

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Využití supravodivosti pro stejnosměrný přenos elektřiny

Use of superconductivity for DC transmission of
electricity



Bakalářská práce

Autor Práce: Vilém Málek

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí Práce: Ing. Miroslav Vítek

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Málek** Jméno: **Vilém** Osobní číslo: **406611**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití supravodivosti pro stejnosměrný přenos elektřiny

Název bakalářské práce anglicky:

Use of superconductivity for DC transmission of electricity

Pokyny pro vypracování:

1. Popis fyzikálního jevu supravodivosti s ohledem na přenos stejnosměrného proudu
2. Plán rozvoje české přenosové soustavy
3. Alternativní návrh využití dosavadních tras 220 kV vedení pro supravodivý přenos DC
4. Porovnání supravodivého řešení s klasickým z ekonomického hlediska

Seznam doporučené literatury:

- [1] Qiu, Xianggang.: High-temperature Superconductors 1st pub. Cambridge: Woodhead, 2011.
- [2] Kvítek, E.: Materiály pro elektrotechniku. Praha, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Vítek, CSc., 13116

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.03.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Miroslav Vítek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem a dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Vilém Málek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Vítkovi , CSc., za konzultace, odborné rady a celkový čas věnovaný mé práci. Poděkování také patří Ing. Janu Kubovi. CSc., který mě k problematice supravodivosti přivedl a zasvětil mě do ní.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zaměřuje na stejnosměrný přenos elektrické energie a supravodivý stav materiálu. V první části je popsán fyzikální jev supravodivosti, druhy supravodičů a především vysokoteplotní supravodiče, které jsou perspektivní pro využití v praxi. Pro komplexnost práce je zde také nastíněna výroba HTS. Druhá a třetí část se zaměřuje na přenosovou soustavu a stejnosměrný přenos. Jsou zde popsány výhody a nevýhody stejnosměrného přenosu oproti konvenčnímu střídavému. Poslední část ekonomicky porovnává různé varianty přenosu a konvenční vedení s vedením obsahující supravodivé prvky. Cílem práce je seznámit s jevem supravodivosti a stejnosměrným přenosem a předložit faktory, které o finanční náročnost projektů s využitím těchto technologií z okamžitého i dlouhodobého hlediska rozhodují.

Klíčová slova: supravodivost, HTS, HVDC, přenosová soustava, roční ekvivalentní pěnížní tok, ztráty, přenos elektrické energie

Abstract:

This bachelor thesis focuses on DC power transmission and superconducting state of the material. The first part describes the physical phenomenon of superconductivity, types of superconductors and, above all, high temperature superconductors, which are promising for practical use. For a more complex introduction the fabrication of HTS is also described. The second and third parts focus on the transmission system and the DC transmission and there are described advantages and disadvantages of DC transmission over conventional AC. The last part economically compares the different transmission alternatives and conventional conduction with conduction containing superconducting elements. The objective of the thesis is to acquaint with the phenomenon of superconductivity and DC transmission and to present the factors, that affect the acquisition and operating cost.

Key words: superconductivity, HTS, HVDC, Electric power transmission, equivalent annual annuity, losses, transmission of electricity

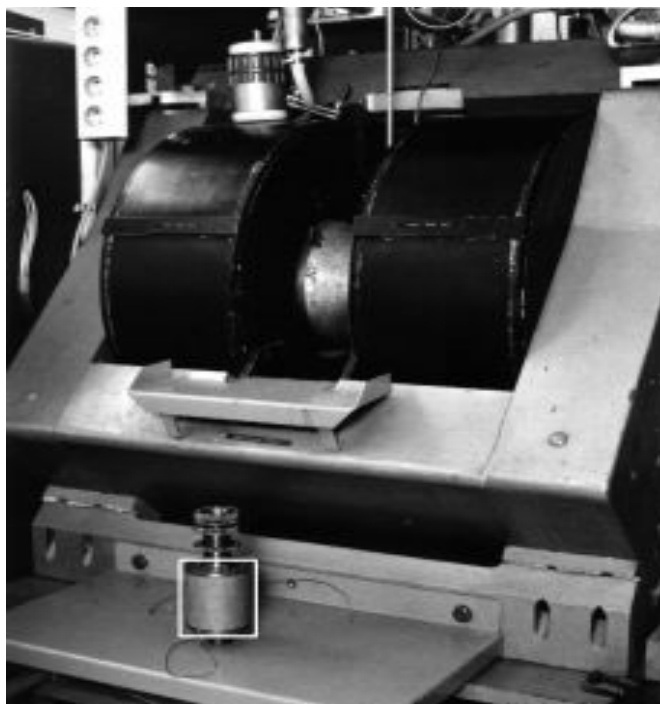
Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Supravodivost..... | 6 |
| 1.1 Úvod..... | 6 |
| 1.2 Meissnerův efekt | 7 |
| 1.3 Druhy supravodičů..... | 8 |
| 1.4 HTS | 9 |
| 1.5 Vlastnosti..... | 11 |
| 1.6 Výroba HTS..... | 12 |
| 2. Plán rozvoje české přenosové soustavy..... | 14 |
| 2.1 Elektrizace soustava..... | 15 |
| 2.2 Budoucí investice..... | 16 |
| 2.3 Plánované investice ČEPS..... | 17 |
| 3. Alternativní návrh využití dosavadních tras 220 kV vedení pro supravodivý přenos DC | |
| 3.1 Stejnoseměrný přenos..... | 20 |
| 3.2 Prvky rozvodny stejnosměrného vedení..... | 21 |
| 3.3 Uspořádání DC sítě..... | 23 |
| 3.4 Infrastruktura..... | 24 |
| 3.5 Supravodivé prvky..... | 27 |
| 4. Porovnání supravodivého přenosu s klasickým z ekonomického hlediska..... | 32 |
| 4.1. Ekonomické porovnání AC a DC přenosu..... | 32 |
| 4.2. Ekonomické porovnání konvenčního AlFe lana a supravodivého AC kabelu | 45 |
| 4.3. Ekonomické porovnání nadzemní DC linky a supravodivé podzemní DC linky..... | 45 |
| 4.4. Zhodnocení..... | 45 |

1. Supravodivost

1.1 Úvod

K objevu supravodivosti vedl výzkum v oblasti nízkých teplot, kterým se zabýval nizozemský fyzik Heike Kamerlingh Onnes. V roce 1908 se mu podařilo zkapalnit helium, jehož teplota varu je při normálním tlaku 4,2K. Zabýval se převážně chováním látek při extrémně nízkých teplotách a to vedlo k pozorování úměrného snižování odporu s teplotou. Odpor se při snižování teploty ustálil na malé zbytkové hodnotě. Takto se chovalo například zlato či platina. Při ochlazování rtuti pod tzn. kritickou teplotu (pro rtuť 4,2K) skokově klesl odpor na neměřitelnou hodnotu. Toto měření se odehrálo v roce 1911 a je považováno za objev supravodivosti. Teplota při níž se daná látka stává supravodivou se nazývá kritická teplota T_c a je charakteristická pro daný materiál. Supravodivost byla popsána až v roce 1957, kdy vědci Bardeen, Cooper a Schrieffer zveřejnili teorii objasňující princip supravodivosti. Tato teorie byla pojmenována BCS teorie. Podle BCS se po dosažení kritické teploty mohou párovat elektrony a vytváří takzvané Cooperovy páry. Ty se nemohou chovat nezávisle na ostatních, tudíž se Cooperovy páry chovají jako celek. Jsou tak schopny se látkou pohybovat bez odporu a vypuzovat vnější magnetické pole. Supravodivost fungující na tomto principu se nazývá konvenční supravodivost. Tato teorie však nedokáže vysvětlit vysokoteplotní supravodivost. [1]



Obrázek 1: Porovnání konvenčního elektromagnetu (černá cívka nahoře) a supravodivého magnetu (cívka dole). Při stejném proudu 100 A dává elektromagnetické pole 2T, zatímco supravodivý magnet dává ve srovnatelném objemu pole 5 T. [1]

1.2 Meissnerův efekt

Pro magnetickou indukci platí vztah:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Kde:

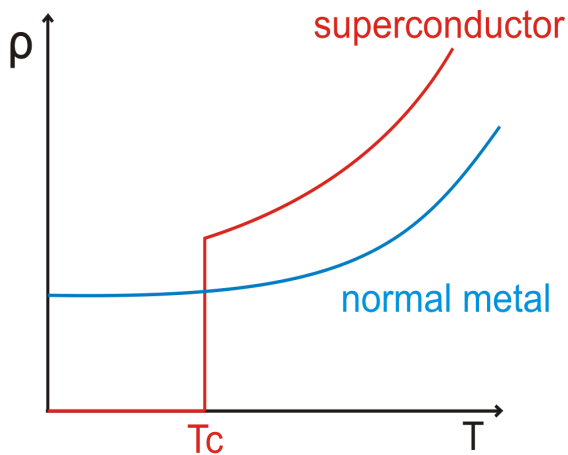
μ_0 – permeabilita vakua [H.m⁻¹]

\vec{H} - intenzita vnějšího magnetického pole [A/m]

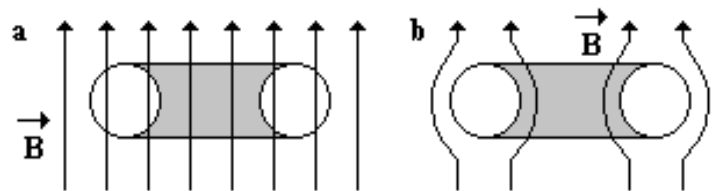
\vec{M} - magnetizace [A/m]

Magnetizace charakterizuje reakci materiálu na vnější magnetické pole. Supravodič se chová jako diamagnetická látka tzn. zeslabuje magnetické pole.

Pro Meissnerův jev tedy platí $B = 0$. Po překročení kritické teploty je magnetická indukce vytlačována z vnitřku supravodiče. Vytlačování indukce způsobují stínící proudy, které protékají supravodičem těsně pod povrchem. Stínící proudy vyvolává vnější magnetické pole a vytvářejí magnetické pole, které vnější pole kompenzuje. Veličina která popisuje hloubku vniku vnějšího magnetického pole do supravodiče, se nazývá Londonova hloubka vniku λ , a u běžně dosahuje řádově 10^{-7} , což je typická tloušťka materiálu, kterou protéká elektrický proud. [2]



Obrázek 2: Závislost rezistivity [ρ] na teplotě [K] s kritickou teplotou supravodiče T_c . [3]



Obrázek 3: Vlevo supravodič nad kritickou teplotou, siločáry vzorkem procházejí. Vpravo ochlazen pod kritickou teplotu, siločáry jsou vytlačovány z vnitřního objemu vzorku. [2]

1.3 Druhy supravodičů

Existují dva druhy supravodičů, které se liší objemovými vlastnostmi, tzn. v chování v přítomnosti vnějšího elektromagnetického pole.

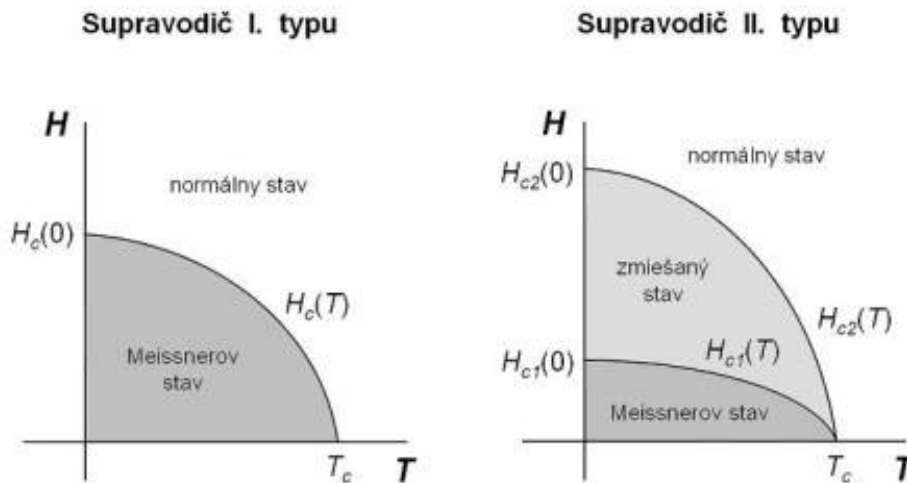
Pro supravodiče I. typu platí $\xi > \lambda L \sqrt{2}$, kde ξ je koherence cooperova páru a λL londonova hloubka vniku.

Supravodiče I. typu mají kritickou teplotu v řádech desetin a jednotek K. Jsou to výhradně kovy a jejich přechod do supravodivého stavu vysvětluje BCS. V silných magnetických polích ztrácí supravodivé vlastnosti pokud $B > B_c$, kde B_c je kritická hodnota magnetické indukce.

Pro supravodiče II. Typu platí $\xi < \lambda L \sqrt{2}$, kde ξ je koherence cooperova páru a λL londonova hloubka vniku.

Jsou to nejrůznější slitiny kovů a kompozitní materiály obsahující měď a nekovové složky. Na rozdíl od supravodičů I. typu mají dvě kritické hodnoty indukce B_{c1} a B_{c2} . Do dosažení B_{c1} se chovají jako supravodiče I. typu, ale po jejich překročení přecházejí do tzv. “smíšeného” stavu.

Tedy začne do objemu vodiče pronikat vnější magnetické pole ve formě tzv. Abrikosovových vírů (vortexů). Těch při zvyšování magnetické indukce vnějšího pole přibývá, až zaplní celý objem supravodiče a zanikne supravodivý stav (překročení B_{c2}). Kritická indukce dosahuje o několik řádů vyšších hodnot než u supravodičů I. typu. [4]

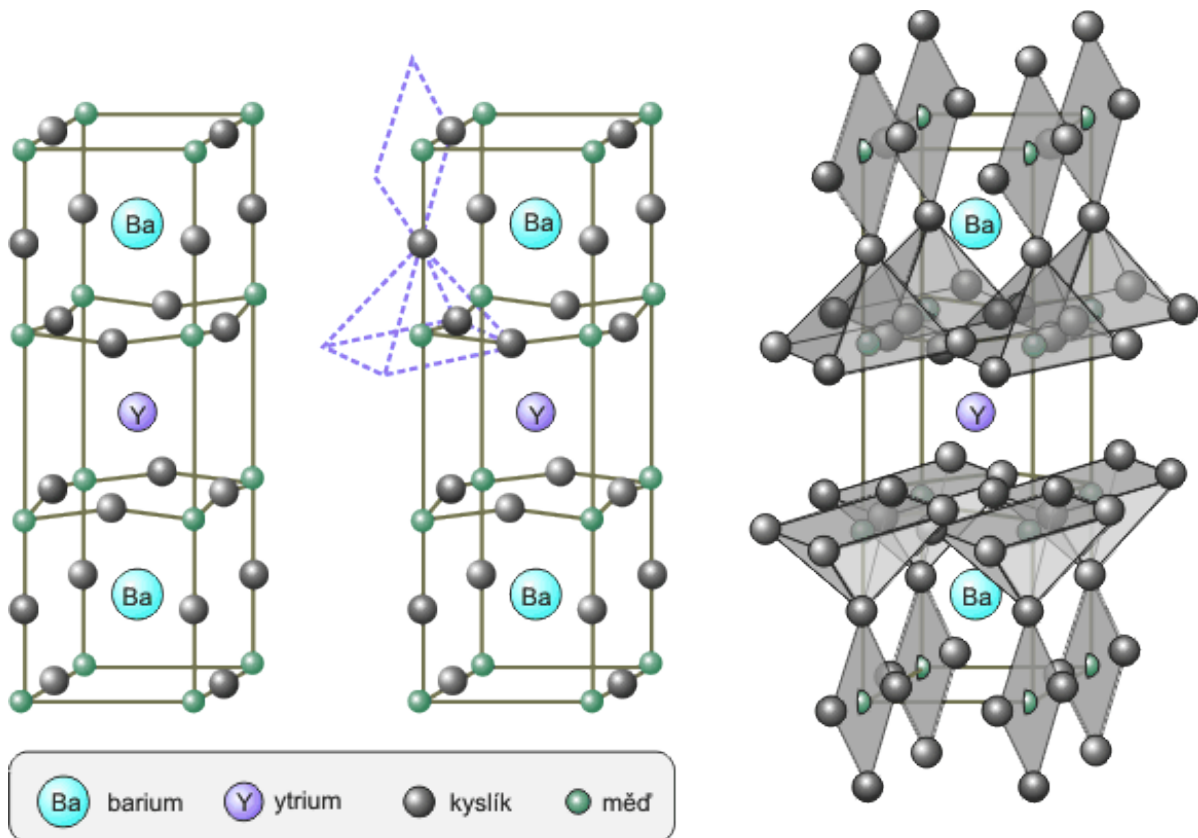


Obrázek 4: Porovnání supravodičů I. a II. typu [5]

1.4 HTS

Jako nepřekonatelná hranice byla považována kritická teplota 23 K. V roce 1973 objevil Bernd Matthias supravodivý Nb_3Ge právě s touto kritickou teplotou. Toto v roce 1986 Karl Alex Muller a Johannes George Bednorz vyvrátili, když objevili supravodivou keramiku $La_{2-x}Ba_xCuO_4$, jejíž kritická teplota byla 30 K. To odstartoval novou vlnu objevování supravodivých materiálů na bázi oxidů mědi kombinovaných se vzácnými kovy. Velký průlom pro použití supravodičů v praxi nastal v témže roce, jelikož Mang Kang Wu objevil supravodivou keramiku $YBa_2Cu_3O_7$ s kritickou teplotou 94 K. O technologický průlom se jednalo, jelikož tuto keramiku šlo chladit finančně méně nákladným kapalným dusíkem (77K).

To umožnilo širší využití supravodičů, vzhledem ke snížení nákladů na dosažení kritické teploty. Tato nová generace byla nazvána vysokoteplotní supravodiče (HTS). V dalších letech byly nalezeny další vysokoteplotní supravodivé materiály na bázi 1-2-3 sloučenin a chemickými vzorci $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ nebo $LaBa_2Cu_3O_{7-x}$. HTS se řadí do supravodičů 2. typu. [6]



Obrázek 5: 1-2-3 struktura. Na levém obrázku je základní krystalová buňka. Na prostředním obrázku je návaznost atomů kyslíku na sousední krystalové buňky. Napravo je prostorové uspořádání atomů kyslíku. Nad a pod atomem yttria se nachází roviny Cu-O2 charakteristické pro tyto "šupinaté" keramiky. [6]

1.5 Vlastnosti

Jelikož teorie BCS popisuje vznik Cooperových páru elektron-fotonovou interakcí pouze při nízkých teplotách (do 23.2K) je nutné vznik vysokoteplotní supravodivosti popsat jinak. U klasických kovových supravodičů dochází k překrývání Cooperových párů, protože je hodnota koherenční délky ξ kovů vysoká ve srovnání s konstantou krystalické mřížky a . U HTS se Cooperovy páry nepřekrývají, jelikož není rozdíl hodnot ξ a konstanty a tak veliký. Základní mechanismy teorie HTS byl poznán a na jeho celkovém objasnění se stále pracuje a pravidelně jsou odkrývány nové poznatky, z nichž některé později uvedu.

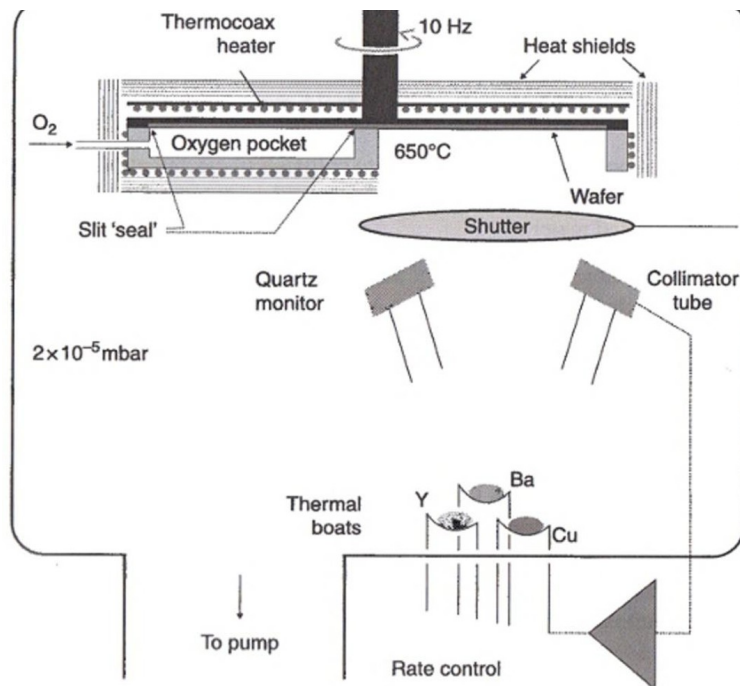
Jak jsem již uvedl u HTS vázání elektronů do Cooperových páru nezajišťuje elektron-fotonová interakce, nýbrž interakce elektronů s excitacemi spinových antiferomagnetických struktur. Excitace mají charakter kvazičástice se silnou anizotropií. Struktura kuprátů se skládá z tzn. *Cu-O* rovin, které se nacházejí pod a nad atomy yttria. Ionty mědi Cu^{2+} se chovají jako elementární magnety (mají nenulový spin) a v *Cu-O* rovinách se řadí antiparalelně. Při přidání atomu kyslíku vznikají v rovinách díry, které vytváří vodivost. Rozdíly mezi nízkoteplotními a vysokoteplotními supravodiči lze shrnout následovně:

- Elektrický odpor a doba života kvazičástic u HTS roste lineárně s teplotou, u nízkoteplotních kvadraticky.
- Excitační energie spinů u HTS jsou podstatně nižší než Fermiho mez E_f , u nízkoteplotních jsou s E_f srovnatelné.
- Vlnové spektrum spinových excitací má u HTS vrcholovou hodnotu, u nízkoteplotních je ploché-
- HTS vykazují antiferomagnetické chování, LTS nikoliv. [7][6]

1.6 Výroba HTS

Zde bych rád vzhledem ke komplexnosti práce stručně uvedl některé postupy výroby. Nejjednodušeji lze připravit keramiku skupiny $YBaCuO$. Čisté oxidy Y_2O_3 , CuO a $BaCO_3$ se ve stanoveném poměru smíchají například pomocí kulového mlýna. Směs se poté vypálí v peci při teplotě 900-950 °C. Po vychladnutí na pokojovou teplotu se může proces rozemletí a vypalování opakovat. Poté se směs vylisuje do požadovaného tvaru a sintruje za teploty 900 °C. Obdobně lze postupovat při přípravě jiných keramik proces, ale může komplikovat toxicita materiálů.

Při přípravě supravodivých oxidů mědi se nejvíce využívají technologie tenkých vrstev. Mezi tyto metody patří především fyzikální depozice, chemická depozice a zhotovení keramiky sol-gel procesem. V metodách fyzikální depozice se nejčastěji využívá napařování, epitaxe molekulárních svazků, napařování a laserová depozice. Všechny tyto metody vyžadují vakuum, což zvyšuje náklady výrobního procesu. Při napařování supravodivých tenkých vrstev je každý prvek umístěn ve své topné ložce, jelikož mají rozdílné teploty přechodu z kapalné do plynné fáze. K přesnému dosažení požadovaného poměru koncentrace jednotlivých prvků ve struktuře HTS, je nutné přesně řízení toku každého komponentu. Pro vznik supravodivé fáze je nutné zajistit lokální oxidaci tenké vrstvy. To může být zajištěno plynovou kapsou s plynem NO_2 , O_3 nebo O_2 jako na přiloženém obrázku nebo například UV zářením.



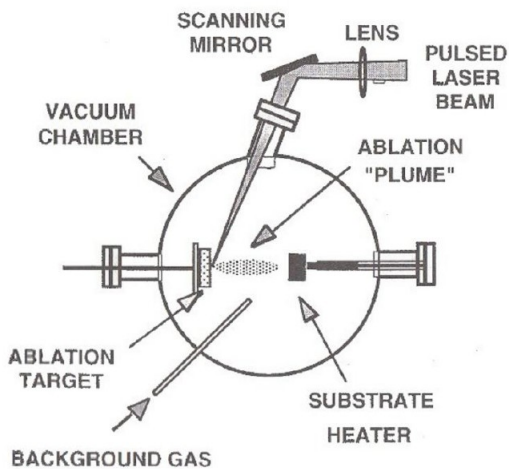
Obrázek 6: Napařování supravodivých tenkých vrstev. Lokální oxidace použitím kaps s plynem [7]

Při laserové depozici pracuje laser v pulzním režimu a je zaostřen na terčik, který je vyroben z materiálu nanášeným na substrát. Při soustředění paprsku na malou oblast dochází k ablaci materiálu terčiku. Materiál postupuje kolmo na rovinu terčiku k substrátu, na kterém vytváří požadovanou tenkou vrstvu.

Jako naprašovací technologie se používá magnetronové naprašování se substrátem v ose a mimo osu pohybu naprašovaných atomu a naprašování iontovým svazkem. Při naprašování dochází k bombardování povrchu kovového nebo oxidového terčiku ionty vzniklými v plazmatu. Atomy materiálu jsou vytrženy z povrchu terčiku a směřují k substrátu, na kterém vytvářejí tenkou vrstvu. Rychlost růstu vrstvy a vlastnosti se dají měnit geometrií umístění substrátu.

Metodou chemické depozice pro tvorbu HTS je depozice epitaxních vrstev z plynné fáze s využitím organokovových prekurzorů. Kationty tenké vrstvy jsou přenášeny pomocí plynu (těkavé) nebo kondenzací (netěkavé) z organokovových prekurzorů na povrch substrátu.

Jako poslední uvedu technologii přípravy Sol – Gel, která je výhodná především z ekonomického a energetického hlediska, jelikož nevyžaduje vakuum. Z požadovaných sloučenin se vytvoří suspenze, která je nanášena nástřikem nebo máčením na substrát. Následně je substrát vysušen za teploty 150-400 °C. Proces je ukončen krystalizací za teploty 600-1000°C. [7]



Obrázek 7: Laserová depozice [7]



Obrázek 8: Schéma přípravy tenkých vrstev technologií sol-gel [7]

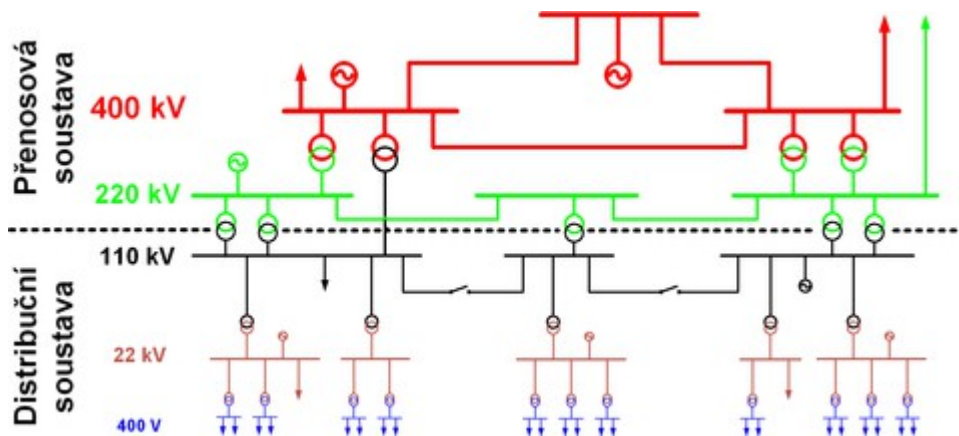
2. Plán rozvoje české přenosové soustavy

2.1 Elektrizace soustava

Jedná se o energetický systém, který zajišťuje výrobu a spolehlivou dopravu dostatečného množství elektrické energie odběratelům v odpovídající kvalitě a s co nejmenšími náklady. Elektrizace soustavu dělíme na přenosovou soustavu a distribuční soustavu.

Přenosová soustava slouží k přenosu výkonu na vysoké vzdálenosti. Propojuje elektrizace soustavu daného státu se soustavami okolních států a slouží k vyvedení výkonu ze systémových elektráren. V České republice se sestává z vedení na napěťových hladinách 400kV a 220kV. Síť 220kV dnes převážně zastávají funkci doplňkových vedení. Elektrizace soustavu tvoří vzájemně propojené a elektricky se ovlivňující prvky. Při výpadku jednoho či více prvků převezmou jejich zátěž ostatní prvky.

Distribuční soustava slouží k vyvedení výkonu k odběratelům. Přenáší se zde výkon na menší vzdálenosti a jsou do ní připojeny elektrárny nižších výkonů. Tvoří ji vzájemně nepropojené oblasti. Ty jsou napájeny z přenosové soustavy, kterou ovlivňují odebraným či dodávaným elektrickým výkonem. [8] [9]



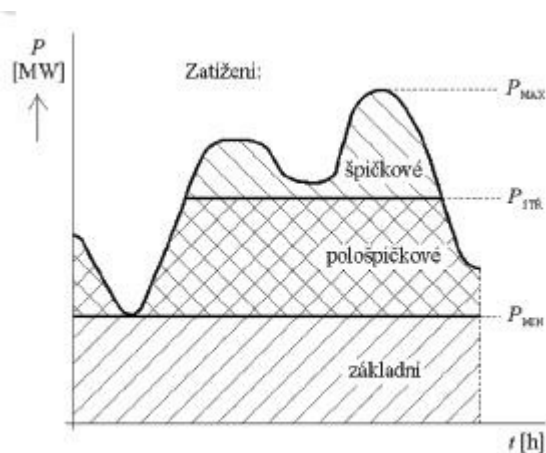
Obrázek 9: Elektrizace soustava [8]

| Trasa | Délka [Km] |
|-------------------------------------|-------------|
| Vedení 400 kV | 3510 |
| <i>z toho dvojitě a vícenásobné</i> | <i>1146</i> |
| Vedení 220 kV | 1909 |
| <i>z toho dvojitě a vícenásobné</i> | <i>1038</i> |
| Vedení 110 kV | 84 |
| <i>z toho dvojitě a vícenásobné</i> | <i>78</i> |
| Celkem | 5503 |

| Rozvodny | Počet [-] |
|----------------|-----------|
| 440 kV | 26 |
| 220 kV | 14 |
| 110 kV | 1 |
| Transformátory | Počet [-] |
| 400/200 kV | 4 |
| 400/110 kV | 47 |
| 220/110 kV | 21 |

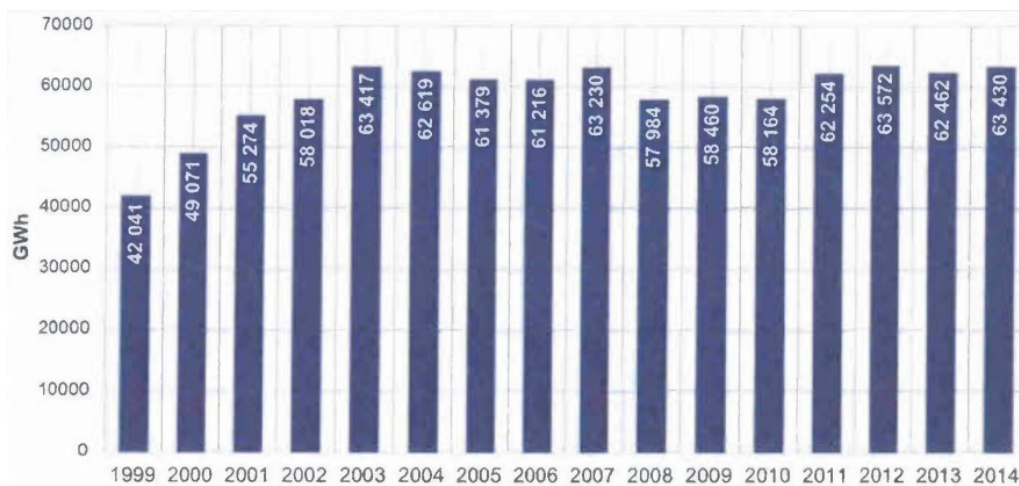
Provoz a rozvoj přenosové soustavy na území České republiky zajišťuje akciová společnost ČEPS. Česká republika vlastní 100% akcií a výkonem práv je pověřeno Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. ČEPS, a.s., je výhradní provozovatel a z toho plynou následující povinnosti:

- umožnit připojení zařízení nebo přenos každému, kdo splňuje podmínky připojení a obchodní podmínky, které jsou stanoveny v Pravidlech provozování přenosové soustavy. Výjimky jsou případy kde je prokázán nedostatek kapacity zařízení pro přenos či při ohrožení bezpečného a spolehlivého provozu PS
- neznevýhodňovat určité účastníky trhu s elektřinou při připojení jejich zařízení k přenosové soustavě
- neznevýhodňovat určité účastníky trhu s elektřinou při přenosu elektřiny



- špičkové zatížení – přečerpávací a akumulární vodní elektrárny, plynové elektrárny
- pološpičkové zatížení – akumulární vodní elektrárny, paroplynové a plynové elektrárny
- základní – jaderné, uhelné a průtočné vodní elektrárny

Obrázek 10: Denní diagram zatížení [10]

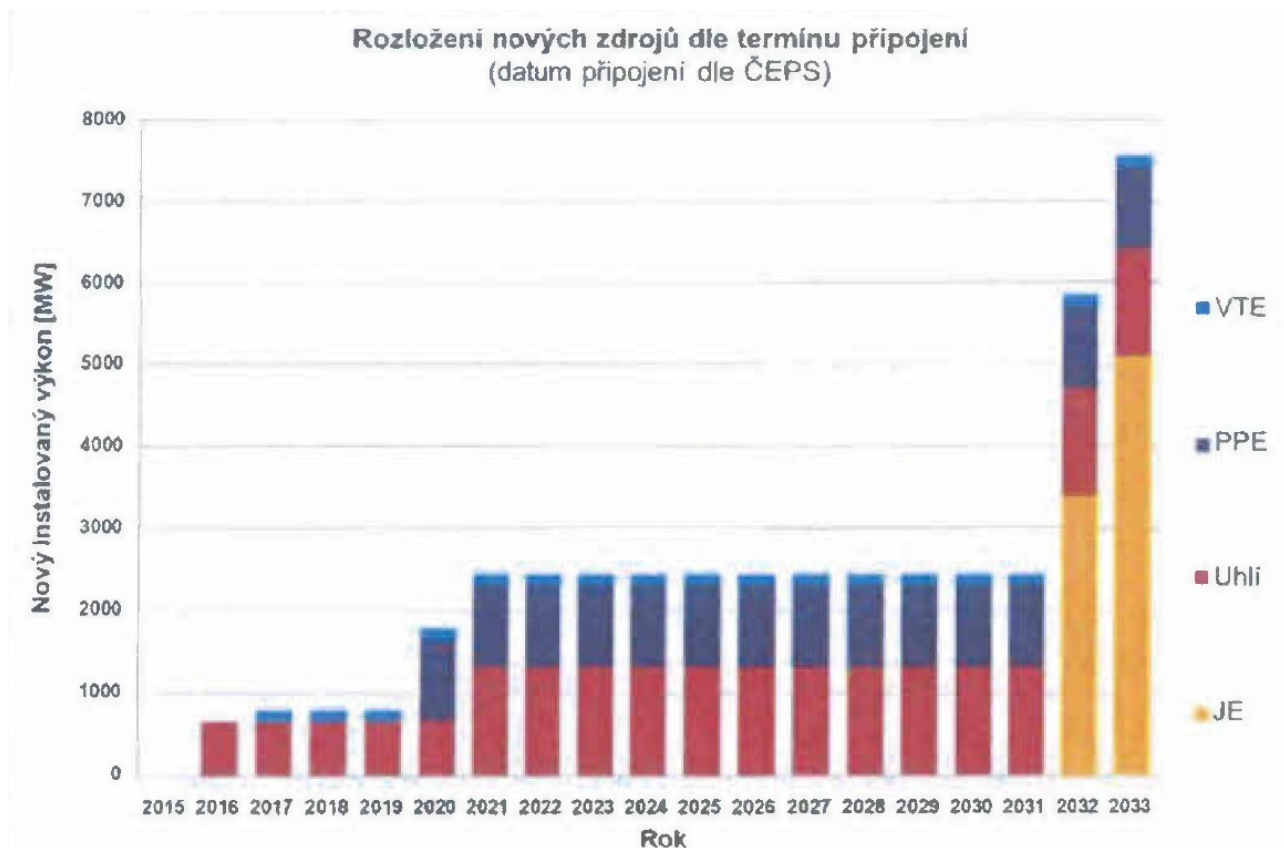


Obrázek 11: Množství energie přenesené PS mezi lety 1999 až 2014[9]

2.2 Budoucí investice

O budoucí podobě a budoucím rozvoji přenosové soustavy rozhodují predikce vývoje instalovaného výkonu v ES ČR. O dlouhodobé vizi energetiky ČR pojednává Statní energetický koncepce (SEK). Tato koncepce uvažuje následující kroky:

- Uhelná elektrárna Počerady bude od roku 2025 nahrazena novým blokem 1x 660 M.
- Provoz stávajících bloků jaderné elektrárny Dukovany bude do let 2035-2037 a od roku 2037 bude v provozu nový blok 1x1200 MW. U JE Temelín se zahájí nové bloky 3 a 4 provoz v letech 2033-2035.
- Obnovitelné zdroje a rozptýlená lokální výroba se budou mírně rozvíjet.
- Část hnědouhelných výroben elektřiny a tepla přejde na jiná paliva, jako například černé uhlí a zemní plyn a doplňkově biomasa a jaderné teplo.
- Lokální mikrogenerace (malokapacitní výroba elektřiny a tepla) bude nadále růst [9]



Obrázek 12: Graf pak pro srovnání uvádí vývoj nově instalovaného výkonu zdrojů dle úplných žádostí o připojení do PS ČR a dle platných smluv pro období 2015 až 2033, které ČEPS, a.s., k datu přípravy tohoto dokumentu eviduje. Žádosti s termínem připojení za horizontem roku 2033 již evidovány nejsou. [9]

3.3 Plánované investice ČEPS

| Seznam vybraných investičních akcí posilování vedení a rozveden: | | | |
|---|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| Název stavby | Délka (km) | Začátek výstavby | Ukončení výstavby |
| Rozvodna Čechy střed, komplexní rekonstrukce | - | 2012 | 2017 |
| Rozvodna Veměřov, nová rozvodna 420 kV | - | 2015 | 2017 |
| Rozvodna Hradec, nový phaseshiftový transformátor | - | 2015 | 2017 |
| Rozvodna Otrokovice, komplexní rekonstrukce | - | 2015 | 2018 |
| Rozvodna Chodov, komplexní rekonstrukce | - | 2016 | 2018 |
| Rozvodna Kočín, komplexní rekonstrukce | - | 2017 | 2023 |
| Rozvodna Vítkov, nová rozvodna 420 kV | - | 2018 | 2020 |
| V413/V416 - smyčka do rozvodny Mírovka | 25 | 2018 | 2019 |
| V451/V448 Babylon - Bezděčín, zdvojení stávajícího vedení | 54 | 2019 | 2020 |
| Rozvodna Prosenice, komplexní rekonstrukce | - | 2019 | 2024 |
| V490/V491 Preštice - Vítkov, výstavba nového vedení | 87 | 2019 | 2021 |
| V423 Čebín - Sokolnice, navýšení přenosové schopnosti | 38,3 | 2020 | 2023 |
| V450/V428 Výškov - Babylon, zdvojení stávajícího vedení | 73 | 2020 | 2022 |
| V460 Nošovice - Albrechtice, navýšení přenosové schopnosti | 16,5 | 2020 | 2020 |
| V403/803 Prosenice - Nošovice, zdvojení stávajícího vedení | 80 | 2021 | 2023 |
| V406/V407 Kočín - Mírovka, výstavba nového vedení | 121 | 2021 | 2025 |
| V415/V416 Chodov - Čechy Střed, I. etapa - zdvojení stávajícího vedení | 8 | 2021 | 2021 |
| V487/V488 Veměřov - Vítkov, výstavba nového vedení | 83 | 2021 | 2023 |
| Rozvodna Hradec, komplexní rekonstrukce | - | 2021 | 2030 |

| | | | |
|---|-----|------|------|
| Rozvodna Chrást, komplexní rekonstrukce | - | 2021 | 2024 |
| Rozvodna Milín, nová rozvodna 420 kV | - | 2022 | 2023 |
| V415/V495 Chodov - Čechy Střed, II. etapa - zdvojení stávajícího vedení | 28 | 2022 | 2022 |
| V431/831 Chrást - Přeštice, zdvojení stávajícího vedení | 33 | 2023 | 2023 |
| V475/V477 - smyčka do rozvodny Milín | 0,7 | 2023 | 2023 |
| V411/811 Hradec - Výškov, zdvojení stávajícího vedení | 46 | 2023 | 2024 |
| Rozvodna Dětmárovice, nová rozvodna 420 kV | - | 2023 | 2025 |
| Rozvodna Praha-Sever, nová rozvodna 400 kV | - | 2023 | 2025 |
| V430/V830 Hradec - Chrást, zdvojení stávajícího vedení | 82 | 2024 | 2025 |
| V456/V803 - smyčka do rozvodny Kletné | 29 | 2024 | 2025 |
| Rozvodna Slavětice, komplexní rekonstrukce | - | 2024 | 2032 |
| V413 Řeporyje - Mírovka, navýšení přenosové schopnosti | 146 | 2025 | 2026 |
| V443/V449 - smyčka do rozvodny Dětmárovice | 1,2 | 2025 | 2025 |
| V409/V410 - smyčka do rozvodny Praha Sever | 13 | 2025 | 2025 |
| V432/429 Přeštice - Kočín, zdvojení stávajícího vedení | 117 | 2026 | 2028 |
| V434/834 Slavětice - Čebín | 52 | 2026 | 2028 |

V koncepci také nesmíme zapomenout na obnovování již vybudovaných zařízení s ohledem na jejich stav. Posledním hlediskem je udržení kvality a spolehlivosti přenosových služeb. V budoucnu je velmi důležité počítat s končící životností přenosových vedení a to zejména stožárů. U napěťových hladin 220 kV se nepočítá s jejich obnovou resp. obnovou vedení v napěťové hladině 220 kV AC. Vzhledem k tomuto faktu jsem vypracoval ekonomickou analýzu různých variant nahrazení tohoto existujícího vedení vedením HVDC popřípadě vedením HVDC s použitím supravodivých prvků. Dále se budu zabývat stejnosměrným přenosem a to hlavně jeho výhodami a popisem prvků stejnosměrného vedení. V první části jsem popsal fyzikální jev supravodivosti a nastínil techniku výroby vysokoteplotních supravodičů (HTS), jelikož jsou v reálné aplikaci vzhledem k možnosti chlazení tekutým dusíkem, které zajišťuje přechod a udržení v supravodivém stavu, ekonomicky použitelné a návratnost je v budoucnu reálná.

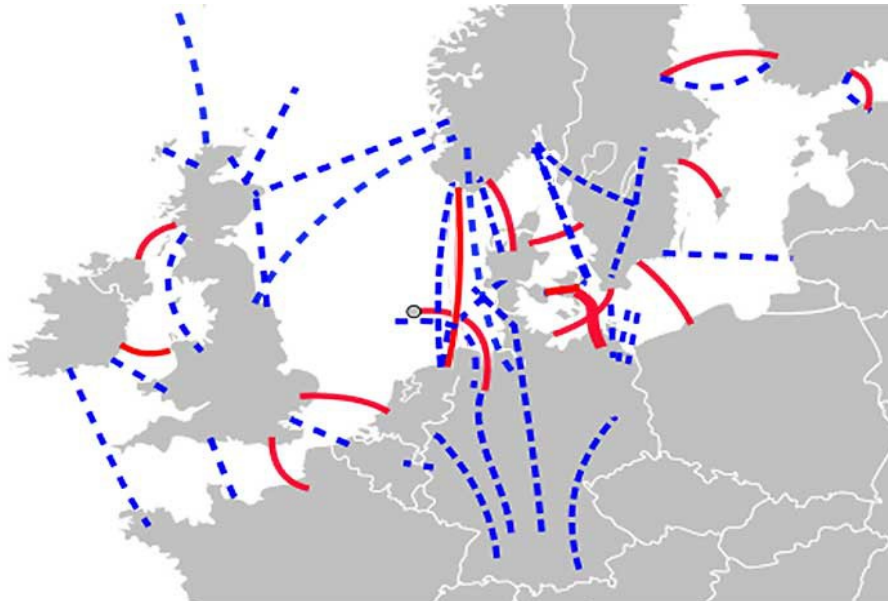
3. Alternativní návrh využití dosavadních tras 220 kV vedení pro supravodivý přenos DC

3.1 Stejnoseměrný přenos

HVDC přenos (High voltage, direct current) byl umožněn vynálezem rtuťových měničů (později nahrazeny měniči tyristorovými a tranzistorovými), které umožňují relativně jednoduchou přeměnu vysokého střídavého napětí na napětí stejnosměrné.

Stejnoseměrný přenos je výhodnější v těchto hlediscích:

- Snadnější řízení přenosu – není nutné udržování všech zdrojů v soustavě v synchronismu, vzhledem k absenci parametrů frekvence a fáze.
- Vysoká stabilita přenosu.
- Menší ztráty než u AC přenosu.
- K přenosu stačí dva vodiče nebo jeden při zemním návratu proudu.
- Menší izolační vzdálenost než u AC přenosu.
- Možná kontrola směru a hodnoty přenášeného výkonu.
- Nemusí se kompenzovat jalový výkon.



Obrázek 13: Již existující HVDC linky (červeně) a plánované (modře) [13]

Při volbě přenosu je nutno vzít v potaz tyto nevýhody:

- Obtížná změna napětí oproti střídavému proudu, kde je snadná a ekonomická změna umožněna transformátory. Před objevem měničů byl stejnosměrný přenos možný je na vzdálenost několik kilometrů, jelikož stroje pracovaly na napětí generátoru. Při větších vzdálenostech se projevovaly ztráty a nastal pokles napětí na vedení.
- Vhodné ke přímému spojení dvou míst. Odbočky lze vybudovat, ale vzhledem k nutnosti vybudování další měřírny je to ekonomicky nevýhodné.
- Vhodné k přenosu na delší vzdálenosti. Ztráty při přenosu jsou oproti střídavému proudu zanedbatelné, ale ztráty v polovodičových součástkách by se na ekonomice přenosu při krátké vzdálenosti výrazně podepsaly.

3.2 Prvky rozvodny stejnosměrného vedení

Měničový transformátor

Jejich úkolem je navýšení hodnoty napětí na vstupní hodnotu měniče.. Transformátor je zapojen v režimu $Yy0$ (zapojení primárního vinutí do hvězdy, sekundárního vinutí do hvězdy a hodinový úhel 0°) nebo $Yd5$ (primár hvězda, sekundár trojúhelník a hodinový úhel 150°), jelikož je 12-pulsní měnič nutné zásobovat ze dvou třífázových vstupů a fázovým rozdílem 30 nebo 150. Také galvanicky odděluje AD a DC soustavu a omezuje zkratové proudy. Izolace transformátoru musí být navržena, aby odolala velkému stejnosměrnému potenciálu vůči zemi.

Filtry

Filtry střídavého proudu bývají umístěny na straně střídavého napětí. Jelikož 12pulsní LCC měniče vyžadují velké množství jalového výkonu (až 60% přeměněného činného výkonu), je nutno filtrovat vyšší harmonické průběhy proudu, které díky tomuto vznikají.[11]

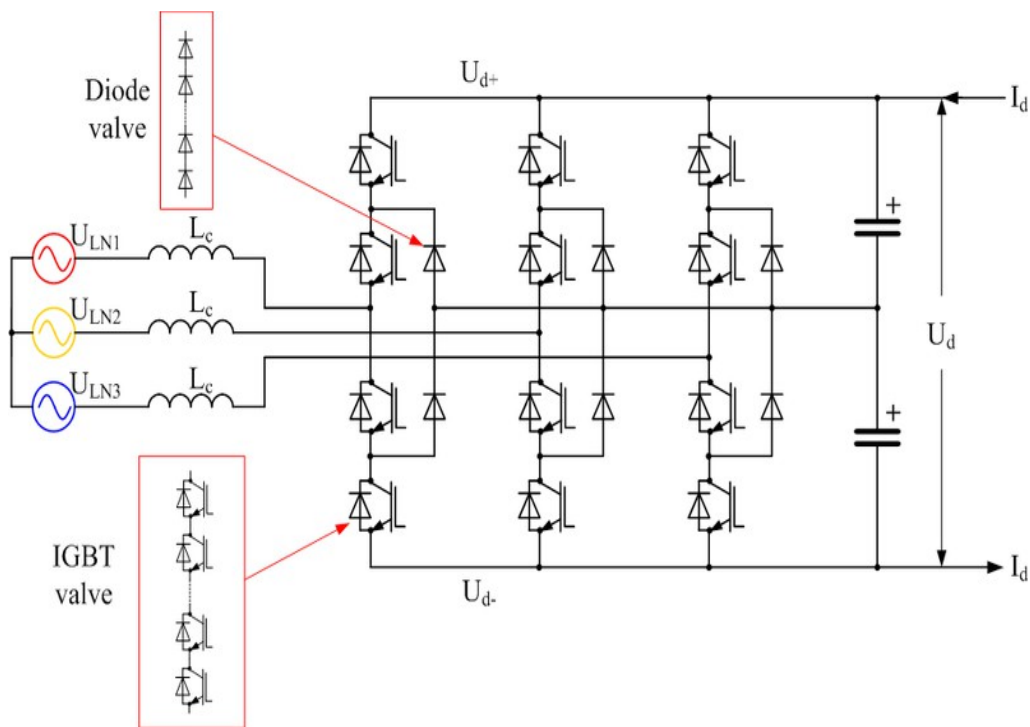
Na stejnosměrné straně je umístěný stejnosměrný filtr, který filtruje sudé vyšší harmonické produkované 12 pulsním AC/DC měničem.

Vyhlazovací Tlumivky

K vyhlazení proudu a omezení vzniku přerušovaného proudu zařazujeme do obvodu vyhlazovací tlumivky. Přerušovaný proud vzniklý při nízkém zatížení vedení může způsobit vysoké přepětí, které obvod poškodí. Při vzniku poruchového proudu ho tlumivky pomáhají omezit. Zařazená tlumivka potlačí vyšší harmonické složky a tím omezuje rušení. [11][20]

Měniče

Pro spínání s vyšší frekvencí můžeme použít tranzistory (IGBT). Tyto polovodičové součástky jsou řízené - lze je řízeně sepnout i vypnout, tudíž jsou měniče nezávislé na komutaci pomocí připojené střídavé sítě, ale zvyšují se ztráty. Takto řešený měnič je schopný dodávat jalový výkon to střídavé síti. Tato technologie se nazývá VCS technologie. U firem využívající tuto technologii je známa jako HVDC Light® společnosti ABB s HVDC Plus® společnosti Siemens. Rozvodny využívající toto řešení dosahují až poloviční úspory rozměrů oproti starším technologiím. Další výhodou oproti starším méně úrovněným modelům je omezení vyšších harmonických.

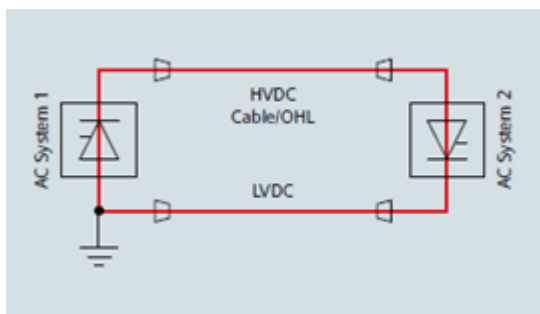


Obrázek 14: 3- fázový 12 pulsní VSC měnič s použitím diod a IGBT tranzistorů [20]

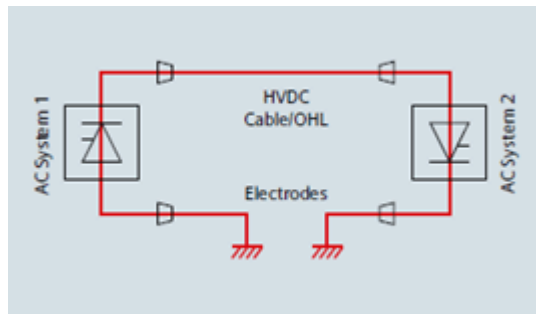
3.3 Uspořádání DC sítě

Jednopolové uspořádání DC sítě

Pro přenos stejnosměrného proudu lze použít jen jeden vodič, který spojuje dvě koncové měřírny. Návrátová cesta je realizována skrz zemi nebo moře S propojením měřírny pomocí zemních elektrod. Jako návratovou cestu lze také použít druhý vodič. Toto uspořádání je vhodné pro HVDC síť při použití moře jako návratové cesty.



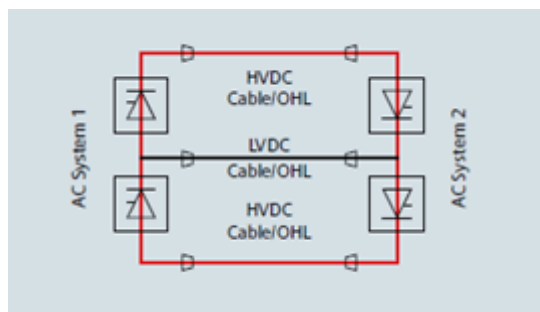
Obrázek 16: 1-pólové uspořádání se zpětným vodičem [11][12]



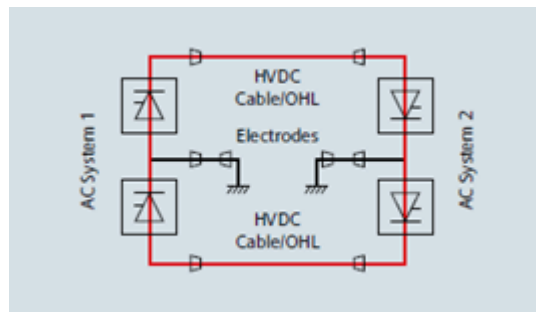
Obrázek 15: 1-pólové uspořádání se zemním návratem [11][12]

Dvupólové uspořádání DC sítě

Toto uspořádání je realizováno propojením dvou 12pulzních měničů dvěma vodiči se stejnou hodnotou napětí, ale opačnou polaritou. Jako návratovou cestu lze opět použít vodič nebo zem, kterým v tomto uspořádání teče jen malý vyrovnávací proud. Uspořádání je spolehlivější a má dvakrát větší přenosovou kapacitu než předešlé uspořádání. Při poruše na jednom z měničů, lze druhý vodič použít jako návratovou cestu pro proud a dále provozovat vedení s 50% kapacitou. Pokud dojde k poruše na jednom z vedení lze druhé provozovat (50% kapacita) s použitím země nebo třetího vodiče (pokud ho vedení obsahuje) jako návratovou cestu.



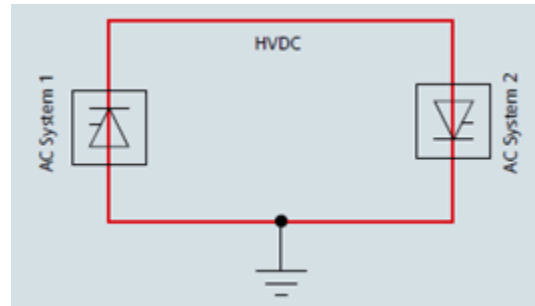
Obrázek 18: 2-pólové uspořádání se zpětným vodičem [11][12]



Obrázek 17: 2-pólové uspořádání se zemním návratem [11][12]

Back-toBack uspořádání

Používá se převážně jako propojení dvou nesynchronních soustav nebo k určení směru toku energie. Střídač i usměrňovač se většinou nachází ve stejné budově. Na rozdíl od dálkových vedení pracují tyto stanice s relativně malým napětím (desítky kV). Vzhledem k menší délce vedení (desítku metrů) nejsou ztráty vlivem vedení vysokých proudů až tak vysoké. Pro nižší napětí není třeba velký počet sériově řazených polovodičových součástek a také jsou nižší požadavky na izolační vzdálenosti, což vede k úspoře prostoru. [11][12]

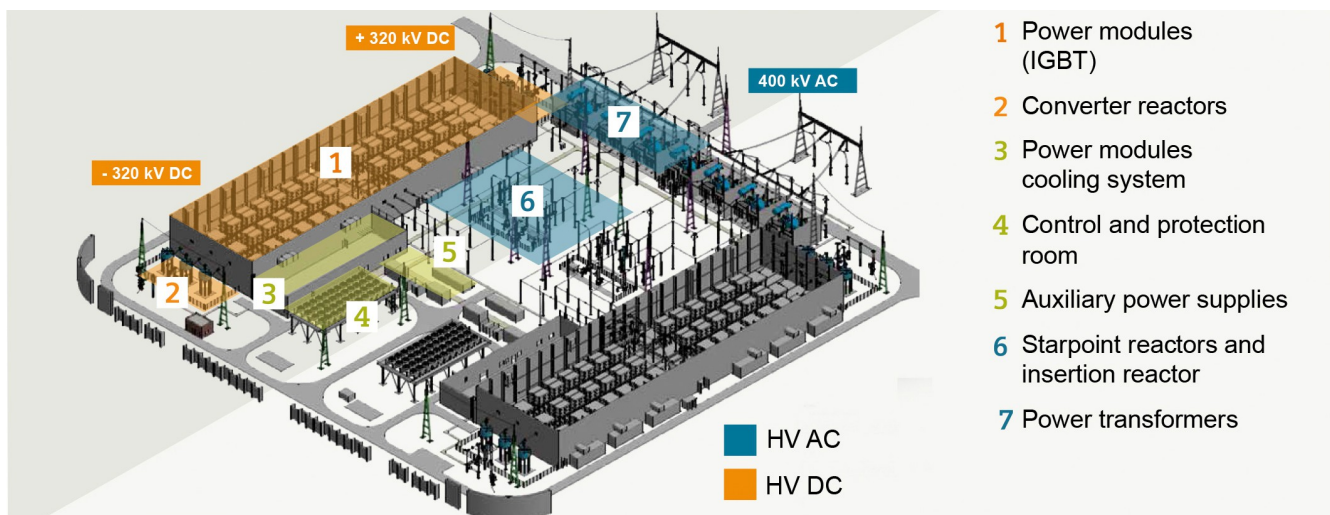


Obrázek 19: Back-toBack [11][12]

3.4 Infrastruktura

Měničová stanice

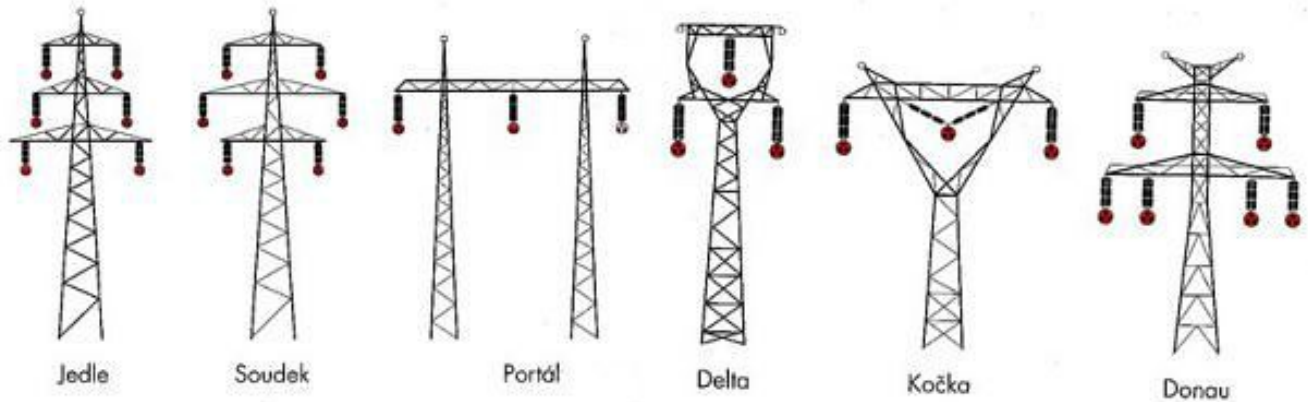
O umístění měnirny rozhoduje několik faktorů například rozloha měnirny závislá na parametrech přenosu a převodu. Pro konvertorovou stanici s převodem 600 MW a přenosem 40 kV je potřeba oblast přibližně 300x300 metrů. Pro menší napětí je potřeba úměrně menší oblast. Dalším faktorem je produkce akustického hluku a radio frekvenční rušení. Akustický hluk může být vyřešen pomocí hlukových stěn. Při výstavbě a návrhu stanice je nutné zabránit možnému znečištění vod olejem z použitých zařízení. Rozlohu lze regulovat použitím podzemního vedení namísto nadzemního. [12]



Obrázek 20: Měničová stanice na hranicích Francie a Španělska [14]

Stožáry elektrického vedení

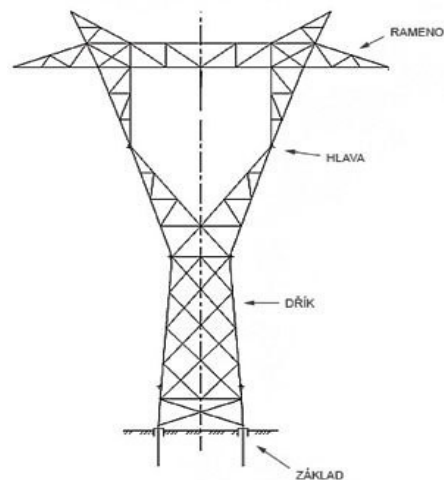
Nadzemní elektrické vedení je realizováno pomocí příhradových ocelových stožárů elektrického vedení. Rozměry a celkové řešení stožáru určuje přenášený výkon, napěťová hladina a počet vodičů. Převažujícím prvkem vedení jsou nosné stožáry, na jejichž závěsném izolátoru je připevněn vodič. Stožár je namáhaný zavěšeným lanem a klimatickými jevy (vítr). Zhruba každý 3 – 5 km se vyskytují stožáry kotevní, které vytvářejí pevné body vedení. Vodič je možné napínat, díky kotevním izolátorovým závěsům připevněným ke stožáru. Další druhy stožárů se využívají vzhledem ke směru a návrhu vedení – rohové, koncové, rozvodné nebo křižovatkové.



Obrázek 21: Typy stožárů a jejich názvy [15]

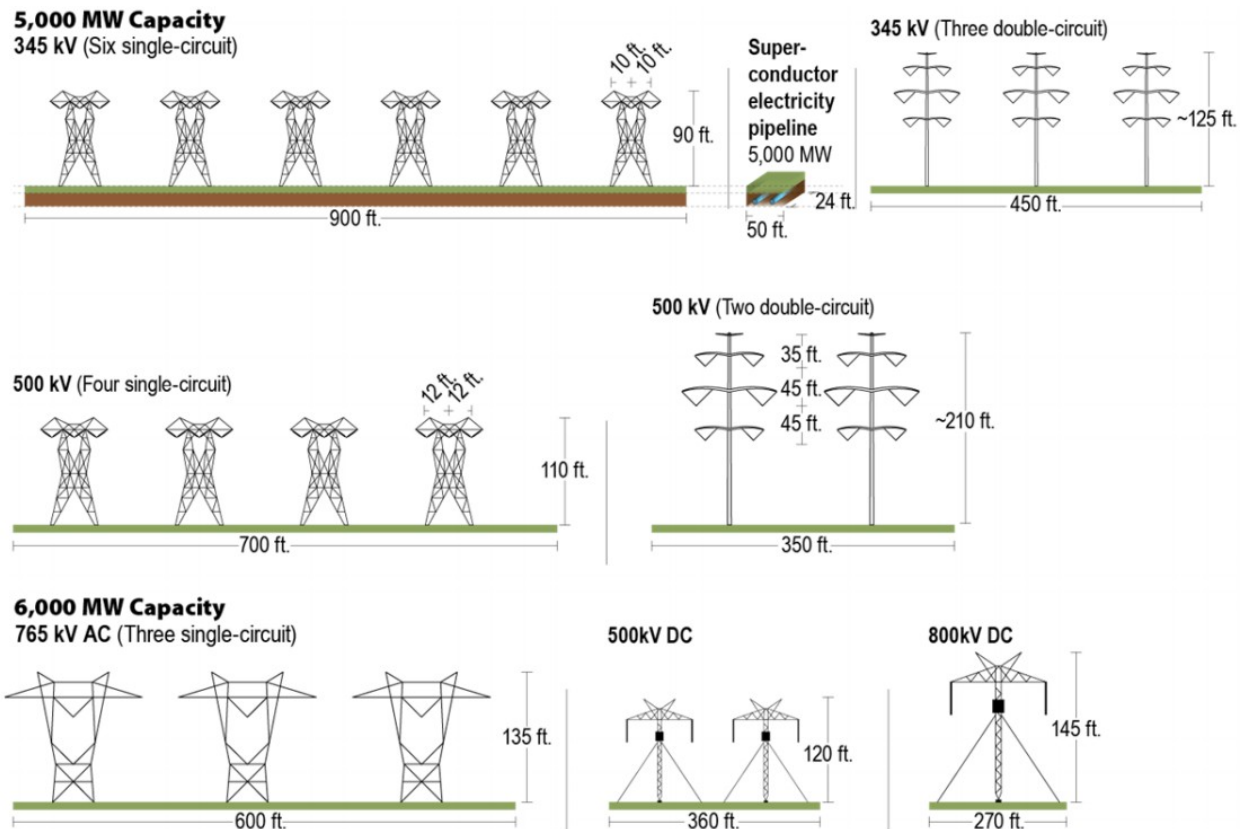
Dále můžeme stožáry rozdělit podle konstrukce – **jednodříkové** nebo **portálové**. Portálové stožáry jsou de facto dvoudříkové, které jsou spojeny příčnicí.

JEDNOTLIVÉ ČÁSTI STOŽÁRU NA PŘÍKLADU
KONSTRUKCE KOČKA



Obrázek 22: Jednotlivé části stožáru. Stožár kočka jednodříkový. [15]

Dřívky se sestávají s ostrohranného válcového materiálu, který směrem k základně zvětšuje svůj průměr. Stožáry jsou upevněny v betonovém základu. Počet těchto základů se odvíjí od výšky stožáru. Jednotlivé dílce stožáru jsou propojeny pomocí šroubů. Základové dílce jsou u menších stožáru svařeny k sobě, u těžších propojeny příložkami. Odolnost proti atmosférickým podmínkám je nejvýhodnější řešit pozinkováním nebo použitím kvalitní ocele. Ochrana může být také realizována nátěry, které je ale nutné obnovovat, což je za provozu nebezpečné. Stožáry jsou propojeny zemnicími lany, která vytvářejí ochranu proti atmosférickým jevům (blesky, atd.) [15]



Obrázek 23: Požadavky na elektrické stožáry u různých systémů vedení. 1 foot = 30,48 cm [16]

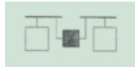


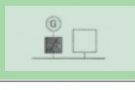

3.5 Supravodivé prvky

SFCL

Při provozu elektrické rozvodné sítě mohou nastat situace, které způsobí prudký nárůst proudu. To může mít za následek mechanické a tepelné namáhání prvků sítě a může vést k požárům nebo destrukci některých zařízení nebo ohrozit zdraví člověka. Jevy vyvolávající nárůst proudu jsou například úder blesku, zkrat nebo zemní spojení. K zabezpečení vedení proti těmto jevům se používají různé bezpečnostní prvky, které by zároveň neměly nepřiměřeně zvyšovat provozní ztráty. *Princip omezovače proudu je v tom, že supravodič při vzrůstu teploty v důsledku působení zkratového proudu nad kritickou hodnotu přejde do normálního, rezistivního stavu. Tím se zkratový proud omezí. Po opětovném vychladnutí pod kritickou teplotu přechází materiál reverzibilně znovu do supravodivého stavu.* [17] Omezení proudu rychlou změnou obvodu s malou impedancí na obvod s velkou impedancí podle rovnice $Z = R + jX$, kde Z je celková impedance R odpor, X reaktance a j imaginární jednotka.

Z této rovnice vycházejí různé druhy omezovačů prvním druhem je omezovač rezistivní, který je zapojen přímo do obvodu zkratového proudu. Teplota materiálu průchodem nadměrného proudu stoupne, pokud je zvýšení větší jak kritická teplota supravodivého materiálu T_c přestane být materiál supravodivý a prudce stoupne odpor R . Jako ochrana před nebezpečným nárůstem teploty, při které může být omezovač poškozen je s ním do obvodu zapojen spínač.

Druhým řešením omezovače je Induktivní supravodivý omezovač. Pracuje na principu nárůstu reaktance. Může být řešen dvojitým způsobem a to jak varianta s transformátorem nebo varianta s cívkou a supravodivým stíněním. Transformátor využívá nárůst teploty při průchodu proudem, kdežto varianta s cívkou využívá nárůstu magnetické indukce B . [17]

| Příklad použití | Blokové schéma | Použitelnost v sítích středního napětí | Použitelnost v sítích vysokého napětí |
|------------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| spojovací spínač |  | ano | ano |
| výstupní spínač |  | ano | ne |
| přívodní spínač |  | ano | ano |
| generátorový spínač |  | ano | ne |
| spínač vlastní spotřeby generátoru |  | ano | ne |
| blokový spínač generátoru |  | ne | ano |

Obrázek 24: Možnosti využití SFCL [17]

Supravodivé transformátory

Transformátor je střídavý netočivý elektrický stroj, který je schopný měnit hodnoty elektrických veličin. Skládá se z magnetického obvodu, vinutí a nádoby. Magnetický obvod slouží k uzavření magnetického toku a u klasických transformátorů je většinou složen z plechů pro elektrotechniku. Vzhledem k omezení ztrát vířivými proudy jsou plechy válcované za studena a legovány křemíkem. Vinutí jsou uložena rovnoměrně na jednotlivých jádrech (konstrukce jádrová) nebo na jádru vnitřním (konstrukce plášťová). Každá fáze má dvě nebo více vinutí, která jsou vzájemně vázána. Transformátory vyšších výkonů jsou ponořeny v oleji v uzavřené nádobě, která zajišťuje chlazení. Ztráty v transformátoru můžeme rozdělit na ztráty závislé na zatížení a ztráty nezávislé na zatížení. Ztráty nezávislé na zatížení jsou ztráty magnetické, které se dělí na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Ztráty závislé na zatížení jsou ztráty způsobené průchodem proudy dány vztahem:

$$\Delta P_j = R * I^2$$

Kde:

ΔP_j - jsou Jouleovy ztráty [W]

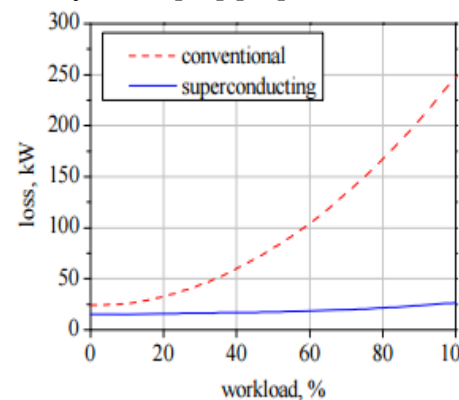
R - odpor vodiče [Ω]

I - proud procházející vodičem [A] [32]

Tyto ztráty můžeme výrazně omezit supravodivých řešeními, při kterém odpor klesá prakticky k nulové hodnotě. Transformátor je ale protékán střídavým proudem, který kolem vodiče vybudí magnetické pole. Supravodič magnetické pole ze svého objemu vytlačuje a brání se jeho vniknutí. Tímto vznikají hysterezní ztráty, které jsou nižší než u konvenčních měděných vodičů. Zde jsou shrnuty výhody supravodivého řešení:

- redukce hmotnosti až od 50%
- ušetření materiálů
- snížení ztrát až o 50%
- nehrozí riziko požáru – není přítomen chladicí olej
- možnost většího přetížení, které je omezeno jen výkonem kryostatu [18] [23]

| Porovnání konvenčního transformátoru s HTS transformátorem | | |
|--|----------------------------|---------------------|
| Veličina | 60MVA HTS | 60MVA konvenční |
| Hmotnost | 16.6 tuny včetně kryostatu | 27.2 tuny bez oleje |
| Velikost jádra | 2674 mm * 2429 mm | 3150mm * 2590mm |
| Ztráty vedení | N/A | 100 kW |
| Ztráty jádra | 28,7 kW | 33kW |
| Ztráty chladicí | 12 kW | N/A |
| Celkové ztráty | 40,7 kW | 133 kW |
| Účinnost | 99,93% | 99,3% |
| Impedance | 16,43% | 19,84% |



Obrázek 25: Ztráty závislé na % zatížení supravodivý vs konv. [19]

HTS kabely

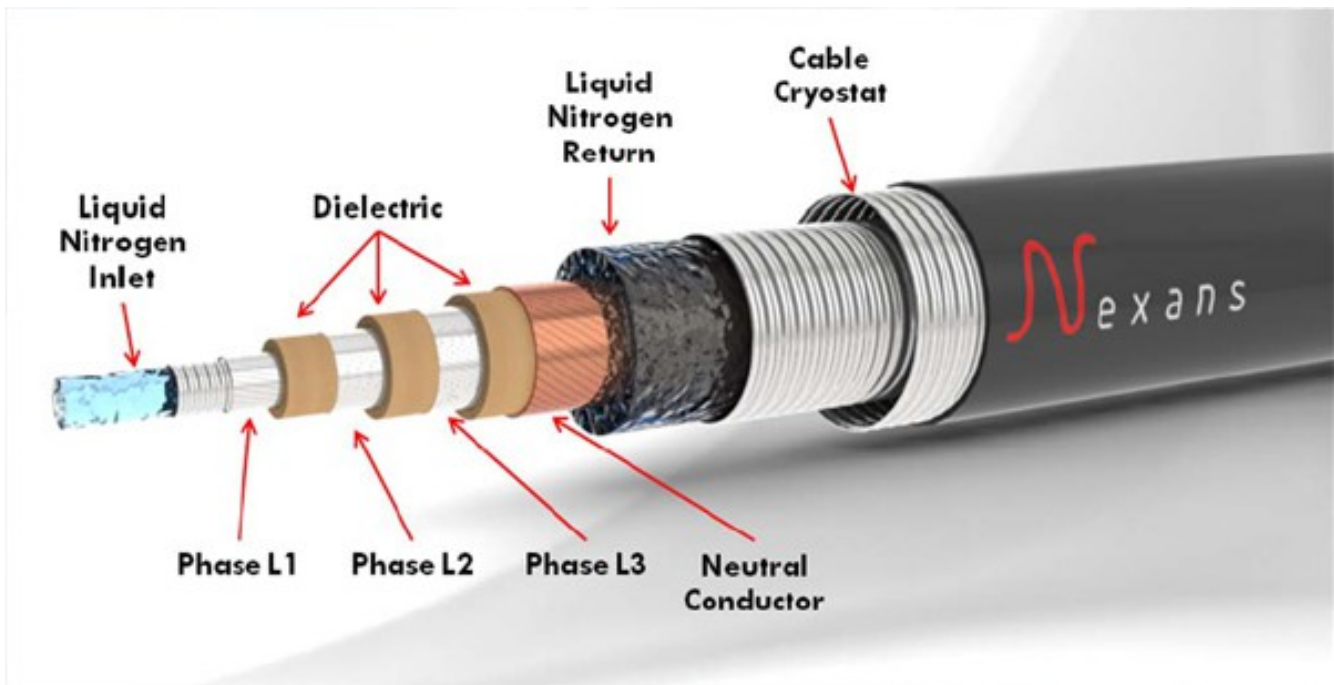
Jedním z budoucích využití vysokoteplotních supravodičů je kabelové vedení. Jsou vnímány jako možná náhrada běžných vysokonapěťových kabelů jako páteř přenosové sítě, nesoucí elektrickou energii na velké vzdálenosti. Také dokáží nést velké množství energie na krátké vzdálenosti (několik set metrů až několik kilometrů). To je výhodné do zastavěných městských oblastí, jelikož se stále zvyšuje poptávka po energii. Při provozu na stejném napětí jsou HTS kabely schopné nést 5-10-krát více energie než běžné kabely. To je velmi výhodné vzhledem k stále těžší možnosti vykupování pozemků pro rozsáhlé nadzemní či podzemní vedení, tudíž by nahrazení běžné kabelové infrastruktury HTS kabely vyřešilo rostoucí poptávku po energii.

V roce 2008 začal v rozvodně Holbrook na Long Island, New York, USA projekt Long Island Authority Power (LIPA). Jedná se o 600m kabelový systém. Skládá se ze tří fází připojených k LIPA síti před 6 venkovních koncovek. HTS kabely byly navrženy, vyrobeny a nainstalovány firmou Nexans s využitím HTS vodiče vyráběného firmou American Superconductor (AMSC). Chladicí systém na bázi tekutého dusíku byl vyroben a nainstalován firmou Air Liquide. Tři 600 metrů dlouhé vakuově izolované kryostaty od firmy Nexans poskytují vysoce kvalitní tepelnou izolaci, která udržuje kabelové žíly na kryogenní teplotě. Použitý supravodivý materiál je $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+x}$, který vykazuje supravodivé vlastnosti při teplotě tekutého dusíku. Program je právě ve druhé fázi, kdy bude jedna fáze HTS kabelu vyměněna za 2G HTS pásku. Tyto pásy jsou znatelně levnější na výrobu než první generace HTS vodiče použita při prvotním projektu. To by zvýšilo ekonomickou efektivitu HTS kabelových systému, jelikož jejich nejzásadnější nevýhodou jsou pořizovací náklady. [21]

27. července 2010 dokončila úspěšně firma Nexans test prvního HTS kabelu, který je navržen pro 200 kV. Byl testován v německém Hannoveru podle doporučení CIGRE (International Council on Large Electric Systems). Testy zahrnovaly zkoušku při napětí 360 kV po několik hodin. Dále kabel vyhověl zkoušce přepětím, které vzniká například při zásahu bleskem či přepínání. Kabel má sloužit k přenosu několika gigawattů (až 12 500 A) elektrické energie, tudíž musí být použity vhodně dimenzované spojky, které umožní instalaci kabelů a také jejich opravy. Tyto kabely mohou v budoucnu najít uplatnění jak v projektu evropského Super Gridu resp. SuperSmart Gridu, tak v plánovaném projektu Tres Amigas SuperStation. Stanice se bude rozkládat ve Spojených státech amerických na 57 km². Poblíž města Clovis, Nové Mexiko. Stanice má propojit dvě hlavní americké AC přenosové sítě Eastern Interconnection a Western Interconnection a jednu menší Texas Interconnection. Zajišťovala by rychlejší přijetí energie z obnovitelných zdrojů a zvýšila by spolehlivost americké přenosové soustavy. Tyto sítě by byly propojeny pomocí supravodivých HVDC linek a AC/DC měničů. Jednalo by se o 9,6 km dlouhý okruh, který by byl schopný přenést a vyvážit gigawatty energie z obnovitelných zdrojů mezi těmito sítěmi. Kabely by nejen pracovali s téměř 100% účinností, ale také by byly schopny přenášet více energie než konvenční kabely stejného průřezu. Stanice by také pracovala jako stejnosměrná spojka, tudíž by od sebe oddělovala tyto sítě na tři od sebe frekvenčně nezávislé celky. V roce 2017 bylo oznámeno, že bude projekt zmenšen a z původního rozpočtu 1.5 miliardy dolarů byl snížen na 200 milionů. [22]

Teoreticky nejúčinnějším termodynamickým cyklem je Carnotův cyklus charakterizovaný faktorem Carnot, který definuje účinnost procesu a závisí jak na kryogenní teplotě, tak na vyšší teplotě prostředí ($T = 300\text{ K}$). Pro tekutý dusík je faktor Carnot 3 ($T = 77\text{ K}$) a pro kapalný vodík ($T = 20\text{ K}$), což znamená, že účinnost chlazení je 4 až 5krát vyšší, pokud používá kapalný dusík ve srovnání s kapalným vodíkem.

Průměrná délka těchto supravodivých kabelů je několik sto metrů a přenesený výkon je poměrně nízká, nicméně tyto SCTL nabízejí skutečné výhody, jako je schopnost přizpůsobit úroveň napětí, zejména aby ji snížila. Kabel AmpaCity HTS, který spojuje dvě napájecí stanice v centru Essenu, drží rekord s délkou 1 km (jaro 2014), ale bude brzy překonán kabelem Petrohradu o délce 2,5 km. V případě společnosti AmpaCity byla odpovědná společnost RWE přesvědčena ekonomickou studií, která ukázala, že kabel SC je jednou ze dvou nejlevnějších možností modernizace stávající sítě. Zejména díky použití kabelu SC, lze využít vysokou hustotu proudu k provozu při nižším napětí (10 kV) a lze tak eliminovat stárnoucí 110-10 kV střídavé transformátory. [24]



Obrázek 26: HTS kabel firmy Nexans [25]

Přehled světových supravodičských projektů zabývajících se přenosem elektrické energie

| Projekt | Lokalita | Délka [m] | Výkon [MVA] | Časový plán | Provozovatel |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| LIPA | Long Island/USA | 600 | 574 (138 kV AC) | V provozu od 2008 | LIPA |
| AmpaCity | Essen/Německo | 1000 | 40 (10 kV AC) | V provozu od 2014 | RWE |
| | Amsterdam/Nizozemsko | 6000 | 250 (50 Kv AC) | Plánováno | Alliander |
| Projekt Petrohrad | Petrohrad/Rusko | 2500 | 50 (20 kV DC) | V provozu od 2015 | FGC UES |
| Ishikari | Ishikari/Japonsko | 2000 | 100 (+-10 kV DC) | Ve výstavbě od 2014 | Město Ishikari |
| | Icheon/Korea | 100 | 154 (154 kv AC) | V provozu od 2013 | KEPCO |
| | Ostrov Jeju/Korea | 1000 | 154 (154 kv AC) | V provozu od 2015 | KEPCO |
| | Ostrov Jeju/Korea | 500 | 500 (800 kV DC) | V provozu od 2014 | KEPCO |
| Hydra | Westchester/USA | 170 | 96 (13,8 kV AC) | Ve výstavbě od 2014 | ConEdison |
| | Yokohama/Japonsko | 250 | 200 (66kV AC) | Modernizace od 2015 | TEPCO |
| | Čína | 360 | 13 (1,3 kV DC) | V provozu od 2011 | IEE CAS |
| REG | Chicago/USA | 5000 | není specifikováno | Projekotváno od 2014 | ComED |
| Tres Amigas | Nové Mexiko/USA | Není specifikováno | | Odloženo | Tres Amigas LLC |

4. Porovnání supravodivého přenosu s klasickým z ekonomického hlediska

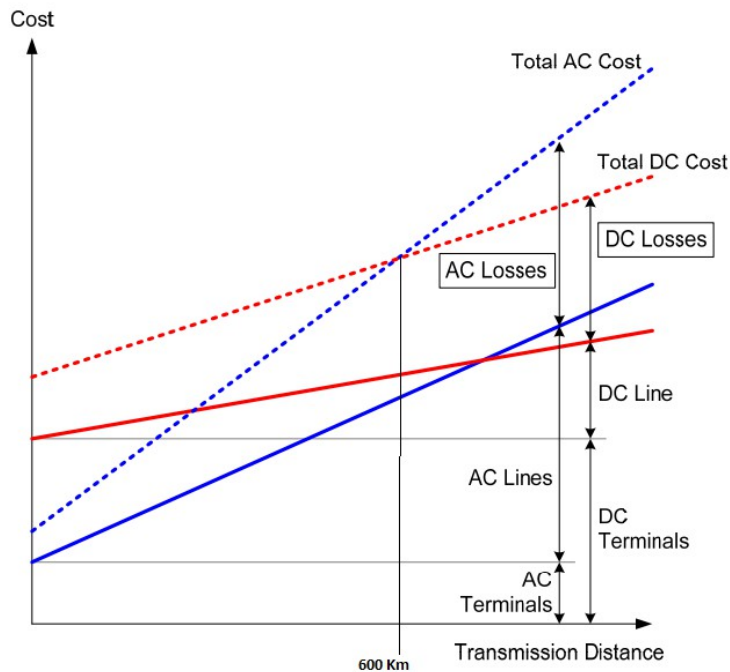
4.1. Ekonomické porovnání AC a DC přenosu

V minulých kapitolách jsem popsal výhody a nevýhody stejnosměrného přenosu. V této kapitole budu ekonomicky porovnávat dvě možnosti modernizace a náhrady trasy Röhrsdorf -> Győr, která vede přes území Německa, České republiky, Rakouska a Maďarska, které aktuálně převážně tvoří vedení na napěťové hladině 220 kV. Vedení na území České republiky je na konci své životnosti a s rekonstrukcí na napěťové hladině 220 kV AC se v budoucnu nepočítá. Vybraná trasa má dohromady 624 km a její detailnější popis uvedu v tabulce. U stejnosměrného vedení můžeme počítat s ušetřením materiálu na vybudování trasy (stožáry a vodiče), ale vyšší náklady na vybudování konvertorů. Konvertory budou na této trase 4, aby byla přenosová soustava každé země, kterou trasa prochází schopna dodávat a odebírat výkon. U varianty střídavého vedení jsou náklady na materiál a vybudování vedení vyšší, ale náklady na výstavbu rozvodů výrazně nižší. Rozvody jsou na této trase již vybudovány, proto považuji náklady na výstavbu 2 rozvodů, které mohou být použity na rekonstrukci či modernizaci stávajících rozvodů. [26][27]

| Trasa spojující Německo, Českou republiku, Rakousko a Maďarsko | | | | | | |
|--|----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Úsek | Označení | Začátek | Konec | Napěťová hladina [kV] | Vedení | Délka [km] |
| 1 | V445 | <i>Röhrsdorf</i> | Rozvodna Hradec | 400 | Dvojité Donau | 96 |
| 2 | V225/226 | Rozvodna Hradec | Rozvodna Vyškov | 220 | Dvojité Portál | 31 |
| 3 | V201 | Rozvodna Vyškov | Rozvodna Čechy střed | 220 | Jednoduché Portál | 85 |
| 4 | V202 | Rozvodna Čechy střed | Rozvodna Opočinek | 220 | Jednoduché Portál | 71 |
| 5 | V203 | Rozvodna Opočinek | Rozvodna Sokolnice | 220 | Jednoduché Portál | 131 |
| 6 | V243/244 | Rozvodna Sokolnice | Bisamberg | 220 | Dvojité Soudek | 108* |
| 7 | 227 | Bisamberg | Vídeň | 220 | Jednoduché | 39 |
| 8 | 245 | Vídeň | Győr | 220 | Jednoduché | 63 |
| Celková délka vedení | | | | | | 624 |

Na grafu můžeme vidět porovnání AC a DC přenosu. Do ceny je zahrnuta výstavba infrastruktury a také provozní ztráty. Pokud započítáme tyto iniciální a provozní náklady DC přenos se oproti AC přenosu vyplatí při vedení okolo délky 600km a delší u nadzemní trasy a 50 km u trasy podzemní. V tabulce níže můžeme sledovat jednu ze zásadních výhod DC přenosu a to nízké ztráty, které při dostatečné délce vedení vynahradí náklady na výstavbu měničů a ztráty v měničích.

Cost vs. Distance for HVDC and AC



Obrázek 27: Porovnání závislosti ceny na délce vedení pro AC a DC vedení [12]

Pro ekonomické porovnání AC a DC přenosu musím určit velikost Jouleových ztrát. Pro ukázkou velikosti ztrát zde uvádím v tabulce data převzané od společnosti Siemens. Pro další výpočty si ztráty na následující straně výčísím podle parametrů mnou navrhovaných vedení. [23]

| Přenos | Napětí[kV] | Délka vedení [Km] | Přenesený výkon [MW] | Ztráty[%] |
|--------|------------|-------------------|----------------------|-----------|
| AC | 400 | 800 | 2500 | 9.4 |
| DC | 500 | 800 | 2500 | 6 |
| DC | 800 | 800 | 2500 | 2.6 |

Základní vzorcem pro výpočet ztrát způsobených průchodem proudu je v práci již zmiňovaný:

$$\Delta P = R \cdot I^2$$

Kde:

ΔP - Jouleovy ztráty [W]

R – odpor vodiče [Ω]

I – proud vodičem [A]

U linky 2x400 kV AC použiji svazkový trojvodič AlFe 6 o jmenovitém průřezu 3x450mm². Kilometrový odpor AlFe 6 bude $R_L = 0,065 \Omega/\text{km}$, tudíž odpor jedné fáze bude třikrát menší a celého vedení 624 km $R = 13,52 \Omega$. Maximální dovolený proud je 1765 A a maximální přenos po jednom potahu je 1,2 GW. [30]

Tyto veličiny dosadím do vzorce pro výpočet Jouleových ztrát a dostanu ztráty pro jednoduché vedení 400 kV:

$$\Delta P = 3 \cdot 13,52 \cdot 1765^2 = 126\,353,526 \text{ kW}$$

Vyjádřeno v procentech je to 10,5% přeneseného výkonu.

Ztráty dvojitého vedení 2x 400 kV při přenosu 2,4 GW tedy jsou:

$$\Delta P_{AC} = 2 \cdot \Delta P = 2 \cdot 126\,353\,526 = 252\,707 \text{ kW}$$

U HVDC 500 kV také použiji 3x450mm², který nemusí být trojsvazkový, ale stáhnutý například drátem, jelikož u DC přenosu není přítomný skinefekt. Pro přenos 1,2 GW bude potřeba proud 1200 kA. Tento proud vyvolá ztráty:

$$\Delta P = 2 \cdot 13,52 \cdot 1200^2 = 38\,937,6 \text{ kW}$$

Vyjádřeno v procentech je to 3,2% přeneseného výkonu.

Pro zdvojnásobení přeneseného výkonu, tedy dosáhnutí přenosu 2,4 GW zdvojnásobíme výkon AC/DC stanic a vodiče budou schopny přenést dvojnásobný proud a ztráty v měničích vyčísím jako 2% přeneseného výkonu:

$$\Delta P_{DC} = 2 \cdot 13,52 \cdot 2400^2 + 24\,000 = 179\,750,4 \text{ kW}$$

Vyjádřeno v procentech je to 8,5% přeneseného výkonu.

Jako kritérium efektivity investice použijí Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF). Také provedu citlivostní analýzu, jejíž měřenou vstupní hodnotou bude diskontní sazba.

$$RCF = N_i \cdot \frac{(1+r)^t \cdot r}{(1+r)^t - 1} + n_m \cdot \Delta P$$

Kde:

- N_i – počáteční investice [Kč]
- r – diskontní sazba [-]
- n_m – marginální náklady [Kč/kW]
- ΔP - Jouelovy ztráty [W]

Jako počáteční investici u AC 2x400 kV trasy budeme brát náklady na výstavbu rozvodny a náklady na výstavbu linky.

Náklady na 1 km linky jsou ve výši 500 tis. USD/km. Jako kurz Kč vůči USD budu považovat 1 USD = 20 Kč jako průměrnou hodnotu, kolem které se kurz od ledna 2005 do května 2008 pohyboval viz. Graf ČNB níže. Náklady vyčíslené v korunách jsou: $n_{km} = 10$ mil. Kč.

Celkové náklady na linku o délce 624 km jsou:

$$n_l = n_{km} \cdot l = 10 \text{ mil.} \cdot 624 = 6\,240 \text{ mil. Kč}$$

Kde:

- n_l – náklady na linku [Kč]
- n_{km} – náklady na 1 km linky [Kč/km]
- l – délka linky [km]

Náklady na výstavbu rozvodny AC jsou ve výši 80 mil. USD. Výše nákladů v korunách je:

$$n_r = 1\,600 \text{ mil. Kč}$$

Počáteční investice do vybudování trasy a dvou rozvodn je:

$$N_i = n_l + n_r = 6\,240 \text{ mil.} + 2 \cdot 1\,600 \text{ mil.} = 9\,440 \text{ mil. Kč}$$



Obrázek 28: Kurz USD vůči koruně od 1.1.2005 po 22.5.2018 [29]

Dále vypočítám anuitu pro diskontní sazbu 3%, 5% a 7%, kterou na konci výpočtu použiji k vyhotovení citlivostní analýzy. Ta je definována:

$$a = \frac{(1+r)^t \cdot r}{(1+r)^t - 1}$$

Kde:

a – anuita

r – diskontní sazba

t – doba trvání investice

Dobu trvání investice určím jako předpokládanou životnost kabelů a rozvoden bez nutnosti komplexní rekonstrukce či výměny. Tato doba se pohybuje mezi 30-40 lety. Já budu pracovat s dobou investice 35 let.

Anuita pro diskontní sazbu 7%:

$$a_{(0,07)} = \frac{(1+0,07)^{35} \cdot 0,07}{(1+0,07)^{35} - 1} = 0,07723396$$

Anuita pro diskontní sazbu 5%:

$$a_{(0,05)} = 0,061071707$$

Anuita pro diskontní sazbu 3%:

$$a_{(0,03)} = 0,046539292$$

Marginální náklady pro dobu plných ztrát 3 000 h, 6 500 h a 8 760 h za rok mi byly stanoveny Ing. Vítkem z předchozích příkladů hodnotami: $n_{m(3000 \text{ h/r})} = 4\,820 \text{ Kč/kW}$, $n_{m(6500 \text{ h/r})} = 7820 \text{ Kč/kW}$ a $n_{m(8760 \text{ h/r})} = 9\,760 \text{ Kč/kW}$.

Ztráty AC 2x400kV přenosu jsem v předešlém výpočtu určil jako $\Delta P_{AC} = 252\,707,052 \text{ kW}$

Výsledný Roční ekvivalentní peněžní tok je tedy:

$$RCF_{0,07} = N_i \cdot a_{0,07} + n_m \cdot \Delta P_{AC} = 9\,440 \text{ mil.} \cdot 0,07723396 + 252\,707,052 \cdot 4820 = 1\,947,1 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0,05} = 9\,440 \text{ mil.} \cdot 0,061071707 + 252\,707,052 \cdot 4820 = 1\,794,6 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0,03} = 9\,440 \text{ mil.} \cdot 0,046539292 + 252\,707,052 \cdot 4820 = 1\,657,4 \text{ mil. Kč}$$

Jako počáteční investici u DC 500 kV trasy budeme brát náklady na výstavbu měřírny a náklady na výstavbu linky.

Náklady na 1 km linky jsou ve výši 250 tis. USD/km. Náklady na 1 km vyčíslené v korunách jsou 5 mil. Kč/km.

Celkové náklady na linku o délce 624 km jsou:

$$n_l = n_{km} \cdot l = 5 \text{ mil.} \cdot 624 = 3\,388 \text{ mil. Kč}$$

Náklady na výstavbu měřírny jsou ve výši 250 mil. USD. Výše nákladů v korunách je:

$$n_r = 5\,000 \text{ mil. Kč}$$

Počáteční investice do vybudování trasy a 4 měřírny, které k trase připojí všechny 4 státy, na jejichž území se trasa nachází jsou:

$$N_i = n_l + 4 \cdot n_r = 3\,388 \text{ mil.} + 4 \cdot 5\,000 \text{ mil.} = 23\,388 \text{ mil. Kč}$$

Ztráty DC 500 kV přenosu jsem v předešlém výpočtu určil jako:

$$\Delta P_{DC} = 179\,750,4 \text{ kW}$$

Roční ekvivalentní peněžní tok dostanu:

$$RCF_{0.07} = N_i \cdot a_{0.07} + n_m \cdot \Delta P_{DC} = 23\,388 \text{ mil.} \cdot 0,07723396 + 179\,750,4 \cdot 4820 = 2\,672,7 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0.05} = 23\,388 \text{ mil.} \cdot 0,061071707 + 179\,750,4 \cdot 4820 = 2\,294,7 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0.03} = 23\,388 \text{ mil.} \cdot 0,046539292 + 179\,750,4 \cdot 4820 = 1\,954,9 \text{ mil. Kč}$$

4.2. Ekonomické porovnání konvenčního AlFe 6 lana a supravodivého AC kabelu

Posuzovat výhodnost kabelů budu z hlediska ztrát při provozu. Data jsem převzal z testu supravodivých kabelů společnosti Furukawa Electric po dobu jednoho měsíce, kde byly vyčísleny ztráty střídavé a dielektrické na jednotku délky. HTS kabely o délce 30m pracovaly na napěťové hladině 200 kV a vodiči procházel proud 3 kA, tudíž je přenesený výkon 600MW. Životnost kabelu se odhaduje na 35 let.

Prvním krokem bude určit ztráty jak supravodivého kabelu při napěťové hladině 200 kV, tak AlFe 6 lana při napěťové hladině 400 kV. Ztráty HTS kabelu jsou součtem ztrát střídavých, ztrát dielektrických a ztrát tepelných, které vznikají v kryostatu.

$$\Delta P_{sp} = \Delta P_{AC} + \Delta P_{diel} + \Delta P_{tep}$$

Kde:

ΔP_{AC} – střídavé ztráty [W/m]

ΔP_{diel} – ztráty dielektrické [W/m]

ΔP_{tep} – ztráty tepelné [W/m]

Po dosazení ΔP_{AC} a ΔP_{diel} z dat společnosti Furukawa Electric a uvažováním tepelných ztrát, které nepřesahují 1W/m dostaneme celkové ztráty supravodivého kabelu o délce 624 km:

$$\Delta P_{sp} = 0.19 * 624\ 000 + 0.44 * 624\ 000 + 1 * 62\ 4000 = 1\ 017\ 120\ W$$

U konvenčního AlFe 6 lana s přenosem 600 MW ztráty počítáme z již uvedených hodnot a výpočtů:

$$\Delta P_{AlFe} = 3 \cdot 13,52 \cdot 882,5^2 = 31\ 588,381\ kW$$

Považujeme-li dobu plných ztrát pro AlFe lano 3000 h/rok a HTS kabel ztráty střídavé 6500 h/rok, ztráty dielektrické a tepelné 8760 h/rok dostaneme následující hotovostní toky:

$$CF_{AC} = 4\ 820 * -31\ 588,3815 = -152\ 256\ tis.\ Kč$$

$$CF_{sp} = 7\ 820 \cdot (-118,56) + 9\ 760 \cdot (-274,56) + 9\ 760 \cdot (-624) = -9\ 697\ tis.\ Kč$$

Protože jsou hotovostní toky konstantní mohou spočítat součastnou hodnotu (PV) pomocí anuity:

$$PV = \frac{CF}{a}$$

Po dosazení hotovostních toků a anuity:

$$PV_{AC} = \frac{-152\ 256\ tis.}{0.07723396} = -1\ 971\ mil.\ Kč$$

$$PV_{sp} = \frac{-9\ 697\ tis.}{0.07723396} = -126\ mil.\ Kč$$

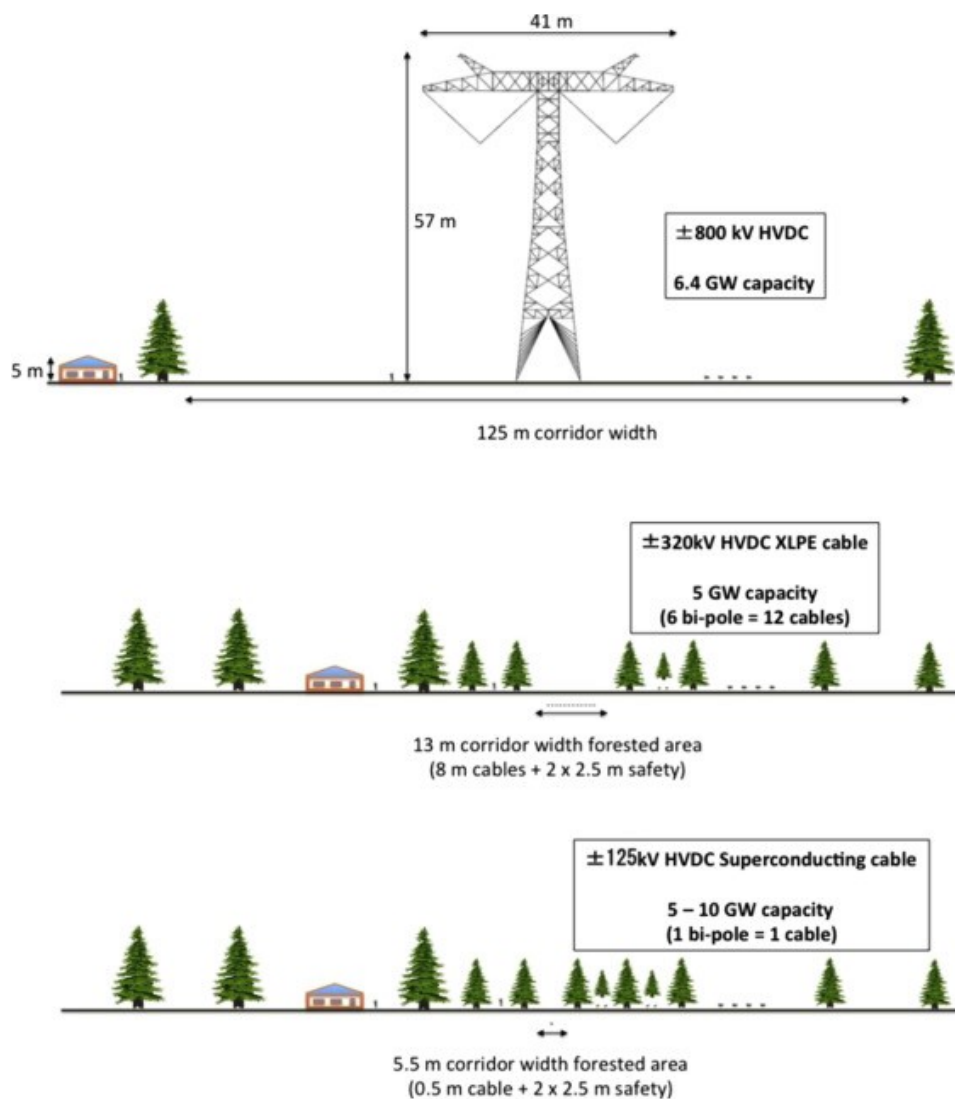
4.3. Ekonomické porovnání nadzemní DC linky a supravodivé podzemní DC linky

Vzhledem k neustále zvyšující se poptávce po energii je supravodivost velkým příslibem do budoucna v oblasti rozvodu elektrické energie. Kladné aspekty supravodivého řešení spočívají jak v ekonomické výhodnosti z dlouhodobého hlediska, tak s prostorové nenáročností linek, které jsou při stejném průřezu kabely schopny přenést více energie. Další výhodou je používání nižšího provozní napětí při zachování stejné kapacity. Z pohledu uživatelů přenosové sítě se jako výhoda jeví nižší vizuální dopad s ohledem na menší velikost vodičů. Například v Německu je velký problém rozšiřování stávající sítě, vzhledem k prostorové náročnosti a vizuálního dopadu nadzemních linek. Řešením těchto negativních aspektů je použití podzemních linek i přes jejich velkou iniciální ekonomickou náročnost. Několik velkých evropských projektů jako například německý Südlink nebo propojení Španělska s Francií nabývá spoždění, kvůli veřejné opozici zvláště z těchto důvodů:

- vizuální dopad na okolní krajinu
- ničení či změna přirozeného rázu krajiny a dopad na přítomnou faunu s flórou
- možný dopad na zdraví
- snižování hodnoty pozemků v okolí přenosové sítě

Kromě těchto problémů je supravodivý kabel výhodnější:

- není tak náchylný k přírodním jevům
- generuje nižší elektromagnetické pole
- supravodivý kabel oproti klasickému nemění vlhkost okolní půdy
- chladicí systém stabilizuje teplotu vodiče a zabraňuje ovlivnění vnějšími jevy [24][31]



Obrázek 29: Porovnání rozměrových nároků různých typů DC vedení. Vrchní vedení je nadzemní HVDC linka s napětovou hladinou 800 kV a přeneseným výkonem 6,4 GW. Druhé je kabelové podzemní DC vedení s napětovou hladinou 320kV a přeneseným výkonem 5 GW skládající se z 12 kabelů. Poslední je supravodivé podzemní kabelové vedení s napětovou hladinou 125 kV a přeneseným výkonem v rozmezí 5-10 GW skládající se z jednoho kabelu. [24]

Náklady na supravodivou linku určím z odhadů nákladů na linku projektovanou v Německu s přenosem 2 GW. Dvě 65 km dlouhé linky včetně konvertoru by stály 1980M €. Cena konvertoru by tvořila 1620M € tedy 82% ceny. [24]

Náklady na kilometr jedné délky budou tedy:

$$n_{km} = \frac{180}{65} = 2\,769 \text{ tis. } \text{€} / \text{km}$$

Náklady na 1 km vyčíslené v korunách podle kurzu 1€ = 25 Kč ČNB jsou:

$$n_{km} = 69\,225 \text{ tis. Kč/km}$$

Náklady na konvertor vyčíslené v korunách jsou:

$$n_r = 40\,500 \text{ mil. Kč}$$

Počáteční investice do 624 km dlouhé trasy se 4 konvertory tedy je:

$$N_i = 69\,225 \text{ tis.} \cdot 624 + 4 \cdot 40\,500 \text{ mil.} = 205\,200 \text{ mil. Kč}$$

Ztráty budou v případě stejnosměrného supravodivého přenosu počítat jen jako ztráty tepelné, způsobené chlazením $\Delta P_{sup} = 1 \text{ W/m}$ celkové ztráty tedy budou:

$$\Delta P_{supDC} = 624 \text{ kW}$$

Použiji marginální náklady pro dobu plných ztrát 8760 h/rok.

Z těchto hodnot mohu určit roční ekvivalentní peněžní tok s diskontní sazbou 7%, 5% a 3%:

$$RCF_{0,07} = 205\,200 \text{ mil.} \cdot 0,0772339596 + 9760 \cdot 624 = 15\,854 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0,05} = 205\,200 \text{ mil.} \cdot 0,0610717072 + 9760 \cdot 624 = 12\,538 \text{ mil. Kč}$$

$$RCF_{0,03} = 205\,200 \text{ mil.} \cdot 0,0465392916 + 9760 \cdot 624 = 9\,556 \text{ mil. Kč}$$

4.4. Zhodnocení

| Přenosové vedení o délce 624 km | | | |
|---------------------------------|-------------|-----------|--------------------------|
| Porovnávaná položka | 2x440 kV AC | 500 kV DC | 230 Kv Supravodivé DC |
| Druh vedení | Nadzemní | Nadzemní | Podzemní |
| Přenesený výkon [GW] | 2,4 | 2,4 | 2 * |
| Investiční náklady [mil.Kč] | 9 440 | 23 388 | 205 200 |
| Ztráty [kW] | 252 707 | 179 750,4 | 624 |
| $RCF_{0,07}$ [mil.Kč] | 1 947,1 | 2 672,7 | 15 854 |
| $RCF_{0,05}$ [mil.Kč] | 1 794,6 | 2 294,7 | 12 538 |
| $RCF_{0,03}$ [mil.Kč] | 1 657,4 | 1 954,9 | 9 556 |

* Supravodivý kabel stejné průřezu jako konvenční může přenášet 5-10 -krát více energie. Velikost přeneseného výkonu u supravodivé HVDC linky je převzata z uvedených materiálů.

V tabulce jsou shrnuty kritéria a dílčí položky podle kterých jsem hodnotil investice. Jako nejvhodnější investice pro mnou navrhovanou trasu podle nákladů na její výstavbu a provoz v rámci 35 let vychází 2x400 vedení s přeneseným výkonem 2,4 Gw s ročním ekvivalentním peněžním tokem:

$$RFC_{AC(7\%)} = 1\,947,1 \text{ mil. Kč}$$

Nadzemní linka 500 kV DC má roční ekvivalentní peněžní tok větší o:

$$\Delta RFC_{AC/DC} = 347,6 \text{ mil. Kč}$$

Podzemní supravodivá linka 230 kV má roční ekvivalentní peněžní tok větší o:

$$\Delta RFC_{AC/SPDC} = 13\,906,9 \text{ mil. Kč}$$

Výhoda nadzemní linky 2x400 kV AC spočívá v menších prvotních nákladech, což se u linky dlouhé 624 km projevilo kladněji než nižší ztráty u HVDC přenosu. Významný faktor v investičních nákladech je vybudování 4 měníren, aby byli soustavy všech států, kterými vedení prochází schopné z linky výkon dodávat a odebírat. Vzhledem k malé délce přenosu nedokázali nižší ztráty tuto počáteční investici vykompenzovat. U linky 2x400 kV AC jsem počítal s investičními náklady jen do 2 rozvoden, jelikož jsou rozvodny na rozdíl od měníren již vybudovány a tento náklad by mohl posloužit k rekonstrukci rozvoden na konci životnosti. V dnešní době již existují HVDC vedení, které jsou na mnohonásobně větší vzdálenosti než uvažovaných 624 a zpravidla se jedná o přenosové vedení propojující dvě měřírny. Příkladem takových vedení jsou podmořské vedení spojující kontinentální Evropu s ostrovy či poloostrovy.

HVDC linka se supravodivými prvky má mnohonásobně větší investiční náklady než obě předešlé varianty, ale ztráty jsou eliminovány jen na ztráty chladicího systému. Stejně jako u konvenčního HVDC přenosu se zde projevují hlavně náklady na výstavbu měníren, které jsou ale za použití supravodivých prvků cca. 8x větší než náklady na výstavbu měřírny s použitím konvenčních technologií. Cenu vodičů navyšuje nákladnější výroba HTS vodičů 2. generace i nutnost chladicího systému. V tomto ohledu se cena na výrobu i chlazení může v budoucnu snižovat, jelikož stále dochází k objevování nových látek, které jsou levnější na výrobu a vyžadují menší kritickou teplotu T_c .

Závěr

Tato práce pojednává o možnostech ekonomičtějšího přenosu elektrické energie. V první části je popsán a vysvětlen fyzikální jev zvaný supravodivost, který by za určitých podmínek mohl rapidně snížit náklady na přenos elektrické energie. Ve druhé a třetí části je popsán stejnosměrný přenos a aspekty jeho výhodnosti oproti konvenčnímu AC přenosu. V poslední části jsou porovnány investice do vedení, které by mohlo nahradit uvažovanou trasu Německo → Maďarsko za využití již zmiňovaných technologií. Jako nejvýhodnější varianta vyšla s použitím hodnocení efektivnosti investice pomocí ročního ekvivalentního peněžního toku nadzemní trasa 2x400 kV.

Velmi nákladná výroba a provoz supravodičů omezuje jejich praktické využití. Zásadní je objev HTS, který otevřel dveře praktickému využití supravodičů, jelikož snižuje náklady na uvedení materiálu do supravodivého stavu. V budoucnu lze očekávat růst aplikací supravodičů, protože jsou neustále objevovány nové supravodiče se zvyšující se kritickou teplotou T_c a ekonomičtější výrobou, což může dospět až k možnému využití tzn. „room temperature“ HTS, které dosahují supravodivého stavu za pokojové teploty. Ekonomická analýza supravodivé DC linky vyšla několikanásobněji méně výhodná než předešlé dvě uvažované alternativy. To je způsobeno parametry této navržené linky a to zejména její malou délkou a potřebou výstavby několika konvertorů. U této linky jsem počítal se stejnou životností projektu jako u předchozích dvou linek, jelikož žádný projekt využívající supravodivé technologie není v provozu dostatečně dlouhou dobu, aby se dala vyčíslit doba jeho životnosti. Teoreticky je opotřebením průchodem proudu u supravodivých látek téměř nulové vzhledem k prakticky nulovému odporu. Delší doba životnosti by vykompenzovala velké investiční náklady na výstavbu linky a měníren, jelikož by se výrazně snížily náklady na rekonstrukci linky v průběhu jejího fungování. Spolu se stálým objevováním nových supravodivých látek s menšími náklady na výrobu a vyšší kritickou teplotou, by supravodivost mohla v budoucnu hrát velkou roli v přenosu elektrické energie.

Zdroje:

[1] Jirsa M. **Supravodivost naděje pro 21. století.** Web:

<http://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>

[2] Reichl J. **Meissnerův jev.** Web:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/424-meissneruv-jev>

[3] Prananto D. **Superconductivity.** 6. Května, 2012. Web:

<https://simpliphy.org/tag/superconductivity/>

[4] Reichel, J. **Druhy supravodičů.** Web:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/426-druhy-supravodicu>

[5] Holubek, T. **Supravodiče.** 1998. Web:

<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=346>

[6] Kulhánek, Petr. **Vysokoteplotní supravodivost.** 6. Zář, 2004. Web:

http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_36_hts.php

[7] Qiu, Xianggang. **High-temperature Superconductors.** 1st pub. Cambridge: Woodhead. 2011.

[8] Galetka, M. **Přenosová soustava.** 11.1.2016. Web:

<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>

[9] ČEPS, a.s. **Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2016 – 2025.** 15. Prosince. 2015. Web:

https://www.eru.cz/documents/10540/1765622/Plan_CEPS_2016-2025.pdf/be688a1a-71ca-4014-961a-e2c75d092491

- [10] Petráš, P. **Slunce fakturu neposílá – 1.část.** 17. října, 2014. Web:
<http://www.zdruzenipecola.org/view.php?cisloclanku=2014101701>
- [11] Majling, Eduard. **HVDC – stejnosměrný přenos energie.** 17.9.2017. Web:
<http://oenergetice.cz/technologie/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>
- [12] Mooney, Joe. **Electrical consideration for HVDC transmission lines.** Web:
<https://www.cleanlineenergy.com/sites/cleanline/media/resources/Electrical-Considerations-for-HVDC-Transmission-Lines.pdf>
- [13] The University of Manchester. **VSC-HVDC.** Web:
<http://www.eee.manchester.ac.uk/our-research/research-groups/pc/researchareas/powerelectronics/vsc/>
- [14] Firma Siemens. Web:
<https://www.siemens.com/press/IG2015040016EMEN>
- [15] Čermák, Jiří. **Elektrina, Elektroenergetika, Technologie.** 13.5.2017. Web:
<http://oenergetice.cz/elektrina/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli/>
- [16] National Renewable Energy Laboratory. **Renewable Electricity Futures Studies.** Web:
<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52409-4.pdf>
- [17] Redakce Elektro. **Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti.** 2007. Web:
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/supravodivost-perspektivni-technologie-blizke-budoucnosti--12718>
- [18] Noe, M. **Electric Power Applications od Coated Conductors.** 11. září, 2016. Web:
https://nationalmaglab.org/images/magnet_development/asc/searchable_docs/asc_resources/coated_conductors/2016/io_11_noe.pdf

[19] Berger, Cherevatskiy, Noe, Leibfried. **Comparosin of the efficienci of superconducting and conventional transformers.** 2010 Web:

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/234/3/032004>

[20] Arrillaga, Jos; **High Voltage Direct Current Transmission**, second edition, Institution of Electrical Engineers. 1998. Web:

https://en.wikipedia.org/wiki/HVDC_converter_station

[21] Nexans. **The world's longest superconductor system to replace inner-city high-voltage cable.** 19. Ledna 2012. Web:

http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigatepub_0_-31642/RWE_Deutschland_Nexans_and_KIT_launch_AmpaCity_pro.html

[22] Wikipedia. **Tres Amigas SuperStation.** Web:

https://en.wikipedia.org/wiki/Tres_Amigas_SuperStation

[23] Firma Siemens. **Fact sheet HVDC.** Květen 2014. Web:

<https://www.eru.cz/legacyerustaticdata/RZ2009/rz/mapy/14.htm>

[24] Thomas, Marian, Chervyakov, Stuckrad, Salmieri, Rubbia. **Superconducting trensmission lines – Sustainable electric energy transfer witch higher public acceptance?** Květen, 2016. Web:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501120X>

[25] Williams, D. **Nexans succes in Essen may see roll-out in other cities.** 1. června, 2016. Web:

<http://www.powerengineeringint.com/articles/2016/01/nexans-success-in-essen-may-see-roll-out-in-other-cities.html>

[26] Austrian Power Grid. **Grid System.** 2018. Web:

<https://www.apg.at/en/grid/assets/grid-system>

[27] Šmid, J. **Česká přenosová a distribuční soustava – 3.díl: Vedení (ochranná pásma, vedení 110kV a 220 kV.** 12. září, 2015. Web:

<http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-ochranna-pasma-vedeni-110-kv-a-220-kv/>

[28] Csaniy, E. **Analysing the costs of High Voltage Direct Current (HVDC) transmission.** 6. srpna, 2014. Web:

<http://electrical-engineering-portal.com/analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission>

[29] ČNB. **Kurzy devizového trhu.** 2018. Web:

https://www.cnb.cz/cs/financni_trhy/devizovy_trh/kurzy_devizoveho_trhu/denni_kurz.jsp

[30] **Mechanika vedení.** Web:

<http://diskuse.elektrika.cz/index.php?action=dlattach;topic=21403.0;attach=14227>

[31] Voříšek, M. **Německo postavilo za první čtvrtletí nejméně přenosového vedení od 3Q 2013.** 23. června, 2016. Web:

<http://oenergetice.cz/nemecko/nemecko-postavilo-nejmene-prenosoveho-vedeni-od-3q-2013/>

[32] Voženílek, Novotný, Mindl. **Elektromechanické měniče.** České vysoké učení technické v Praze. 2011