

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A
HUMANITNÍCH VĚD**



SUPRAVODIVOST U TRANSFORMÁTORŮ

Bakalářská práce

Autor práce: Martin Štencel
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Štencel** Martin

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Supravodivost u transformátorů

Pokyny pro vypracování:

1. Fyzikální princip supravodivosti
2. Rešerše technických řešení v praxi
3. Technické a ekonomické parametry supravodivých transformátorů
4. Případová studie

Seznam odborné literatury:

1. Odehnal M.: Supravodivost a jiné kvantové jevy. Academia, 1992.
2. Voženílek P., Nový V., Mindl P.: Elektromechanické měniče. Skriptum ČVUT FEL, 2011.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

Doc. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2014

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat těm mnoha lidem, kteří se prostřednictvím rad, podnětů a užitečných připomínek podíleli na vzniku této bakalářské práce. Za všechny bych rád jmenoval alespoň vědecké pracovníky Mika Steinese, Erina Keehana, Vítězslava Pankráce, Jana Kubu a Jana Wilda. Velký dík patří také mé rodině za podporu během studia, bez níž by tato práce nikdy nevznikla. Nakonec bych rád poděkoval kolegovi Tomáši Tvaroužkovi za velmi konstruktivní kritiku.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....
Martin Štencel

Anotace

Tato práce se zabývá kvantovým fyzikálním jevem supravodivosti. V první části je pojednáno o historii jejího objevu a jsou zde stručně popsány základní vlastnosti supravodivých látek. Také se zde práce zabývá typologickým dělením supravodičů. Ve druhé části je pak pojednáno o již existujících praktických aplikacích. Přitom je kladen důraz na technická řešení z oblasti výroby, přenosu a užití elektrické energie - tedy energetiky. Třetí část obsahuje porovnání investic v případě nahrazení konvenčního transformátoru supravodivým. Citlivost tohoto výpočtu na vstupní parametry je řešena tzv. citlivostní analýzou rovněž ve třetí části práce.

Abstract

This thesis focuses on quantum-physical phenomenon of superconductivity. The first part is about history of its discovery and includes brief description of basic characteristics of superconducting materials. Furthermore the thesis deals with typological division of superconductors as well. In the second part are discussed currently existing practical applications. Emphasis is put on technical solutions in field of production, transmission and use of electrical energy - power engineering. The third part includes comparison of investment in case of replacement conventional device with superconducting one. Sensitivity of this calculation on input parameters is solved by sensitivity analysis in third part of thesis as well.

Klíčová slova

Kritická teplota, kritická magnetická indukce, kritická proudová hustota , ideální diamagnetikum, vysokoteplotní supravodivost, transformátor, čistá současná hodnota, citlivostní analýza.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Fyzikální princip supravodivosti.....	9
2.1	Historie objevu supravodičů a jejich vlastnosti	9
2.2	Rozdělení supravodičů	13
3	Přehled technických řešení v praxi	15
3.1	Supravodivé aplikace v energetice	15
3.1.1	Supravodivé vodiče a kabely	15
3.1.2	Supravodivé omezovače zkratových proudů (SFCL).....	19
3.1.3	Supravodivé akumulátory magnetické energie (SMES).....	21
3.1.4	Dynamické synchronní kompenzátory	24
3.1.5	Supravodivé elektromotory	25
3.1.6	Supravodivé transformátory.....	25
3.2	Ostatní aplikace	34
3.2.1	Magnetická rezonance	34
3.2.2	SQUID - Superconducting QUantum Interference Device	34
3.2.3	Elektrodynamická levitace.....	34
3.3	Pronikání HTS zařízení na trh	35
4	Případová studie.....	37
4.1	Přijaté předpoklady	37
4.2	Výpočet.....	38
4.2.1	Hodnocení investice - čistá současná hodnota.....	38
4.2.2	Citlivostní analýza	41
5	Závěr	44
6	Reference	46
7	Kontaktní adresa	49
8	Seznam číslovaných příloh	50

1 Úvod

Supravodivost byla objevena před více než sto lety během tehdejších snah o dosažení teploty co nejbližší absolutní nule. Od té doby prošla bouřlivým vývojem a našla uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Jedním z těchto oborů je energetika. Ve 21. století si již stěží dokážeme představit život bez elektrické energie, která je nám každý den dodávána až domů v prakticky neomezeném množství. Každý den používáme doslova stovky výrobků a vymožeností, jež by bez přičinění elektrické energie nemohly nikdy vzniknout anebo by jejich cena byla o několik řádů vyšší. Aby toto bylo možné, musí existovat síť elektráren, ve kterých se tato elektrická energie vyrábí a přenosová soustava, která tuto energii přepravuje. Na přenosu elektrické energie se zdaleka nepodílí pouze vodiče, ale mnoho dalších pomocných zařízení, které činí přenos efektivnějším a bezpečnějším. Jedním z těchto zařízení jsou i transformátory, jejichž hlavním úkolem je minimalizovat ztráty v rozvodné síti. Jak vedení, tak i transformátory a jiné prvky soustavy vykazují určitý elektrický odpor R , neboť jejich vodiče jsou většinou z mědi, případně z hliníku, železa nebo jiných materiálů. Vlivem toho se část vyrobené energie ztrácí ve formě tepla dříve, než může být koncovým odběratelem využita. Co by se tedy stalo, pokud bychom obyčejný transformátor s měděným vinutím nahradili transformátorem, jehož vinutí žádný měřitelný odpor nevykazuje? Vyplatí se taková varianta přes mnoho technických i ekonomických obtíží, které s sebou nová technologie zpravidla přináší? A pokud ano, za jakých podmínek? Na tyto otázky se na následujících stránkách pokusím odpovědět.

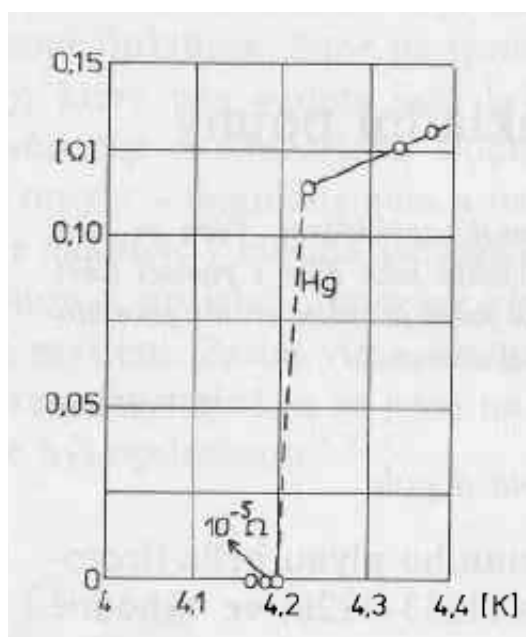
2 Fyzikální princip supravodivosti

V této kapitole se pokusím čtenáře seznámit s pojmem supravodivosti jako kvantově fyzikálním jevem. Po historickém úvodu zde bude objasněno základní dělení a charakteristické vlastnosti supravodičů.

2.1 Historie objevu supravodičů a jejich vlastností

Na konci devatenáctého století a na počátku století dvacátého zažívala fyzika nízkých teplot bouřlivý rozvoj. Roku 1877 francouzský fyzik L. P. Cailletet zkapalnil kyslík za teploty 90,2 K. Kapalný dusík poprvé připravili roku 1883 polští vědci Z. F. Wróblewski a K. Olszewski, bylo to při teplotě 77,4 K. Kapalný vodík pak, za teploty 20,4 K, poprvé pozoroval slavný anglický fyzik J. Dewar roku 1898. Ten se domníval, že zkapalněním vodíku bylo již zároveň dosaženo zkapalnění helia. Později ale vyšlo najevo, že tomu tak není. Helium zůstávalo posledním plynným prvkem, který nebyl dosud pozorován v kapalném skupenství a mezi vědci odstartoval doslova závod o to, komu se to jako prvnímu podaří. Dne 10. července 1908 v 19.30 večer tento závod vyhrál holandský fyzik Heike Kamerlingh-Onnes. Experiment byl proveden v holandském Leidenu za přítomnosti mnoha tehdejších vědeckých elit. Teploty 4,2 K zde bylo dosaženo pomocí snižování tlaku nad kapalinou (odsávání par). Onnes za svou práci v oblasti fyziky nízkých teplot obdržel roku 1913 nobelovu cenu za fyziku. [2][3]

Poté co se Onnesovi podařilo dosáhnout takto nízké teploty, rozhodl se zkoumat mimo jiné elektrické vlastnosti kovů za těchto teplot. Nejprve při experimentech použil jedny z nejlepších vodičů - platinu a zlato. Zjistil přitom, že ačkoli - dle očekávání - rezistivita prvků s teplotou klesá, u vzorků i při teplotě okolo 1 K stále přetrvává zbytkový odpor stejnosměrnému proudu. Onnes tuto skutečnost připisoval nečistotám, supravodivost však u některých prvků nebyla dodnes pozorována a pravděpodobně to ani není možné (kromě zlata jsou to například železo, kobalt nebo nikl). Poté se Onnes rozhodl proměřit vzorek rtuti, neboť tu měl k dispozici ve velmi čisté formě. Výsledek měření znázorňuje obrázek níže.

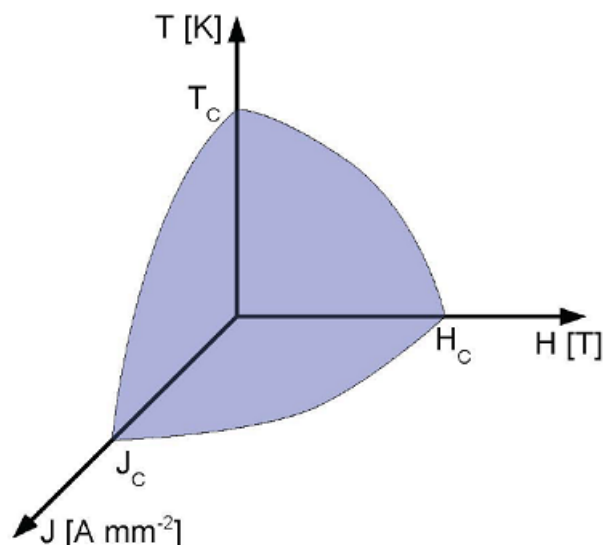


Obr. 1: Originál závislosti elektrického odporu na teplotě u vzorku rtuti publikovaný Onnesem roku 1911 (s drobnými úpravami) [2]

Jak je z obrázku patrné, odpor rtuti při určité teplotě (později nazvané **kritickou teplotou supravodiče**) náhle prudce klesá k nule. Tomuto jevu dnes říkáme supravodivost, tedy stav látky, kdy tato klade nulový či lépe neměřitelný odpor stejnosměrnému proudu. Onnesem byl později zjištěn také u cínu a olova. Brzy se ukázalo, že se jedná o velmi běžnou vlastnost jak kovů, tak jejich slitin. [2][3]

Za zmínku také stojí známý experiment, který k údivu obecnstva prováděl i samotný Onnes, kdy je do supravodivého prstence přiveden stejnosměrný proud a obíhá v něm bez odporu teoreticky libovolně dlouho. Tímto způsobem bylo zjištěno, že rezistivita supravodiče je menší, než $10^{-25} \Omega \cdot \text{cm}$, což je o 14 řádů méně, než u mědi podchlazené na 20 K.

Pozn.: Jak bylo zdůrazněno, neměřitelný odpor kladou supravodiče pouze stejnosměrnému proudu. Při průchodu střídavého proudu supravodičem dochází k hysteretickým ztrátám. Platí : $\mathbf{R} = \mathbf{f}(\mathbf{f})$. [2]



Obr. 2: Oblast supravodivé fáze je vymezena třemi kritickými parametry.[4]

Přestože se výzkum supravodivosti stále vyvíjel a byly objevovány nové a nové možnosti využití, teoretické vysvětlení tohoto jevu chybělo ještě dlouho po jeho prvním pozorování. Teprve v roce 1957 byla publikována tzv. **BCS teorie** - podle příjmení jejích autorů Johna Bardeena, Leona Coopera a Johna Shrieffera. Roku 1972 proto obdrželi všichni tři nobelovu cenu za fyziku. [3]

Základní myšlenkou této teorie je, že v supravodiči vznikají v důsledku přitažlivé interakce způsobené výměnou fononů (fonon je definován jako kvantum vibrační energie krystalové mřížky) páry elektronů s opačnými spiny. Uvedená elektron-fonon-elektronová interakce je silnější než odpuzivá elektrostatická síla, která panuje mezi souhlasnými náboji. To vede ke vzniku elektronového, tzv. Cooperova páru elektronů. Na supravodivosti se podílí pouze velmi malá část ($\sim 10^4$) z celkového počtu vodivostních elektronů*. Střední vzdálenost elektronů tvořících pár odpovídá tzv. koherentní délce D , která je v rozmezí 10^{-8} - 10^{-6} m. Odtud plyne, že mezi každými dvěma účastníky Cooperova páru leží velké množství vodivostních elektronů, které pár nevytvořily. Vlnové funkce jednotlivých párů se překrývají. Jejich významnou vlastností je, že se mohou pohybovat mřížkou bezztrátově. Proto v uzavřené smyčce supravodiče zachovává jednou urychlená soustava párů elektronů permanentní tok, tzv. persistentní proud při poměru hloubky vniku L a koherentní délky D definovaný parametrem $\beta = L/D$. Velikost β je funkcí teploty, a proto existují materiály, které mohou být v závislosti na teplotě (v různých teplotních intervalech) supravodiči různých typů. [3]

*ostatní jsou Cooperovými páry „zkratovány“.

2.2 Rozdělení supravodičů

Supravodiče obvykle dělíme na nízkoteplotní a vysokoteplotní (podle kritické teploty) a supravodiče I. a II. Typu (podle hodnoty parametru β).

a) Supravodiče I. typu ($\beta < 0,7$)

Jedná se o čisté kovy. Vykazují plný Meissner-Ochsenfeldův jev. Do supravodivého stavu přecházejí skokem.

b) Supravodiče II. Typu ($\beta > 0,7$)

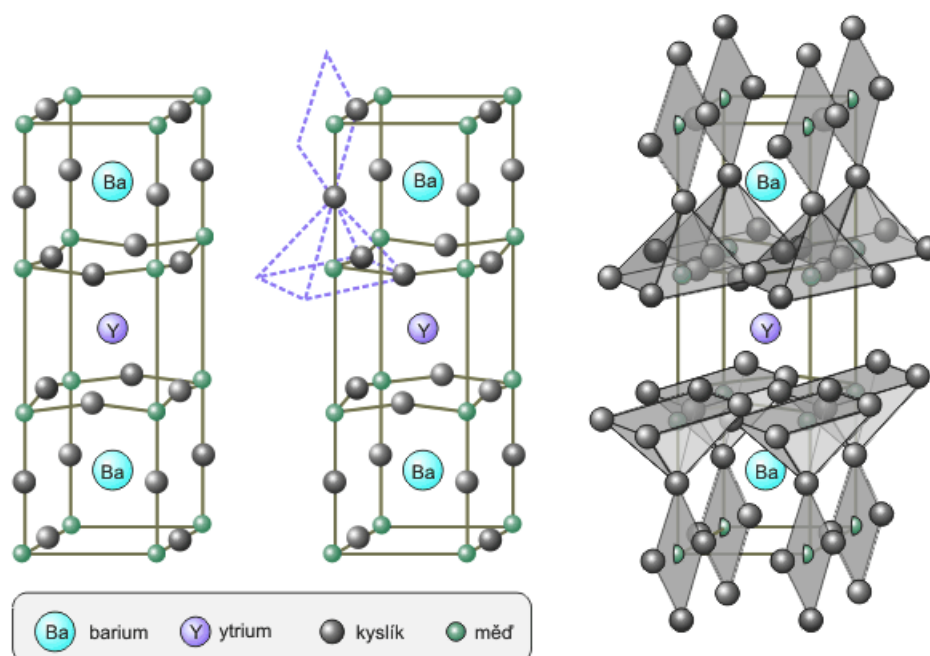
Jedná se o slitiny, případně intermetalické sloučeniny. Pouze výjimečně čisté kovy. Jak vidíme níže, jejich kritické parametry **B** a **J** jsou mnohem vyšší, proto jsou v praktických aplikacích silně upřednostňovány.

Jsou charakterizovány dvěma kritickými hodnotami intenzity vnějšího magnetického pole hodnotou H_{k1} a hodnotou H_{k2} . Při poli s hodnotou intenzity $H < H_{k1}$ magnetické pole do supravodiče nevniká a situace je stejná jako v případě supravodiče I. typu. Při zvyšování intenzity magnetického pole, v oblasti, kdy $H_{k1} < H < H_{k2}$, vniká vnější pole postupně do supravodiče ve formě trubic magnetického toku, tzv. fluxoidů. Uvnitř těchto trubic je materiál v normálním stavu, zatímco vně je materiál supravodivý. Nárůstem intenzity vnějšího pole se podíl nesupravodivé fáze stále zvyšuje, až při hodnotě intenzity H_{k2} supravodivost zanikne. Uvedená závislost je, stejně jako v případě supravodičů prvního typu, zcela reverzibilní. Stav supravodiče v intervalu intenzit H_{k1} a H_{k2} se nazývá smíšeným stavem supravodiče. Hodnoty H_{k1} jsou zpravidla v řádu 10^4 A.m^{-1} , což odpovídá magnetické indukci 1 T. Hodnoty H_{k2} jsou obvykle v řádu 10^7 A.m^{-1} , což odpovídá magnetické indukci řádu 10 T. Z uvedených typů supravodičů jsou prakticky užívány pouze supravodiče 2. typu. [3]

Vysokoteplotní supravodiče

V desetiletích následujících po objevu supravodivosti byly postupně zkoumány další a další materiály vykazující stále lepší vlastnosti. Klíčový parametr - tedy kritická teplota - byl přitom limitován BCS teorií, za horní hranici byla považována teplota 24 K, což potvrzovaly i mnohé experimenty. O to větší bylo překvapení, když roku 1986 pracovníci IBM K. A. Müller a J. G. Bednorz oznámili objev keramického supravodivého materiálu $(\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15})\text{CuO}_4$ s kritickou teplotou 30 K. Nedlouho poté se americkému vědci čínského původu Maw-Kuen Wuovi podařil průlomový objev, když lantan nahradil ytrem a dosáhl u tohoto materiálu kritické teploty přes 90 K (tyto materiály se používají dodnes, nazývají se souhrnně **YBCO** – Ytrium Barium Copper Oxide). Tím byla překonána magická hranice 77 K - bodu varu dusíku. Magická proto, že kapalný dusík jako chladiivo je asi 20x levnější, nežli kapalné helium, které se k chlazení supravodičů do té doby používalo. Supravodivost tak mohla poprvé upustit stěny laboratoří a stala se doslova masovým fenoménem. Od té doby až dodnes pokračuje vývoj materiálů s lepšími a lepšími vlastnostmi. Dodnes nejvyšší dosažená kritická teplota, o kterou se však vedou spory, je 177 K právě u materiálu YBCO. Nejvyšší teplotou všeobecně uznávanou je 138 K. Bylo dosaženo i podstatně vyšších teplot, (více, než 50° C) nicméně supravodivost v těchto materiálech obvykle zaniká již při nepatrných

proudových hustotách či hodnotách magnetické indukce, případně tyto výsledky nebyly potvrzeny a tyto materiály jsou tím pádem pro praktické aplikace nepoužitelné. Zjistilo se také, že ytrium může být nahrazeno téměř jakýmkoli prvkem vzácných zemin nebo skandiem. Souhrnně mluvíme o tzv. **Re-BCO** struktuře. Všechny vysokoteplotní supravodiče jsou samozřejmě supravodiči II. Typu. [1][3]



Obr. 3: YBCO struktura. Vysokoteplotní supravodivé materiály jsou nejčastěji keramické. [5]

Kompletní teorie vysvětlující beze zbytku chování vysokoteplotních supravodičů dodnes chybí, nicméně dnes již víme o mnoho více, než bezprostředně po jejich objevu. Autory současné teorie z roku 2004 jsou Stephen Hayden a John Tranquada. Podle jejich závěrů nezajišťuje vázání elektronů do Cooperových párů elektron-fononová interakce, tak jako u nízkoteplotních supravodičů, ale interakce elektronů s excitacemi spinových antiferomagnetických struktur, hovoříme proto o elektron spinové interakci. Společným rysem všech vysokoteplotních supravodičů jsou výrazné Cu-O roviny. Ionty mědi Cu²⁺ se chovají jako permanentní magnety zatímco v Cu-O rovinách se řadí antiparalelně. Podstatným rozdílem mezi nízkoteplotními a vysokoteplotními supravodiči je, že nízkoteplotní supravodiče jsou i za pokojové teploty vodivé, vysokoteplotní supravodiče vesměs nikoli. [3][5]

Výzkum v této oblasti intenzivně pokračuje a nalezení supravodiče za pokojové teploty je doslova svatým grálem dnešní vědy.

3 Přehled technických řešení v praxi

Od objevu supravodivosti již uplynulo více než sto let a jejich využití je dnes již poměrně široké. Objev vysokoteplotní supravodivosti učinil z využití tohoto jevu masovou záležitostí a supravodiče mohly poprvé opustit stěny laboratoří. Každým rokem se objevují nové a nové aplikace a parametry těch stávajících jsou vylepšovány. Tato kapitola seznamuje s aplikacemi, které jsou v současné době využívány, případně intenzivně zkoumány.

Jak již bylo popsáno výše, pro možnost aplikace supravodivých materiálů jsou do velké míry zásadní jejich kritické parametry, tedy teplota, proudová hustota a intenzita magnetického pole. Přestože bylo již v překonávání těchto parametrů dosaženo nemalých úspěchů, materiály, které takto uspokojivé vlastnosti vykazují, jsou vesměs keramické. Technologické postupy jejich výroby jsou tedy velmi náročné a samotné materiály velmi křehké, což způsobuje nepříjemnosti zejména v aplikacích, kde jsou tyto materiály vystaveny velkému mechanickému namáhání (např. odstředivá síla v točivých strojích či mechanické účinky silných magnetických polí).

3.1 Supravodivé aplikace v energetice

Využití supravodičů v oblasti elektrotechniky, která má za úkol co nejefektivnější výrobu, přenos a využití elektrické energie - tedy v energetice, je skutečně na snadě. Nepochybně proto je energetika oblastí, kde nacházejí supravodiče - jak nízkoteplotní, tak vysokoteplotní - nejširší uplatnění. V této podkapitole stručně popíší ty nejdůležitější aplikace, kterými jsou: kabely a vodiče, omezovače zkratových proudů, dynamické synchronní kompenzátory, akumulátory magnetické energie (SMES), elektromotory, generátory a transformátory.

3.1.1 Supravodivé vodiče a kabely

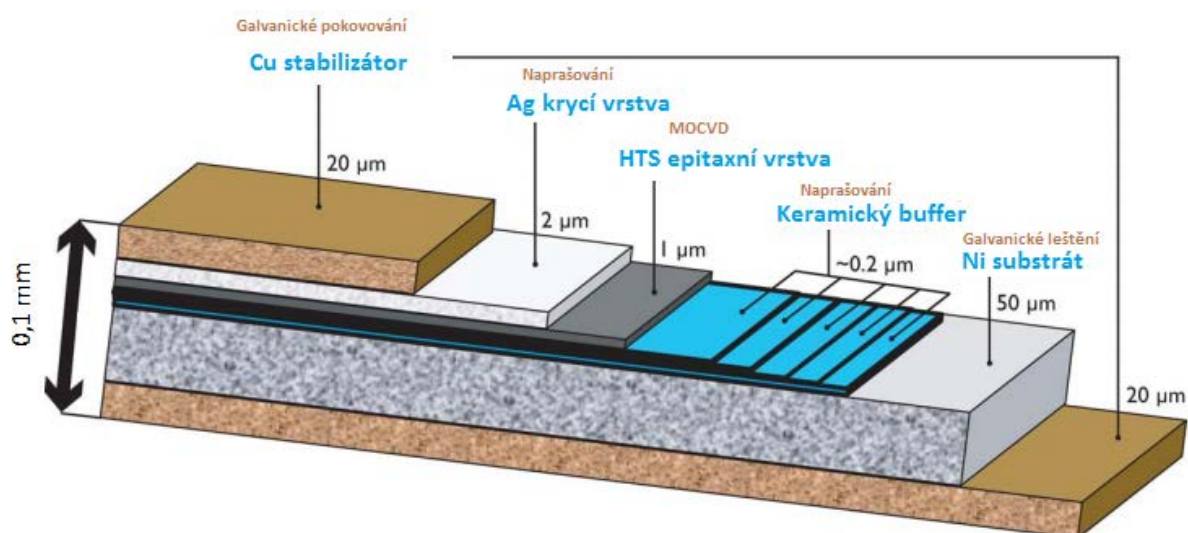
Prakticky současně s objevem supravodivosti se nutně musela objevit lákavá myšlenka realizovat bezztrátový přenos elektrické energie. V rozvodných sítích dosahují ztráty až 30% vyrobené energie a to zejména vlivem vyzařování Joulova tepla do okolí. Další výhodou supravodivých kabelů je fakt, že jsou při stejném průřezu schopny přenést mnohem vyšší výkon a jejich použití se jeví jako zvláště výhodné tam, kde není možné např. z důvodů ochrany životního prostředí použít konvenční vysokonapěťové vedení. Tato skutečnost umožňuje snížení napětí zhruba 4x při takřka nulových ztrátách a zároveň stálém přenášeném výkonu až 1000 MW. Supravodivé kabely také lze vyrábět v koaxiálním provedení, které při vhodné volbě izolace dokonale odstíní vnější i vnitřní magnetické pole. Nevýhodami jsou naopak nutnost chladicího systému, který navíc musí běžet na plný výkon i mimo plné zatížení a také vysoké pořizovací náklady v porovnání s AlFe v případě venkovních vedení nebo XLPE v zemi či v budovách. [7][8][9][10]

Na tomto místě je třeba se zmínit o tzv. vysokoteplotních supravodičích druhé generace (HTS 2G) pro jejich zásadní význam při snaze o dosažení konkurenceschopnosti HTS vodičů a zařízení. Jedná se o koncept konstrukce vodiče, která se vyznačuje jak lepšími přenosovými vlastnostmi (v současnosti okolo 500A/cm² za teploty 77K, dosažitelná hodnota se odhaduje až na 1000A/cm² !), tak také nižší cenou - zejména díky snížení obsahu stříbra na pouhých 3%

oproti 70% v případě HTS 1G; okolo 95% vodiče je tvořeno levným niklem a mědí - a navíc vykazuje lepší mechanické vlastnosti. [23][25][26][27]

Konstrukce takovýchto vodičů se různí, ale obecně se většinou jedná o epitaxně rostoucí YBCO strukturu nanesenou pomocí chemické depozice (CVD) na keramický buffer, tvořený jednoduchým oxidem. Tento buffer je nanesen ve vrstvách na kovový substrát (nikl) a poskytuje šablonu pro růst epitaxní vrstvy YBCO. Na horní stranu supravodiče je pak nanášena tenká krycí stříbrná vrstvička a takovýto celek pak zataven do mědi kvůli dosažení požadovaných mechanických a elektrických vlastností. [25][28]

*Tyto údaje jsou vždy vztaženy k tloušťce supravodivého pásu (V tomto případě 2 μm). Celková proudová zatížitelnost dosahuje u supravodivé vrstvy např. 5 000 000 A/cm². Celek supravodivého pásu pak 25 000 A/cm². [29]



Obr. 4: Průřez jednotlivými vrstvami HTS vodiče druhé generace s upřesněním výrobní technologie. [25]

Dalším stupněm realizace bezztrátového přenosu energie jsou supravodivé kabely. Ty lze rozdělit dle několika hledisek. Zprvce to může být podle použitého typu supravodivosti na vysokoteplotní a nízkoteplotní a zadruhé podle způsobu přenosu elektrické energie na kabely pro střídavé a stejnosměrné vedení. Stejnosměrné vedení se přitom jeví jako výhodnější kvůli absenci hysterezních ztrát a také výhodnější konstrukci. Dnes jsou pro výrobu kabelů testovány a využívány zejména HTS supravodiče I. i II. generace. [10]

a) Nízkoteplotní supravodivé kabely

V současné době se využívá především kovových slitin NbTi a Nb₃Sn. Jedná se o systémy s několika tisíci vlákny o průměru 0,1 – 0,5 μm . Tato vlákna bývají uložena v matici ze slitiny CuNi. Proudová zatížitelnost může dosáhnout až 1000 A a vodič odolá magnetické

indukci až 20 T. Tyto kabely jsou chlazeny na teplotu 4,2 K pomocí kapalného helia, což je také jejich hlavní nevýhodou, neboť chlazení heliem je konstrukčně i energeticky náročné. Velkou výhodou oproti HTS supravodičům je naopak snadná práce s kovovými materiály, z nichž jsou tyto vodiče vyrobeny, což činí technologický proces jejich výroby jednodušším a tedy i levnějším. [10][11]

b) Vysokoteplotní supravodivé kabely

Zde se nejedná o kovové materiály, ale oxidické sloučeniny (např.: YBCO, BSCCO – **Bismuth Stronthium Calcium Copper Oxide**). Odtud pramení jejich hlavní nevýhoda, neboť tyto materiály jsou keramické a manipulace s nimi je tak daleko obtížnější, než je tomu u kovů. Skládají se totiž ze zrn a tedy je nutno je před dalším použitím upravit. Toho se např. u modernějšího YBCO dosahuje nejčastěji spékáním, méně často sprejováním. Při nanášení tenkých vrstev se používají tradiční metody. Pro praktické aplikace - vodivé pásy - se provádí nanášení supravodivého materiálu na měděnou matrici a celek je pokryt ochrannou vrstvou niklu. Kritická teplota YBCO je 94 K, kritická hodnota magnetické indukce 120 T. [10]

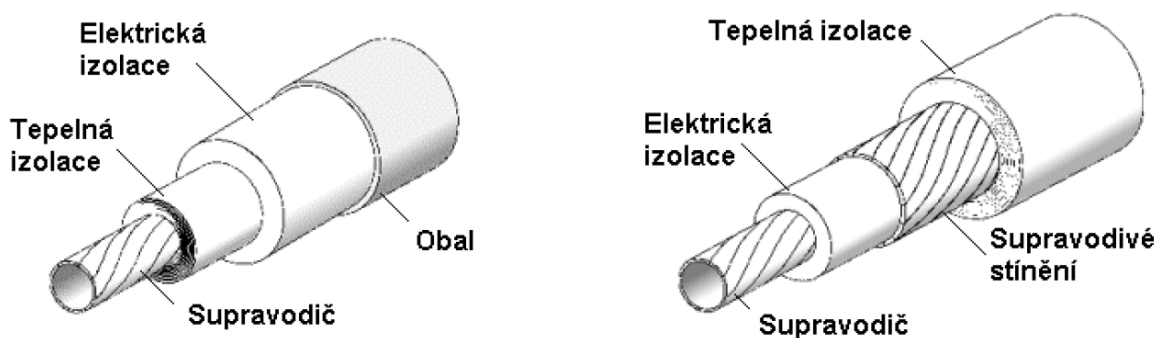
Co se týče samotné konstrukce: *Existují dvě základní koncepce HTS kabelů, tzv. teplé kabely (Warm Dielectric Cable) a studené kabely (Cold Dielectric Cable). Tekutý dusík proudí centrální částí tvořenou pružnou trubkou, u teplého kabelu se zpět k chladiči vrací přes jiný souběžný kabel, u studeného proudí zpět mezi stínící vrstvou a kryostatem.*[10]

V případě teplého kabelu lze použít konvenční dielektrikum (např.: PE), neboť izolace pracuje přibližně při teplotě okolí. Tyto kabely mají při stejných ztrátách až dvojnásobnou kapacitu přenosu. Mohou být jak jednofázové, tak třífázové. Jelikož nemají magnetické stínění, jsou levnější, ale také citlivější na vnější magnetické pole. Nepříjemný je zejména efekt blízkosti, kvůli němuž musí být jednotlivé takové kabely od sebe alespoň 50 cm vzdáleny. Odhaduje se, že maximum přenosové kapacity jedné fáze může dosáhnout 2,5 kA. [6][10]

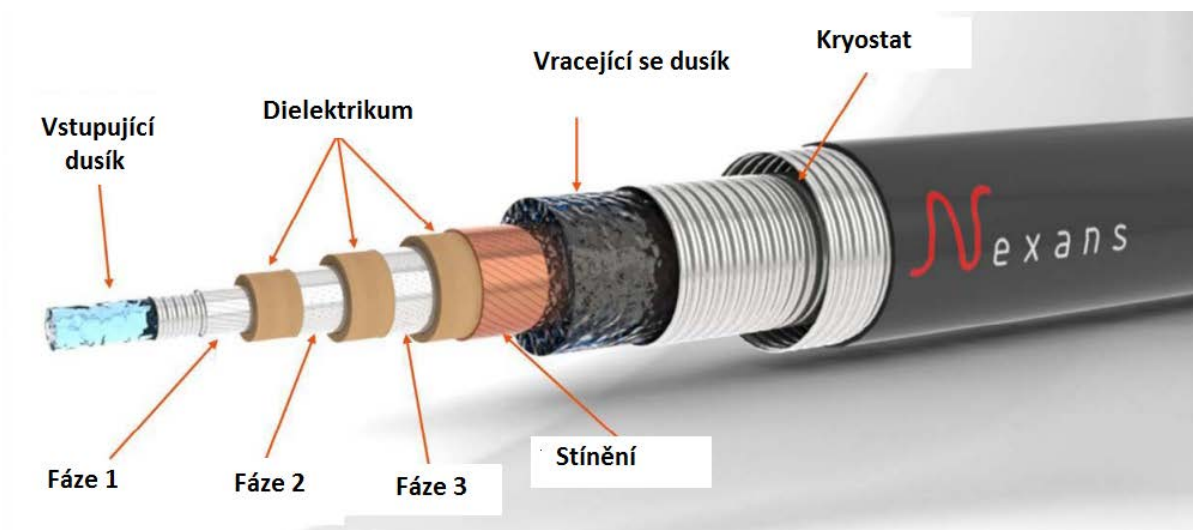
V případě kabelu studeného je dielektrikum umístěno pod tepelnou izolací a pracuje tedy při teplotě vodiče. Chladičí systém tak musí odvést také teplo vzniklé vlivem ztrát v dielektriku. Tento typ kabelu má magnetické stínění realizované běžným vodičem kvůli snížení střídavých ztrát a na první pohled tak připomíná kabel koaxiální. Přenosová kapacita jedné fáze se odhaduje na 8 kA. Ve třífázovém provedení připadají v úvahu dvě varianty chlazení - zvlášť pro každou fázi nebo společně pro celý kabel. Orientačně se tepelné úniky supravodivého kabelu pohybují okolo 1W/m. Cílem mnoha vědeckých pracovišť je pak dosažení hodnoty okolo 0,5 W/m. Uspořádání může být standardní trojžilové nebo i koncentrické. [6][10][24]

kabel	R	L	C
konvenční	1 x R	1 x L	1 x C
HTS teplý	0,05 x R	1 x L	2 x C
HTS studený	0,01 x R	0,5 x L	0,5 až 1 x C

Tab. 2: Srovnání parametrů supravodivých kabelů [10]



Obr. 5: Konstrukce supravodivých kabelů; studený (vpravo) a teplý (vlevo) [10]



Obr. 6: Koncentrický studený HTS kabel společnosti Nexans [21]

Neodmyslitelnou součástí každého supravodivého kabelu je kryogenní jednotka, která zajišťuje cirkulaci kapalného dusíku a jeho chlazení, a tím udržuje vodič v supravodivém stavu. Při větší délce kabelu je někdy zapotřebí dochlazovat dusík i na více místech na vedení každých cca několik kilometrů.

Za zmínku ještě stojí problematický kontakt kov - supravodič v místě, kde supravodivé vedení končí a začíná vedení konvenční. V tomto místě se prudce mění teplota a toto místo musí proto být zvláště odolné proti teplotnímu namáhání. Supravodivé kabely jsou proto vybaveny monitorovacími zařízeními, které sledují mimo jiné i důležité elektrické i neelektrické veličiny v těchto místech vedení. Monitorovací systém má také za úkol hlídat poruchové stavy. Při poruše může proud dosáhnout až desetinásobku jmenovité hodnoty a supravodič by se rázem ocitl v nesupravodivém stavu. Vedení jsou proto opatřena buď tzv. tvarovačem, který je nejčastěji z mědi a má za úkol po přechodnou dobu odvádět teplo a proud, anebo velmi rychlými vypínači. [9][10][12]

Zatím pravděpodobně nejdelším HTS kabelem je kabel od společnosti Nexans realizující v Essenu propojení dvou kilometr vzdálených rozveden. Jde o třífázový, kapalným dusíkem chlazený kabel na napětí 10 kV (studený), který přenese výkon až 40 MW. Dlouhodobě se také uvažuje o nasazení supravodivých vedení na krátké vzdálenosti, kde hraje hlavní roli úspora prostoru. Příkladem může být Tokio, které má vysokou spotřebu elektrické energie na čtvereční kilometr a tedy vysoké tepelné ztráty v městské rozvodné síti. [9][12]

HTS kabely jsou stále předmětem intenzivního výzkumu. Zabývají se jimi prakticky všichni významní výrobci kabelů.

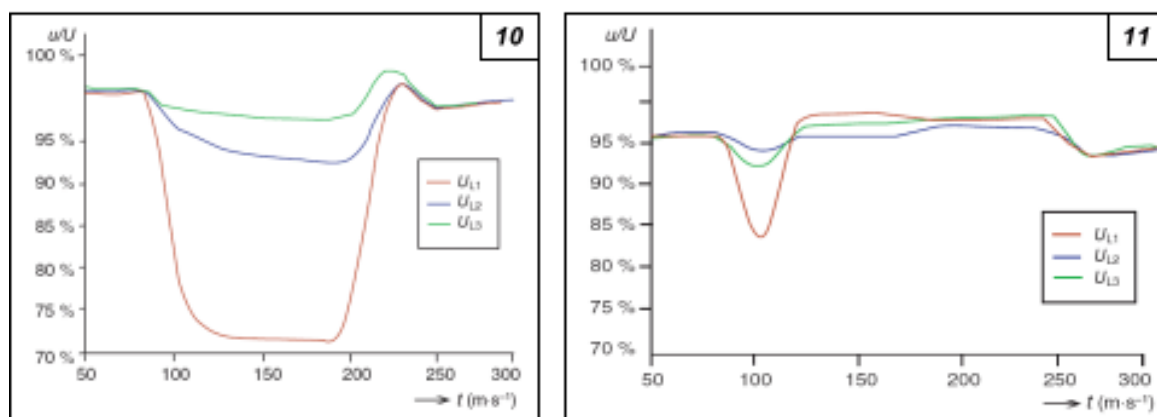
3.1.2 Supravodivé omezovače zkratových proudů (SFCL)

V elektrické rozvodné síti může nastat celá řada situací, které způsobí prudký nárůst proudu. Například úder blesku, zkrat nebo zemní spojení. Takovýto prudký nárůst, pokud by nebyl nijak regulován, by způsobil velké mechanické i tepelné namáhání všech prvků sítě a mohl by vést k požárům, destrukci některých zařízení nebo i způsobit újmu na zdraví člověka. Proto se v síti používají různé bezpečnostní prvky, které mají za úkol účinky těchto proudů eliminovat, ale zároveň pokud možno nezvyšovat nepřiměřeně provozní ztráty. Princip funkce omezovačů zkratových proudů, které máme dnes k dispozici je zpravidla rychlá změna obvodu s malou impedancí na obvod s impedancí vysokou. Tyto přístroje vykazují dobré vlastnosti i při použití konvenčních vodičů, nicméně jsou schopny působit vždy až po několika periodách a navíc nejsou stoprocentně spolehlivé. Distribuční síť je proto projektována tak, aby byla proti zkratu odolná - *Jmenovitý odpor sítě nesmí klesnout pod určitou hodnotu, což zase nedovoluje optimalizaci sítě vzhledem k nutným provozním podmínkám, jako jsou ztráty na vedení, vysoké spády napětí nebo možnost ovlivnění tvaru napěťové vlny.* [15] Pro omezování zkratových proudů, které mohou dosahovat až stonásobku proudu jmenovitého, se tedy v rozvodné síti používají reaktory (tlumivky) a transformátory s vyšší reaktancí, obojí má ale za následek růst ztrát, nákladů na údržbu a také materiál.

SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) se zde jeví jako optimální řešení. Při jeho konstrukci jsou využity vlastnosti pro supravodiče typické, tedy že materiál je supravodivý v oblasti $T < T_c$ nebo $J < J_c$ (případně $B < B_c$) a tedy při dodržení těchto vnějších podmínek je jeho impedance blízka nule a SFCL nijak nezhoršuje parametry sítě. V případě, že některá

z těchto podmínek není splněna (například právě při velkém nárůstu proudu), materiál přestane být supravodivým a jeho impedance prudce vzroste.

Kromě nízké impedance v supravodivém stavu mezi jejich výhody patří také velmi nízký zotavovací čas, dále jsou zcela reverzibilní, nepotřebují již žádné přídavné zařízení pro detekci velikosti proudu, dokáží proud omezovat už v ¼ periody (1. perioda je pro systém nejrizikovější), proud potlačují v časech pod 1 ms a není zapotřebí žádná zvláštní údržba, pouze chlazení. [13][14]



Obr. 7: Srovnání poklesu napětí třífázové sítě během zkratu bez použití SFCL (vlevo) a s ním [13]

Supravodivé omezovače zkratových proudů můžeme rozdělit na následující 2 základní typy, lišící se výrazně způsobem realizace, ačkoli základní princip je stále tentýž. Základním východiskem pro první dva typy je jednoduchá rovnice: $Z = R + jX$, kde Z je celková impedance - její zvýšení je cílem omezovače, R činný odpor (rezistance) - změnu této veličiny využívá ke své funkci rezistivní omezovač, X reaktance - její změnu využívá induktivní omezovač a j imaginární jednotka.

1) Rezistivní supravodivý omezovač (R - typ)

Je zapojen přímo do obvodu zkratového proudu a přímo tak využívá vlastnosti supravodivého materiálu. Teplota materiálu vzroste již při první půlplně proudu a je-li tento vyšší, než dovolený, teplota materiálu vzroste nad T_c a materiál přestane být supravodivým – prudce vzroste rezistivita R . Je však třeba poznamenat, že s takovýmto supravodivým omezovačem musí být zapojen do série také konvenční spínač, který v čase cca. 50 ms obvod rozpojí. To proto, aby se supravodič nezahřál příliš, mohlo by pak dojít k jeho poškození. Zotavovací čas je velmi nízký, supravodič je schopen obnovit své vlastnosti během 0,5 sekundy (doba opětovného vychladnutí). [13][15]







2) Induktivní supravodivý omezovač (L – typ)

Jak již bylo naznačeno, tento omezovač pracuje na principu nárůstu reaktance v důsledku nárůstu proudu. Tento typ je považován za perspektivní pro výkonové aplikace a to zejména

pro svou malou dobu zotavení a jeho automaticčnost. Je možné jej realizovat dvojitým způsobem. Jednak to může být tzv. **varianta s transformátorem**, kdy je do obvodu zapojen transformátor, jehož sekundární vinutí je supravodivé a v jeho obvodu je umístěn konvenční spínač. Při nárůstu proudu vzroste i teplota a supravodivé sekundární vinutí se stane rezistivním. Nevýhodou tohoto uspořádání jsou nenulové ztráty na sekundárním vinutí vlivem střídavého magnetického pole.

Varianta s cívkou a supravodivým stíněním pak využívá podmínky $B < B_c$. Zde je mezi cívkou zapojenou do obvodu a její jádro vložen tzv. supravodivý štít, který magnetické pole vytvořené cívkou zcela odstiňuje. Při vzrůstu proudu vzroste i magnetická indukce B supravodivý štít přejde do normálního stavu, může jím tedy procházet magnetické pole až k jádru cívky a její reaktance tak vzroste.

Vedle zmíněných dvou typů omezovačů existuje ještě konstrukce se saturovatelným jádrem a hybridní typ. Ani jeden z nich zde pro jejich složitost nepopisuji.

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

Tab. 3: Možnosti využití SFCL [9]

3.1.3 Supravodivé akumulátory magnetické energie (SMES)

Efektivní akumulace elektrické energie byla, je a pravděpodobně ještě nějaký čas bude jednou z největších výzev současné vědy. Zatížení elektrické sítě je velmi proměnlivé jak s ročním obdobím, tak s denní dobou. Některé výkyvy jsou předvídatelné, jiné nikoli. V takových případech je nutné výkon dodávaný do sítě regulovat, což je u jeho hlavních zdrojů, pokrývajících základní zatížení, obtížné. Uhelné elektrárny trvá nejméně půl dne, než je schopna pracovat na plný výkon, elektrárny jaderné i více. Obnovitelné zdroje v tomto ohledu nepomohou, protože jejich výkon je většinou nestálý a závislý na těžko předvídatelných

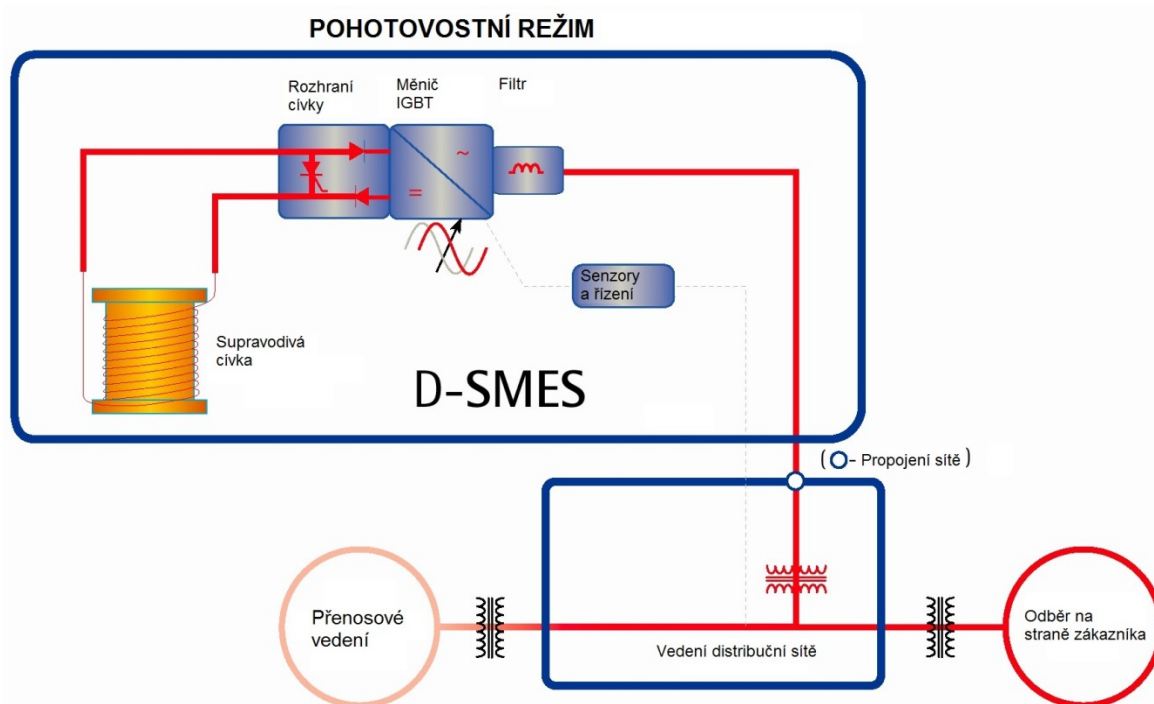
okolnostech. Proto bylo vždy třeba vymyslet způsob, jak energii vyrobenou v době, kdy jí je přebytek, uchovat na dobu nedostatku. Zvláště u aplikací jako jsou IT nebo medicína je doslova životní nutností najít způsob, jak případný výpadek konvenční sítě okamžitě a pokud možno efektivně nahradit. Možnost efektivně akumulovat elektrickou energii by také velmi pomohla obnovitelným zdrojům kompenzovat jejich nestálost, bylo by možné skladovat přebytečnou energii v době nízkého odběru, aby se pak ve špičce vrátila do sítě nebo by i pomohla odvrátit black-out.

Známe několik způsobů, jak elektrickou energii uchovávat. Nejznámější variantou jsou pravděpodobně elektrochemické články a akumulátory. Taková energie je ovšem velmi drahá a často také neekologická, nicméně i v této oblasti probíhá intenzivní výzkum. Další známou alternativou je přeměna kinetické energie na potenciální a zpět, tedy konkrétně například přečerpávací a akumulační elektrárny nebo zásobníky stlačeného plynu. Také byly prováděny pokusy s uskladněním energie v pružinách. V současné době intenzivně zkoumané možnosti jsou například tzv. supersetrvačníky, schopné krátkodobě uchovat kinetickou energii, dále vodík, který je možné v době přebytku energie vyrábět z vody společně s kyslíkem pomocí elektrolýzy a následně je využít v palivových článcích. Toto je velmi perspektivní varianta pro obnovitelné zdroje. Průtokové baterie, které byly vynalezeny již před více než třiceti lety, jsou něco mezi klasickým akumulátorem a palivovým článkem. Energie je zde ukládána do elektrolytů. Celé zařízení dokáže pracovat s účinností až 90% a dodávat až 1MWh po dobu 24h, při vlastní velikosti zhruba lodního kontejneru. Jako velmi zajímavá možnost se jeví gallium-arsenidové magnety nanosené coby tenká vrstva o tloušťce cca. 50nm na zinkovou podložku. Zde poprvé v historii energetiky dochází k přeměně magnetické energie na elektrickou a to při vybíjení této baterie. Tato technologie využívá kvantový tunelový jev. Za zmínku stojí také tzv. superkapacitory využívané již dnes v hybridních automobilech a elektromobilech. Ty pro změnu ke své funkci využívají energii elektrického pole kondenzátoru podle známého vztahu $W = \frac{1}{2}CU^2$ kde W je akumulovaná energie, C kapacita kondenzátoru a U přiložené napětí. Základem jsou elektrody s obrovskou plošnou hustotou a tím pádem kapacitou až tisíce faradů. Výhodou superkapacitorů je jejich vysoká účinnost (až 95%). [17]

V neposlední řadě je možné skladovat energii v podobě magnetického pole pomocí supravodičů – **Superconducting magnetic energy storage (SMES)**, o nichž pojednává tato kapitola.

O konstrukci jakéhosi předchůdce tohoto zařízení se pokoušel již H. Kamerlingh-Onnes. Jedná se o systém schopný skladovat energii v magnetickém poli vzniklém vlivem průtoku stejnosměrného proudu supravodivou cívkou, která je pomocí kryogenní jednotky chlazená na teplotu nižší, než je kritická teplota jejího vinutí. Typicky sestává SMES ze tří částí: supravodivé cívky, stabilizátoru napětí, řídicí jednotky a chladicího systému. Jakmile se cívka jednou nabije, vytvoří kolem sebe magnetické pole a energie v ní může být uchována napořád a v případě potřeby je možné ji téměř okamžitě vrátit do sítě. Stabilizátor napětí používá ke své funkci usměrňovač a střídač, ty způsobují ztráty asi 2-3% v každém směru, i tak je ale SMES nejefektivnějším způsobem uskladňování energie. Jeho účinnost je větší, než 95%. Pro

energii uloženou v cívce platí známý vztah : $W = \frac{1}{2}LI^2$, kde W je uložená energie, L indukčnost cívky a I proud protékající vinutím cívky. Energie, kterou lze do cívky vložit je tedy dána materiálem vinutí (maximální proud) a počtem závitů cívky (indukčnost). [16]



Obr. 8: Možné zapojení SMES v elektrické síti [4][18]

První supravodivá zařízení schopná skladovat magnetickou energii byla zkoumána ve Spojených státech amerických již v 70. letech minulého století. **UPS**, jak se tyto malé akumulátory nazývají (Uninterruptible Power Supplies), jsou schopny absorbovat pouze malá množství energie a slouží pro regulační účely, nikoli pro souvislou dodávku energie. Jsou již dostupné na trhu a nacházejí uplatnění zejména v provozech, kde může mít výpadek, byť velmi krátkodobý, fatální následky a to pro jejich schopnost dodávat téměř okamžitě jalový i činný výkon. Jedná se zpravidla o supravodivou cívku ponořenou do kapalného helia (vinutí je tvořeno nízkoteplotními supravodiči). Možnost použití vysokoteplotních supravodičů v těchto zařízeních je intenzivně zkoumána. I přes nesrovnatelně nižší náklady na jejich chlazení se ale jejich nasazení zatím nejeví jako efektivní pro jejich velmi problematické mechanické vlastnosti a tedy i vysoké výrobní náklady. Zajímavé se ale jeví supravodivá ložiska použitá mimo jiné i v setrvačnicích, které by mohly využívat právě vysokoteplotních supravodičů. [16]

Pro potřeby energetiky mají význam zařízení schopná uskladnit nejméně 1 MWh energie. První takové v zařízení bylo v USA budováno v roce 1983. Zařízení má toroidní (prstencový) tvar. Klasická solenoidní konstrukce se nepoužívá proto, že se zvětšující se uskladněnou energii rostou i síly působící na zařízení a toto je tak mechanicky více namáháno. Toroidní konstrukce je mechanicky odolnější a navíc je tak odstíněno vnější magnetické pole, takže

zařízení může být umístěno blíže systému, pro který je určeno. Je třeba poznamenat, že zařízení této konstrukce schopná dodávat komerčně užitečný výkon by musela být skutečně obrovská, uvažuje se o gigantických podzemních smyčkách (například ve velkých elektrárnách) dlouhých stovky kilometrů. U většiny způsobů akumulace energie dochází k její přeměně na jinou formu, zde se pouze mění ze střídavého proudu na stejnosměrný. Nejdůležitější výhodou je fakt, že doba mezi nabíjením a vybíjením je velmi krátká - napájení je možné téměř okamžitě (zlomky ms) a energii lze dodávat po dlouhou dobu. Další výhodou spočívá v již zmiňované vysoké efektivitě. Hlavní komponenty SMES jsou navíc nehybné, tudíž je celý systém vysoce spolehlivý. Nevýhodami jsou již zmiňované problematické mechanické vlastnosti a cena HTS supravodičů, nutnost chlazení, velké rozměry. Pokud nedojde k průlomům ve výzkumu vysokoteplotních supravodičů, SMES se z těchto důvodů pravděpodobně nestanou masovou záležitostí. [16][18]

3.1.4 Dynamické synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátor je přebuzený synchronní motor pracující naprázdno, který dodává pouze jalový výkon. Rozbíhá se většinou asynchronně, případně pomocným motorem. Slouží ke zlepšení účinnosti v místě velkého odběru jalového výkonu, k regulaci napětí v sítích a ke zvýšení stability přenosu. Jím dodávaný jalový výkon je nezbytný pro chod transformátorů a asynchronních motorů jako jeho hlavních spotřebitelů. Synchronní kompenzátory od těchto jalových výkonů odlehčují alternátory a přenosová vedení mezi elektrárnami a místem připojení kompenzátorů. Snižují se tak ztráty v sítích a alternátory v elektrárnách mohou být lépe využity. [19]

V současné době jsou více využívány statické kompenzátory jako STATCOM (Static compensator) nebo SVC (Static Var Compensator) pro snadnou údržbu a rychlou odezvu. Do dynamických synchronních kompenzátorů (DSC) jsou pak vkládány naděje, že tento trend změní. Jedná se o vylepšenou verzi dynamického kompenzátoru, využívající supravodivé budící vinutí. Mezi jeho výhody patří fakt, že negeneruje žádné vyšší harmonické, také jeho ztráty jsou oproti běžnému kompenzátoru nízké a jeho velikost asi poloviční. [16]

V případě supravodivé verze tohoto typu stroje je budící vinutí tvořeno HTS vodiči, umožňujícími vyšší míru sycení, které jsou kryogenní jednotkou chlazeny na 35-40 K. Chladicí jednotky jsou umístěny v pevném rámu a jako chladicí médium je použito plynné helium nebo kapalný neon. Statorové vinutí je tvořeno obyčejnými měděnými vodiči. Jako i u jiných supravodivých aplikací, i zde je velkou výhodou vysoká účinnost a funkční pružnost, a to i při nízkém zatížení. Nevýhodou zůstává nutnost chlazení.

Použití vysokoteplotních supravodičů je obecně značný technologický oříšek, neboť křehké supravodivé materiály musejí při rotaci odolat velkým silám. Zpravidla se používají vláknové keramické supravodiče o tloušťce několika mikronů. Vlákna jsou uložena ve stříbrné matici a chladiivo je přiváděno dutou hřídelí [16]

S tímto tématem úzce souvisí také možnost uplatnění supravodičů při výrobě elektrické energie, tedy v synchronních generátorech. Tyto stroje pracují nejčastěji jako trojfázové a nazývají se alternátory. Dokonce lze říci, že turboalternátory se supravodivým budícím

vinutím jsou v současné době nejrozšířenějšími stroji využívajícími supravodivost. Dosahují výkonů více než 1000 MW. [9][19]

Protože jsou vysokoteplotní supravodiče při stejném průřezu vodičů schopny přenášet až stokrát vyšší proudové hustoty, než obyčejné měděné, lze značně zmenšit rozměry celého zařízení (až o polovinu). Navíc není třeba železné jádro. V roce 2006 firma *Siemens* například úspěšně otestovala synchronní generátor o výkonu 4 MW a otáčkách $3\,600\text{ min}^{-1}$ určený především pro velká plavidla, kde je úspora prostoru a hmotnosti velmi žádoucí. Pozdější úpravy umožnily provoz s běžnými měniči frekvence. V roce 2011 začala stejná společnost ve spolupráci s Karlsruhe institute of technology pracovat na generátoru o výkonu až 900 MW pro běžné využití v elektrárnách, od kterého si slibuje zvýšení efektivity až o 0,5%. Pokud by se tento cíl podařilo splnit a supravodivé generátory by se staly běžnou součástí alespoň některých typů elektráren, vedlo by to ke značným úsporám paliva a snížení negativních dopadů provozů elektráren na životní prostředí. [20]



Obr. 9: Supravodivý generátor firmy *Siemens* o výkonu 4 MW [15]

3.1.5 Supravodivé elektromotory

Analogicky ke generátorům lze najít uplatnění HTS i v další kategorii supravodivých točivých strojů a tou jsou elektromotory. První takovéto stroje vznikaly v USA pro speciální účely již v sedmdesátých letech minulého století. I přes velkou technologickou náročnost jsou jejich výhody nesporné. Stejně, jako u supravodivých generátorů jde o vysokou efektivitu, stálý a tichý chod, malé rozměry a hmotnost, což jsou velké konkurenční výhody především v dopravě. Kromě firmy *Siemens* se jejich vývojem zabývají společnosti *American superconductor*, *Automation rockwell* nebo *Reliance electric*. [9]

3.1.6 Supravodivé transformátory

Zde se dostáváme k hlavnímu bodu této práce, kterým jsou supravodivé transformátory. Následující kapitola tedy bude obsáhlejší způsobem tomu odpovídajícím.

Transformátor je střídavý elektrický netočivý stroj schopný měnit hodnoty elektrických veličin (zejména napětí a proudu). Rozhodující význam mají tyto stroje především v elektrické síti, při přenosu a rozvodu elektrické energie, kde slouží k zvyšování napětí a snižování proudu kvůli omezení ztrát ve vedení podle vztahu:

$$P = RI^2$$

Kde **P** zde značí ztráty způsobené průchodem proudu **I** při činném odporu **R**. Přestože se tato práce zabývá především transformátory pro aplikace v energetice, tedy velkých výkonů, jmenovité výkony transformátorů se obecně pohybují od zlomků VA (elektronika, speciální aplikace...) až po stovky MVA. Hodnoty pracovních napětí se pohybují od zlomků V po stovky kV. Limitujícím faktorem pro velikost nejvýkonnějších transformátorů v energetice (blokové transformátory v elektrárnách) je možnost dopravy těchto zařízení po železnici. Důležitými částmi transformátoru jsou :

- a) Magnetický obvod - slouží k uzavření hlavního magnetického toku, v případě konvenčních transformátorů bývá složen z plechů pro elektrotechniku kvůli omezení ztrát vířivými proudy. Tyto plechy jsou válcovány za studena – tedy anizotropní kvůli omezení hysterézních ztrát. Ze stejného důvodu bývají plechy legovány křemíkem. Používá se buďto jádrová konstrukce, kde vinutí jsou umístěna rovnoměrně na jednotlivá jádra nebo konstrukce plášťová s vinutími na vnitřním jádře.
- b) Vinutí - každá fáze má dvě či více vinutí, která jsou vzájemně magneticky vázána. Mohou být řešena jako koncentrická nebo desková.
- c) Nádoba - u transformátorů vyšších výkonů, které jsou pak ponořeny v oleji a uzavřeny v této nádobě. Pro nejvyšší výkony se používá nucený oběh oleje.

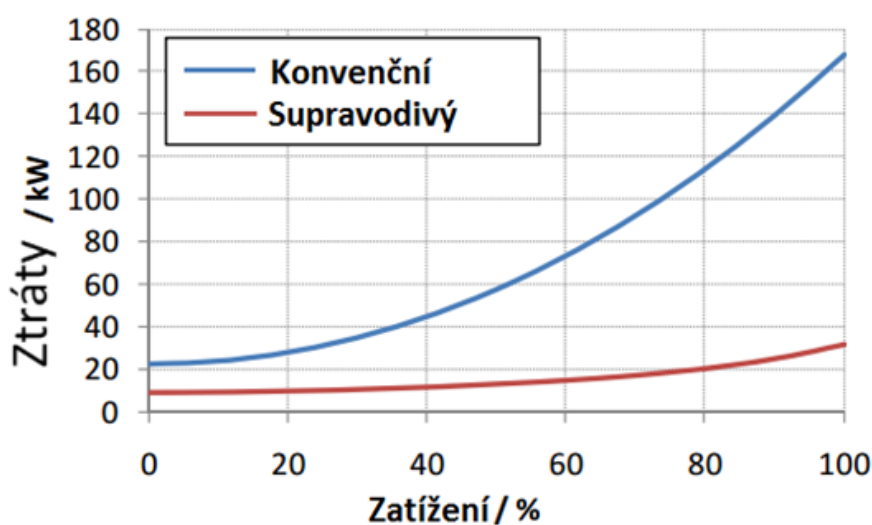
Transformátor pracuje na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce :

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N * \frac{d\Phi}{dt}$$

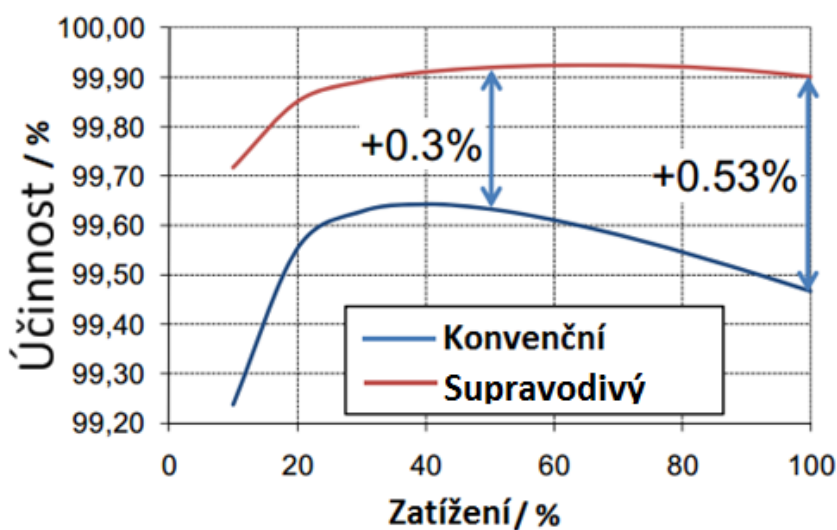
Kde u_i je napětí indukované v sekundárním vinutí vlivem spřaženého magnetického toku Ψ , vyvolaným časovou změnou proudu v primárním vinutí. **N** je počet závitů, Φ pak magnetický indukční tok. [19]

Je třeba si uvědomit, že zásadní přednost většiny zařízení, o kterých bylo pojednáno v minulých kapitolách, tedy prakticky nulový elektrický odpor vodičů, zde již neplatí, neboť jak známo, vinutí transformátoru je protékáno střídavým proudem. Ten vybudí v okolí vodiče magnetické pole a jak bylo již uvedeno, všechny supravodivé materiály vytlačují magnetické pole ze svého objemu, tedy supravodivost je možná pouze v oblasti nulové magnetické indukce. Supravodič se vniknutím magnetického pole brání a tím vznikají v jeho objemu hysterézni ztráty. Nutno podotknout, že tyto ztráty jsou obecně mnohem menší, než je tomu u měděných vodičů (celkové ztráty jsou o 25-50% nižší, než v případě konvenčních transformátorů). Supravodivé transformátory mají také menší hmotnost (40-60%), nejsou

hlučné a nezatežují životní prostředí, neboť neobsahují v tomto ohledu problematický transformátorový olej. S tím souvisí i riziko vzniku požáru, které je na rozdíl od konvenčního transformátoru prakticky nulové. Důležité je, že tyto stroje lze přetížít až na dvojnásobek jmenovitého výkonu, neboť omezení spočívá pouze v kapacitě chladicího systému. Další výhodou je snazší regulovatelnost napětí a možnost pracovat při poruchovém proudu až dvacetinásobněm, než je proud jmenovitý a podle konstrukce případně také takové proudy omezovat. Zmíněné přednosti činí supravodivé transformátory zvláště vhodnými pro použití v budovách, v oblastech s velkými výkyvy spotřeby a jejím nesnadným odhadem nebo v trakci. V elektrizační soustavě by nasazení supravodivých transformátorů vedlo ke snížení nákladů na její provoz (nižší jalový příkon, tudíž možnost vyššího využití generátorů pro výrobu činné energie a nižší úbytky napětí v síti, omezení zkratových proudů, tudíž náhrada vypínačů odpínači, odstranění reaktorů apod.). [21]



Obr. 10: Graf pro porovnání ztrát v závislosti na zatížení transformátorů 31,5 MVA [21]



Obr. 11: Graf pro porovnání účinnosti transformátorů 31,5 MVA v závislosti na zatížení [21]

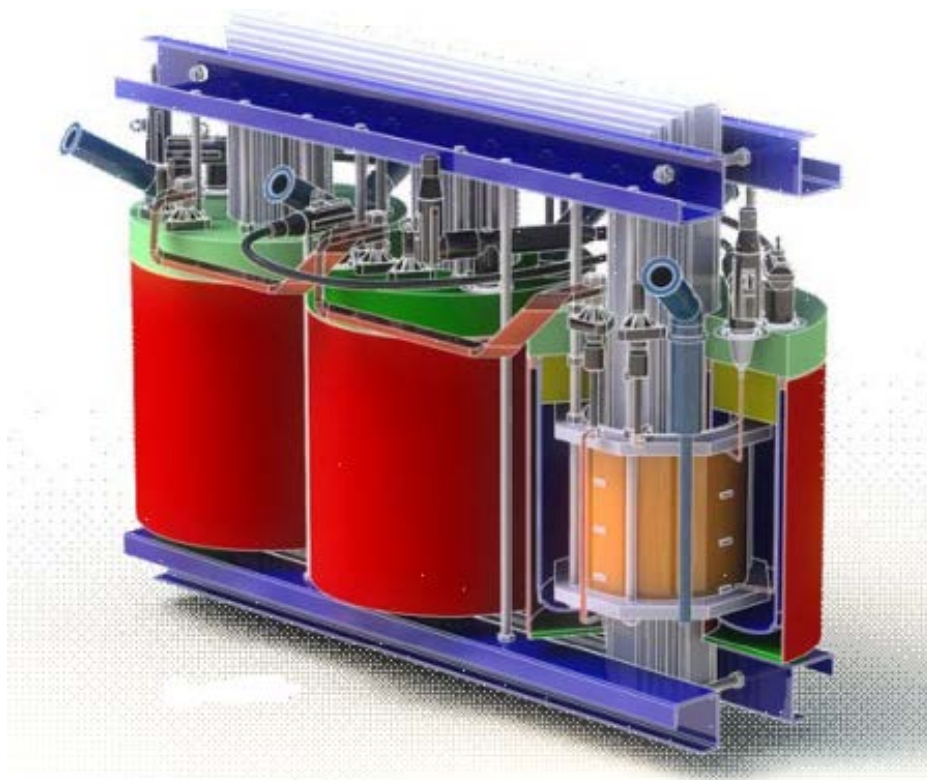
První supravodivé transformátory byly vyráběny v 80. letech minulého století. V té době došlo k vzniku řady prototypů, většinou o výkonech řádově jednotek až desítek kVA. Později začaly vznikat i transformátory vyšších výkonů (např.: třífázový transformátor společnosti *Kansai Electric Power Company* o výkonu 2 MVA). Tehdy vyšlo najevo, že ačkoli je technicky možné postavit supravodivý transformátor s použitím nízkoteplotních supravodičů, je takové zařízení zcela nekonkurenceschopné, neboť chladicí systém je drahý (chladicím médiem je helium), příliš objemný a navíc nespolehlivý. Zcela jiná situace ovšem nastala s příchodem vysokoteplotních supravodičů, kde jsou náklady na chlazení výrazně nižší a které vykazují vyšší odolnost působení magnetického pole a nižší hysterezní ztráty. [10]

Země	Společnost	Aplikace	Parametry	Počet fází	Rok dokončení	Materiál vinutí
Švýcarsko	ABB	Přenos	630 kVA/18,42 kV/420 V	3	1996	Bi 2223
Japonsko	Fuji electric	Demonstrace	500 kVA/6,6 kV/3,3 kV	1	1998	Bi 2223
Německo	Siemens	Demonstrace	100 kVA/5,5 kV/1,1 kV	1	1999	Bi 2223
USA	Waukesha	Demonstrace	1 MVA/13,8 kV/6,9 kV	1		Bi 2223
USA	Waukesha	Demonstrace	5 MVA/24,9 kV/4,2 kV	3		Bi 2223
Japonsko	Fuji electric	Demonstrace	1 MVA/22 kV/6,9 kV	1	2001	Bi 2223
Německo	Siemens	Trakce	1 MVA/25 kV/1,4 kV	1	2001	Bi 2223
EU	CNRS	Demonstrace	41 kVA/2050 V/410 V	1	2003	YBCO, Bi 2223
Jižní Korea	Soul university	Demonstrace	1 MVA/22,9 kV/6,6 kV	1	2004	Bi 2223
Japonsko	Nagoya university	Demonstrace	2 MVA/22 kV/6,6 kV	1	2009	YBCO, Bi 2223
Německo	KIT	Demonstrace	1 MVA, 20 kV	1	2015*	YBCO, Cu
USA	Waukesha	Prototyp	28 MVA/69 kV	3	2013	YBCO
Japonsko	Kyushu	Demonstrace	400 kVA	1	2010	YBCO
Austrálie	Callaghan inovat.	Demonstrace	1 MVA	3	2013	YBCO

*odhad

Tab. 4: Některé dosavadní projekty HTS transformátorů [21]

Jak je patrné z tabulky výše, supravodivé HTS transformátory jsou předmětem intenzivního zájmu vědeckých pracovišť po celém světě, tradičně zejména v Japonsku, Německu, USA, poslední dobou také v Koreji a v Austrálii. Vývoj supravodivých transformátorů je tedy převážně záležitostí největších průmyslových velmocí.



Obr. 12: Supravodivý transformátor společnosti Callagan Inovation o výkonu 100 MW [21]

Konstrukce a technologie supravodivých transformátorů a jejich perspektivy

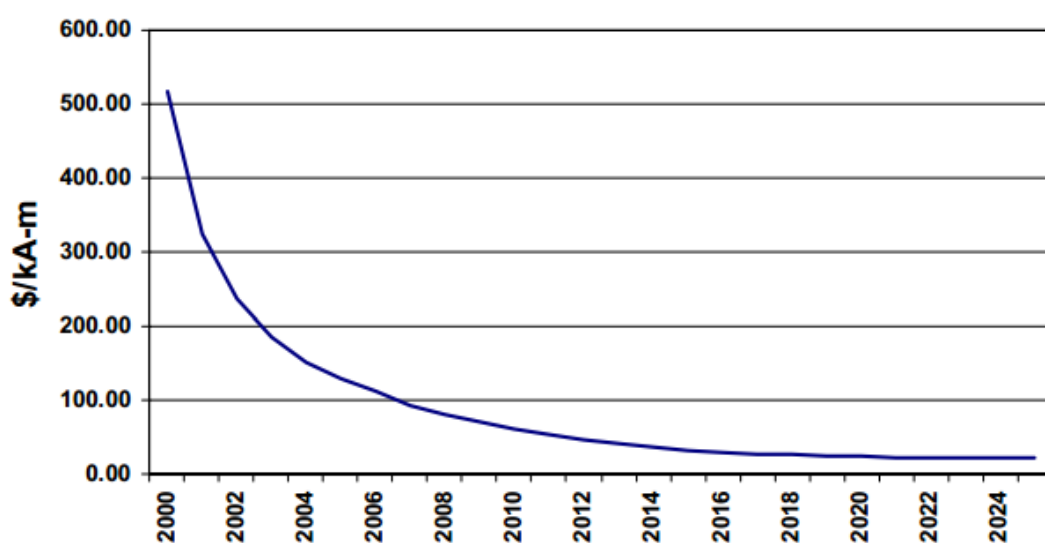
Přestože supravodivý transformátor pracuje na stejném principu jako transformátor konvenční, vlastnosti supravodivých materiálů s sebou přinášejí jistá specifika konstrukce, což má dopad i na ekonomické parametry transformátorů. V této kapitole se také zaměřím na trh a vývoj dvou nejproblematictějších položek supravodivých zařízení, tedy vodičů a kryogenních jednotek. Stejně jako na jakémkoli jiném svobodném trhu, i na trhu se supravodiči totiž platí zákon nabídky a poptávky. Cena supravodičů je tedy silně závislá na poptávce a ta je zase zpětně ovlivněna cenou. Přitom hlavní položkou v ceně supravodivých zařízení je obvykle supravodivé vinutí. Nezanedbatelná je také cena a parametry chladicího příslušenství. Je tedy jasné, že v závislosti na úspěších dosažených na cestě za zlevňováním a zlepšováním těchto dvou komponent každého supravodivého zařízení bude růst jeho konkurenceschopnost na světovém trhu.

1) Vinutí

Standartně se používají jednak vodiče 1. generace, tedy BSCCO a vodiče 2. generace, tedy YBCO, přičemž druhý jmenovaný typ vodičů postupně převažuje pro své lepší vlastnosti a klesající cenu. Vodiče nemusí být vždy navinuté do cívky, například v Koreji bylo použito tzv. CDW vinutí (Continual Disk Winding), které vykazuje lepší izolaci a je odolnější vůči

mechanickému poškození. Konstrukce supravodivých vinutí, ať už se jedná o BSCCO či YBCO, je technologicky náročná pro jejich křehkost a nesnadnou manipulaci. [10][22]

Při hodnocení ceny supravodičů je rozhodující ukazatel „cena/výkon“, v tomto případě udávaný v $\$/\text{kA}\cdot\text{m}$. Tedy cenu za vodič o délce 1 metr a kapacitě přenosu 1 kA. Jak vidíme, výsledná hodnota závisí na dvou parametrech. Jednak je to přenosová kapacita supravodivého vodiče daného průřezu (viz. výše) a pak samozřejmě náklady na výrobu HTS vodiče. Odhaduje se, že k tomu, aby byly supravodiče schopny konkurovat mědi, musí tento ukazatel dosáhnout hodnoty 10-50 $\$/\text{kA}\cdot\text{m}$. Nemusí být přitom nezbytně nutné, aby byly HTS vodiče levnější, neboť mají zpravidla výrazně lepší vlastnosti. Jednotlivé studie se v odhadech různí, ale zatím se zdá, že hodnota okolo 20 $\$/\text{kA}\cdot\text{m}$ je v nejbližších několika letech reálná. Je tomu tak zejména zásluhou HTS vodičů 2G. (viz výše). [23]



Obr. 13: Vývoj cen HTS vodičů. Ačkoli odhad pochází z roku 2001, zatím se zdá být poměrně blízký realitě [23]

Všechny dostupné studie se také shodují na tom, že cena HTS vodičů bude dále klesat. To je dáno jednak zaváděním nových výrobních postupů a také již zmiňovanou zvyšující se poptávkou. Stejně tak se v dohledné době očekává další nárůst přenosové schopnosti HTS vodičů. V současné době nejlepším výrobním postupem se zdá být tzv. RCE-CDR technologie (**R**eactive **C**o-**E**vaporation and **C**yclic **D**eposition **R**eaction), která umožnila snížit počet kroků a spotřebu materiálu při výrobě, zvětšit oblast růstu epitaxní vrstvy a přitom má nižší výrobní náklady. [27]

2) Jádro

Ve snaze dále snižovat ztráty HTS transformátorů jsou intenzivně zkoumány také různé alternativní možnosti konstrukce magnetického obvodu. Při jeho řešení totiž vyvstává problém: Pokud by byl celý magnetický obvod umístěn v kryostatu, musel by tento odvádět i teplo způsobené ztrátami v železe, což by neúměrně zvýšilo energetickou náročnost celého

stroje. Nabízí se zde v zásadě dvojí řešení: Buď lze vyrobit magnetický obvod prstencového tvaru a umístit jej mimo kryostat anebo lze vyrobit transformátor bez jádra. Obecně se soudí, že zatímco první způsob je technologicky poměrně schůdný, ten druhý je spojen s řadou problémů. V Číně bylo například pro HTS transformátor vyvinuto první jádro z amorfních slitin, zatímco vědci v Koreji se vydali cestou společného jádra, stejného jako doposud, kdy odpadá nutnost výstavby nových rozveden v případě nasazení těchto zařízení. Ve Španělsku byla zase studována možnost vzduchového jádra. Jak vidíme, možností je mnoho a zatím není jasné, která z nich se ukáže jako nejvýhodnější. [22]

3) Kryostat

Obvykle je vyroben z vlákniny vyztuženého plastu (FRP) a vyrábí se ve tvaru toroidu. K izolaci používá obvykle vakuum a superizolační vrstvy. Může působit také jako elektrická izolace mezi jádrem a vinutím. [21][22]

4) Kryogenní jednotka

Jak známo, nad teplotu 77K je možné chladit zařízení tekutým dusíkem. To je ve srovnání s nízkoteplotními supravodiči velmi příjemné, neboť chladicí zařízení je tím pádem jednodušší, spolehlivější a celý proces také mnohonásobně levnější. Supravodiče v transformátorech jsou nicméně obvykle chlazeny na nižší teplotu, okolo 65 K. Děje se tak kvůli zvýšení kritického proudu, který je za takového podchlazení až 1,5 násobný. Výhodou také je, že takto podchlazený kapalným dusíkem má lepší izolační elektrické vlastnosti, nicméně pro chladicí systém je toto snížení teploty samozřejmě náročnější. Neodmyslitelnou součástí chladiče je i monitorovací systém. [10][22]

Jak již bylo řečeno, parametry a cena kryogenní jednotky je pro konkurenceschopnost jakéhokoli zařízení využívajícího ke své funkci supravodivost naprosto zásadní. Zatím totiž nedošlo k objevu materiálu, který by vykazoval supravodivé chování při pokojové teplotě a není pravděpodobné, že by se to v dohledné době podařilo. Pro posouzení konkurenceschopnosti chladicího zařízení jsou rozhodující zejména tyto dva parametry:

- a) **Poměr cena výkon** udávaný nejčastěji v \$/W. Za požadovanou a reálně dosažitelnou hodnotu je považováno 25 \$/W při chlazení na 65-80 K (v současnosti se cena pohybuje asi na 80-100 \$/W). Zdá se, že jediná cesta, jak toho dosáhnout je rozšířit a zautomatizovat výrobu, neboť zásadní průlom v technologii a konstrukci jednotlivých komponent je nepravděpodobný. [31]
- b) **COP** (Coefficient Of Performance) vyjadřuje efektivitu podle vztahu:

$$COP = \frac{P_{výstupní}}{P_{vstupní}} [-]$$

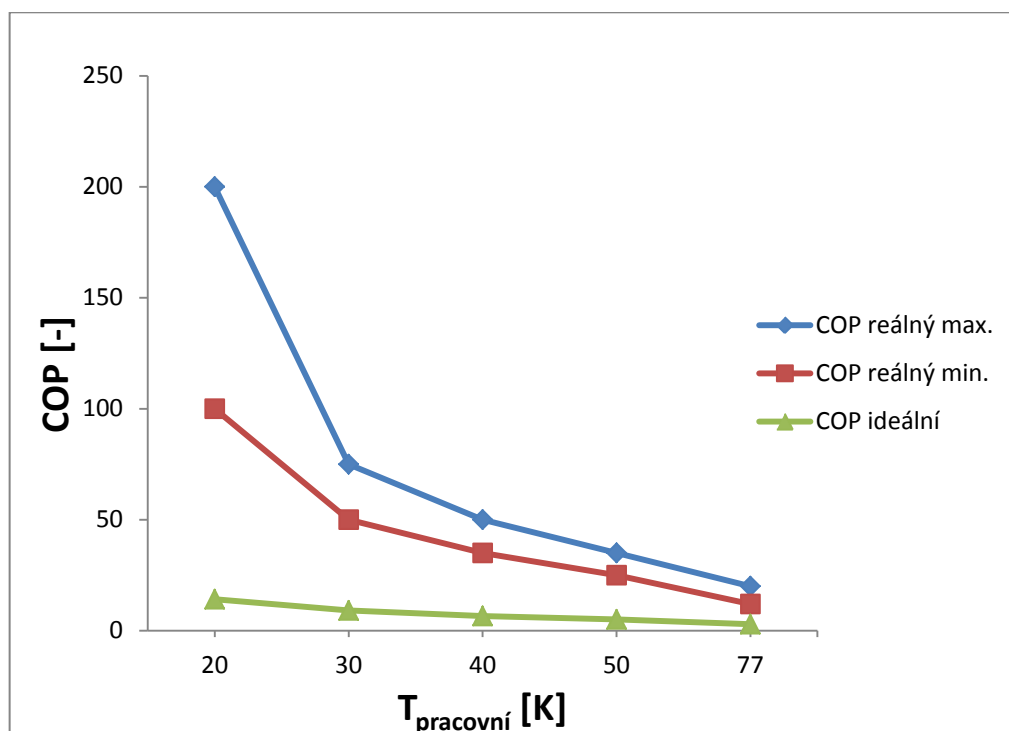
Kde pod $P_{výstupní}$ chápeme čistou kapacitu chladiče. Často se v literatuře setkáme s přístupem, kdy je tato hodnota umocněna na -1, neboť výsledek je pak vyšší než jedna a tedy názornější. Čistě technicky by toto číslo mělo být nazýváno spíše COP faktorem, pro jednoduchost se tak ale často neděje a proto i já v této práci budu považovat za COP hodnotu

vzorke výše v převrácené hodnotě. Ideálem je dosažení hodnoty okolo 3, reálná zařízení v současnosti dosahují 12-20. [30][31]

Jiným parametrem pro posouzení účinnosti kryogenní jednotky může být také poměrná hodnota vztažená ke Carnotově cyklu při shodném podílu teplot, přitom za ideální hodnotu je považována 0,3. Jelikož je spolehlivost často devizou supravodivých zařízení, dalším požadavkem kladeným na kryogenní systém je právě vysoká spolehlivost, nejméně 99,8%, lépe však 99,9% a více. [30][31]

Pracovní teplota [K]	77	50	40	30	20
Ideální COP	2,94	5,06	6,58	9,10	14,15
Reálný COP	12-20	25-35	35-50	50-75	100-200

Tab. 5: Srovnání teoreticky dosažitelných a reálných parametrů současných chladičů v závislosti na teplotě. [30]



Obr. 14: Grafické vyjádření hodnot z tabulky 5. Jak vidíme, účinnost chladiče je silně teplotně závislá, od 30 K výše však roste výrazně pomaleji. [31]

Pro různá supravodivá zařízení se hodí různé technologie chlazení, které jsou založené na různých principech. Ty můžeme rozdělit na rekuperační a regenerační. Rekuperační jednotky používají rekuperační výměníky tepla a pracují s konstantním tokem chladiva a

stabilním vysokým tlakem. Patří mezi ně první dva typy uvedené níže. Ostatní typy chlazení nazýváme regenerační. Zde se médium ochlazuje tím, že se rozpíná a koná tedy práci. Tlak a objemový průtok jsou tak proměnlivé a cyklus se stále opakuje. Rozdíl mezi regeneračním a rekuperačním chladičem lze připodobnit k rozdílu mezi AC a DC zařízením, kde napětí představuje tlak a proud objemový průtok chladiva. Nejdůležitějšími principy chlazení jsou tyto: [34]

- Joule-Thompsonův cyklus (JT) - využívá Joule-Thompsonova jevu, kdy plyn expandující do vakua při teplotě nižší, než je jeho tzv. inverzní teplota, se tento dále ochlazuje. JT kryogenní jednotky se sice vyznačují nižší efektivitou, než chladiče využívající jiných principů, nejsou ale příliš náročné na údržbu, neboť neobsahují žádné pohyblivé díly.
- Ericssonův-Braytonův cyklus (TB) - Převod tepla probíhá za konstantního tlaku při změně objemu. Součástí zařízení je turbína. TB kryogenní jednotky pokrývají nejširší oblast teplot, na které lze chladit a mají nejvyšší chladicí kapacitu, jsou ale poměrně drahé.
- Stirlingův cyklus - Pracovní cyklus tvoří dva izotermické ($T = \text{konst.}$) a dva izochorické ($V = \text{konst.}$) děje. Stirlingovy kryogenní jednotky mají vysokou chladicí kapacitu, vůbec nejlepší účinnost, ale navzdory skutečnosti, že neobsahují žádné pohyblivé části, vyžadují údržbu ze všech typů chladičů nejčastěji.
- Pulsně trubicové chladiče (PT) - využívají vylepšenou obdobu Stirlingova cyklu. Účinnost je sice mírně nižší, roste ale spolehlivost. Také tento typ neobsahuje žádné pohyblivé části.
- Gifford-McMahonův cyklus (GM) - Tyto kryogenní jednotky mají otočný regulační ventil, vyžadují proto olejové mazání. Oproti Stirlingovu cyklu zde koná práci plyn při izoentropické expanzi na úkor plynu za ventilem. Obě části jsou přitom propojeny, takže na ventil nepůsobí síla konající práci. Účinnost není příliš vysoká, systém je ale velmi spolehlivý a nevyžaduje často údržbu. Právě tyto chladiče jsou nejčastěji využívány v supravodivých transformátorech.
- Termoakustický cyklus - využívá faktu, že šíření zvukových vln je doprovázeno změnami teploty. Tyto změny závisí na amplitudě zvukové vlny - čím je tato vyšší, tím větší je změna a také roste účinnost celého zařízení. [31][33][35]

Název	Typ	Doba bez údržby [h]	Vstupní výkon [kW]	Chladicí kapacita [W]	COP [-]	% Carnotova cyklu
Stirling C&R SPC-4	Stirling	6000	40	4000 při 80K	10,0	28
Stirling C&R LPC-4	Stirling	6000	60	2800 při 65K	21,4	17,1
Stirling C&R SPC-4T	Stirling	6000	40	320 při 20K	125,0	11,3
Aisin seiki SCy501	Stirling	7500	14	1000 při 77K	14,0	20,0
Qdrive 2S362	Stirling PT	/	22	1000 při 77K	22,0	13,3
Cryomech AL600	GM	10000	13	600 při 80K	21,7	12,9
Cryomech AL325	GM	10000	11,2	230 při 50K	48,7	10,4
Cryomech AL330	GM	10000	8,0	40 při 20K	200,0	7,1
Cryomech PT90	GM-PT	15000-20000	5,5	48 při 50K	114,6	4,4

Tab. 6: Příklady některých současných nejvyspělejších chladičů pro supravodivé aplikace. [31]

3.2 Ostatní aplikace

Supravodiče zdaleka nenacházejí uplatnění pouze v energetice. Za více než sto let od jejich objevu bylo objeveno nespočetně možností využití. V této kapitole pouze krátce zmíním některé z těch nejdůležitějších. Kromě níže uvedených se jedná a mnoho velmi specifických aplikací jako je například LHC (Large Hadron Collider) ve výzkumném středisku CERN, kde se pro urychlování částic používá supravodivých kabelů a magnetů. Dále pak stojí za zmínku projekt ITER, tedy pokus o udržení energie termonukleární fúze pomocí tokamaků, ve kterých jsou použity supravodivé cívky.

3.2.1 Magnetická rezonance

Jedná se o neinvazivní zobrazovací metodu, schopnou odhalit, co se děje v lidském těle. Silné magnetické pole supravodivých magnetů vstupuje do těla a atomy vodíku a tukové buňky jsou nuceny přijímat energii tohoto pole. Tím dojde ke změně frekvence, což jsou počítače schopny zaznamenat. [1]

3.2.2 SQUID - Superconducting QUantum Interference Device

Další supravodivá aplikace používaná v lékařství a také ve výzkumu. Pracuje na principu Josephsonova jevu (speciální případ tunelového jevu, kdy mezi dvěma supravodiči oddělenými vrstvou izolantu v této vrstvě vzniká elektrický proud). Toto zařízení je schopno měřit magnetické pole s extrémní přesností - 10^{-14} T. Využívá se například při encefalografii, v geologii nebo v kvantových počítačích. [1]

3.2.3 Elektrodynamická levitace

Doprava je jednou z velmi úspěšných aplikací supravodivosti. Podobně jako při experimentu „Mohamedův hrob“ (viz výše), zde těleso - v tomto případě vlak -

doslova plave na magnetickém polštáři a to zcela bez tření. Supravodivé magnety se zde používají proto, že jsou mnohem menší a lehčí, než ty konvenční. Vlaky maglev mohou dosahovat rychlosti přes 600 km/h, jejich nasazení je ale problematické kvůli obavám ze silných magnetických polí v jejich okolí a tedy jejich vlivu na životní prostředí. [1]

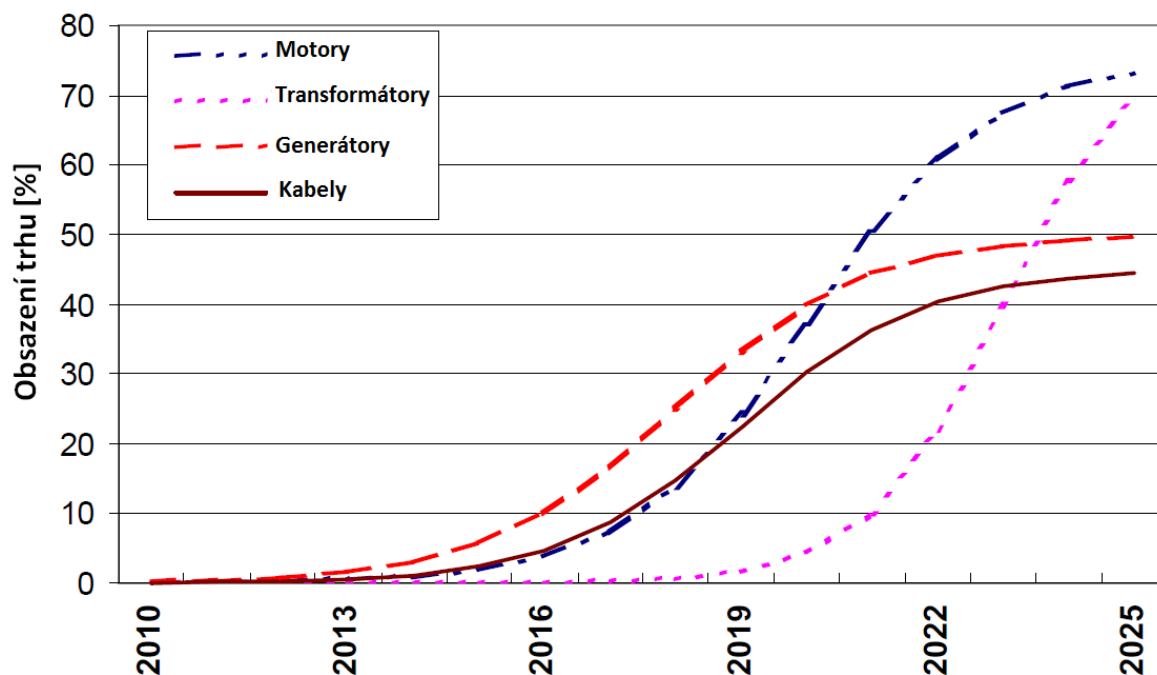
3.3 Pronikání HTS zařízení na trh

V odstavcích výše již bylo naznačeno, že různé supravodivé aplikace mají rozdílný potenciál k proniknutí na trh v masovém měřítku. Odhad budoucnosti je ale pochopitelně velmi složitou disciplínou i u jednodušších a tradičnějších technologií, než jsou HTS zařízení. Jak víme, technika a business jsou dva zcela odlišné světy a úspěch v jednom ještě v žádném případě nezaručuje také úspěch v tom druhém. Přičemž k tomu, aby jakákoli technologie pronikla na trh, musí být nejen skvěle zvládnutá po technické stránce, ale také dostatečně přitažlivá pro investory, potažmo uživatele. Ekonomické parametry však obvykle nejsou tím jediným, co trh při jeho rozhodování ovlivňuje. U některých aspektů inovací, jako jsou bezpečnost (ať už domnělá nebo skutečná - viz letecká doprava nebo jaderná energetika), pohodlnost užívání nebo nejrůznější sekundární bonusy, je těžké, ba i nemožné vyjádření penězi a zejména posouzení jejich vlivu na chování trhu. Roli hraje také fakt, že nová technologie, obzvláště tak komplikovaná, jako HTS, je vždy oproti té staré v mírné nevýhodě. Je to dáno tím, že starší technologie je jednoduše řádně zavedená - funguje servis, subdodávky, infrastruktura, pracovníci jsou vyškoleni, často i laická veřejnost má o ní povědomí a i to může hrát roli v případě, že investorem je demokraticky řízený stát atd. Ona averze ke všemu novému, s níž se lze někdy setkat, je tak do určité míry opodstatněná. Jako příklad může opět posloužit letecká doprava, kde jsou již dávno známy lepší varianty konstrukce letadel, ale kvůli nutnosti přebudovat infrastrukturu letišť a kvůli zvyku veřejnosti, jejíž strach z létání se v minulém století podařilo s obtížemi překonat, zůstávají všechny tyto nápady zatím v pomyslném šuplíku.

Co se týče HTS zařízení, šanci na úspěch mají spíše aplikace větších výkonů a ve větším měřítku. Předpokládá se, že nejdříve se na trh podaří ve větší míře proniknout omezovačům zkratového proudu a dynamickým synchronním kompenzátorům. V některých aplikacích se velmi pravděpodobně supravodiče neuplatní nikdy.

Pro posouzení vývoje trhu s HTS jsem zvolil analýzu z roku 2001 doplněnou o údaje analýzy z roku 2006. Přestože jsou tyto údaje starší, většina zákonitostí na tomto trhu je stále platná. Považuji je proto za přínos, přestože se ukazují být v některých svých odhadech poměrně dosti optimistické. Žádná analýza z posledních let bohužel k dispozici není nebo není volně dostupná. V analýze z roku 2001 je použita standartní S-křivka a to pro kabely, motory, generátory a transformátory. Je vidět, že pronikání zařízení na trh je nejprve velmi pomalé, teprve po nějaké době po nich začne vzrůstat poptávka a tedy zpětně klesat jejich cena. Výrobci tak budou moci provést tzv. úspory z rozsahu dané poměrem fixních a variabilních nákladů. Odtud tento specifický tvar charakteristik níže. Pro kabely, generátory a transformátory je v této studii použita diskontní sazba 7 %, jak je v odvětvých, kde jsou tato zařízení využívána, obvyklé. V případě motorů je to 10%, neboť zde bývá cena ušlé

příležitosti vyšší. I to má pochopitelně vliv na výsledný odhad pronikání jednotlivých zařízení na trh. [23][24]



Obr. 15: Pronikání HTS zařízení na trh - odhad z roku 2001. Uvažována jsou pouze zařízení vyšších výkonů. [23]

Zařízení	Vývoj produktu			Vývoj trhu	
	První prototyp	Vylepšený prototyp	Komerční prototyp	Otevření trhu	Proniknutí na trh
Silové kabely	2006	2008	2011	2014	2017
Synchronní kompenzátory	2004	2006	2009	2011	2014
SFCL	2007	2010	2012	2014	2017
Motory	2004	2006	2011	2016	2019
Běžné generátory	2008	2012	2016	2020	2023
Větrné generátory	2008	2010	2012	2014	2017
Transformátory	2003	2008	2011	2014	2017

Tab. 7: Odhady technologického vývoje a vývoje trhu s HTS zařízeními z roku 2006 [24]

V tabulce výše si můžeme všimnout, že od vstupu zařízení na trh po jeho skutečné proniknutí jsou třeba tři roky. Je to dáno právě tím, že technologie je nová a musí nejprve získat důvěru investorů.

4 Případová studie

Předmětem této části práce je zejména výpočet efektivity případné investice do supravodivého transformátoru namísto transformátoru konvenčního. Cílem je rozhodnout, zda je za daných okolností taková investice rozumná, či nikoli. Dále se pokusím posoudit vliv změny pořizovací ceny takového zařízení, budoucí ceny energií a diskontu na toto rozhodování.

4.1 Přijaté předpoklady

Pro tento účel jsem si vybral projekt supravodivého transformátoru 40 MVA od australské společnosti Callaghan Innovation. Toto zařízení není skutečně realizováno. Jeho parametry jsou vypočteny na základě funkčního 1 MVA transformátoru od stejné společnosti. Rozhodl jsem se také na doporučení jednoho z pracovníků Callaghan Innovation při svém výpočtu použít jinou kryogenní jednotku. V původním projektu je použito chladicí zařízení Cryomech AL 600. Já pro účely této práce použiji zařízení společnosti Infinia, využívající tzv. MCC (technologie **M**ulti **C**ylindric **C**ryocooler) vyvinutou speciálně pro supravodivé aplikace a slibující snížení ztrát i náročnost na údržbu. HTS transformátor společnosti Callaghan Innovation je také vybaven supravodivým omezovačem zkratového proudu a vinutí je tvořeno Roeblovými permutovanými vodiči kvůli snížení ztrát vířivými proudy a potlačení skin efektu. [36][38]

Ve výpočtech níže považuji náklady na údržbu a obsluhu u supravodivých a konvenčních transformátorů za rovnocenné. Toto zjednodušení je nutné, neboť skutečné náklady na údržbu supravodivých transformátorů nejsou dosud známy. Je sice pravdou, že HTS zařízení je technologicky složitější a jeho údržba by tedy mohla být mírně náročnější, na druhé straně však může jeho provoz přinést určité sekundární úspory např. díky tomu, že nejsou nutné žádné prvky protipožární ochrany. [37]

Dalším faktorem, který při výpočtu zanedbávám, je fakt, že v síti jsou transformátory velmi předimenzovány a pracují často pouze na 50 % svého výkonu. Toto by ale u supravodivých zařízení pravděpodobně nebylo nutné, neboť je lze mnohem snáze přetěžovat. [39]

Co se týká výpočtu úspory energie, při jejím určení jsem pro jednoduchost uvažoval jako zdroje pouze jaderné a přečerpávací vodní elektrárny. Učinil jsem tak pomocí metody reprezentantů, která předpokládá následující.

- 1) *Dosavadní zdroje přesně kryjí potřeby dosavadních spotřebitelů a na jakémkoliv zvýšení spotřeby je třeba instalovat (rezervovat) výkon v závěrném zdroji a síti, rovněž jakýkoliv úbytek dosavadních zdrojů je třeba nahradit závěrným zdrojem.*

- 2) *Závěrné elektrárny a sítě jsou přitom ty, jež v blízké budoucnosti mohou být bez vážnějších omezení stavěny a provozovány k pokrytí nárůstu zatížení a úbytku dožívajících zdrojů. V České republice tuto roli hrají právě jaderné a vodní elektrárny. [37]*

Pro výpočet čisté současné hodnoty bylo také nutné odhadnout cenu supravodivého transformátoru. Kvalifikované odhady se pohybují od 150 % do 250 % ceny transformátoru konvenčního. Trh se supravodivými transformátory v tuto chvíli neexistuje a tudíž jejich tržní cena pochopitelně není známa. Rozhodl jsem se nicméně po konzultacích s několika vědeckými pracovníky, kteří se podíleli nebo podílejí na vývoji těchto zařízení, stanovit cenu HTS transformátoru jako 200 % ceny konvenčního transformátoru, přičemž vliv nepřesnosti tohoto odhadu na hodnocení investice zachycuje citlivostní analýza. [22]

Cenu elektrické energie a tedy i budoucí hotovostní toky považuji v průběhu sledovaného období za konstantní. Vliv její změny zachycuje rovněž citlivostní analýza.

Při výpočtu čisté současné hodnoty uvažuji životnost konvenčního i supravodivého transformátoru 30 let, jak je u transformátorů obvyklé. Jednoduše proto, že mi není znám žádný důvod, proč by měla být životnost HTS zařízení nižší, než životnost zařízení konvenčních. Je možné, že by mohla být vyšší, ale protože žádný HTS transformátor zatím není v provozu po tak dlouhou dobu, je těžké něco takového tvrdit s jistotou. Jedna z komponent HTS transformátoru ale přece jen stárne rychleji, než konvenční transformátor a tou je kryogenní jednotka. Zde uvažuji dobu životnosti 15 let, tedy polovinu životnosti transformátoru. [38]

4.2 Výpočet

4.2.1 Hodnocení investice - čistá současná hodnota

Detaily konstrukce a parametrů supravodivého transformátoru lze najít v přílohách. V tuto chvíli postačí, když uvedu, že ztráty rozptýlené v kryostatu dosahují 5 kW. Jedná se jednak o Joulovo teplo vzniklé vlivem hysterezních ztrát v supravodivém vinutí a také teplo pronikající do kryostatu průchodkami i samotným kryostatem. K těmto ztrátám je nutné připočítat ztráty v magnetickém obvodu transformátoru, tedy ztráty naprázdno, které dosahují 27 kW. Nesmíme ale zapomenout, že účinnost chlazení není 100, nýbrž 10,81 % . Odtud $COP = 9,25$. Celkové ztráty supravodivého transformátoru jsou pak rovny

$$P_{zhts} = P_0 + P_{kryo} * COP = 27 + 5 * 9,25 = 73,25 \text{ kW}$$

Kde:

P_{zhts}celkové ztráty HTS transformátoru [kW]

P_0ztráty naprázdno [kW]

P_{kryo}ztráty rozptýlené v kryostatu [kW]

COP.....Coefficient of performance kryogenní jednotky [-]

Celkové ztráty konvenčního transformátoru společnosti ČEZ dosahují 145 kW. Ztráty HTS zařízení jsou tedy téměř přesně poloviční. [36][40]

Nyní je třeba ocenit ztrátu výkonu, aby bylo možné určit roční úsporu na provozu HTS zařízení. K tomuto účelu nejlépe poslouží tzv. metoda reprezentantů pomocí níž vypočteme marginální náklady. Tato metoda předpokládá následující.

Použijeme následující empirický vztah

$$n_m = p_A(n_{PAj} + 8760 * n_{wAj}) + p_v * n_{pv} \quad \left[\frac{\text{Kč}}{\text{kW} * \text{rok}} \right]$$

Kde:

n_mcelkové dlouhodobé marginální náklady [Kč/kW/rok]

p_Apodíl jaderné elektrárny na krytí maxima typického odběratele [-]

n_{PAj}měrné marginální náklady jaderné elektrárny - stálé [Kč/kW/rok]

n_{wAj}měrné marginální náklady jaderné elektrárny - proměnné [Kč/kW/rok]

p_vpodíl přečerpávací vodní elektrárny na krytí maxima typického odběratele [-]

n_{pv}měrné marginální náklady přečerpávací vodní elektrárny – stálé [Kč/kW/rok]

Index j zde značí napěťovou hladinu, na níž výpočet provádíme, v našem případě 5.

Koeficienty p_A a p_v určíme opět podle empirického vztahu.

$$p_A = 0,0448 + 109,041 * 10^{-6} * T_m [-]$$

Kde T_m je doba využití maxima jaderné elektrárny. V našem případě 6876 h (z ročního diagramu zatížení).Tedy po dosazení získáme

$$p_A = 0,7946$$

Koeficient p_v je pak již jednoduše tím, co zbývá do 100 %. Tedy

$$p_v = 1 - p_A = 0,2054$$

Nyní můžeme dosadit do vztahu pro dlouhodobé marginální náklady. Dostaneme

$$n_m = 0,7945 * (6634 + 8760 * 0,386) + 0,2054 * 1763 = 8\,320,33 \frac{K\check{c}}{kW * rok}$$

Transformátory na 5. napěťové hladině ale v žádném případě nejsou v provozu celý rok. Pro účely této práce budu uvažovat provoz 4500 h v roce, což je v souladu s údaji ERÚ. To odpovídá přibližně 0,51 roku. Roční úspora U_a při nahrazení konvenčního transformátoru supravodivým tedy bude

$$U_a = (P_{zkonv} - P_{zhts}) * n_m * 0,51 = (145 - 73,25) * 8320,33 * 0,51 = 304\,461,68 \text{ K}\check{c}$$

Kde P_{zkonv} značí celkové ztráty konvenčního transformátoru [37][41]

Nyní můžeme vypočítat čistou současnou hodnotu pro obě varianty investice. Čistá současná hodnota je nástroj hodnocení investic definovaný jako součet budoucích diskontovaných hotovostních toků. V této práci použiji tzv. rozdílovou čistou současnou hodnotu, kdy budu uvažovat pouze ty hotovostní toky, které se pro obě varianty investice liší. Jak bylo již uvedeno, ostatní náklady spojené s provozem obou zařízení budu považovat za shodné. V polovině hodnoceného období je pak třeba vyměnit kryogenní jednotku. Zde uvažuji poměr cena výkon 80 \$/W. Potřebný chladicí výkon je 5000 W. Hodnota dolaru je v současné době okolo 20 Kč, tedy cena nové kryogenní jednotky bude 8 000 000 Kč. Posledním parametrem potřebným k výpočtu čisté současné hodnoty (NPV) je diskontní sazba. Ta je dána jednak inflací, potažmo inflační politikou ČNB a jednak nákladem ušlé příležitosti (opportunity cost), jinak řečeno naším očekáváním. Pro investice v tomto odvětví je obvyklá diskontní sazba 7%. [23]

Cena konvenčního transformátoru 40 MVA je 17 740 795,06 Kč. Čistá současná hodnota této investice je tedy

$$NPV_{konv} = -17\,740\,795,06 \text{ K}\check{c}$$

neboť rozdílové hotovostní toky jsou nulové. Jiná bude situace při výpočtu čisté současné hodnoty pro HTS transformátor. Zde

$$NPV_{hts} = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I \text{ [K}\check{c}\text{]}$$

Kde:

CF_trozdílový hotovostní tok v roce t [Kč]

r.....diskont [-]

T.....životnost investice [roky]

I.....počáteční cena investice [Kč]

Po dosazení

$$NPV_{hts} = \sum_{t=1}^{30} \frac{CF_t}{(1 + 0,07)^t} - 2 * 17\,740\,795,06 \text{ [Kč]}$$

Hotovostní toky ve všech letech kromě 15. činí 304 461,69 Kč. V roce 15 je hotovostní tok roven $304\,461,69 - 8\,000\,000 = -7\,695\,538,31$ Kč.

Výsledek je tedy

$$NPV_{hts} = -34\,603\,080,75 \text{ Kč}$$

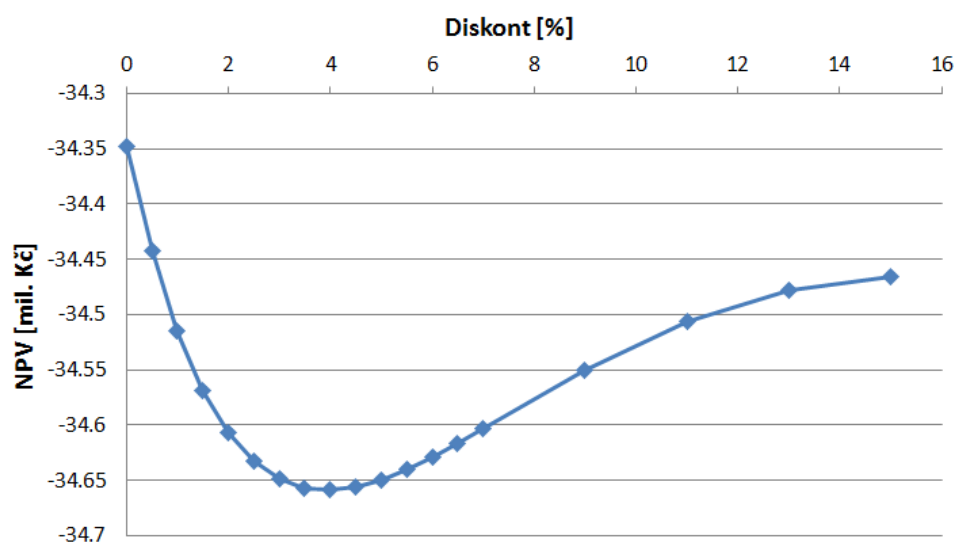
Na první pohled je zřejmé, že HTS transformátor 40 MVA společnosti Callagan Innovation v žádném případě nemůže konkurovat konvenčnímu zařízení. Čistá současná hodnota investice do konvenčního zařízení je téměř poloviční (pozor - v záporných hodnotách).

4.2.2 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza je nástroj, který nám umožňuje posuzovat citlivost výsledku na změnu některého ze vstupních parametrů. Já jsem si pro tuto práci zvolil vliv změny diskontu, ceny elektřiny (tedy CF_t) a velikosti vstupní investice.

1) Vliv změny diskontu

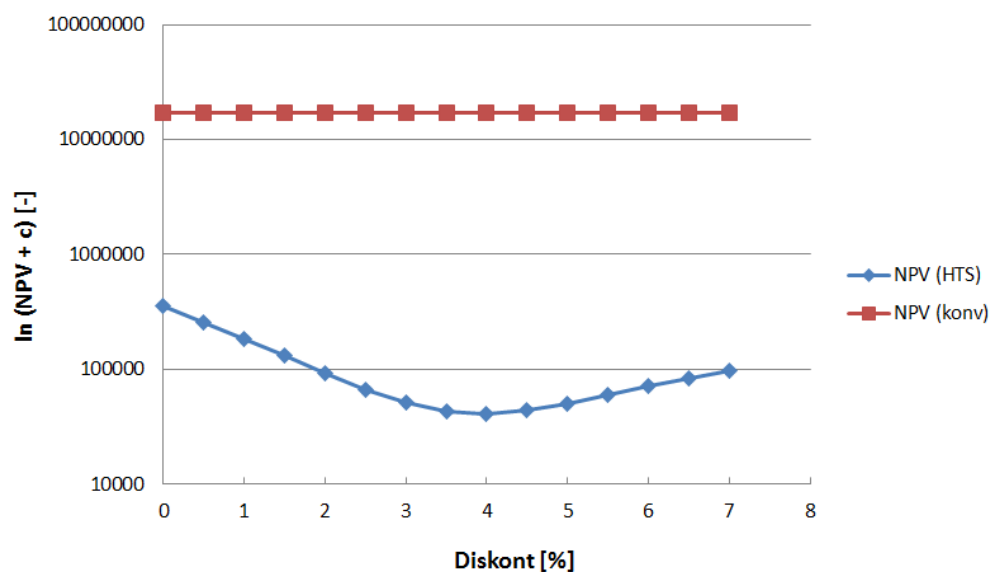
Zde je třeba si uvědomit, že vliv diskontu na investici do HTS transformátoru je dvojitý. Zmenšuje totiž reálnou hodnotu hotovostních toků - jak těch kladných, tak těch záporných (v našem případě máme záporný pouze jeden hotovostní tok a to v 15. roce). To je důvod, proč má křivka na obrázku 23 inflexní bod.



Obr. 16: Závislost čisté současné hodnoty investice do supravodivého transformátoru na diskontu.

Při pohledu na obr. 16 ihned vidíme, že jakákoli změna diskontu nemá zásadní vliv na efektivnost této investice. Ta zůstává nadále zoufale neefektivní. Část grafu úplně vlevo (zhruba od 0% do 2%) je spíše teoretickou záležitostí, myslitelnou snad jen v případě hluboké deflace, která ale v nejbližší době není pravděpodobná. Taktéž scénář naznačený v pravé části není příliš pravděpodobný. Byl by možný snad za velmi vysoké inflace (hyperinflace) nebo pokud by výnosy z jiných investic slibovaly mimořádné zhodnocení.

Pro názornost uvádím níže také tutéž závislost, ale v logaritmickém měřítku, aby bylo možné zanést i NPV investice do konvenčního zařízení a provést tak srovnání. K tomu bylo zapotřebí přičíst k hodnotám obou srovnávaných zařízení konstantu, aby se tyto dostaly do kladných hodnot a bylo je možné logaritmovat. Konstantu jsem zvolil víceméně náhodně, proto hodnoty v grafu níže nemají žádnou smysluplnou interpretaci. Zde jde pouze o znázornění poměru mezi oběma křivkami.

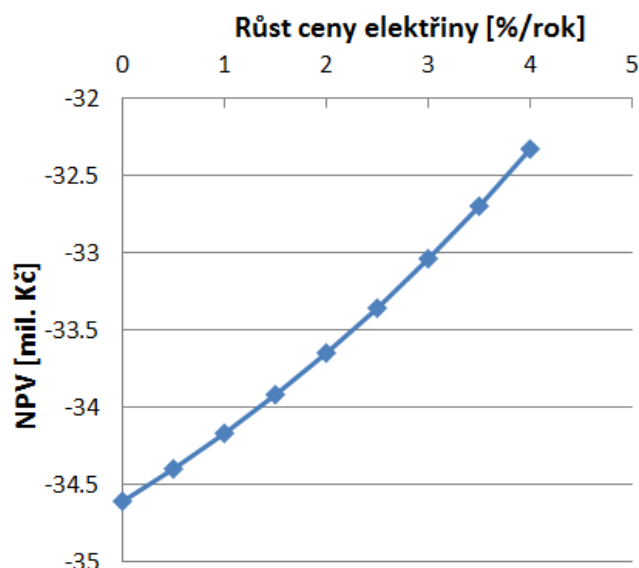


Obr. 17: Znovu závislost NPV investice do supravodivého transformátoru na diskontu. Svislá osa je v logaritmickém měřítku. "c" značí reálnou konstantu, jejíž hodnota je 34 700 000.

2) Vliv změny ceny elektřiny

Dalším parametrem, jehož vliv na čistou současnou hodnotu jsem se rozhodl zkoumat je cena elektrické energie (v našem případě sazba na 5. napěťové hladině). Přitom uvažuji pouze její růst, neboť přesto, že její pokles je v dohledné době spíše pravděpodobný, (svobodný trh vlivem regulací a dotací prakticky neexistuje a odhad

je i proto značně obtížný) již tak nepříznivé vyhlídky investice do HTS zařízení by to ještě zhoršilo a tak pro nás tato eventualita není zajímavá. Jak je vidět z grafu níže, uvažoval jsem stabilní roční růst ceny elektřiny maximálně 4 %. Je třeba podotknout, že i takto vysoký roční růst je velmi nepravděpodobný za jakýchkoli okolností.

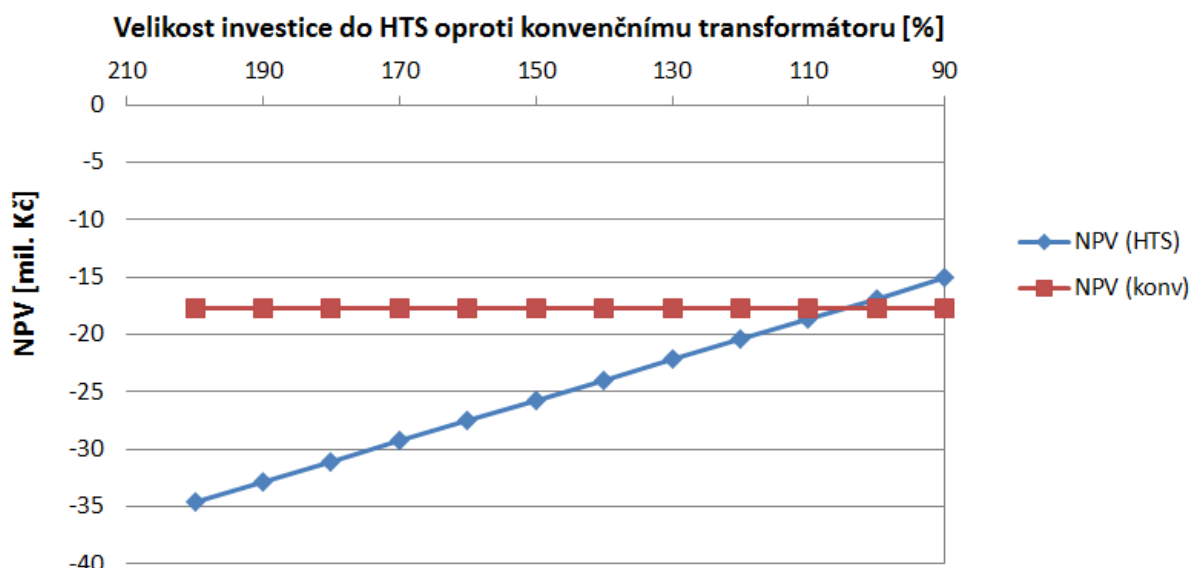


Obr. 18: Závislost čisté současné hodnoty investice do supravodivého transformátoru na ročním růstu ceny elektřiny.

Na obrázku 18 si všimněme, že růst čisté současné hodnoty je poměrně prudký (exponenciální), ovšem čisté současné hodnotě investice do konvenčního zařízení se ani zdaleka neblíží. K tomu by bylo třeba růstu ceny elektřiny okolo 12% ročně, což je samozřejmě téměř nemožné.

3) Vliv změny ceny vstupní investice

Již na začátku této kapitoly jsem uvedl, že cena HTS zařízení je obtížně odhadnutelná. Je možné že by mohla dosáhnout i vyšších hodnot, než je 200% konvenčního zařízení, nicméně stejně jako v předchozím případě, ani zde se tím nebudu zabývat a to ze stejného důvodu. Rozhodl jsem se naopak zachytit vliv snižování ceny supravodivého transformátoru ať už z důvodu snižování cen supravodivých vinutí a kryogenních jednotek nebo díky automatizaci výroby a úsporám z rozsahu, případně kombinaci obojího. Výsledek můžeme vidět na obrázku 19.



Obr. 19: Závislost čisté současné hodnoty investice do supravodivého transformátoru na ceně této investice.

Jak si lze povšimnout, závislost je lineární. Uvažoval jsem snížení ceny až na 90% ceny konvenčního transformátoru, ovšem pouze pro názornost. Reálná hodnota téměř jistě nebude nižší, než 150%. Obě křivky se protínají v bodě, kde hodnota supravodivého transformátoru dosahuje 105,21%, což odpovídá ceně 18 665 073 Kč.

5 Závěr

V prvních dvou částech práce byly shrnuty základní pojmy týkající se supravodičů, jejich nejdůležitější vlastnosti, možnosti jejich využití a odhady budoucího růstu trhu v této oblasti. Jak vidíme, jedná se o objev pro lidstvo skutečně zásadního významu. Možností využití tohoto objevu je skutečně mnoho a mnoho dalších ještě jistě čeká na objevení. I přes značné technologické obtíže, která provázejí veškerou snahu o jejich uplatnění, bude trh se supravodiči nepochybně nadále růst, jako tomu bylo v předchozích letech.

Ve třetí části práce jsem se zaměřil podrobněji na hlavní předmět svého zkoumání - supravodivé transformátory, jejich přednosti, specifika konstrukce a principy a perspektivy hlavní výzvy všech supravodivých aplikací, tedy chlazení. Také zde je patrný velký potenciál pro další vývoj.

Ve čtvrté části jsem pak provedl porovnání hypotetických investic do dvou transformátorů se srovnatelnými parametry - supravodivého a konvenčního. Učinil jsem tak metodou čisté současné hodnoty budoucích hotovostních toků (NPV). Výsledek vyznívá pro mnou zvolený projekt supravodivého transformátoru jednoznačně negativně. Následně jsem se tedy rozhodl zkoumat citlivost této investice na některé vstupní proměnné ve výpočtu NPV. Vyšlo najevo, že bohužel ani při těch neoptimističtějších odhadech není supravodivé zařízení konkurenceschopné. Ukázalo se také, že parametrem, na kterém je výsledná NPV nejcitlivější

ve zkoumané oblasti je cena vstupní investice, rovněž vliv růstu ceny elektřiny není zanedbatelný. Naproti tomu velikost diskontu nemá na NPV zásadní vliv.

Zde je třeba si uvědomit, že využití vysokoteplotní supravodivosti u transformátorů je ještě stále v podstatě v plenkách a mnou zjištěné výsledky tedy v žádném případě neznamenaají, že je tato technologie slepou uličkou. Zároveň je ale evidentní, že pokud mají supravodivé transformátory jednou nahradit ty konvenční, je před námi ještě velké množství práce.

6 Reference

- [1] ECK, Joseph. **Superconductors**. webové stránky www.superconductors.org
- [2] ODEHNAL, Milan. **Supravodivost a jiné kvantové jevy**. Praha: Academia, 1992
- [3] PETR, Jiří. **Supravodiče pro výkonovou elektrotechniku**.
- [4] HOLEŠÍNSKÝ, Radek. **Supravodivost v energetice**. Bakalářská práce. Praha 2012
- [5] KULHÁNEK, Petr. **Vysokoteplotní supravodivost**. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_36_hts.html
- [6] JIRSA, Miloš. **Supravodiče - hit blízké budoucnosti**. Pdf. Dostupné z: <http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/005.pdf>
- [7] Tel Aviv university. **Innovative Superconductor Fibers Carry 40 Times More Electricity**. 2011. dostupné z: <http://www.aftau.org/site/News2?page=NewsArticle&id=15181>
- [8] OSWALD, B. R.: **HTSL-Anwendungsmöglichkeiten in der Energietechnik**. 2004.
- [9] ČERNÝ, Václav. **Supravodivost**. Časopis Elektro. 2005. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/vyhledavani-vysledek/supravodivost-1-26575.html>
- [10] TESAŘOVÁ, M. **Současný stav a perspektivy využití supravodivých komponent v ES**. 2004
- [11] KVÍTEK, Emil. **Materiály pro elektrotechniku**. 2007
- [12] Společnost Nexans, **Type testing of the recently developed superconductor cable for the “AmpaCity” project successfully completed**. 2013. dostupné z: http://www.nexans.de/Germany/2013/1103_Ampacity_Produktionsbeginn_final-e.pdf
- [13] MOYSÉS, Adir. **Applications of High-Tc Superconductivity**. Croatia : InTech, 2011
- [14] KOZAK, Janusz. JANOWSKI, Tadeuzs. **The influence of core parameters on the inductive superconducting fault current limiters’ operation**, dostupné z: http://www.aspect.pollub.pl/publications/ZN5_J_Kozak_PE.pdf
- [15] Redakce časopisu Elektro : **Supravodivost - perspektivní technologie blízké budoucnosti**, dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34841
- [16] LEE, Geun-Joon. **Superconductivity Application in Power System**. Chungbuk Provincial College. 2011. dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/applications-of-high-tc-superconductivity>

- [17] TŮMA, Jan. **Hledá se kýbl na elektřinu**, 2009. Dostupné z:
<http://vtm.e15.cz/clanek/hleda-se-kybl-na-elektrinu>
- [18] Joint Implementation Network. **Superconducting magnetic energy storage (SMES)**. 2003. Dostupné z:
<http://climatetechwiki.org/technology/jiqweb-ee#Feasibility of technology and operational necessities>
- [19] VOŽENÍLEK, Petr. NOVOTNÝ, Vladimír. MINDL, Pavel. **Elektromechanické měniče**. s. 45,46,55. České vysoké učení technické v Praze. 2011
- [20] **Webové stránky Siemens AG**. 2011. Dostupné z:
<http://www.siemens.com/innovation/en/news/2011/new-project-generator-with-superconductors.htm>
- [21] NOE, Mathias. **High temperature superconductors power applications**. Institute for Technical Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Germany. 2013 dostupné z
<http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=29&resId=0&materialId=slides&confId=194284>
- [22] CHEN, Xiaoyuan. JIN, Jianxun. **Development and Technology of HTS Transformers**. Center of Applied Superconductivity and Electrical Engineering. China. 2007. dostupné z :
http://scienceplatform.com/RC/vol_1/P2.pdf
- [23] MULHOLLAND, Joseph, Thomas P. SHEAHEN a Ben MCCONNELL. **Analysis of Future Prices and Markets for High Temperature Superconductors**. 2001. Dostupné z:
<http://web.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/Mulholland%20Report%20063003.pdf>
- [24] **High Temperature Superconductivity Market Readiness Review**. Navigant Consulting, Inc. 2006. Dostupné z:
<http://www.w2agz.com/Library/Superconductivity%20Surveys%20&%20Workshops/NCI%20HTS%20Tech%20and%20Market%20Assessment%20Report%20Final%20Report.pdf>
- [25] **Development of 2G HTS Wire for Demanding Electric Power Applications**. Prezentace společnosti Superpower. 2011. s. 1-11. Dostupné z:
http://www.superpower-inc.com/system/files/2011_0620+ENERMAT+Spain_TL+Web.pdf
- [26] **Status of 2G HTS Wire Development & Production in the US, plus an Overview of the SFCL Transformer and 2G SMES Programs**. Prezentace společnosti Superpower. 2010. Dostupné z:
http://www.superpower-inc.com/system/files/2010_1006+ISIS19+Pres_Lehner_4.pdf
- [27] **Superconductor Technologies Inc. – Investor presentation.pdf**. Prezentace společnosti Superconductor technologies inc. 2013.

- [28] **Reducing the price-performance ratio of 2G wire.** FLESHLER, S., D. ROY, M.W. RUPICH a A. SANTAMARIA.. 2009. s. 1-2 .Dostupné z:
<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/pdf/CCA08/2C-11-FLESHLER.pdf>
- [29] **High-Performance 2G HTS Wire for an Efficient and Reliable Electricity Supply.** Prezentace společnosti Superpower. 2010. s. 5. Dostupné z:
http://www.superpower-inc.com/system/files/2010_0927+IEEE+Reliable+Energy_DWH.pdf
- [30] MIX John. **HVAC Efficiency definitions.** 2006. s. 4. Dostupné z:
<http://www.usair-eng.com/pdfs/efficiency-definitions.pdf>
- [31] Y.F. BI. **Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications.** 2013. Dostupné z :
<http://demo.ipp.ac.cn/uploadfile/2014/0211/20140211105727885.pdf>
- [32] M. J. GOUGE, J. A. DEMKO and B. W. MCCONNEL, J. M. PFOTENHAUR. **Cryogenics Assessment Report.** 2002. Dostupné z:
<http://web.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/CryoAssessRpt.pdf>
- [33] BEDNÁŘÍK, Michal. ČERVANKA, Milan. **Využití intenzivních zvukových polí.** s. 9-10. Dostupé z:
http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/19_20bednarik_cervenka.pdf
- [34] RAY, Radebaugh. **Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler.** 2000. s. 3-6. Dostupné z:
http://cryogenics.nist.gov/Papers/Institute_of_Refrig.pdf
- [35] KUBA, Jan. **Kryotechnika 2 – stati ze skript.** s. 16-18.
- [36] WHITE, Maury. **Infinia Cryocooler Projects for HTS Applications.** Prezentace společnosti Infinia. 2011. s. 12, 18, 19, 25. Dostupné z:
<http://www.superconductivityiea.org/document/M.%20White%20Infinia%20%20Cryocoolers%20for%20HTS.pdf>
- [37] Konzultace s Ing. Miroslavem VÍTKEM. Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL ČVUT.
- [38] Konzultace s Doc. Janem KUBOU. Katedra elektrotechnologie FEL ČVUT.
- [39] Konzultace s Ing. Vítězslavem PANKRÁCEM. Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT.
- [40] Obchodní portál společnosti ČEZ distribuční služby s.r.o. Dostupné z:
<https://obchodcds.cez.cz/webshop/ProductDetails.aspx?CategoryID=59&SubCategoryID=625&productID=423458>
- [41] VÍTEK, Miroslav. **Dlouhodobé marginální náklady náhrady jaderného výkonu obnovitelnými zdroji.** Článek v časopise Energetika s. 295-296. 2012.

7 Kontaktní adresa

Martin Štencel
Jánská 4087
76701 Kroměříž
Tel.: 628 484 313

8 Seznam číslovaných příloh

Příloha č. 1: Prospekt 1 MVA transformátoru společnosti Callaghan Innovation.

Příloha č. 2: VÍTEK, Miroslav. Stanovení dlouhodobých marginálních nákladů metodou reprezentantů.

Příloha č. 3: Parametry kryogenní jednotky společnosti Infinia cryocoolers.

Příloha č. 1: Prospekt 1 MVA transformátoru společnosti Callaghan Innovation.

Summary

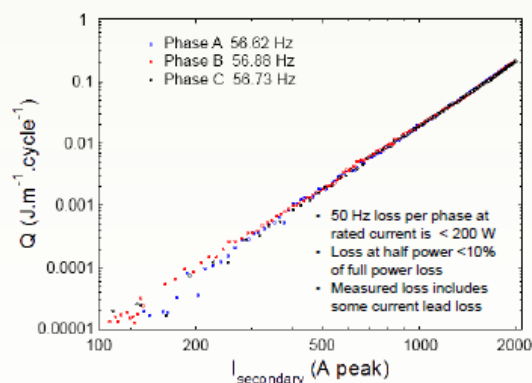
We have built a 1 MVA 3-phase HTS transformer using YBCO (2G) conductor: 15 strand Roebel cable for the low voltage windings and standard 4 mm wire for the high voltage windings. The transformer will be installed in the electricity grid in a zone substation in Auckland, New Zealand early in 2014. Testing shows that 1 kW of heat is dissipated in the cryostat at full load - from AC loss, current leads, and cryostat heat leak. This is equivalent to only 0.1% of the 1 MVA rating, but translates to 3% losses after allowing for cryocooler efficiency, well in excess of conventional transformers. We project that at 40 MVA rating a transformer using Roebel cable low voltage windings will compete with a conventional transformer in terms of efficiency.

Transformer design parameters

Parameter	Value
Primary Voltage	11,000 V
Secondary Voltage	415 V
Maximum Operating Temperature	70 K, liquid nitrogen cooling
Target Rating	1 MVA
Connection	Delta-Wye
LV Winding	20 turns 15/5 Roebel cable per phase (20 turn single layer solenoid winding)
LV Rated Current	1390 A rms
HV Winding	918 turns of 4 mm YBCO wire per phase (24 double pancakes of 38.25 turns each)
HV Rated Current	30 A rms



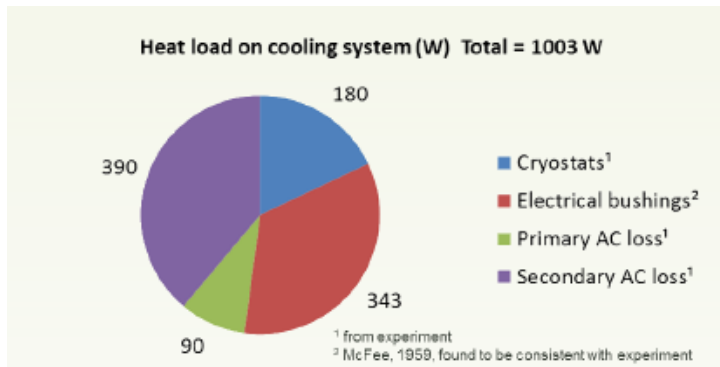
Overview of site installation



Air core AC loss on individual phases



Completed transformer installed in container prior to connection



Cooling System

The cooling system for the transformer utilises a novel mechanism to safely integrate cryo-coolers into the sub-cooled LN2 system, whilst allowing for them to be removed for servicing without disrupting the cold box. The design currently uses 1 Cryomech AL600 to satisfy part of the cooling load, the balance of the cooling being provided by bulk LN2 and vacuum pumping to produce the necessary sub-cooling. The system has provision to add 2 more AL600 units to satisfy the entire heat load without the need for a bulk LN2 supply.

Matching the performance of conventional transformers

In scaling the transformer design from 1 MVA 11/0.4 kV to 40 MVA 110/11 kV we aim for total losses of 150 kW to match the efficiency of a conventional 40 MVA transformer. This translates to a 5 kW dissipation limit in the cryostat. Windings will be in a single cryostat so cryostat and current lead losses are little changed compared to the 1 MVA design, and become a small fraction of the heat budget.

We will meet the loss target if AC loss is limited to ten times the 500 W measured in the 1 MVA transformer.

Despite 40 times increase in rating we expect less increase in loss because:

- Current in the low voltage winding increases by only 50% compared to the 1 MVA transformer.
- Winding loss can be reduced by lowering the operating temperature to 65 K.
- Conductor length per turn increases by 260%, but most of the loss is concentrated in the end turns of the windings.

AC loss modelling, validated on the 1 MVA transformer, is underway to quantify the projected loss.



Roebel cable used in LV Winding (actual size)

Příloha č. 2: VÍTEK, Miroslav. Stanovení dlouhodobých marginálních nákladů metodou reprezentantů.

podíl **JE** na krytí maxima typického odběratele se vypočte:

$$p_A = 126,58 \cdot 10^{-6} T_m \quad \text{pro } T_m \leq 2\,555 \text{ h}$$

$$p_A = 0,0448 + 109,041 \cdot 10^{-6} T_m \quad \text{pro } T_m > 2\,555 \text{ h}$$

podíl **PVE** je pak $p_V = 1 - p_A$

a dosadí do vzorce pro odběratele odebírajícího každý den v roce podle stejného resp. podobného DDZ:

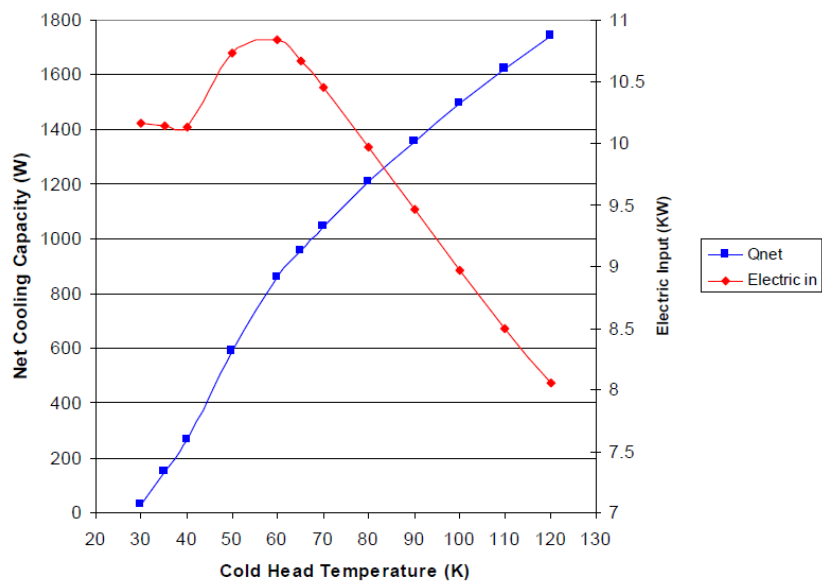
$$n_m(j, T_m, k_m) = p_A (n_{pAj} + 8760 n_{wAj}) + p_V n_{pVj} + k_m n_{pSj}$$

	JE	PVE	PPE	sítě	kzp	kzw	nisz
ni	36 974	11 800	11 500	j = 1	1.013	1.041	1 452
nw	0.352	0	0.835	j = 3	1.038	1.066	3 713
kvs	1.082	1.015	1.041	j = 5	1.070	1.097	7 656
kr	1.19	1.19	1.19	j = 7	1.170	1.196	14 336
ki	0.077	0.073	0.070	0.073			
pst	0.053	0.040	0.081	0.080			
pps	0.028	0.007	0.041	0.047			
km	1			kv 1.37		kc 1.43	

hladina j	npA	npV	npP	nwA	nwP	npS
0	6 201	1 607	2 154	0.352	0.835	0
1	6 279	1 673	2 181	0.366	0.869	222
3	6 436	1 713	2 235	0.375	0.890	568
5	6 634	1 763	2 304	0.386	0.916	1 172
7	7 254	1 922	2 519	0.421	0.999	2 195

Příloha č. 3: Parametry kryogenní jednotky společnosti Infinia cryocoolers.

MCC Design Performance at Cryogenic Temperatures



- Good cooling capacity and thermal performance at temperature > 50 K