymerními sloučeninami, mají dielektrickou vodivost 10^{-17} S/m. I zde má vodivost iontový charakter a je silně závislá na čistotě materiálu a polárnosti látek. U nepolárních látek je vodivost způsobena jen obsahem nečistot, zatímco u polárních látek k ní přispívají i disociované molekuly vlastního izolantu. Dielektrická vodivost je pak samozřejmě vyšší u látek polárních. Nevýhodou organických izolantů je také jejich sklon k navlhání, neboť jak již bylo několikrát zmíněno, voda zhoršuje izolační vlastnosti materiálu, tím pádem zvyšuje dielektrickou vodivost. [51]

7.2.5 Elektrický odpor

Teplotně závislá fyzikální veličina udávající schopnost bránit průchodu elektrického proudu. U izolačních materiálů je požadován co nejvyšší elektrický odpor, aby se zabránilo průchodu proudu. [58]

Měrný vnitřní odpor ρ – Závisí na vnitřní stavbě materiálu a je definován jako poměr stejnosměrného napětí a proudu, protékajícího objemem materiálu mezi dvěma elektrodami, které se dotýkají protilehlých ploch materiálu. Izolační materiály by měly mít co největší hodnotu vnitřního odporu, různé vodivé příměsi a nečistoty tuto hodnotu výrazně snižují.

Měrný povrchový odpor ρ_p – Podobně jako vnitřní odpor je definován i povrchový odpor. Opět se jedná o poměr stejnosměrného napětí a proudu, který nyní ale protéká po povrchu izolačního materiálu. Jeho hodnotu ovlivňuje absorbovaná vlhkost a nečistoty na povrchu materiálu.

7.2.6 Prostorový náboj

Prostorový náboj popisuje prostorové rozložení elektrického náboje v izolačním médiu. Vzniká ve vzduchu nebo v dielektriku jako nepříznivý účinek silného elektrického pole. Častěji a s vyšší intenzitou se projevuje u izolačních systémů stejnosměrného napětí, ovšem ani výskyt ve střídavých systémech není vyloučen. Svoji přítomností nepříznivě ovlivňuje elektrickou pevnost izolačních materiálů, které může oslabit až do takové míry, že dojde k průrazu izolace při mnohem nižší intenzitě elektrického pole, než je pro daný materiál obvyklé.

Pokud na dielektrikum působí elektrické pole o určité intenzitě, může dojít k částečné ionizaci některých molekul. Volné elektrony se pak chtějí dostat ke kladné elektrodě vytvářející pole a ionizované molekuly zase pomalu putují k záporné. Tento pohyb částic vytváří v materiálu, v blízkosti elektrod, oblasti prostorového náboje. Zvětšováním oblastí prostorového náboje se zmenšuje vzdálenost mezi těmito oblastmi a tím se zvětšuje celková síla pole. Pokud dosáhne kritických hodnot, může to způsobit vznik vodivého kanálu, který by způsobil průraz dielektrika. Společně s vysokou intenzitou elektrického pole má také velký vliv na vznik prostorového náboje i doba působení pole na izolaci a přítomnost vlhkosti. Proto jsou nejvíce ohrožené polyethylenové XLPE izolace, které jsou náchylné na navlhání a jsou často používány jako izolační systémy vysokého napětí. [59] [60]

Větší problémy působí prostorový náboj u DC systémů, protože působení elektrického pole má konstantní polaritu. To vytváří velké prostorově nabitě homogenní oblasti, které u povrchu snižují elektrickou pevnost a v objemové struktuře dielektrika zvyšují sílu pole, které pak může způsobit elektrický průraz. Pokud dojde k obrácení polarity přiloženého napětí, což některé stejnosměrné přenosové systémy dovolují, vznik nových prostorových nábojů bude ovlivněn již existujícími. Nový prostorový náboj pak bude vznikat uprostřed izolace, tam kde byla dosud největší intenzita elektrického pole, zatímco v blízkosti elektrod bude růst síla pole. Následkem toho je rozložení silného elektrického pole v celém objemu izolační vrstvy, s čímž je spojeno snížení elektrické pevnosti a zvýšení pravděpodobnosti elektrického průrazu. U AC napětí dochází k periodickému střídání polarity elektrického pole, proto je vznik velkých prostorově nabitých oblastí složitější. Mohou ovšem vznikat malé oblasti prostorového náboje u povrchu elektrod, které významně zkreslují elektrické pole, čímž dochází ke zvýšení vnitřní elektrické síly v blízkosti elektrod. Elektrická síla negativně působí na velikost elektrické pevnosti dielektrika a to v takové míře, že může dojít k průrazu. [61] [62]

7.2.7 Částečné výboje

Částečné výboje jsou místní elektrické výboje, které jen částečně přemostí izolační systém mezi elektrodami o určitém potenciálu. Obvykle jsou důsledkem lokálního elektrického namáhání v izolaci či na jejím povrchu a projevují se jako impulsy s dobou trvání kratší než 1 μ s. Následkem častých částečných výbojů je postupné zhoršování kvality izolačního systému, neboť elektrické výboje narušují povrch materiálu v místě svého vzniku. Měřením částečných výbojů lze zjistit velikost elektrického namáhání izolace, a proto se jedná o často používanou metodu hodnocení kvality izolačních systémů. Jelikož jednotlivé částečné výboje nemají na izolaci velké destruktivní účinky, jedná se o účinnou metodu, která dokáže odhalit stav izolačního systému. Dalším výhodou je možnost zjišťování úrovně výbojů a jejich lokalizace nejen na povrchu izolace, ale i ve vnitřních materiálových nehomogenitách. Velkým plusem je právě zmíněná možnost lokalizace částečného výboje, která se používá při lokalizaci izolačních defektů kabelových svazků. Nejčastější výskyt částečných výbojů je u vrstvených izolací, nebo u izolací s horší homogenitou izolační vrstvy, protože nemůžou vznikat uvnitř čistého pevného nebo kapalného materiálu. Vznikají pouze v plynném prostředí, ovšem je jedno, kde se toho prostředí nachází. [63][64][65]

Právě podle místa vzniku lze částečné výboje rozdělit do tří kategorií: [63]

Vnitřní částečné výboje – Výboje v plynu, který je obklopen pevným nebo kapalným dielektrikem. Může se jednat o defektní dutinky uvnitř pevného dielektrika nebo o plynové kapsičky vzniklé nedokonalou výrobou. Například dutinky mezi vrstvami papírové izolace či bubliny ve vysoce viskózním oleji.

Vnější částečné výboje – Tento typ částečných výbojů vzniká v plynech kolem elektrod či vodičů s malým poloměrem nebo zakřivením. Příkladem jsou doutnavé výboje, korónové výboje nebo Trichelovy impulzy.

Povrchové částečné výboje – Objevují se v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Například klouzavé nebo drážkové výboje.

K výraznému zhoršení kvality izolace nedojde ihned po jednom částečném výboji. Pokud ale v izolaci dochází k výbojům pravidelně, může se jejich vliv negativně projevit na životnosti materiálu. Výboje totiž způsobují svými přímými i nepřímými účinky fyzikální změny v materiálu izolantu. Podle podstaty procesu se následně dělí. [63] [64]

Elektrické účinky – Pokud dojde v dutince ke vzniku elektrického oblouku, jeho následkem se vytvoří vodivá dráha. Když intenzita elektrického pole nabyde vysokých hodnot, může koncentrace elektrického pole vyvolat čistě elektrický průraz a vodivá dráha se tak může šířit dále dielektrikem.

Erozivní účinky – S elektrickými účinky jsou spojeny i erozivní, protože elektrony a ionty bombardující stěnu dutinky způsobují erozi materiálu. Tím dochází ke zvětšování dutinky a při pokračující erozi může dojít až k průrazu dielektrika.

Tepelné účinky – Při častém opakování částečných výbojů ve stejných dutinkách dojde k oteplení plynu a okolního dielektrika a tím klesá hodnota napětí tepelného průrazu.

Chemické účinky – Výbojová činnost v dutinkách mění chemické vlastnosti obsažených plynů. Kyslík je měněn na ozon, který má výrazné oxidační účinky. Pokud je v dutince obsažen dusík, vzniká aktivní dusík, který může reagovat s ozonem za vzniku kyseliny dusičité. Při výbojích může dojít i k chemickému rozkladu izolačních materiálů. Produkty rozkladu pak mohou difundovat do pevné izolace, kde mohou snižovat jeho elektrickou pevnost.

7.2.8 Odolnost proti elektrickému oblouku

Udává dobu, po kterou je materiál schopen odolávat účinkům vysokonapětového elektrického oblouku, než dojde k vytvoření vodivé cestičky na povrchu izolačního materiálu. Po překročení kritické hodnoty vzniká elektrický oblouk, jehož teplotní destruktivní účinky narušují povrch izolantu. Tím vzniká vodivá dráha, která výrazně snižuje povrchový odpor izolantu a povrch izolantu se tak stává vodivým. Podobným způsobem fungují i povrchové proudy, jen s tím rozdílem, že tvorba vodivé cestičky trvá déle v závislosti na velikost povrchových proudů. U běžně využívaných materiálů se odolnost proti elektrickému oblouku pohybuje v řádech desítek vteřin. Odolnost je snížena přítomností nečistot a vlhkosti, naopak různé materiálové příměsi mohou mít pozitivní účinek na její zvýšení. [66]

7.3 Mechanické vlastnosti

Využití kompozitů jako izolačních materiálů je výhodné nejen pro jejich lepší elektrické vlastnosti. Díky kombinaci různých složek materiálů dochází ke zlepšení i mechanických vlastností. Hodnota namáhání materiálu potřebná ke vzniku jednoosé deformace v tahu nebo tlaku se označuje jako Youngův modul pružnosti. Při vnějším mechanickém působení na materiál může dojít k pružné nebo trvalé deformaci. U polymerních izolačních systémů se však objevují obě složky deformace, které jsou navíc časově závislé. Hlavní vliv na velikost pevnosti v tahu a tlaku má materiál použité výztuže a použitím elastického materiálu plniva pak lze zlepšit flexibilitu izolačních systémů. [58]

7.3.1 Pevnost v tahu

Hodnota tahového napětí, kterému materiál odolává předtím, než dojde k jeho prasknutí. Pevnost v tahu je důležitá hlavně pro izolační systémy kabelů a závěsných izolátorů, které jsou nejvíce namáhány tahovou silou. Vliv na velikost síly potřebné k přetržení materiálu má nejen struktura materiálu, ale i vnější působení okolí a elektrického pole, které přispívá k degradaci materiálu s čímž je spojeno i snížení hodnoty pevnosti v tahu.

7.3.2 Pevnost v tlaku

Podobně jako pevnost v tahu je i pevnost v tlaku izolačních materiálů důležitá především u izolací, které plní i konstrukční funkci zařízení, např. podpěrné izolátory. Velikost pevnosti v tahu udává maximální tlak, kterému izolační materiál odolá před zborcením.

7.3.3 Pevnost v ohybu

Důležitá vlastnost hlavně pro izolace vysokonapětových kabelů, jejichž izolační vrstva může být řádově centimetry tlustá. Při ohybu dochází na jedné straně k tahovému a na druhé straně k tlakovému namáhání. Pevností v ohybu se určí maximálně poloměr zahnutí, při kterém izolace ještě dokáže bez problémů plnit svoji funkci. Stejně jako u ostatních mechanických vlastností musí i zde být přihlédnuto i k působení elektrického pole a teploty.

7.4 Ostatní vlastnosti

V neposlední řadě jsou pro dobrý izolant důležité i materiálové parametry spojené s teplotní odolností a vlastnosti popisující vztah materiálu a vody, protože voda negativně ovlivňuje především elektrické vlastnosti izolantů.

7.4.1 Navlhavost a nasákavost

Voda nebo vzdušná vlhkost má obecně zhoršující vliv na elektrické vlastnosti materiálu. Působení vody dochází k zmenšování elektrického odporu, zvyšování ztrátového činitele nebo třeba k poklesu elektrické pevnosti. [52]

Navlhavost – Dochází k ní při styku materiálu s vodní parou. Je to dlouhodobý proces, při kterém látka uložená v prostředí o dané relativní vlhkosti a teplotě postupně zvyšuje obsah vlhkosti ve svém jednotkovém objemu.

Nasákavost – Schopnost materiálu přijímat vodu při ponoření. Je měřítkem pórovitosti materiálu a je vždy větší než navlhavost.

7.4.2 Teplotní požadavky

Vznik tepla průchodem elektrického proudu vodičem je nevyhnutelný, proto se musí počítat i s tím, že vzniklé teplo bude ovlivňovat také okolní izolaci. Pro izolaci je působící teplo prakticky nejzásadnějším faktorem ovlivňující jeho funkci a životnost. Vzniklé teplo se automaticky rovná ztrátám, proto je ideální aby průchodem proudu vznikalo co nejméně tepla. Pokud už ale nějaké vzniká, izolace by tím neměla být příliš ovlivňována, navíc by se měla postarat o co nejrychlejší a nejefektivnější odvedení tepla do okolního prostředí. Fyzikální veličinou popisující schopnost odvádět vzniklé teplo je měrná tepelná vodivost, která je u kompozitů až trojnásobně vyšší než u běžných izolantů. Dalším teplotním faktorem elektroizolačních materiálů je tepelná roztažnost. U materiálů se rozlišuje objemová a délková roztažnost a především u kompozitů je důležité, aby nebyl příliš velký rozdíl

v teplotních roztažnostech jednotlivých složek, pak by mohlo docházet k nadměrnému mechanickému pnutí, které by mohlo vyvrcholit až v poškození kompozitu. [67]

Tepelná třída – Právě kvůli působení tepla byla vytvořena tabulka určující základní tepelné třídy, které slouží k určení maximální, nepřetržitě působící teplotě ve stupních Celsia, jenž je daný elektroizolační materiál schopný vydržet bez destrukčních následků. Tepelná třída u kompozitů se získá průnikem teplot jednotlivých složek. [52]

Tab. 7.1 – Tepelné třídy izolace dle normy ČSN EN 60085

Písmenné označení	Y	A	E	B	F	H	N	R	-
Tepelná třída °C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

7.5 Stárnutí izolace

Veškeré elektrické, mechanické a klimatické vlivy mají přímý účinek na stárnutí izolace. Stárnutí je nepřetržitý proces, který má za následek fyzikální a chemické změny ve struktuře materiálu. Tím dochází k postupnému znehodnocování materiálu, které vede k trvalému zhoršení jeho funkčních vlastností. Nejvíce jsou stárnutím zasaženy organické izolační systémy, tedy všechny systémy využívající polymerní struktury. Naopak anorganické izolanty, jako je například sklo či keramika, až na výjimky stárnutí nepodléhají. Doba života izolačního materiálu je časový úsek, po který je daný materiál schopen plně zastupovat svoji izolační funkci. Stárnutí izolace má negativní účinek na dobu života izolačního systému, s čímž je úzce spojená i doba života celého elektrického zařízení. Izolace může být vystavena různým činitelům, které urychlují stárnutí izolace. Především pak u venkovních vysokonapěťových přenosových AC i DC systémů musí izolační systém odolávat mnohým činitelům zkracujícím jeho dobu života. Mezi ně patří klimatické vlivy okolí, ať už se jedná o déšť, sníh, námrazu nebo sluneční záření, mechanické vlivy, které způsobují mechanické namáhání celých systémů, nebo vlivy chemické, spojené s přítomností agresivních chemických látek ve vzduchu ve znečištěných oblastech. V neposlední řadě má velký vliv na stárnutí izolace vysokého napětí i přítomnost elektrického pole a samozřejmě i teplo, která je obecně nejdůležitějším činitelem neblaze působícím na dobu života izolačního systému. [68]

8 Vybrané diagnostické metody

Dnešní doba klade stále větší nároky na kvalitu a životnost výrobků. V elektrotechnice, tím pádem i v oblasti elektroizolačních materiálů, tomu není jinak. Elektrické izolace, ať už z běžných materiálů, nebo ty z kompozitů, jsou stále více elektricky i mechanicky namáhány, jsou vystaveny extrémním prostředím, a proto je důležité zajímat se o jejich technický stav nejen před uvedením do provozu, ale i během jejich života. K tomu slouží diagnostika. Ta nejen že dokáže monitorovat dané zařízení, ale především dokáže určit a lokalizovat místo poruchy. Důležitá je také schopnost v provozu predikovat vznik možných poruch a tím sledovat a prodlužovat život technických zařízení a jejich součástí.

Z pohledu přístupů elektrotechnologických diagnostických metod se mluví o fenomenologickém a strukturálním. Fenomenologický přístup je takový, který je zaměřen na reakce diagnostikovaného systému na vnější vstupní signály. Je jednodušší, proto je využíván častěji, ovšem nepodává tak komplexní výstupy jako přístup strukturální. Ten zkoumá probíhající děje ve vnitřní struktuře diagnostikovaného objektu, proto podává užitečnější informace o reálném stavu objektu. Diagnostické metody se také dělí na destruktivní a nedestruktivní. Jak už sám název napovídá, destruktivní metody jsou takové, při kterých je testovaný objekt zničen. Naopak nedestruktivní metody jsou takové, které mohou probíhat na zařízení bez toho, aby byla nějak zhoršena jejich funkčnost. [51]

Pro elektroizolační materiály jsou důležité citlivé a nedestruktivní diagnostické metody, které jsou schopné určit jejich elektroizolační vlastnosti, detekovat a lokalizovat již vzniklé nebo začínající poruchy. Nositelem informace o elektrotechnickém stavu diagnostikovaného systému je diagnostická veličina, která se získá určitými diagnostickými metodami. Elektrotechnické diagnostické metody pak zkoumají stav zařízení a jeho součástí během provozního období. Za nejdůležitější součást elektrických zařízení se dá považovat právě izolační systém, protože ten je z pohledu elektrických vlastností nejcitlivějším místem a na jeho správné funkci závisí funkce celého zařízení. Proto se provádějí série diagnostických testů, které předkládají kompletní obraz o technickém stavu testovaného objektu. Pro izolační materiály jsou pak nejdůležitější diagnostiky základních elektrických vlastností. Mezi nejrozšířenější elektrické diagnostické metody izolačních prvků patří zkoumání částečných výbojů a jejich projevů, měření elektrické pevnosti, měření absorpčních a resorpčních charakteristik, které vypovídají o základních elektrických

vlastnostech dielektrika, zjišťování dielektrických ztrát, nebo třeba kontrolování vzniku prostorových nábojů. [67], [69]

Neméně důležité diagnostické metody elektroizolačních materiálů jsou samozřejmě i diagnostiky fyzikálních, tepelných a strukturálních vlastností, protože ty společně s elektrickými vlastnostmi tvoří výsledný charakter izolačního systému. To platí jak pro obvyčejné jednosložkové izolace, tak i hlavně pro kompozitní izolační materiály, kde je vzájemná interakce všech vlastností jednotlivých složek velmi důležitá. Z pohledu fyzikálních vlastností se zkoumá struktura materiálu, jeho homogenita a izotropie. Klasické izolační materiály jsou většinou izotropní a homogenní, zatímco u kompozitů se jedná o anizotropní materiály s nehomogenní vnitřní strukturou. Teplota má velký vliv na elektrické vlastnosti dielektrik, proto je nutné vždy dielektrika provozovat na správné teplotní hladině, aby nedocházelo k jejich zbytečnému nadměrnému zahřívání a s tím spojenému i stárnutí izolace. V neposlední řadě se nesmí zapomenout na mechanické vlastnosti elektroizolačních materiálů. Materiály často mají i funkci mechanické podpory a ochrany, proto je potřeba testovat jejich odolnost. Nejsledovanější mechanické vlastnosti jsou pevnost v tahu, tlaku, ohybu ale i houževnatost a pružnost. [67]

8.1 PEA – Metoda elektroakustického pulzu

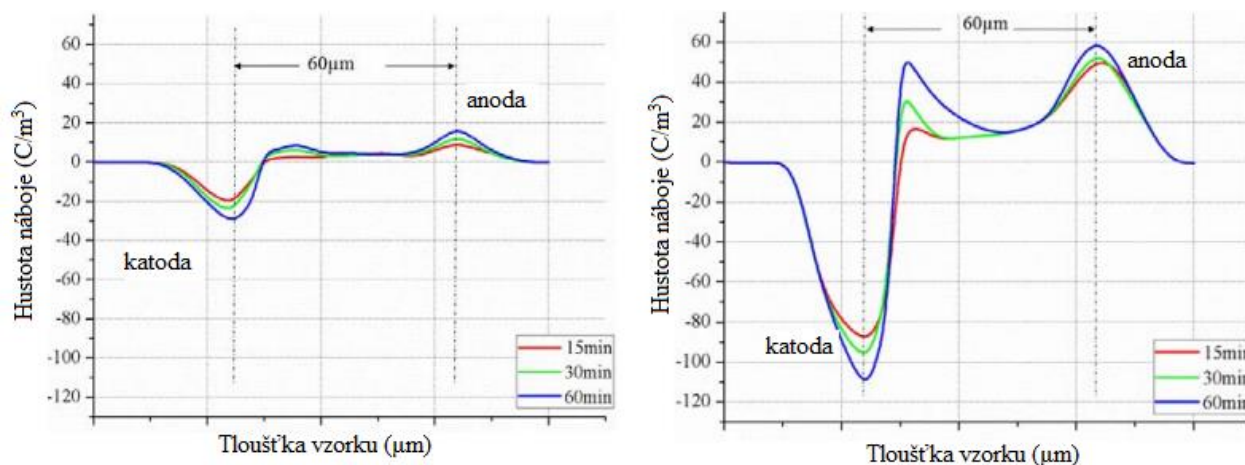
Diagnostická metoda zabývající se rozložením prostorového náboje v nehomogenním dielektriku, který je dnes jedním z nejvýznamnějších problémů spojených s kvalitou nízkofrekvenčních a stejnosměrných vysokonapětových izolačních systémů. [51]

Podmínkou pro vznik prostorového náboje je přítomnost volných nosičů, které v přítomnosti elektrického pole migrují materiálem izolantu a zachycují se na makroskopických nehomogenitách, čímž dojde k prostorovému přeskupení elektrického náboje. Zdrojem volných nosičů jsou přiléhající elektrody, které tzv. vstříkují volné elektrony do objemu dielektrika. Nehomogenitou pak může být nečistota, rozhraní ve složených dielektrikách, strukturální defekt nebo jen nehomogenní makroskopická struktura kompozitního materiálu. Právě u kompozitních polymerních izolačních systémů stejnosměrného napětí je výskyt prostorového náboje nejvýraznější. Na rozložení a velikost prostorového náboje má také vliv teplota, velikost a doba působení přiloženého napětí a především pak materiál dielektrika. Například u XLPE kabelových izolací se prostorový

náboj projevuje už při přiložení relativně malého napětí, protože se zde jako volné nosiče uplatňují ionty vedlejších produktů. Následkem přítomnosti prostorového náboje v dielektriku je výrazné zkreslení průběhu intenzity elektrického pole, což ovlivňuje vodivost a elektrickou pevnost materiálu. Nahromaděný náboj může vést k elektrickému průrazu už při nižších hodnotách napětí, než je napětí průrazné. [51]

Metoda elektroakustického pulzu PEA (z anglického Pulse Electroacoustic Method) je nedestruktivní diagnostická metoda založená na principu detekce akustického signálu úměrného rozložení prostorového náboje. Na vzorek sledovaného dielektrika je přivedeno stejnosměrné napětí vyvolávající vznik a akumulaci prostorového náboje v jeho vnitřní struktuře. Stejnosměrné napětí, nejčastěji úměrné provozní napětí hladině izolačního systému, působí určitou dobou danou požadavky testu. Poté je na vzorek přiveden velmi krátký vysokonapětový impulz, který silově zapůsobí na náboj dle Coulombova zákona. Parametry běžně používaného impulzu jsou 5 až 200 ns s amplitudou 200 V až 2 kV. Síla impulzu způsobí mírné vychýlení vázaných nosičů náboje, což je doprovázeno vznikem akustické vlny. Akustická vlna šířící se materiálem je přímo úměrná rozložení prostorového náboje. Po jejím průchodu zemnicí elektrodou je přivedena na PVDF membránový převodník tlaku. PVDF převodník je piezoelektrický prvek z polyvinyliden fluoridu, který je schopný detekovat akustickou vlnu v materiálu a převést ji na napětíový signál. Signál je následně zesílen a zobrazen na obrazovce digitálního osciloskopu, kde je možné pozorovat prostorové rozložení náboje v tloušťce izolantu. [51] [70]

Následující grafy ukazují rozložení hustoty prostorového náboje v izolaci 22kV kabelu s 6 mm tenkou izolační vrstvou z XLPE materiálu, který byl pro účely diagnostiky PEA metodou nařezán na několik vzorků s tloušťkou 60 μm . Kabel byl vystaven stejnosměrnému elektrickému poli o intenzitě 25, respektive 100 kV/mm po dobu 15 min, 30 min a 60 min. Akustická vlna byla vyvolána napětíovým pulzem 400 V s délkou 5 ns. Je patrné, že prostorový náboj se soustředí v okolí elektrod a výrazně roste s rostoucím přiloženým napětím. Doba působení elektrického pole hraje taky svoji roli, nejen při rozdílných intenzitách elektrického pole, ale i v rámci stejné intenzity. [60]



Graf 8.1 – Rozložení hustoty prostorového náboje při působení vnějšího elektrického pole 25kV/mm (vlevo) a 100kV/mm (vpravo)

(převzato a upraveno z [60])

Dalšími nedestruktivními metodami měření prostorového náboje jsou metoda laserem indukovaného tlakového pulzu LIPP a metoda piezoelektricky indukovaného tlakového skoku PIPS, které jsou založeny na vytvoření tlakového pulzu a jeho detekci. Metody tepelného pulzu TP a tepelného skoku TSP využívají tepelného roztažení elektrody vyvolaného jejím osvětlením. Tyto metody nahradily původní destruktivní metody, při nichž bylo nutné testovaný vzorek rozřezat na tenké destičky a přítomnost prostorových nábojů se pak opticky zjišťovala rozložením nanesených prášků citlivých na polaritu náboje. [51]

8.2 Měření částečných výbojů

Měření částečných výbojů je jednou z nejdůležitějších diagnostických metod zjišťování kvality izolačních systémů. Částečné výboje v nehomogenitách dielektrika mají totiž díky svým fyzikálním, chemickým a tepelným účinkům přímý vliv na stárnutí materiálu izolace, které vede k nevratnému zhoršení jeho elektrických vlastností. Následkem částečných výbojů je degradace povrchu izolantu a zvyšování jeho vodivosti, která je způsobena reakčními ději vzdušné vlhkosti a ze vzduchu disociovaných produktů, jejichž vznik je zapříčiněn částečnými výboji. Dalším následkem je formování lokálních pevných produktů, které přispívají k zintenzivnění nehomogenního elektrického pole a vzniku dalších lokálních částečných výbojů. To vše vede k růstu tzv. elektrického stromečku, který může vést až k elektrickému průrazu izolace. Největší mírou degradace způsobenou částečnými výboji trpí organické a kompozitní materiály, což může být zapříčiněno nejen jejich strukturou, náchylností na navlhání, ale i přítomností materiálových nehomogenit a nedokonalostí vzniklých při výrobě. [69]

Elektrické výboje se vyskytují při překročení určité hodnoty intenzity elektrického pole. Potřebná velikost intenzity pole pro vznik výboje pak dále závisí na materiálu a tloušťce izolantu. U střídavých systémů je jejich výskyt již dobře znám, dobře jsou popsány i jejich projevy a metody detekce. Měření částečných výbojů na stejnosměrných systémech je otázkou několika posledních let, kdy se výrazněji začala rozšiřovat technologie HVDC. Projevy výbojové činnosti jsou u HVDC systémů stejné jako u systémů AC přenosu, struktura použitých izolačních materiálů však nahrává vzniku převážně vnitřní výbojové činnosti. Není tomu tak, že by vnitřní částečné výboje byly problémem jen stejnosměrných přenosových systémů, ovšem díky vyšším napěťovým hladinám je i intenzita elektrického pole vyšší a společně s materiály použitých izolací to nahrává vzniku právě vnitřních výbojů. Vnitřní částečné výboje vznikají v materiálových nehomogenitách, plynových dutinkách nebo prasklinkách, uvnitř pevného izolantu. Tento problém mají především polymerní a kompozitní izolační materiály, které mohou takové dutinky obsahovat ať už z důvodů vnitřní struktury, tak i z důvodů nedokonalé technologie výroby. [65]

Pro měření výbojové činnosti v izolantu se využívá celé řady fyzikálních projevů elektrického i neelektrického charakteru a je zaměřeno především na měření zdánlivého náboje a četnosti výbojů. Elektrickým projevem je vznik proudového impulsu a generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které jsou základem elektrických metod detekce částečných výbojů. Kromě elektrických projevů částečných výbojů se také objevují projevy neelektrické, které mohou být chemického i jiného fyzikálního charakteru. Další dělení je možné na metody globální a lokalizační. Komplexním měřením stavu izolace v souvislosti s částečnými výboji se zabývají globální metody, zatímco lokalizační metody slouží jen určení místa výskytu částečných výbojů. V praxi se měření nejčastěji realizuje za pomoci obou metod tak, aby se získal kompletní přehled o výbojové činnosti v měřeném izolačním systému. Z hlediska provozního stavu zařízení s testovanou izolací se dále mluví o měření on-line a off-line. Rozdíl je v tom, zda zařízení během testování pracuje ve svém běžném pracovním režimu, nebo zda je zařízení odpojené či jsou využity specifické testovací podmínky. On-line měření je mnohem více vypovídajícím způsobem měření v souvislosti s výskytem částečných výbojů v izolaci během reálného provozu. [69]

8.2.1 Elektrické metody detekce

Elektrické metody detekce částečných výbojů se dělí na metody přímé a nepřímé. [69]

Přímé metody k vyhodnocení výbojové činnosti využívají měření proudových impulzů, které doprovázejí vznik částečných výbojů. Při výboji v izolačním materiálu poklesne přiložené svorkové napětí. Protože indukčnost zdroje nedovolí, aby se tento úbytek napětí vyvolaný výbojem dorovnal ze zdroje, je zjištěný úbytek úměrný náboji proudového impulsu částečného výboje. V závislosti na materiálu zkoušené izolace je délka pulzu rozdílná, pro pevné izolace je impuls kratší, desítky ns, než u kapalných izolací, kde se celková doba proudového impulsu pohybuje v hodnotách jednotek μs .

Globální galvanická metoda je zástupcem přímých metod pro detekci částečných výbojů. Výhodou je vysoká citlivost měření, bezpečnost měřeného objektu z hlediska nadměrného přetěžování a možnost měřit v on-line režimu. Základem je sledování proudových impulzů pomocí měřicí impedance, která je realizována jako RLC člen s ochrannými prvky proti přepětí. Norma ČSN EN 60270 specifikuje tři druhy zapojení, sériové, paralelní a můstkové, v závislosti na zapojení zkoumaného objektu a snímací impedance. Snímací impedance slouží k převádění výbojem vyvolaných proudových pulzů na výstupní napětíové pulzy pro měřicí zařízení.

Při výbojové činnosti je také vyzařováno vysokofrekvenční elektromagnetické pole, jeho detekce pomocí různých snímačů a antén je pak základem nepřímých elektrických metod. Metody induktivně vázané sondy, diferenciální elektromagnetické a kapacitní drážkové sondy, jsou pak lokalizační metody používané pro diagnostiku točivých strojů. Pro detekci výbojové činnosti v kabelech se používají kapacitní a induktivní snímače.

Kapacitní snímač je snímač koaxiálního tvaru, který zachycuje elektrickou složku vyzařovaného vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Je možné s nimi měřit částečné výboje kabelů, kabelových spojek a koncovek nebo zařízení zapouzdřených rozvodů. Nevýhodou je nemožnost určit elektricky odstíněný zdroj částečných výbojů a měření pouze v off-line režimu.

Induktivní snímač je na rozdíl od kapacitního snímače možné použít i pro on-line měření. Snímají se impulzní dobíjecí proudy částečných výbojů, které protékají uzemněním měřicího elektrického obvodu. Jedná se o toroidní snímače, jejichž primární vinutí tvoří právě vodič zemnicího spojení, nebo snímače lineární, které se umisťují tak, aby byla

podélná osa snímače orientována ve směru vektorů magnetické indukce a intenzity magnetického pole.

8.2.2 Neelektrické metody detekce

Vzhledem k tomu, že výskyt částečných výbojů je doprovázen nejen elektrickými, ale i neelektrickými projevy, byly zavedeny i metody detekce právě těchto neelektrických projevů. Výbojová činnost je doprovázena tepelným ohřevem okolí, vznikem chemických zplodin nebo světelného záření ve viditelném i ultrafialovém spektru, ale také vznikem zvukové vlny ve slyšitelném nebo ultrazvukovém pásmu. Pro jejich detekci se pak používají speciální měřicí zařízení, jako jsou směrové mikrofony, termovize nebo plynová chromatografie. Ty nejen že dokáží částečné výboje detekovat, ale jsou také schopné je kvantifikovat a lokalizovat jejich polohu. [69]

Akustická detekce je založena na snímání akustické emise vznikající při částečných výbojích. Zvukové vlny širokofrekvenčního spektra se pohybují od místa vzniku výboje a mohou být detekovány pomocí směrových mikrofونů nebo různých čidel a piezoelektrických snímačů. Výhodou metody je její jednoduchost a možnost on-line měření. Na druhou stranu výstupem metody je pouze lokalizování místa vzniku částečných výbojů, které nemusí být vždy úplně přesné. Díky lepší směrovosti a nezaměnitelnosti s vibracemi okolního prostředí se v praxi častěji používá detekce zvukových vln ultrazvukového pásma, které jsou pro výbojovou činnost charakteristické.

Optická detekce sleduje vnější optické projevy částečných výbojů. Může se jednat o optické projevy ve viditelném, ultrafialovém i infračerveném spektru. K pozorování se používají kamery, fotografie, kamery se speciálními selektivními filtry pro pozorování optických projevů v ultrafialovém spektru a infrakamery, neboť částečné výboje jsou doprovázeny také místním ohřevem materiálu. Optická detekce nachází největší uplatnění při sledování vnějších výbojových činností u venkovních vedení. Pomocí speciálních kamer je možné zaznamenat slabé elektrické výboje až na vzdálenost 10 m, což právě u venkovních vedení velice zjednodušuje monitorování stavu vysokonapětových vedení. Jednoduchou, on-line a nedestruktivní optickou inspekci lze tak díky detekování výbojů kontrolovat degradaci kompozitních izolátorů, praskliny keramických izolátorů a jejich znečištění. [71]

Chemická detekce analyzuje chemické produkty vznikající při výbojové činnosti. Z důvodu nízké koncentrace vznikajících chemických produktů se chemická detekce zaměřuje spíše na dlouhodobě namáhané izolace transformátorů a velkých točivých strojů.

8.3 Napětové zkoušky

Napětové zkoušky testují velikost elektrické pevnosti izolačních materiálů a systémů. Jedná se proto o jednu z nejdůležitějších zkoušek, protože právě elektrická pevnost udává charakteristické vlastnosti izolace, které jsou důležité při návrhu a konstrukci izolačních systémů.

Obecně se napětové zkoušky mohou rozdělit do skupin na stejnosměrné a střídavé zkoušky a zkoušky atmosférickým impulzním napětím. V případě stejnosměrného testování se izolace testuje zkušebním napětím kladné i záporné polarity, jehož hodnota zvlnění by neměla přesáhnout 3 %. Při výdržné zkoušce je na materiál izolace přiloženo napětí, které se postupně v daných krocích zvyšuje do té doby, než je dosaženo zkušební hodnoty. Zkušební napětí zůstává ve své nejvyšší hodnotě po určitou dobu, přibližně několik sekund. Důležité je napětí nezvyšovat příliš pomalu, aby se výrazně nezačalo projevovat oteplení izolace, které má negativní vliv na výslednou hodnotu elektrické pevnosti. Aplikují se také zkoušky přeskokovým či průrazným napětím, během kterých je přiložené napětí zvyšováno do té doby, než dojde k elektrickému průrazu. Nevýhodou této metody je destruktivní průraz izolačního materiálu u pevných izolací. Další nevýhodou napětových zkoušek se stejnosměrným napětím je fakt, že u polymerních izolačních materiálů, především pak u extrudovaných kabelových izolací XLPE, se za přítomnosti stejnosměrného elektrického pole vytváří prostorový náboj. Ten může následně působit problémy se snížením deklarovaných hodnot elektrické pevnosti. Alternativou můžou být testy využívající střídavé napětí s velmi malou frekvencí, menší než 0,1 Hz. Ty nezpůsobují takové hromadění prostorového náboje v polymerních izolacích a jsou schopny detekovat případné poruchy už při nižších hodnotách napětí, než je tomu u DC testu. [69], [72], [73]

Podobně se používají i testy se střídavým napětím. Důležité je dodržet předepsaný tvar a hodnotu přiloženého napětí, k jehož generování slouží certifikované generátory. Střídavé napětí průmyslového kmitočtu se aplikuje jako napětí výdržného testu, kde je důležité pomalé připojování a odpojování přiloženého napětí, aby nedošlo ke vzniku přechodových

přepětí a tím ke zkreslení výsledků. Stejně jako u DC testu se používají i testy přeskokovým/průrazným napětím. Ty jsou rozděleny na zkoušky s rychlým nárůstem napětí, kde je napětí rovnoměrně zvyšováno od nuly až do průrazu tak, aby k průrazu došlo okolo 10 až 20 sekund od přiložení napětí. Druhým typem zkoušky střídavého průrazného napětí je zkouška se stupňovitým nárůstem napětí s dvacetisekundovými stupni. Především u izolačních systémů venkovních vedení pak důležitou roli hrají napětěvé zkoušky s atmosférickým impulzním napětím, které napodobují atmosférický impulz vznikající při bouřkové činnosti. Normalizovaný atmosférický impulz pak má přesně daný tvar, doba čela 1,2 μs a doba půltýlu 50 μs . [51], [69]

8.4 Měření rezistivity a vodivosti

Ačkoli je žádoucí, aby izolační materiály měly ideálně nulovou elektrickou vodivost, v reálném světě toho nelze dosáhnout. I ten sebelepší izolant obsahuje volné nosiče náboje a určité množství příměsí a nečistot, které způsobují nežádoucí elektrickou vodivost. Podobně působí i vlivy okolního prostředí, které na izolant působí. Největší vliv má vzdušná vlhkost, která výrazně zvyšuje nejen povrchovou vodivost materiálu, ale v případě porézních a navlhavých materiálů i tu vnitřní. Za normálních podmínek jsou nejčastěji volnými nosiči náboje ionty, v případě vložení izolačního materiálu do silného elektrického pole se začíná projevat elektronová vodivost. Vodivost izolačních materiálů pak vyvolává průchod vodivostních proudů, které způsobují ztráty ve formě vzniklého Jouleova tepla. Ve stejnosměrných elektrických polích je pro ztráty rozhodující právě velikost vodivostního proudu, zatímco u střídavých polí se na dielektrických ztrátách podílejí ještě ztráty polarizační. Výjimku tvoří nepolární organické polymery, u nichž se vyskytuje jen bezztrátová polarita. [51]

Z hlediska hodnocení elektrické vodivosti se používají hodnoty měrného elektrického odporu ρ [Ωm] a měrné elektrické vodivosti γ [S/m], mezi kterými platí následující vztah:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (8.1)$$

Platí tedy, že hodnota měrné elektrické vodivosti je úměrné převrácené hodnotě měrného elektrického odporu, a naopak. Měrný elektrický odpor v homogenním poli pak lze vyjádřit pomocí plochy elektrod S [m^2], tloušťky vzorku h [m] a hodnoty izolačního elektrického odporu R [Ω]. Platí vzorec

$$\rho = R * \frac{S}{h} \quad (8.2)$$

kde

$$R = \frac{U}{I} \quad (8.3)$$

Hodnota izolačního elektrického odporu se vypočte z přiloženého elektrického napětí U [V] a procházejícího elektrického proudu I [A]. Elektrický izolační odpor není vlastností materiálu, ale konkrétního izolačního prvku. Proto je potřeba materiály porovnávat z hlediska měrného elektrického odporu, který je materiálovou vlastností, a ne z hlediska izolačního odporu. [51]

Pro stanovení elektrické vodivosti izolačních materiálů se využívá právě přímé úměry s hodnotami měrného elektrického odporu a jeho závislosti na snadno zjistitelném izolačním odporu. Měření elektrického odporu lze provést přímými nebo srovnávacími metodami. U přímých metod, jejichž zástupcem je například voltampérová metoda, je na testovaný vzorek přiloženo napětí a z procházejícího proudu se odvodí výsledný odpor. Srovnávací metody srovnávají pomocí můstkového zapojení a nulového indikátoru velikost odporu s hodnotou normálu. Důležité je, aby testovací sestava nijak nezkreslovala výslednou hodnotu elektrického odporu. Musí být zajištěn správný kontakt napěťových elektrod, které by měly být z co nejlépe vodivého materiálu s nízkým přechodovým odporem. Proto se na povrch elektrod aplikují vodivé nátěry, kovové fólie nebo speciální vodivé gumy. Neméně důležitá je i příprava měřeného vzorku, který by měl být v dielektricky stabilním stavu. Tzn. neutralizované vnitřní a povrchové náboje. [51]

V přenosových systémech je velmi důležité měření a kontrola vodivosti izolací vysokonapětových kabelů. Zvláště pak u extrudovaných XLPE izolací stejnosměrných systémů je potřeba zajistit nízkou hodnotu elektrické vodivosti, protože ta je společně s prostorovým nábojem hlavním činitelem zkracování životnosti těchto izolací. Experiment podle [74] se zaměřil na zjišťování závislosti DC vodivosti polymerní XLPE izolace na množství doprovodných produktů její výroby. Při procesu extruze, která probíhá za vysoké teploty a tlaku, se z polymerního materiálu uvolňuje acetofenol a jiné látky, které zvyšují jeho vodivost. Proto je nutné acetofenol při výrobě následně odstranit procesem odplynění, jehož doba trvání pak udává zbývající množství této nežádoucí látky. Pokud proces odplynění proběhne příliš rychle, zbylé látky způsobí zvýšení vodivosti izolace. Zvýšená

elektrická vodivost u tohoto typu izolací způsobuje neúnosné zahřívání, které může vyvrcholit tepelným průrazem. Měření probíhalo na 1 mm tenkých plátcích XLPE izolace, které se lišily pouze v době aplikace procesu odplynění. Přes mosazné elektrody na ně bylo přivedeno napětí s intenzitou 30kV/mm. Test probíhal po dobu 23 hodin za konstantní teploty 70 °C. Bylo zjištěno a potvrzeno, že DC vodivost XLPE izolace je opravdu výrazně ovlivněná přítomností produktů procesu extrudování. Navíc bylo potvrzeno, že doba procesu odplynění také hraje svoji roli. Jen 5 hodin trvající proces odplynění dokáže snížit výslednou vodivost XLPE izolace na polovinu, oproti stavu bez procesu odplynění. Nelze ovšem dosáhnout nulové vodivosti, neboť ani po výrazně delší době není možné nežádoucí látky zcela odstranit.

Vodivosti izolačních materiálů je závislá na teplotě. S rostoucí teplotou roste i vodivost, zvláště u organických izolantů je tato závislost poměrně výrazná. Právě tímto jevem se zabíral pokus [75]. Několik vzorků polymerních izolací XLPE a LDPE bylo vystaveno dynamickým změnám teploty, v rozsahu od pokojové teploty do 90 °C, během několika hodin. Z výsledků je patrné, že elektrická vodivost opravdu poměrně přesně sleduje dynamické změny teploty. Dále bylo také dokázáno, že na vodivost vzorků má velký vliv typ ochranného filmu používaného při procesu extrudování. Ochranný film se vkládá mezi desky lisu a lisovaný materiál, aby se zajistily požadované povrchové i strukturální vlastnosti. Použití hliníkového ochranného povlaku výslednou vodivost snížilo až desetinásobně oproti případu, kde byla použita PET ochranná vrstva. To lze vysvětlit tím, že při procesu lisování a extrudování se z PET povlaku uvolňují některé z nežádoucích látek, jako je tomu u samotného XLPE nebo LDPE polyetyleny. Tento jev souvisí i s předchozím experimentem, protože použitý film bude mít vliv i na uvolňování nežádoucích látek ze základního materiálu a tím i na zvyšování elektrické vodivosti. Navíc zde byla také potvrzena souvislost mezi dobou odplynění extrudovaných materiálů a výslednou velikostí elektrické vodivosti. Oba testy také ukázaly, že vodivost všech měřených izolačních materiálů postupně slábne, pokud je vzorek ponechán delší čas v elektrickém poli konstantní intenzity.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsání vysokonapětových stejnosměrných izolačních systémů se zaměřením na kompozitní izolační prvky v přenosových a distribučních systémech. Také byla provedena rešerše základních technických požadavků na elektrické izolace a byly představeny vybrané diagnostické metody využitelné v oblasti prokazování technické způsobilosti izolačních systémů.

Aby vůbec bylo jasné, proč je potřeba zabývat se vysokonapětovými stejnosměrnými izolačními systémy, je v úvodu práce popsán zatím ne zcela běžný stejnosměrný přenos elektrické energie. Technologie HVDC, neboli technologie stejnosměrného vysokého napětí, přináší řadu výhod oproti klasickým střídavým systémům přenosu elektrické energie. Stále však platí, že výhody spojené se stejnosměrným přenosem jsou na kratších vzdálenostech zastíněny vysokými náklady na výstavbu DC vedení, především pak na výstavbu terminálových koncových stanic, které jsou vybaveny složitými a drahými měniči napětí. Při přenosových vzdálenostech větších než 600 km se ovšem DC přenos stává i z ekonomického hlediska výhodnějším řešením. Vyšší stabilita, lepší ovladatelnost přenosové soustavy, nižší ztráty společně s menším počtem potřebných vodičů jsou jen některé z mnoha výhod stejnosměrného přenosu elektrické energie. Díky tomu mohou vznikat vedení ohromných rozměrů, jako je například 2200 km dlouhé UHVDC vedení pracující s napětím ± 800 kV, které spojuje čínské provincie Xinjiang a Henan. Výhodnější je také použití stejnosměrného napětí pro podzemní a podmořská spojení, která nejsou tolik ovlivňována kapacitou kabelů.

Na popis HVDC technologie navazuje popis vysokonapětových izolačních prvků, konkrétně popis kabelových izolací a izolátorů, neboť to jsou dva nejdůležitější izolační prvky u vysokonapětových přenosových vedení. Z kabelových izolací jsou představeny impregnované izolace, polymerní extrudované izolace, ale i moderní plynem izolovaného vedení. Zvláště polymerní zesíťované materiály XLPE jsou stále častěji využívaným řešením. Důvodem je především jejich zvýšená teplotní odolnost, vysoká elektrická pevnost a absence olejů, díky čemuž se jedná o ekologicky i konstrukčně velice výhodné řešení zvláště pro izolace podmořských kabelů. Dále je obecně popsána problematika vysokonapětových izolátorů s rozdělením na keramické, skleněné a kompozitní. Podobně jako u kabelových izolací se i u izolátorů stále více uplatňují polymerní kompozitní látky. Ty nejen že přinášejí zlepšení v oblasti elektrických vlastností, ale ve velké míře i v oblasti

neelektrických vlastností. Kompozitní izolátory pak jsou daleko menší, lehčí a odolnější v porovnání s klasickými keramickými izolátory dimenzovanými na stejnou napět'ovou hladinu. Nespornou výhodou jsou také jejich výborné povrchové vlastnosti. Už tenká vrstva RTV silikonu dokáže snížit náchylnost izolátorů ke znečištění, které je velkým problémem u všech izolátorů na všech napět'ových hladinách.

Protože je elektrická izolace tak důležitá, že bez její správné funkce nelze bezpečně provozovat elektrické zařízení, je potřeba důkladně znát elektrické vlastnosti a technické požadavky na izolační materiály. Kapitola 7 se proto věnuje základním elektrickým vlastnostem izolačních prvků, jako jsou elektrická pevnost, dielektrické ztráty, dielektrická vodivost, ale i problémů spojeným s výskytem elektrického pole, kterými jsou například částečné výboje či vznik prostorového náboje. Elektrické vlastnosti izolantů jsou opět brány obecně pro AC i DC systémy, neboť se při dimenzování izolace tento rozdíl zatím příliš neřeší. V některých případech mohou izolace sloužit současně i jako konstrukční prvky, s čímž je potřeba počítat už ve fázi návrhu daného izolačního systému. Proto jsou v závěru kapitoly sepsány i základní požadavky na mechanickou odolnost a odolnost proti vlivům tepla. Zvýšené tepelné namáhání totiž ve velké míře nepříznivě ovlivňuje dobu života elektrické izolace. Pro zajištění požadovaných vlastností, kvůli lepšímu porozumění chování za působení elektrického pole a pro možnost monitorování stavu izolací byly vyvinuty různé diagnostické metody. Pro popis byly vybrány diagnostické metody, které zkoumají chování izolací ve vysokonapět'ových instalacích. Sledování částečných výbojů je velmi široká disciplína, která se zabývá detekcí a měřením výbojové činnosti v izolačních materiálech. Z hlediska sledování problémů ve vysokonapět'ových stejnosměrných systémech byla vybrána metoda elektroakustického pulzu a metody měření elektrické rezistivity a vodivosti. Tyto dvě metody totiž zkoumají dva zásadní problémy vyskytující se u stejnosměrných vysokonapět'ových izolačních systémů. Vznik prostorového náboje v polymerních izolacích a vliv stejnosměrného elektrického pole vysoké intenzity na vodivost izolačních materiálů je předmětem mnoha zkoumání.

Ze závěrů práce je jasné, že vysokonapět'ové stejnosměrné izolační systémy zatím nejsou příliš rozlišovány od těch střídavých. Přesto že stávající izolační systémy jsou pro DC aplikace funkční, kvůli zvýšení účinnosti a bezpečnosti, je potřeba zaměřit se na chování izolace za dlouhodobého působení stejnosměrného elektrického pole. Protože právě to způsobuje největší problémy pro stejnosměrný vysokonapět'ový přenos. Zdaleka ne všechny

tyto problémy už byly vyřešeny, některé problémy možná zatím nebyly ani objeveny. Cílem energetického průmyslu by proto nyní mělo být správně pochopení chování vysokonapětových stejnosměrných izolací a hledání nových izolačních prvků. V tom by mohly pomoci kompozitní materiály, které jsou společně se stejnosměrným přenosem energie považovány za budoucnost energetiky

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] “Materials Toward Development of Insulators of the Future,” *INMR.com*, 2018. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/materials-development-insulators-future-2/>. [Accessed: 01-May-2018].
- [2] Eduard Majling, “HVDC – stejnosměrný přenos elektrické energie,” 2017. [Online]. Available: <http://oenergetice.cz/technologie/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [3] Jiří Kohutka, “Historie dálkového přenosu elektrické energie | Energy-Hub,” 2016. [Online]. Available: <https://cz.energyhub.eu/pro-energy/13258-historie-dalkoveho-prenosu-elektricke-energie>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [4] “Přenos elektrické energie budoucnosti.” [Online]. Available: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/prenos_3.html. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [5] “První 800 kV vedení stejnosměrného proudu velmi vysokého napětí v Číně nyní v plném provozu | Tiskové centrum SIEMENS,” 2010. [Online]. Available: <http://www.siemens.cz/press/prvni-800-kv-vedeni-stejnosmerneho-proudu-velmi-vysokeho-napeti-v-cine-nyni-v-plnem-provozu>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [6] redakce Proelektrotechniky.cz, “UHVDC přenos 1100kV od ABB,” 2014. [Online]. Available: <http://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/58.php>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [7] ABB, “Press material: The history of HVDC transmission,” *Press Material ABB*, 2010. [Online]. Available: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/a521beb28ac88e75c12572250046e16a/\\$file/HVDC+history.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/a521beb28ac88e75c12572250046e16a/$file/HVDC+history.pdf). [Accessed: 13-Oct-2017].
- [8] “About Direct Current Technology.” [Online]. Available: <http://www.cleanlineenergy.com/technology/hvdc>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [9] “HVDC Classic technology | ABB.” [Online]. Available: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-classic>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [10] D. Mička, “Model HVDC spojky pro laboratorní výuku,” *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Bakalářská práce*, 2013.
- [11] “What are different types of HVDC links? - Monopolar, Bipolar, & Homopolar link - Circuit Globe.” [Online]. Available: <http://circuitglobe.com/different-types-hvdc-links.html>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [12] K. Myint, “Does HVDC experienced person have knowlegde about High Voltage AC?,” 2015. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/does-hvdc-experienced-person-have-knowledge-high-voltage-kyaw-myint>. [Accessed: 05-Nov-2017].
- [13] R. Faulkner, “AC vs. DC Powerlines and the Electrical Grid - The Energy Collective,” 2013. [Online]. Available: http://www.theenergycollective.com/roger_rethinker/204396/ac-versus-dc-powerlines. [Accessed: 20-Mar-2018].
- [14] “ABB: Xiangjiaba - Shanghaj,” 2012. [Online]. Available: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/xiangjiaba---shanghai>. [Accessed: 03-Nov-2017].

- [15] J. Mooney and B. Johnson, "HVdc Transmission and Integration into an AC Grid," 2016. [Online]. Available: https://www.pacw.org/no-cache/issue/september_2016_issue/lessons_learned/hvdc_transmission_and_integration_into_an_ac_grid/complete_article/1/print.html. [Accessed: 05-Nov-2017].
- [16] "ABB: World's most powerful underground HVDC cable," 2011. [Online]. Available: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/debdfbaa3ccb037fc125797c003de13b.aspx>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [17] B. A. Reyers, E. U. Transparency, R. Id, and Europacable, "An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Underground Cables," *Eur. 80, Blvd. A. Reyers — B-1030 Brussels — www.europacable.com — EU Transpar. Regist. ID 4543103789-92*, no. October, 2011.
- [18] T. Heiko and M. Adela, "Superconducting transmission lines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/284359690_fig3_Fig-3-Possible-layouts-to-fulfi-II-HVDC-5-GW-power-transmission-requirements-with-ROW. [Accessed: 05-Nov-2017].
- [19] B. A. Reyers, E. U. Transparency, R. Id, and Europacable, "An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Subsea Cables," *Eur. 80, Blvd. A. Reyers — B-1030 Brussels — www.europacable.com — EU Transpar. Regist. ID 4543103789-92*, no. October, 2011.
- [20] M. Bešta, "Rozvod elektrické energie." [Online]. Available: <http://docplayer.cz/3694331-Rozdeleni-napeti-znacka-napeti-napetove-hladiny-v-cr.html>. [Accessed: 26-Nov-2017].
- [21] Gilstrap and Matt, "United States Electricity Industry Primer," 2015. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f28/united-states-electricity-industry-primer.pdf>. [Accessed: 19-May-2018].
- [22] "ELEKTRINA." [Online]. Available: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/4-4.htm>. [Accessed: 26-Nov-2017].
- [23] A. Parisot, M. Boden, G. Sommantico, and E. Abildgaard, *Recommended voltages for HVDC grids*, vol. 292, no. June 2017. 2017.
- [24] "List of HVDC projects." [Online]. Available: https://www.revolvy.com/main/index.php?s=List of HVDC projects&item_type=topic. [Accessed: 29-Nov-2017].
- [25] "What's the difference between DC insulation and AC insulation for 50 Hz at high voltages say 500 kV? - Quora." [Online]. Available: <https://www.quora.com/Whats-the-difference-between-DC-insulation-and-AC-insulation-for-50-Hz-at-high-voltages-say-500-kV>. [Accessed: 20-Mar-2018].
- [26] C. Zhang, "Offshore Transmission Associated with Connecting Offshore Generation," *Eng. Technol. Ref.*, Jan. 2014.
- [27] "Paper insulated cables - Nexans." [Online]. Available: http://www.nexans.no/eservice/Norway-en/navigate_342614/Paper_insulated_cables.html. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [28] "Paper Insulated Oil Filled Cable SCFF CABLE(id:2545159). Buy oil-filled cable - EC21." [Online]. Available: <https://www.ec21.com/product-details/Paper-Insulated-Oil-Filled-Cable--2545159.html>. [Accessed: 31-Jan-2018].

- [29] “GENI-us Letter - February 2015 - Underwater High-Voltage Cable Links Nations And Renewable Energies - GENI - Global Energy Network Institute.” [Online]. Available: <http://www.geni.org/globalenergy/library/GENI-us/2015/geni-us-letter-2015-02.shtml>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [30] G. Mazzanti and M. Marzinotto, *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission Advances in Research and Development*. John Wiley & Sons, 2013.
- [31] “N2XSY 3.6/6 kV XLPE.” [Online]. Available: https://zzhd.en.alibaba.com/product/60655455581-209395143/N2XSY_3_6_6_kV_XLPE_INSULATED_SINGLE_CORE_CABLES_WITH_COPPER_CONDUCTOR_MEDIUM_VOLTAGE_CABLES.html. [Accessed: 06-Mar-2018].
- [32] U. Riechert, U. Straumann, R. Gremaud, and M. Callavik, “Compact Gas-insulated Systems for High Voltage Direct Current Transmission: Design and Testing.”
- [33] “Gas-insulated transmission lines - Power transmission lines - Siemens Global Website.” [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/high-voltage/power-transmission-lines/gas-insulated-lines.html>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [34] “Orient-composite insulator,puncture arc,puncture arc of composite insulator.” [Online]. Available: <http://www.suspensioninsulator.com/technic/Puncture-arc-of-composite-insulators.html>. [Accessed: 19-Mar-2018].
- [35] G. Zhicheng, “Application of & Experience with Different Insulators in China,” *INMR.COM*, 2014. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/application-experience-different-insulators-china-2/>. [Accessed: 22-Mar-2018].
- [36] “Meranie na izolátorovom reťazci.” [Online]. Available: http://kee.fei.tuke.sk/images/documents/TVN/nc_tv_n_4.pdf. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [37] “ČSN EN 60672-1: Keramické a skleněné izolační materiály - Část 1: Definice a třídění,” 1997.
- [38] “WS Industries (India) Limited.” [Online]. Available: <http://www.wsindustries.in/products.html>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [39] K. Daware, “Electrical Insulators - insulating materials and different types | electricaleasy.com.” [Online]. Available: <https://www.electriceasy.com/2016/11/electrical-insulators.html>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [40] “Basics of RTV Silicone Coatings,” *INMR.com*, 2017. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/basics-rtv-silicone-coatings/>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [41] “Composite Insulators for Application on UHV AC & DC Transmission Lines,” *INMR.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/composite-insulators-application-uhv-ac-dc-transmission-lines/>. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [42] F. Schmuck, “Preferred Insulators for DC Line Applications,” *INMR.com*, 2017. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/preferred-insulators-line-applications/>. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [43] J. Zárýbnický, “Přeskokové charakteristiky izolátorů při umělém znečištění,” *České vysoké učení technické v Praze, Katedra elektroenergetiky, Diplomová práce*, Praha, 2015.

- [44] "SILCOSIL © SILICONE INSULATORS," *PFISTERER SEFAG AG*. [Online]. Available: http://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads_en/Silcosil-Silicone-Insulators-AI-EN.pdf. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [45] Y. Khan, "Hydrophobic characteristics of EPDM Composite Insulators in Simulated Arid Desert Environment," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 3, 2009.
- [46] A. Sykaras, "A Study of SiR / EPDM Mixtures for Outdoor Insulators," vol. 7, no. 4, pp. 1737–1740, 2017.
- [47] "Suspension Composite Insulator, Tension Polymeric Insulator, Socket, Ball," *Suzhou Chino Electric Co., Ltd*. [Online]. Available: <http://www.chinoele.com/sale-8179834-suspension-composite-insulator-tension-polymeric-insulator-socket-ball.html>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [48] K. Papailiou, "Composite Insulators in Innovative Tower Solutions & Line Upgrading," *INMR.com*, 2018. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/composite-insulators-innovative-tower-solutions-line-upgrading/>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [49] G. Gödel, "Technical Review of Hybrid Insulators," *INMR.com*, 2015. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/technical-review-hybrid-insulators/>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [50] T. Tomášková, "Perspektivní komozity pro elektrotechniku," *Západočeská univerzita v Plzni, Katedra elektroenergetiky a ekologie Diplomová práce*, Plzeň, 2012.
- [51] V. Mentlík, *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [52] A. Mudruňková, "Elektrotechnické materiály I.," *publi.cz*, 2016. [Online]. Available: <https://publi.cz/books/353/Impresum.html>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [53] R. Gorur, "Nanotechnology and Insulators," *INMR.com*, 2015. [Online]. Available: <http://www.inmr.com/nanotechnology-insulators/>. [Accessed: 26-Mar-2018].
- [54] T. Ráček, "Dielektrické vlastnosti epoxidové pryskyřice plněné nanočásticemi," *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Diplomová práce*, Brno, 2010.
- [55] L. Jabůrek, "Studium elektrického namáhání drážkové izolace," *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Bakalářská práce*, Brno, 2009.
- [56] R. Wasyluk, "Elektrotechnologie : pro školu a praxi," 2004. [Online]. Available: <https://publi.cz/books/353/06.html>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [57] J. Zimáková, "Měření permitivity a ztrátového činitele vody," *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Diplomová práce*, Brno, 2012.
- [58] L. Běhálek, "Polymery," 2015. [Online]. Available: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>. [Accessed: 26-Mar-2018].
- [59] M. Robinson, "What's space charge with regard to high voltage/insulation? - Quora," 2015. [Online]. Available: <https://www.quora.com/Whats-space-charge-with-regard-to-high-voltage-insulation>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [60] N. Ruangakajonmathee, R. Thiamrsri, and B. Marungsri, "Space charge distribution in 22 kV XLPE insulated cable by using PEA measurement technique," *World Acad. Sci.*, vol. 6, 2012.

- [61] S. Li, Y. Zhu, D. Min, and G. Chen, "Space Charge Modulated Electrical Breakdown," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 32588, Dec. 2016.
- [62] M. Fu, L. A. Dissado, G. Chen, and J. C. Fothergill, "Space Charge Formation and Its Modified Electric Field under Applied Voltage Reversal and Temperature Gradient in XLPE Cable," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 851–860.
- [63] I. Plaček, "Diagnostika kabelů vysokého napětí," *Západočeská univerzita v Plzni, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, Bakalářská práce*, Plzeň, 2012.
- [64] V. Macek, "Částečné výboje," *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Diplomová práce*, Brno, p. 63, 2014.
- [65] O. Kozák, "Částečné výboje při stejnosměrném napětí," *Západočeská univerzita v Plzni, Katedra technologií a měření, Diplomová práce*, Plzeň, 2015.
- [66] M. Kutz, *Handbook of materials selection*. J. Wiley, 2002.
- [67] T. Jandera, "Diagnostický systém kompozitních materiálů," *Západočeská univerzita v Plzni, Katedra technologií a měření, Diplomová práce*, Plzeň, 2015.
- [68] M. Kučera, "Účinky vícefaktorového namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů," *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Bakalářská práce*, Brno, 2009.
- [69] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, and P. Trnka, *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [70] J. Hornak and P. Trnka, "Konstrukční návrh a realizace diagnostické jednotky pro sledování rozložení prostorového náboje v dielektrických materiálech," *Electroscope*, vol. I., 2017.
- [71] "Ofil's DayCor Corona Cameras- Original Professional Sensitive," *ofilsystems.com*. [Online]. Available: <http://www.ofilsystems.com/>. [Accessed: 28-Apr-2018].
- [72] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*. New York: MARCEL DEKKER, 1998.
- [73] L. W. Meng, "The dangers of DC high voltage test for XLPE cables at site," *Singapore Eng.*, 2001.
- [74] U. H. Nilsson, J. Andersson, V. Englund, V. Eriksson, P. O. Hagstrand, and A. Smedberg, "The role and measurement of DC conductivity for HVDC cable insulation materials," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2015–Decem, pp. 31–34, 2015.
- [75] H. Ghorbani, C.-O. Olsson, and M. Jeroense, "DC conductivity of polyethylene and crosslinked polyethylene measured with a dynamic temperature program," *Proc. Nord. Insul. Symp.*, 2017.