

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE

Fakulta elektrotechnická

**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních
věd**

Program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management



Vývoj přenosových soustav ve střední Evropě a Super-grid

Development of transmission systems in
Central Europe and Super-grid

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracovala: Anastasiia Kononova
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vitek, CSc.
Rok: 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kononova** Jméno: **Anastasiia** Osobní číslo: **479023**
 Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
 Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
 Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
 Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vývoj přenosových soustav ve střední Evropě a Super-grid

Název bakalářské práce anglicky:

Development of transmission systems in Central Europe and Super-grid

Pokyny pro vypracování:

Historie rozvoje přenosových soustav v Evropě
 Současné problémy s nedostatečnou přenosovou schopností soustav pro mezinárodní obchod s elektřinou (úzká místa)
 Varianty evropské Supergrid se zaměřením na střední Evropu
 Vyhodnocení variant z ekonomického hlediska

Seznam doporučené literatury:

Kubín Miroslav: Přenosy elektřiny v kontextu evropského vývoje.
 VAN HERTEM, D., GHANDHARIA, M. Multi-terminal VSC HVDC for the European Supergrid: Obstacles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume: 14, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Vítek, CSc. 13116

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.07.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2023**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji Ing. Miroslav Vítka, CSc. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily.

Podpis autora

Název práce: Vývoj přenosových soustav ve střední Evropě a Super-grid
Autor: Anastasiia Kononova

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management
Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.
Klíčová slova: Přenosová soustava, stejnosměrné vedení, velmi vysoké napětí

Abstrakt:

Tato bakalářská práce zkoumá možnosti výstavby nového stejnosměrného vedení na území ČR pro zvýšení přenosové schopnosti mezi Německem a Rakouskem. Cílem a hlavním výstupem práce je návrh různých tras vedení a jejich porovnání z ekonomického hlediska. Úvodní část bakalářské práce je věnována historii rozvoje přenosové soustavy ČR a základním komponentům stejnosměrného vedení. V praktické části jsou stanoveny hlavní parametry navržených tras a jsou spočítány investiční a provozní náklady na výstavbu nového vedení. Dále jsou náklady porovnány pomocí ekonomických ukazatelů a je vybrána optimální varianta.

Title: Development of transmission systems in Central Europe and Super-grid
Author: Anastasiia Kononova

Key words: Transmission system, direct current lines, very high voltage

Abstract:

This bachelor thesis examines the possibilities of a new HVDC line construction in the Czech Republic, which would increase the transmission capacity between Germany and Austria. The main output of the thesis is to design various routes of the transmission lines and their economical comparison. The introductory part of the bachelor thesis is devoted to the history of Czech transmission system development and HVDC line basic components. In the practical part, the main parameters of the proposed routes are determined and the investment and operating costs of the construction are calculated. Next, the costs are compared using economic indicators and finally the optimal option is chosen.

Obsah

Seznam použitých zkratk	ix
Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 Historie rozvoje přenosové soustavy České republiky	2
1.1 Výstavba dálkových vedení 100 kV	2
1.2 Výstavba přenosové sítě 220 kV	2
1.3 Přenosová soustava 400 kV	3
2 Historie mezinárodní spolupráce přenosových soustav v Evropě	5
2.1 Propojení států RVHP (Rada vzájemné hospodářské pomoci)	5
2.2 Vznik UCPTÉ (Sdružení pro koordinaci výroby a přenosu elektrické energie)	5
2.3 UCTE a ENTSO-E	6
2.4 Největší havarie v přenosových soustavách	8
3 Přeshraniční spojení přenosových soustav	9
3.1 Přeshraniční spojení pomocí HVAC a HVDC vedení	10
3.1.1 Porovnání HVAC a HVDC vedení	10
3.1.2 HVDC nejvýznamnější projekty	11
3.2 Přeshraniční spojení ČR	12
3.2.1 Problém s přeshraničními přenosy a jeho řešení	12
4 Komponenty HVDC vedení	14
4.1 Měniče	14
4.1.1 LCC	14
4.1.2 VSC	15
4.1.3 LCC vs VSC	15
4.2 Konfigurace přenosu	16
4.2.1 Monopolární	16
4.2.2 Bipolární	16
4.2.3 Monopolární vs Bipolární	16
4.3 Síťové připojení	17
4.3.1 Bod-bod	18
4.3.2 Multi-terminální	18
4.4 Měničové transformátory	18
4.5 Typy stožárů	19
4.5.1 Rekonstrukce stožárů pro kombinované HVDC a HVAC vedení	19
4.6 Ochranná pásma	20
4.7 Druhy vodičů	21

5	Návrh tras nového HVDC vedení	22
5.1	Projekty ČEPS po přestavbě HVAC vedení	22
5.1.1	Vedení 445/446: Hradec –Röhrsdorf	22
5.1.2	Vedení 432/429: Kočín–Přeštice	23
5.1.3	Vedení 487/488: Hradec – Vítkov	23
5.1.4	Vedení 490/491: Přeštice – Vítkov	23
5.1.5	Rekonstrukce rozveden a transformátorů	23
5.2	Navržená HVDC trasa varianta 1	24
5.2.1	Varianty výstavby nového vedení Dasný - Ersthofen	25
5.3	Navržená HVDC trasa varianta 2	26
5.4	Navržená HVDC trasa varianta 3	28
5.5	Navržená HVDC trasa varianta 4	29
6	Náklady na výstavbu nového HVDC vedení	30
6.1	Parametry navržených tras	30
6.1.1	Ztráty HVDC vedení	31
6.2	Provozní náklady	33
6.2.1	Porovnání měrných ročních nákladů různých variant vedení	34
6.3	Investiční náklady	35
6.4	Optimální varianta, ekonomické ukazatele	36
	Závěr	39
	Bibliografie	40
	A Parametry HVAC stávajícího vedení	43
	B Parametry vodiče AlFe Falcon	46
	C Navržené hybridní stožáry	47

Seznam použitých zkratk

RVHP Rada vzájemné hospodářské pomoci

NDR Německá demokratická republika

UCPTE Union for the Co-ordination of Production and Transmission of Electricity - Sdružení pro koordinaci výroby a přenosu elektrické energie

SRN Spolková republika Německo

CENTREL Asociace, která sdružovala provozovatele přenosových soustav Maďarska, Polska, ČR a SR

HVDC High-voltage, direct current - stejnosměrný přenos elektrické energie

HVAC High-voltage, alternating current - střídavý přenos elektrické energie

UCTE Union for Coordination of Transmission od Elektriciry - Sdružení pro koordinaci přenosu elektrické energie

ATSOI Association of the Transmission System Operators of Ireland

NORDEL Association of Nordic electric system operators, comprising Denmark, Finland, Norway, Sweden

UKTSA United Kingdom Transmission System Operators Association

ETSO European transmission system operators - sdružení evropských provozovatelů přenosových soustav

ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity - Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav

ČEPS Česká elektroenergetická přenosová soustava

LCC Line commutated converter

VSC Voltage source converter

MI Mass Impregnated

SCFF Self-Contained Fluid Filled

XLPE Crossed Linked Polyethylene

ACSR Aluminium Conductor Steel Reinforced

DCF	Discounted cash flow
WACC	Weighted average cost of capital
ERU	Energetický regulační úřad
NPV	Čistá současná hodnota
OpEx	Operational expenditures
CapEx	Capital expenditures
OTE	Operátor trhu s elektřinou
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
CEE	Central and Eastern Europe
SEPS	Slovenská elektrizační přenosová soustava
PSE	Polská elektrizační přenosová soustava
APG	Austrian power grid
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
PS	Přenosová soustava
RCF	Roční ekvivalentní peněžní tok
OZE	Obnovitelné zdroje energie

Seznam obrázků

1.1	Stav přenosové soustavy k roku 1970, ČEPS.	3
2.1	Vzájemná výměna elektřiny v roce 1955 v GWh [3].	6
2.2	UCTE a jiné členové evropské síti provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E) [3].	7
2.3	Porucha 2006, rozložení frekvence v jednotlivých státech [4].	8
3.1	Elektrizační soustava ČR, 2020 [7].	9
3.2	Porovnání investičních výdajů HVAC a HVDC přenosů v závislosti na délce vedení [8].	11
3.3	Propojení elektrizačních soustav [7].	12
3.4	Výkonové toky přes přenosovou síť ČR při zvýšené výrobě větrných elektráren v Německu	13
4.1	Komponenty HVDC vedení [13].	14
4.2	Uspořádání LCC [15].	15
4.3	Uspořádání VSC [15].	15
4.4	Porovnání počtu LCC a VSC projektů v Evropě	16
4.5	Druhy obvodu VSC vedení [18].	17
4.6	Porovnání počtu bipolárních a monopolárních projektů v Evropě	17
4.7	(a) Bod-bod; (b) Multi-terminální, MTDC - multiterminal DC [19].	18
4.8	Typy stožárů	19
4.9	Hybridní stožáry pro HVAC a HVDC [24] a [25].	20
4.10	Ochranná pásma [20].	20
5.1	Navržená trasa varianta 1. Modře je označen úsek Dasný - Lipno - Aschach, červeně je označen úsek Dasný - Ernsthofen.	25
5.2	Navržená trasa varianta 2.	27
5.3	Navržená trasa varianta 3.	28
5.4	Navržená trasa varianta 4. Modře je označen úsek Dasný - Lipno - Aschach, červeně je označen úsek Dasný - Ernsthofen.	29
6.1	Porovnání měrných ročních nákladů různých variant vedení.	34
6.2	NPV různých variant při různé diskontní sazbě.	37
6.3	RCF různých variant při různé diskontní sazbě.	38
A.1	Základní parametry a ztráty korónou na vedeních 220 kV za různého počasí [38].	43
A.2	Základní parametry a ztráty korónou na vedeních 400 kV za různého počasí [38].	44

A.3	Parametry střídavého vedení, kde R_1 je odpor vedení, X_1 je indukční reaktance, B_1 je kapacitní vodivost, P_p je přirozený činný výkon, Z_v je vlnová impedance, I_{max} je maximální proud, U_n je jmenovité napětí, ΔP_j jsou činné ztráty.	45
B.1	Charakteristiky vodiče AlFe Falcon pro ± 500 HVDC vedení [39]. . .	46
C.1	Navržený hybridní stožár pro jednoduché vedení. Černým je označena konstrukce klasického 400 kV HVAC vedení, červeným je navržený hybridní stožár s dvěma póly ± 500 kV HVDC a 400 kV HVDC. . . .	47
C.2	Navržený hybridní stožár pro dvojitě vedení[40]. Černě je označena konstrukce klasického 400 kV dvojitého HVAC vedení, červeně je navržený hybridní stožár s dvěma póly ± 500 kV HVDC a dvojitým 400 kV HVDC.	48

Seznam tabulek

1.1	Vývoj délek tras vedení v letech 1975 – 2020 [2].	3
3.1	Technické, ekonomické a ekologické výhody HVDC.	10
4.1	Porovnání LCC a VSC technologie	15
5.1	Projekty ČEPS po po přestavbě HVAC vedení	22
5.2	Navržená HVDC trasa varianta 1	24
5.3	Navržená HVDC trasa varianta 2	26
5.4	Navržená HVDC trasa varianta 3	28
5.5	Navržená HVDC trasa varianta 4	29
6.1	Parametry navržených tras	31
6.2	Souhrn ročních provozních nákladů	34
6.3	Souhrn investičních nákladů	36
6.4	NPV různých variant při různé diskontní sazbě	37
6.5	RCF různých variant při různé diskontní sazbě	38

Úvod

Většina vyrobené elektřiny musí být přenesena na dlouhé vzdálenosti. Toto řeší přenosová soustava, která vystupuje jako dopravní systém, spojující výrobce a odběratele elektrické energie.

Existují dva způsoby přenosu: střídavé a stejnosměrné. Střídavé vedení (dále pak HVAC) je více používanější a je základem evropské propojené přenosové soustavy. Stejnosměrné vedení (dále pak HVDC) je budováno především pro podmorská vedení, mezistátní propojení a vedení na dlouhé vzdálenosti.

Se stále sílícím tlakem na využití obnovitelných zdrojů energie, sousedící s Českem Německo pokračuje ve výstavbě velkých větrných farem na severu země. V důsledku toho rostou přeshraniční tranzitní výkony a vznikají úzká místa v české přenosové soustavě. Odstranění úzkého místa může vyvolat vznik dalších úzkých míst, což málo přispívá ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti přenosové soustavy.

Výstavba nových koridorů vedení se zpožďuje kvůli ekologickým omezením a protestům veřejnosti. Na nové vysokonapěťové vedení není v Evropě místo, protože jeho výstavba je spojena s potřebou velké plochy území.

Rekonstrukce již existujícího HVAC na hybridní vedení, které umožňuje HVAC a HVDC vedení na stejném stožáru, řeší problémy úzkých míst a potřeby zvýšení přenosové schopnosti mezi Německem a Rakouskem. Hybridní vedení nepotřebuje vyjednání nových koridorů a zajišťuje spolehlivý provoz celé přenosové soustavy.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumání možných variant nového hybridního vedení a výběr optimální varianty z ekonomického hlediska. V prvních třech kapitolách jsou popsány historie rozvoje české přenosové soustavy, rozvoj mezistátních spojení ve střední Evropě, současnost, existující problémy na vedení a způsoby jejich řešení. Ve čtvrté kapitole je představen souhrn hlavních komponent HVDC přenosové soustavy a jejich porovnání především z technického hlediska. V posledních dvou kapitolách jsou navrženy trasy vedení, které jsou pak zhodnoceny pomocí různých ekonomických ukazatelů.

Kapitola 1

Historie rozvoje přenosové soustavy České republiky

Problematickou přenosu elektřiny od místa výroby na velké vzdálenosti se začali zabývat odborníci od konce 19. století. Toto období je dobře známo jako válka proudů, což je spor o volbu stejnosměrného nebo střídavého proudu pro přenos elektrické energie. Tehdy po vynálezu transformátoru a motoru s točivým polem vyhrál přenos střídavým proudem, hlavním propagátorem v českých zemích byl Emil Kolben.

První vedení na území budoucího Československa bylo provedeno v roce 1899 od Holešovické elektrárny a bylo pouze o napětí 3 kV. Ale proces elektrifikace byl tak rychlý, že zanedlouho tato napěťová hladina přestala být dostatečná pro potřeby obyvatelstva. Proto bylo rozhodnuto o přeměnu přenosového napětí na hodnotu 10 kV v roce 1907. S rostoucím rozvojem průmyslu v Praze zvýšení hladiny napětí pro přenos na delší vzdálenosti pokračovalo dál. V roce 1919 přenosové napětí dosáhlo hodnoty 22 kV. Kromě střídavého napětí se někdy také vystavěly i sítě nízkého stejnosměrného napětí, jejichž propagátorem byl v českých zemích nestor české elektrotechniky František Křižík.

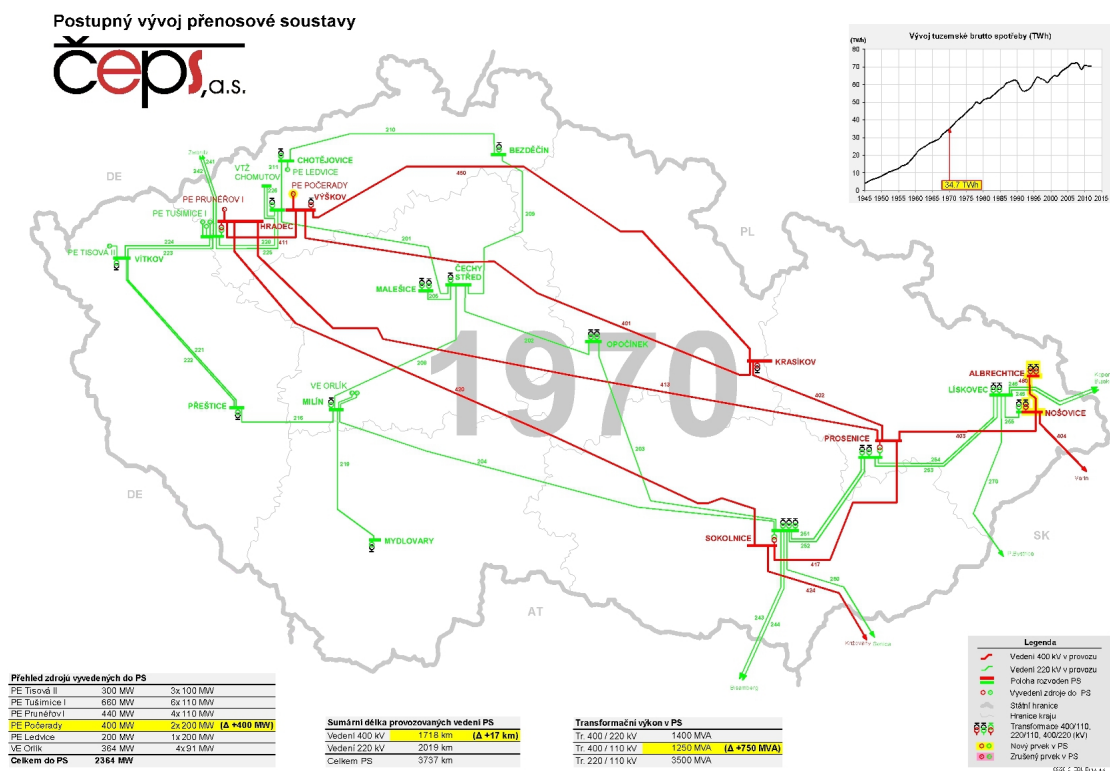
1.1 Výstavba dálkových vedení 100 kV

Počátek výstavby přenosové soustavy, která odpovídá současnému vedení velmi vysokého napětí, začal po vzniku Československa v roce 1918. Přenášené napětí vedením Ervěnice – Praha se zvýšilo na hodnotu 100 kV. Nová transformovna 100/23 kV Praha – Jih předstihla svým technologickým uspořádáním tehdejší dobu. Od roku 1929 se vyvíjela stavba dálkových vedení 100 kV po celém území Československa.

1.2 Výstavba přenosové sítě 220 kV

V roce 1950 oblasti východních Čech a západní Moravy trpěly nedostatkem výkonu, a proto byla potřeba zabezpečit dostatečnou dodávku elektrické energie. Bylo vybudováno dvojité vedení 220 kV, které mělo celostátní význam a řešilo problémy s vyrovnáním přebytků a nedostatkem energie v přenosové soustavě. Výstavbou přenosové sítě 220 kV a vzájemným propojením jednotlivých částí republiky vznikla na území Československa propojená elektrizační soustava [1].

Výstavba 220 kV byla dokončena v 70. letech. Nyní jsou trasy 220 kV postupně nahrazovány vedením 400 kV a slouží jako záložní trasy při poruchách, a hlavně pro obnovu provozu v případě rozpadu soustavy [2].



Obrázek 1.1: Stav přenosové soustavy k roku 1970, ČEPS.

1.3 Přenosová soustava 400 kV

Diskuse pro výstavbu optimálního nadřazeného systému probíhala již od roku 1951. Rozhodovalo se mezi vedením 220 kV a 380 kV. Konzultace roku 1956 v bývalém SSSR ale přispěla k budování 400 kV soustavy pro zajištění velké přenosové schopnosti, což hrálo velmi důležitou roli v existujícím mezistátním propojení. Nová soustava prošla velkým počtem prověrek a přísných posuzování, a nakonec se rozhodlo o systému, do kterého by se začlenila i již rozestavená soustava 220 kV.

V roce 1965 dosáhla délka vedení 400 kV 543 km a během následujících 5 let přibýlo dalších 1300 km [2].

Délka sítě [km]	1975	1980	1985	1989	2018 SR ¹	2020 ČR ²
Vedení 400 kV	2 489	3 144	3 578	3 870	1 740	3 867
Vedení 220 kV	2 397	2 451	2 408	2 430	648	1 824
Vedení 110 kV	9 277	9 988	11 023	11 358	40	84

¹ Délka vedení na území Slovenska.

² Délka vedení na území Česka.

Tabulka 1.1: Vývoj délek tras vedení v letech 1975 – 2020 [2].

Po roce 1990 hlavně probíhala modernizace a výměna transformoven a zastaralých zařízení.

Kapitola 2

Historie mezinárodní spolupráce přenosových soustav v Evropě

Regionální mezistátní přenosy mezi Švýcarskem, Itálií, Francií a Německem začaly vznikat v meziválečném období minulého století. Toto propojení bylo postaveno pro využití přebytečné energie z vodních elektráren v Alpách.

2.1 Propojení států RVHP (Rada vzájemné hospodářské pomoci)

V roce 1953 se uskutečnilo propojení Československa a Maďarska 110 kV vedením.

Od roku 1961 soustava 220 kV zajišťovala mezistátní spojení Československa, Maďarska, NDR a Polska. Později se k této soustavě taky připojil i Lvovský energetický systém (Ukrajinská SSR), systém Rumunska a Bulharska.

V roce 1962 byla uzavřena Dohoda o zřízení Centrální dispečerské organizace propojených elektrizačních soustav evropských členských zemí RVHP se sídlem v Praze. Pro československou energetiku to znamenalo významnou kvalitativní změnu a rozvoj soustavy jako součásti mezinárodního energetického systému [1].

Od roku 1973 se uvádí do provozu 400 kV vedení mezi státy RVHP. Uvedené linky odstraňovaly úzká místa v přenosech a prohloubily mezistátní spolupráci.

Též od roku 1979 bylo uvedeno do provozu vedení 750 kV mezi bývalým SSSR a socialistickými státy východní Evropy. Důvodem pro tento krok byl předpoklad, že spotřeba elektřiny v evropských zemích bude značně stoupat. Synchronní propojení 750 kV bylo ukončeno v roce 1993. Jedinou výjimkou byla Burštynská elektrárna na Ukrajině, která byla v roce 2003 připojena k synchronní síti kontinentální Evropy přes Maďarsko mezi rozvodnami Vinica, Zapadoukrajinskaja a Albertirsa.

2.2 Vznik UCPTE (Sdružení pro koordinaci výroby a přenosu elektrické energie)

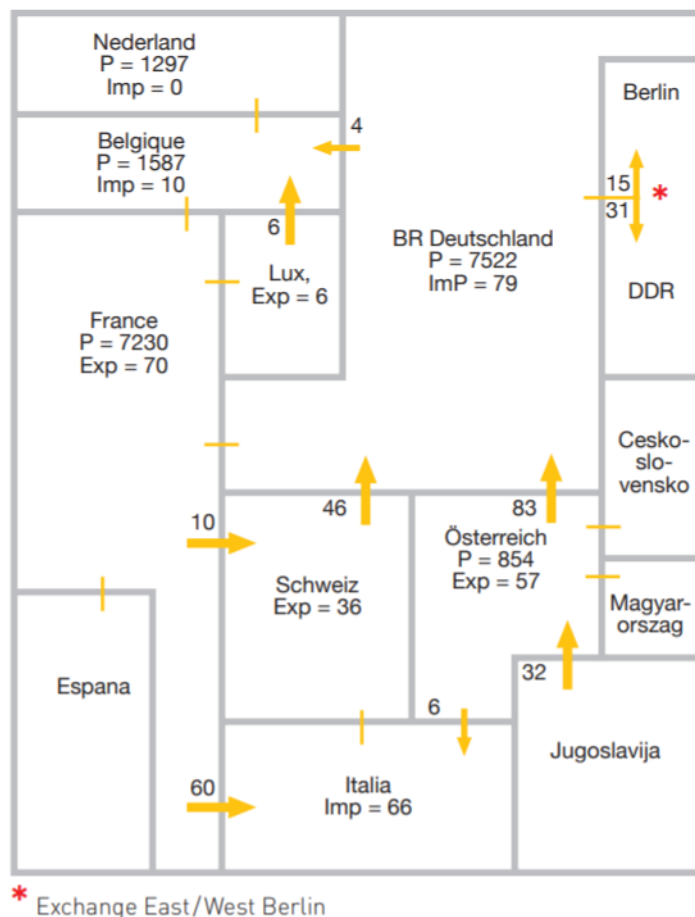
Návrhy na propojenou elektrickou soustavu vznikly díky procesu rekonstrukce a obnovy v poválečném období. Původní přenosové soustavy osmi zemí Belgie, SRN, Francie, Itálie, Lucemburku, Nizozemska, Rakouska a Švýcarska byly prodlouženy do dalších částí Evropy - Řecka, Jugoslávie a později Španělska a Portugalska.

Hlavním cílem pro UCPTE bylo zajištění dodávky elektrické energie jejím odběratelům takové kvality a spolehlivosti, jako kdyby neexistovaly žádné statní hranice mezi jednotlivými elektrickými soustavami. Dosažené úspěchy UCPTE pak byly:

- veřejné zpřístupnění informací o dostupné energii v státech členech UCPTE,
- zabránění ztráty nadbytečné produkce elektrické energie,
- liberalizace obchodování elektrické energie mezi zeměmi,
- vývoj komunikační technologie mezi partnery.

Od konce 1960 začalo vznikat okružní spojení přenosových soustav Rakousko-SRN, Francie-Itálie-Švýcarsko, Itálie-Rakousko-Jugoslávie a Francie-Belgie-Nizozemsko-SRN-Švýcarsko. Od začátku 1950 se mezistátní přenosová schopnost zvýšila desetkrát a dosáhla hodnoty 32,2 GW v roce 1974.

Od roku 1995 i státy soustavy CENTREL (Česko, Maďarsko, Polsko a Slovensko) jsou synchronně propojeny s UCPTE. Před tím existovaly jenom stejnosměrné spojky nulové délky v rozvodnách Duhrohr a Etzenricht.



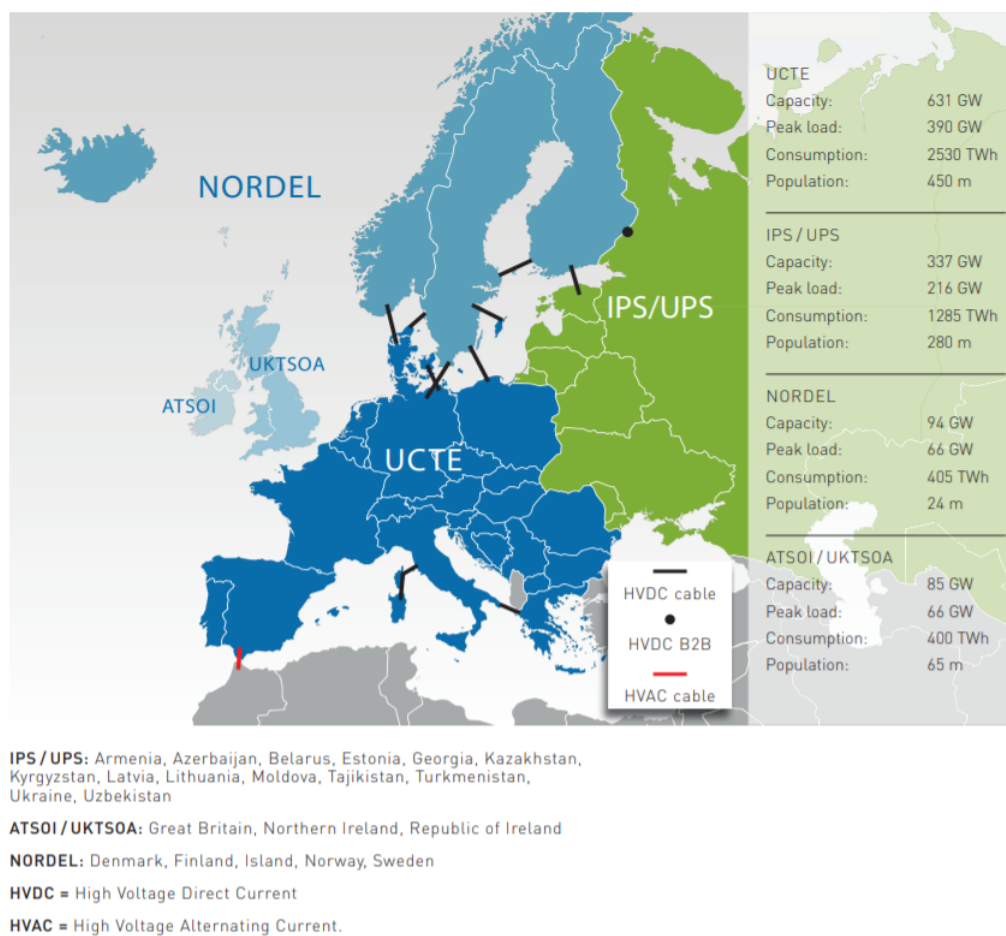
Obrázek 2.1: Vzájemná výměna elektřiny v roce 1955 v GWh [3].

2.3 UCTE a ENTSO-E

90. léta přinesla přechod k oddělení (unbundling) výroby, přenosu a distribuce elektrické energie za účelem zajištění tržního prostředí ve výrobě a nediskriminačního

přístupu k sítím pro všechny uživatele, a tedy i vznik konkurenceschopnějšího trhu. Z tohoto důvodu UCPTE omezil svou činnost jenom na přenos elektrické energie a změnil název na UCTE [3].

Od roku 2009 UCTE je spolu s NORDEL (severoevropské země), ATSOI (celé Irsko), UKTSOA (Velká Británie) součástí evropské sítě provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E - evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav). UCTE zajišťuje spolehlivou dodávku elektřiny pro 350 milionů odběratelů na území od Polska do Portugalska. 41 evropských provozovatelů z 34 zemí jsou částí European Network of Transmission System Operators for Electricity - Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav (ENTSO-E).



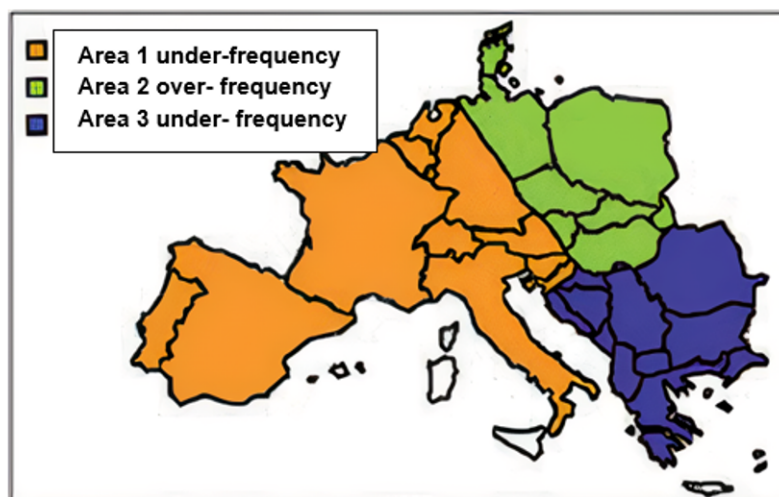
Obrázek 2.2: UCTE a jiné členové evropské sítě provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E) [3].

Po ruské invazi na Ukrajinu 24. února 2022 provozovatelé přenosových soustav kontinentální Evropy dohodli, že dne 16. března 2022 zahájí zkušební synchronizaci ENTSO-E s elektrizačními soustavami Ukrajiny a Moldavska. Bylo potvrzeno, že nouzová synchronizace je technicky proveditelná s řadou opatření k zajištění bezpečného provozu.

2.4 Největší havarie v přenosových soustavách

Každá propojená přenosová soustava se setkala s různými haváriemi za dobu své existence. Poruchy v přenosové soustavě mají svůj unikátní soubor příčin a faktorů, které zapůsobily ve stejném okamžiku. Za dlouhou dobu existence propojené soustavy vznikalo poměrně hodně problémů, různých z hlediska počtu dotčených zemí. Dále jsou uvedeny největší poruchy a příčiny jejich vzniku [4].

- Dne 28. září roku 2003 se bez elektřiny na 12 hodin muselo obejít 56 milionů obyvatel Itálie a části Švýcarska. Příčinou italského blackoutu bylo prověšení lana 380 kV vedení na území Švýcarska pod vlivem vysokého zatížení, což způsobilo výboj mezi ním a přilehlým stromem [5].
- 4. listopadu 2006 byla v systému UCTE zaznamenána nejrozsáhlejší porucha v historii všech provozovatelů synchronně propojených Evropských soustav. Příčinou přetížení byly neočekávané změny toků výkonu ve větrných elektrárnách na severu Německa. V důsledku poruchy se soustava UCTE rozdělila na tři oblasti s různými frekvencemi. Pro soustavu ČR to znamenalo extrémní mezinárodní toky a havárie některých prvků PS.



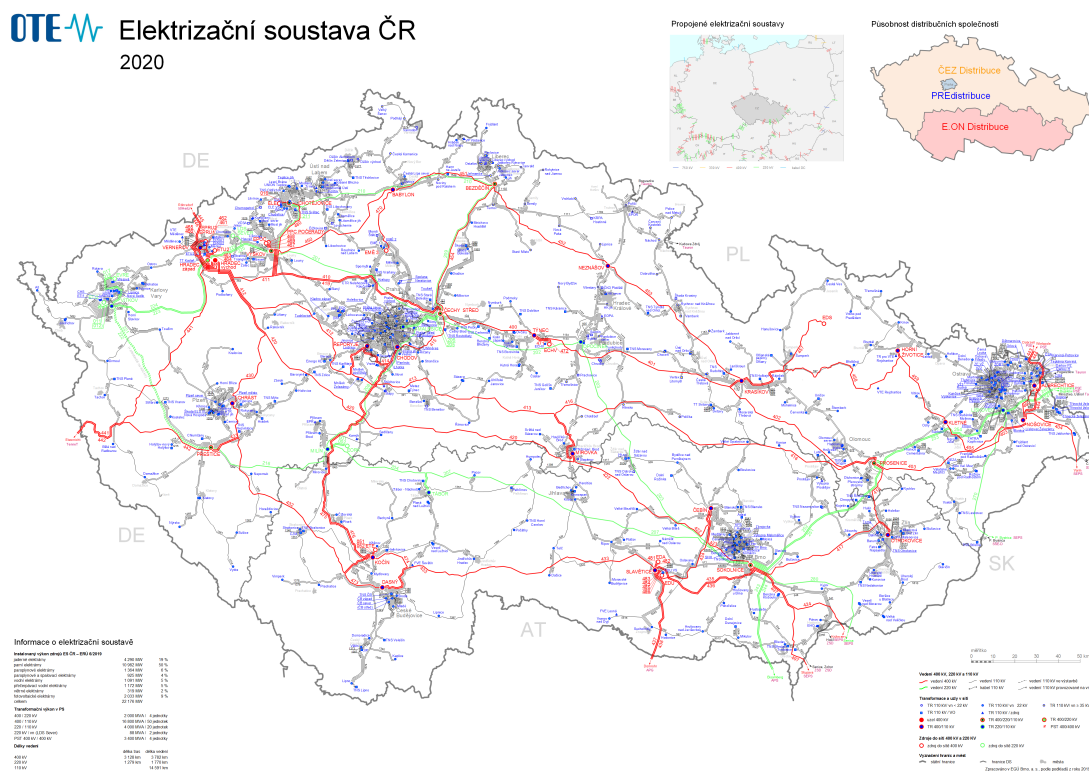
Obrázek 2.3: Porucha 2006, rozložení frekvence v jednotlivých státech [4].

- Od 25. listopadu do 16. prosince, 2011, česká přenosová soustava byla přetížena toky z německých větrných elektráren. V některých hodinách přebytek dosahoval 3 500 MW, což je 3,5x obvyklého množství. Nebylo taky dodržováno kritérium n-1, které zabezpečuje stabilitu soustavy. Celá Česká republika se tak mohla ocitnout bez elektřiny. Pro odstranění nebezpečí vyplývajících z neřízených přetoků mezi Německem a ČR byly instalovány transformátory s regulací fáze v rozvodnách Röhrsdorf a Hradec (v roce 2017).

Kapitola 3

Přeshraniční spojení přenosových soustav

Celou českou přenosovou soustavu provozuje od roku 1998 společnost ČEPS, a.s. Hlavními úkoly společnosti ČEPS je provoz, údržba, obnova a rozvoj 42 rozveden se 75 transformátory a trasy vedení s napětovou hladinou 400 kV o délce 3 867 km a 220 kV o délce 1 824 km na území České republiky [6]. Současně společnost je významným hráčem v mezistátních přenosech. Zajišťuje export, import a tranzit elektrické energie.



Obrázek 3.1: Elektrizační soustava ČR, 2020 [7].

ČEPS je členem ENTSO-E a je zařazena do regionu střední a východní Evropy (region CEE). Jednou z úloh přenosové soustavy ČR je tranzitní přenos elektrické energie ze severního Německa, kde je přebytek elektřiny, do jižních částí regionu CEE jako je Rakousko.

3.1 Přeshraniční spojení pomocí HVAC a HVDC vedení

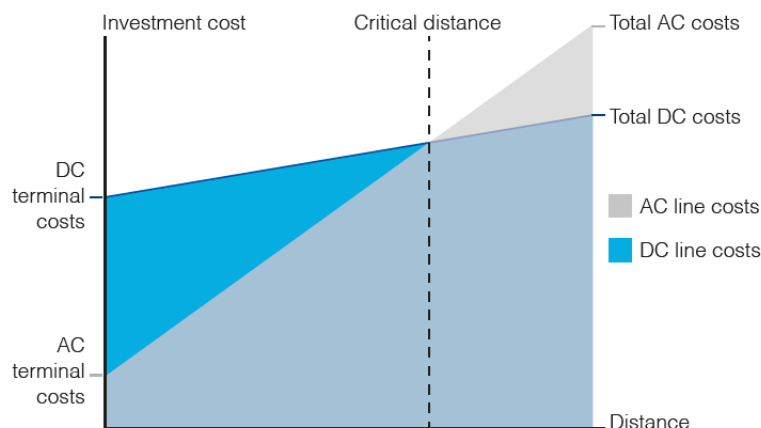
Přeshraniční spojení je možné provést dvěma způsoby. Prvním a nejčastějším je synchronní, při kterém propojené soustavy mají shodný kmitočet střídavého napětí. Druhým je asynchronní propojení pomocí stejnosměrných spojek. Stejnosměrné propojení odděluje spojované sítě od vzájemné kmitočtové závislosti. Elektřina se nejdříve usměrní a následně se znovu převede na kmitočet nový.

3.1.1 Porovnání HVAC a HVDC vedení

HVDC přenosy jsou obvykle používány pro propojení dvou asynchronních systémů a pro vzdálené přenosy venkovního a podmořského vedení. Hlavní výhody z technického, ekonomického a ekologického hlediska jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Technické	Ekonomické	Ekologické
U HVDC přenosu není nutnost udržování soustavy v synchronismu, což zvyšuje stabilitu soustavy	Díky poklesu ztrát korunou a dielektrických ztrát při přenosech na velké vzdálenosti provozní náklady jsou menší (viz obrázek 3.2)	Elektrostatické pole nepřináší nepříjemné pocity pro člověka na rozdíl od proměnného elektrického pole
Odstranění skin efektu - je možnost použití menšího průřezu vodiče	Oproti střídavým 3-fázovým soustavám stačí k stejnosměrnému přenosu pouze 2 vodiče - snížení investičních nákladů	Magnetické pole kolem přenosových vedení HVDC je konstantní, proto nejsou indukovány proudy do vodivého okolí a není vliv na živé organismy
Vzhledem k absenci induktivní reaktance dochází k velmi nízkému poklesu napětí v přenosových vedeních HVDC	U stejnosměrných přenosů jsou nižší náklady na izolace a stožáry	Plocha zabraná umístěním HVDC vedení je většinou menší

Tabulka 3.1: Technické, ekonomické a ekologické výhody HVDC.



HVDC has a higher initial cost – the converter stations – but because the means of transmission (the overhead lines and the cables) are less expensive per kilometer with DC, there is a break-even distance.

Obrázek 3.2: Porovnání investičních výdajů HVAC a HVDC přenosů v závislosti na délce vedení [8].

Investiční náklady na výstavbu stejnosměrné soustavy jsou podstatně větší kvůli drahým AC/DC měničů, ale variabilní náklady nerostou tak prudce se zvyšováním zatížení jako tomu je u HVAC. V kritickém bodě se přímky protínají a od určité vzdálenosti je výstavba stejnosměrného vedení ekonomicky výhodnější. Tato vzdálenost závisí na konkrétním projektu a je různá v závislosti na druhu provedení.

HVDC má samozřejmě i nevýhody, hlavními z nich jsou:

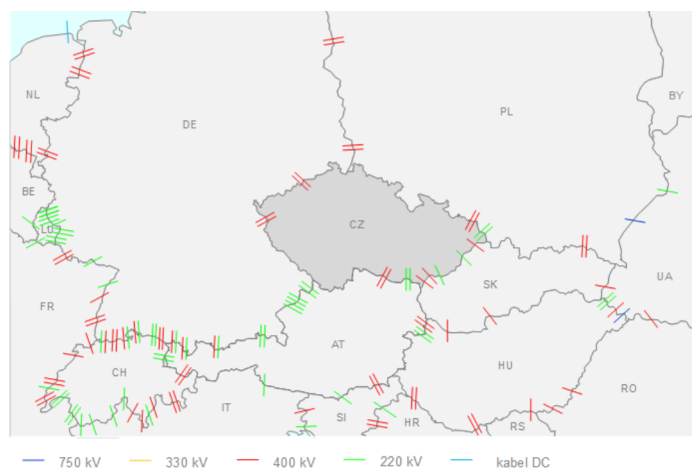
- použití snižovacího a zvyšovacího transformátoru není možné,
- u HVDC vedení je potřeba složitých a drahých polovodičových měničů,
- řízení napětí v multi-termální přenosové síti a vypínání stejnosměrného proudu jsou problematické.

Přes tyto nedostatky, zájem o výstavbu nových tras pro stejnosměrná vedení neustále roste, především u mezistátních vedení. Země, zaměřené na výrobu elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů energie, potřebují přenášet velké výkony a proto vnímají HVDC vedení jako perspektivní.

3.1.2 HVDC nejvýznamnější projekty

V Evropě nejvýznamnějšími projekty se stejnosměrným propojením mezi státy jsou:

1. BritNed – podmořské 1000 MW HVDC vedení mezi Británií a Nizozemskem, 2011.
2. EWIC – vedení 500 MW HVDC mezi Británií a Irskem.
3. INELFE – vedení 2000 MW HVDC mezi Francií a Španělskem, 2015.
4. IFA 2000 – podmořské 2000 MW HVDC mezi Francií a Británií, 1986 [9].



Obrázek 3.3: Propojení elektrizačních soustav [7].

Existují projekty, v rámci kterých probíhá výměna stávajících střídavých na částečné nebo celé stejnosměrné vedení. Příklady jsou:

1. UltraNet project - jedno DC vedení 380 kV plus dvě 110 kV AC na jedné stožárech mezi Severním Rhine-Westphalia a Baden-Württemberg v Německu.
2. Angle-DC project - 33 kV AC propojení bylo změněno na 27 kV DC vedení mezi Severním Wales a Anglesey ve Velké Británii.
3. HVDC Sileru–Barsoor - 200 kV vedení v Indii.

3.2 Přeshraniční spojení ČR

Přenosová soustava České republiky je obklopena pěti sousedními soustavami - dvěma německými (50Hertz, TenneT), polskou PSE, slovenskou SEPS a rakouskou APG [10]. Celkem je propojeno 11 vedení na hladině napětí 400 kV a 6 vedení 220 kV.

Česká přenosová soustava je propojena s Rakouskem dvojitým vedením 400 kV a 220 kV. Se SEPS je propojena třemi vedeními 400 kV a dvěma 220 kV, s PSE je propojena dvěma vedeními 400 kV a dvojitým 220 kV, s německým provozovatelem 50Hertz je propojena dvojitým vedením 400 kV a s provozovatelem TenneT dvěma vedeními 400 kV.

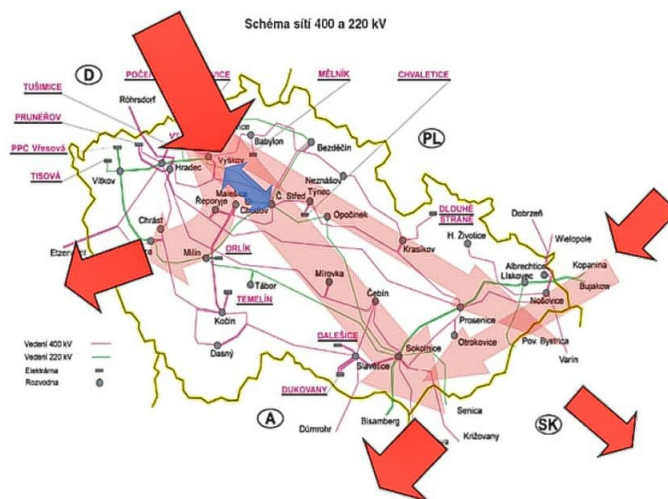
Pro regulaci a omezení přeshraničního toku jsou zapojeny k vedení transformátory s příčným posuvem fáze (Phase Shift Transformers). Transformátor velikostí příčného přídavného napětí ovlivňuje úhel mezi vstupním a výstupním napětím, což umožňuje snižovat či zvyšovat průtok činného výkonu [11].

3.2.1 Problém s přeshraničními přenosy a jeho řešení

Vzhledem k přesahu poptávky nad reálnými přeshraničními přenosovými možnostmi vznikají tzv. úzká místa uvnitř národních přenosových soustav. V české přenosové soustavě začínají objevovat úzká místa kvůli velkým přetokům z větrných parků mezi severem a jihem Německa. Odstranění úzkého místa může vyvolat vznik dalších úzkých míst v lokacích, kde se předtím nenacházela. A naopak: odstranění

úzkého místa v rámci jedné národní sítě nemusí nutně přispět k její větší bezpečnosti [12].

Se stále sílícím tlakem na využití obnovitelných zdrojů dochází k budování dalších velkých větrných farem v Německu. V důsledku toho rostou tranzitní výkony přes českou přenosovou soustavu.



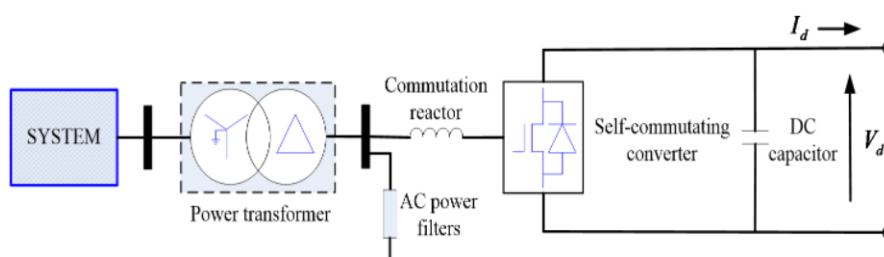
Obrázek 3.4: Výkonové toky přes přenosovou síť ČR při zvýšené výrobě větrných elektráren v Německu

Na nové vysokonapěťové střídavé vedení ve střední Evropě není místo, protože jeho výstavba je spojena s potřebou velké plochy území oproti HVDC vedením. Stejnoseměrné vedení má tu výhodu, že nijak neovlivňuje již existující střídavé vedení. Proto vhodná a v některých případech jediná volba pro efektivní a spolehlivý transport vyrobené elektrické energie do míst spotřeby je výstavba nadřazené stejnosměrné soustavy na bázi HVAC. Byla by nejen schopna přenášet výkon ze současných zdrojů, ale i dalších nových, obnovitelných zdrojů při maximální eliminaci slabých míst [12].

Kapitola 4

Komponenty HVDC vedení

V kapitole jsou popsány hlavní komponenty potřebné pro stejnosměrný přenos a jejich krátké porovnání. Zejména jsou zde popsány měničové stanice, topologie HVDC sítě, transformátory, druhy stožárů, měřicí a ochranná zařízení.



Obrázek 4.1: Komponenty HVDC vedení [13].

4.1 Měniče

U stejnosměrných přenosů jednou z nejdůležitějších komponent je měnič AC/DC a DC/AC. Dvě hlavní technologie, starší LCC a modernější VSC, budou popsány v následujících podkapitolách.

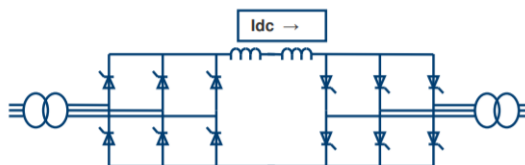
4.1.1 LCC

LCC je založen na polovodičové technice - tyristorech. Měnič pracuje v závislosti na parametrech vedení, spíná se podle kmitočtu vedení. Tato technologie zajišťuje velkou přenosovou schopnost.

LCC neumožňuje změnu směru proudu, proto směr výkonu lze měnit jenom změnou směru napětí, což vede k většímu namáhání celého vedení.

Další nevýhodou LCC je velká spotřeba jalového výkonu (50 % - 60 % od celkového přenášeného výkonu) [14].

Přes hodně nedostatků LCC technologie je stále používána v projektech, kde je potřeba velká přenosová schopnost.

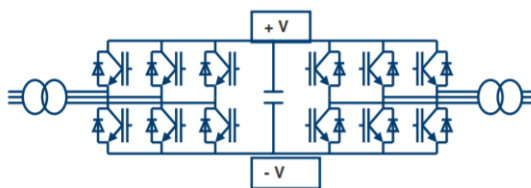


Obrázek 4.2: Uspořádání LCC [15].

4.1.2 VSC

VSC technologie využívá tranzistory IGBT, což umožňuje aplikace vysokofrekvenční pulzní-šířkové modulace. Rozvodny využívající tuto technologii dosahují až poloviční úspory rozměrů vůči starší LCC technologii.

VSC nejsou závislé na parametrech vedení, používají externí signály pro řízení. Taký směr výkonu lze jednoduše měnit změnou směru proudu, což je rychlejší a spolehlivější způsob oproti LCC.



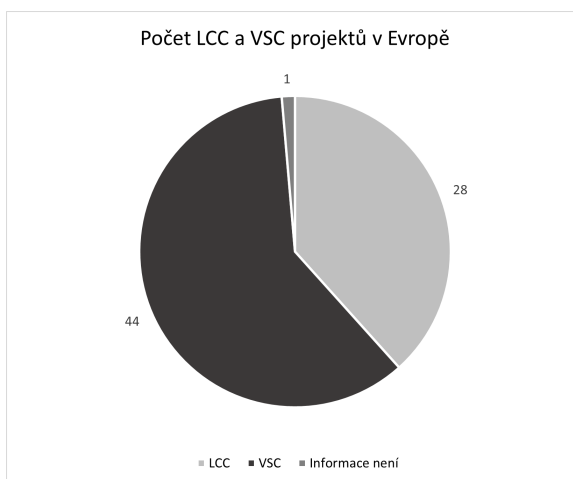
Obrázek 4.3: Uspořádání VSC [15].

4.1.3 LCC vs VSC

V tabulce 4.1 jsou uvedeny hlavní body, čím se liší VSC a LCC.

Line commutated converter (LCC)	Voltage source converter (VSC)
1) Napětí dvou polarit	1) Napětí jedné polarity
2) Proud teče jedním směrem	2) Proud teče dvěma směry
3) Vysoká přenosová schopnost	3) Malá přenosová schopnost
4) Zkreslení kvůli harmonickým složkám	4) Skoro žádné harmonické složky
5) Velké rozměry a potřebná plocha pro výstavbu transformačních stanic	5) Poloviční úspora rozměrů
6) Menší náklady	6) Náklady jsou o 10 % - 15 % větší
7) Menší ztráty v měniči	7) Větší ztráty v měniči
8) Vyšší spolehlivost	8) Nižší spolehlivost, důvodem je větší počet zařízení

Tabulka 4.1: Porovnání LCC a VSC technologie



Obrázek 4.4: Porovnání počtu LCC a VSC projektů v Evropě

Bylo analyzováno 73 projektů v Evropě, které buď už byly postaveny nebo jejich realizace teprve začne. Z toho 60 % projektů jsou VSC, 38 % - LCC, o 1 % projektů informace chybí [14].

Po zvážení všech výhod a nevýhod obou typů měničů a taky po průzkumu současných projektů bylo rozhodnuto použít VSC technologii v praktické části bakalářské práce.

4.2 Konfigurace přenosu

Topologie stejnosměrné sítě je ovlivněna především požadovanou úrovní spolehlivosti, hodnocení efektivity nákladů a dodržováním místních zásad a předpisů [14].

Dále jsou krátce popsány jenom základní druhy - monopolární a bipolární. Pro více informace lze najít ve zdrojích [16] a [17].

4.2.1 Monopolární

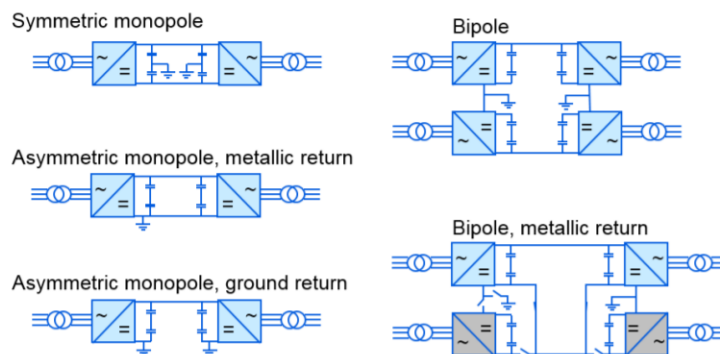
U monopolárního vedení jeden z terminálů měniče je připojen k zemi, druhý - na potenciál vysokého napětí. Proud teče v jednom směru kovovým vodičem a zpět do zdroje se vrací zemí. Takové provedení je méně nákladné, ale proud tekoucí zemí vyvolává elektrochemickou korozi kovových předmětů, jako jsou například potrubí.

4.2.2 Bipolární

Oproti monopolárnímu u bipolárního vedení jsou použity dva vodiče vysokého napětí opačné polarity. Použití dvou vodičů zvyšuje spolehlivost přenosu a umožňuje 50 % přenosovou schopnost v případě výpadku jednoho z vodičů. U bipolárního vedení je taky minimalizována elektrochemická koroze (vzniká stejnosměrnými zemními proudy). Vzhledem k tomu, že je potřeba více vodičů, rostou náklady jak na samotné vodiče, tak i na izolace.

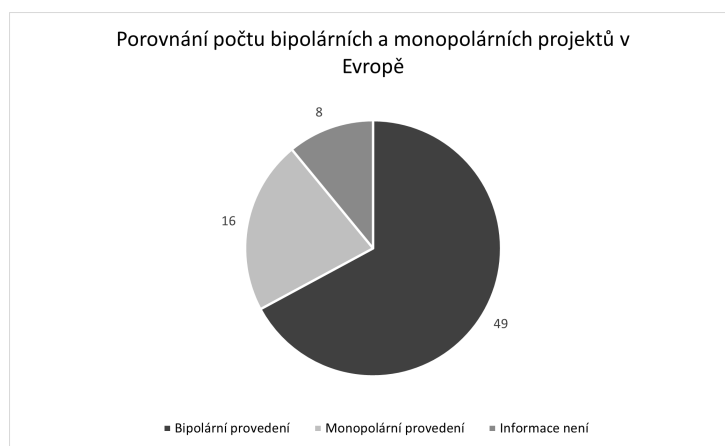
4.2.3 Monopolární vs Bipolární

Na obrázku 4.5 jsou znázorněny schémata monopolárního a bipolárního vedení.



Obrázek 4.5: Druhy obvodu VSC vedení [18].

Bylo analyzováno 73 projektů v Evropě, které buď už byly postaveny nebo jejich realizace teprve začne. Z toho 67 % projektů jsou bipolární provedení, 22 % - monopolární, o ostatních 11 % projektů informace chybí [14].

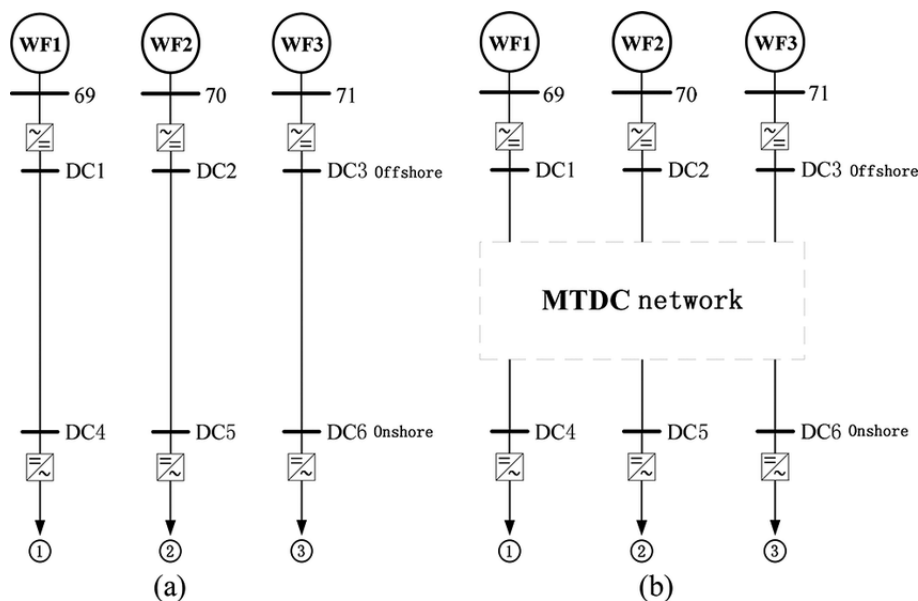


Obrázek 4.6: Porovnání počtu bipolárních a monopolárních projektů v Evropě

Po zvážení všech výhod a nevýhod obou typů topologie sítě a taky po průzkumu současných projektů bylo rozhodnuto použít bipolární provedení v praktické části bakalářské práce.

4.3 Síťové připojení

Existují dva způsoby síťového připojení - víc používané jsou bod-bod a méně časté jsou multi-terminální.



Obrázek 4.7: (a) Bod-bod; (b) Multi-terminální, MTDC - multiterminal DC [19].

4.3.1 Bod-bod

Bod-Bod je vedení, které spojuje dva měniče AC/DC na jednom konci a DC/AC na jiném. Pro připojení dalšího vedení k síti je potřeba dvou nových měničů DC/AC, AC/DC. Vedení bod-bod nelze považovat za propojenou síť HVDC, protože nejsou alternativní cesty k tokům energie v případě, že dojde k poruše vodiče.

Konfigurace bod-bod s průměrnou přenosovou schopností 1-2 GW se často staví v Evropě pro mezistátní vedení [20].

4.3.2 Multi-terminální

Multi-terminální topologie umožňuje připojení více než dvou koncových bodů. Oproti bod-bod, u multi-terminálního vedení místo dvou měničů jeden měnič a jeden jistič jsou použity pro zapojení dalších vedení do soustavy. Vynechání jednoho z měničů přináší ekonomické úspory a nižší ztráty energie. Také v případě poruchy jednoho z vodičů proud má pak alternativní cesty.

Hlavním důvodem proč multi-terminální topologie není tak populární je to, že obvykle HVDC vedení je postaveno mezi dvěma státy, tj. jsou jenom dva koncové body.

4.4 Měničové transformátory

Měničové transformátory v HVDC slouží hlavně k:

- spojení střídavého napětí vedení a napětí měniče;
- galvanickému oddělení AC a DC, aby stejnosměrné složky nevstupovaly do střídavého vedení;
- omezení zkratového proudu;
- potlačení harmonických kmitočtů a to především 5. a 7. [21].

Transformátor musí být navržen tak, aby vydržel stejnosměrné a střídavé namáhání, proto jsou kladeny větší požadavky na izolaci.

Pro dosažení elektrického posunu fáze o 30° a potlačení harmonických kmitočtů jsou nejčastěji používány Y-Y, Y- Δ zapojení.

4.5 Typy stožárů

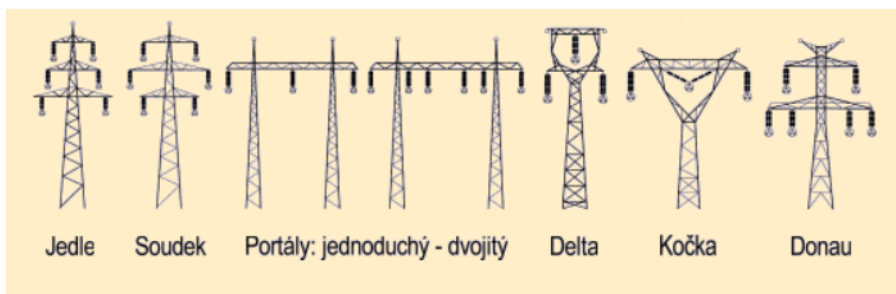
Základními prvky vedení velmi vysokého napětí jsou příhradové ocelové stožáry včetně zemních částí, konzol a armatury, izolačních prvků, vodičů, rozpojovacích prvků, ochranných zařízení, uzemnění apod [22].

Ve vedení se používají nosné stožáry, kotevní stožáry (umístěny ve vzdálenosti 3-5 km), rohové stožáry (slouží pro zatáčení vedení), koncové, odbočné, rozvodné nebo křížovatkové stožáry.

Stožáry se dále dělí na jednodřívkové (dřík je svislá část stožáru) nebo portálové. Portálový stožár je složen ze dvou dříků, které spojuje dlouhý příčník [23].

Konstrukce stožárů musí odolávat extrémním povětrnostním vlivům a námrazám.

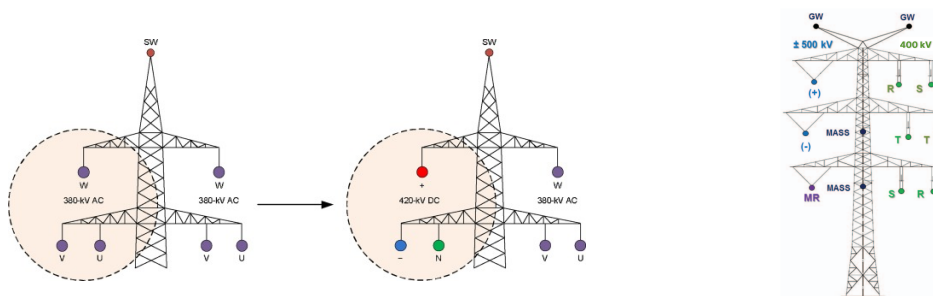
Typické typy stožárů, které se používají u HVAC vedení v ČR jsou na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Typy stožárů

4.5.1 Rekonstrukce stožárů pro kombinované HVDC a HVAC vedení

Některé úseky HVAC vedení, ze kterých se skládají navržené trasy (viz kapitola 5) byly postaveny ještě v 70. letech minulého století. Vzhledem k tomu, že předpokládaná životnost stožárů je 35 let, optimálním řešením bude úplná rekonstrukce dosavadních stožárů. Nová konstrukce stožárů bude umožňovat hybridní vedení: 400 kV HVAC a ± 500 kV HVDC, což je ekonomičtější řešení než výstavba dvou paralelních vedení.



Obrázek 4.9: Hybridní stožáry pro HVAC a HVDC [24] a [25].

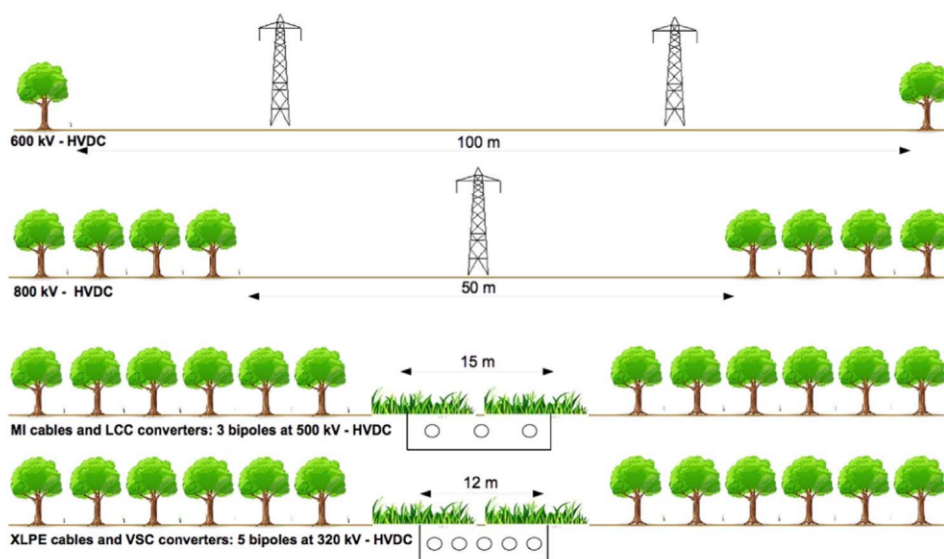
4.6 Ochranná pásma

Podél vedení se zřizují ochranná pásma, jejichž šířka činí 15 metrů pro střídavé vedení 220 kV a 20 metrů pro 400 kV od krajního vodiče. Uvnitř ochranných pásem se nesmí vyskytovat porost vyšší než 3 metry nad zemí. Navíc je stanovena minimální vzdálenost objektů od živých částí vedení, která činí 4 metry u vedení 220 kV a 5 metrů u vedení 400 kV [26].

U podzemního vedení je šířka potřebného prostoru pro dvojité kabelové vedení 400 kV do 40 m. Jediným omezením využívání půdy nad podzemním vedením je vysazování hluboce zakořeněných stromů.

V místě přechodu z venkovního na kabelové vedení (a naopak), je nutná oplocená přechodová stanice s ochranným pásmem 20 m od oplocení.

Ochranné pásmo stejnosměrného vedení je menší než u střídavého vedení. Elektrické pole je statické a proto nedochází k indukčním efektům jako u HVAC vedení. Jako příklad jsou na obrázku 4.10 různé konfigurace HVDC přenosu a jejich ochranná pásma.



Obrázek 4.10: Ochranná pásma [20].

4.7 Druhy vodičů

Pro stejnosměrné přenosy jsou k dispozici 4 hlavní technologie: MI, SCFF a XLPE, ACSR.

- MI se nepoužívají v kombinaci s HVAC kvůli problémům s elektrickým výbojem. V současné době jsou vyráběny pro napětí až ± 600 kV, maximální výkon 800 MW pro monopolární vedení a výkon 1600 MW pro bipolární. Jsou používány jak pro podmořské přenosy, tak i pro nadzemní.
- SCFF vodiče jsou vyráběny pro napětí ± 600 kV. Jsou obvykle používány pro podzemní vedení.
- XLPE jsou lehčí než MI vodiče, což vede k možnosti větší vzdálenosti mezi stožáry, poklesu nároků na izolaci a ke zmenšení poruchovosti vedení [27]. Jsou taky schopny přenášet větší hodnoty proudu. Kvůli svým vlastnostem XLPE jsou používány jenom pro technologii VSC. Přenosová schopnost jednoho vodiče je omezena na 1000 MW.
- ACSR jsou lana složená z vodičů ze dvou materiálů. Ocelové jádro zajišťuje dostatečnou mechanickou pevnost, hliníkovou částí efektivně protéká elektrický proud. Mají nízkou hmotnost a nízkou odolnost proti atmosférickým vlivům.

Pro výpočty nákladů a ztrát nového stejnosměrného vedení budou použity vodiče ACSR (AlFe).

Základní informace o dosavadních HVAC vedeních jsou představeny v příloze A.

Kapitola 5

Návrh tras nového HVDC vedení

5.1 Projekty ČEPS po přestavbě HVAC vedení

Číslo vedení	Trasa vedení	Délka km	Rok realizace	Záměr	Ztráty ¹ MW
445/446	Hradec Röhrsdorf	29,7 ²	2027-2028	Modernizace na vyšší parametry	0 - 19,4
430/830	Hradec Chrást	79,787	2028-2030	Zdvojení stávajícího vedení	-0,3 - 13,3
431/830	Přeštice Chrást	32,618	2024-2025	Zdvojení stávajícího vedení	-0,2 - 4,7
432/429	Přeštice Kočín	115,556	2022-2028	Zdvojení stávajícího vedení	-1 - 9
487/488	Hradec Vítkov	83	2022-2024	Přestavba na dvojitě vedení 400 kV Verněřov-Vítkov	-1,3 - 13,2
490/491	Přeštice Vítkov	86,163	2019-2021	Přestavba na dvojitě vedení 400 kV	-0,8 - 12,5

¹ Minimální a maximální ztráty při celoročním výpočtu.

² Vzdálenost do hranice s Německem.

Tabulka 5.1: Projekty ČEPS po přestavbě HVAC vedení

Projekty přispějí ke zvýšení stability přenosové soustavy ČR a rovnoměrnému rozložení tranzitních toků a zatížení. Dále je detailněji popsána rekonstrukce některých z úseků tras.

5.1.1 Vedení 445/446: Hradec –Röhrsdorf

Modernizace stávajícího vedení 400 kV mezi rozvodnou Hradec a Röhrsdorf bude realizován pouze v úseku na území ČR, a to ve stávající trase. Bude provedena výměna fázových vodičů, stávajících stožárů, zemnicích lan a izolátorových závěsů. Rekonstrukce umožní maximálně využít již existující přenosové schopnosti vedení

na straně zahraničního partnera, navýšení přenosové schopnosti na straně Česka o cca 400 A při zachování spolehlivého a bezpečného provozu přenosové soustavy [28].

5.1.2 Vedení 432/429: Kočín–Přeštice

97 km výstavby nového dvojitého vedení 400 kV proběhne ve stávající trase. Bude navýšena spolehlivost přenosu zejména pro stávající a plánované bloky jaderné elektrárny Temelín. Přínosy projektu jsou úhlová a napěťová stabilita, zvýšení přenosové schopnosti o 500 MW, integrace OZE 491 GWh/rok (snížení nákladů o 485 mil. Kč/rok).

5.1.3 Vedení 487/488: Hradec – Vítkov

70 km celkového vedení bude vystavěno ve stávajícím koridoru dvojitého vedení 220 kV Hradec – Vítkov. Nové vedení zajistí spolehlivý přenos 140 MW výkonu větrného parku z rozvodny 420 kV Verněřov. Přínosy projektu jsou úhlová a napěťová stabilita, zvýšení přenosové schopnosti o 500 MW, integrace OZE 668 GWh/rok (snížení nákladů o 655 mil. Kč/rok).

5.1.4 Vedení 490/491: Přeštice – Vítkov

Kolem 80 km bylo vystavěno ve stávajícím koridoru dvojitého vedení 220 kV Vítkov – Přeštice. Přínosy projektu jsou úhlová a napěťová stabilita, zvýšení přenosové schopnosti o 500 MW, integrace OZE 668 GWh/rok (snížení nákladů o 655 mil. Kč/rok).

5.1.5 Rekonstrukce rozveden a transformátorů

V roce 2017 v transformovně Hradec byly uvedeny do provozu transformátory s příčnou regulací pro vedení 445/446. Jedná se o dvojici dvou paralelně spojených transformátorů s výkonem 2x850 MVA. V současné době ČEPS připravuje modernizaci rozveden 420 kV s ohledem na požadavky zajištění zkratové odolnosti transformovny v základním zapojení, životnosti zařízení a budoucího zdvojení síťových vedení [29].

V rámci rekonstrukce rozvodny Kočín v roce 2020 byl instalován nový transformátor T402. Ukončení komplexní rekonstrukce je plánováno na rok 2023.

V roce 2017 byla vybudována nová rozvodna 420 kV Verněřov a v roce 2020 nová transformovna Vítkov.

5.2 Navržená HVDC trasa varianta 1

Číslo vedení	Trasa vedení	ve- dení km	Délka ve- dení km	Rok vý- stavby	Typ vedení	Ztráty HVAC GWh/rok
445/446	Hradec Röhrsdorf		81,54	1976	Dvojité vedení – Dunaj	29,7
430	Hradec Chrást		79,787	1978	Jednoduché vedení – větši- nou Kočka	10
431	Přeštice Chrást		32,618	1978	Převážně jednoduché ve- dení – Kočka	3,9
432	Přeštice Kočín		115,556	1979	Převážně jednoduché ve- dení – Kočka	13,4
473	Dasný Ko- čín		35,708	1995	Většinou jednoduché ve- dení – Kočka	4,6
Nové vedení	Dasný Ernstshofen		120-135 ¹		Výstavba no- vého vedení	

¹ Vzdálenost se bude lišit v závislosti na koridoru vedení (120 km je varianta vedení Dasný - Lipno - Aschach, 135 km je varianta vedení Dasný - Ernstshofen).

Tabulka 5.2: Navržená HVDC trasa varianta 1



Obrázek 5.1: Navržená trasa varianta 1. Modře je označen úsek Dasný - Lipno - Aschach, červeně je označen úsek Dasný - Ernstshofen.

Celková délka trasy vedení je 465,209 - 480,209 km.

5.2.1 Varianty výstavby nového vedení Dasný - Ernstshofen

Existují dvě varianty pro nové vedení Dasný - Ernstshofen:

1. Nová trasa nadzemního vedení HVDC podél silnice E55/dálnice A7. Přibližná délka vedení je 120 km (Dasný – rakouská hranice 50 km, hranice - Ernstshofen 70 km) [30].
2. Rozdělená do úseků trasa:
 - úsek Dasný - Lipno (68 km) HVDC nadzemní přenos podél stávajícího střídavého vedení 110kV s budováním nové přečerpávací vodní elektrárny Lipno-Dunaj;
 - úsek Lipno - Aschach (27 km) nové podzemní HVDC vedení;
 - úsek Aschach - (vedení St. Peter – Ernstshofen) (40 km) HVDC nadzemní vedení vedle stávajícího střídavého dvojitého vedení 220 kV a připojení k vedení St. Peter – Ernstshofen.

Výstavba vedení Dasný - Lipno - Aschach je technicky a ekonomicky náročná. Hlavními problémy jsou:

- výkop tunelu na 27 km podzemního vedení a taky vodního přivaděče představuje vytěžení přibližně $364\,500\text{ m}^3$ zeminy;
- stavební a montážní rozsah prací pro opravu a pro výměnu podzemního kabelu je srovnatelný s rozsahem prací pro výstavbu [26];

- průměrné náklady na výstavbu kabelového vedení (především kvůli výkopové práci) jsou 10x až 20x vyšší než náklady na výstavbu nadzemního vedení;
- náklady na výstavbu přečerpávací elektrárny Lipno jsou obrovské a jsou počítány v stovkách miliard korun.

Vzhledem k náročnosti výstavby úseku Dasný - Lipno - Aschach byla vybrána varianta přímého vedení Dasný - Ernsthofen podél silnice E55/dálnice A7.

5.3 Navržená HVDC trasa varianta 2

Číslo vedení	Trasa vedení	Délka vedení km	Rok výstavby	Typ vedení	Ztráty HVAC GWh/rok
445/446	Hradec Röhrsdorf	81,54	1976	Dvojité vedení – Dunaj	29,7
430	Hradec Chrást	79,787	1978	Jednoduché vedení – většinou Kočka	10
431	Přeštice Chrást	32,618	1978	Převážně jednoduché vedení – Kočka	3,9
432	Přeštice Kočín	115,556	1979	Převážně jednoduché vedení – Kočka	13,4
473	Dasný Kočín	35,708	1995	Většinou jednoduché vedení – Kočka	4,6
433	Dasný Slavětice	142,688	1982	Převážně jednoduché vedení – Kočka	17,4
437/438	Slavětice Durnrohr	96,021	1983	Dvojité vedení – Dunaj	19,2

Tabulka 5.3: Navržená HVDC trasa varianta 2



Obrázek 5.2: Navržená trasa varianta 2.

Celková délka trasy vedení je 583,918 km.

5.4 Navržená HVDC trasa varianta 3

Číslo vedení	Trasa vedení	Délka vedení km	Rok výstavby	Typ vedení	Ztráty HVAC GWh/rok
445/446	Hradec Röhrsdorf	81,54	1976	Dvojité vedení – Dunaj	29,7
223/224	Hradec Vítkov	69,962	1960	Dvojité vedení – převážně Soudek	9,2
221/222	Přeštice Vítkov	86,163	1963	Dvojité vedení – Dunaj	7,9
432	Přeštice Kočín	115,556	1979	Převážně jednoduché vedení – Kočka	13,4
473	Dasný Kočín	35,708	1995	Většinou jednoduché vedení – Kočka	4,6
433	Dasný Slavětice	142,688	1982	Převážně jednoduché vedení – Kočka	17,4
437/438	Slavětice Durnrohr	96,021	1983	Dvojité vedení – Dunaj	19,2

Tabulka 5.4: Navržená HVDC trasa varianta 3



Obrázek 5.3: Navržená trasa varianta 3.

Celková délka trasy vedení je 627,638 km.

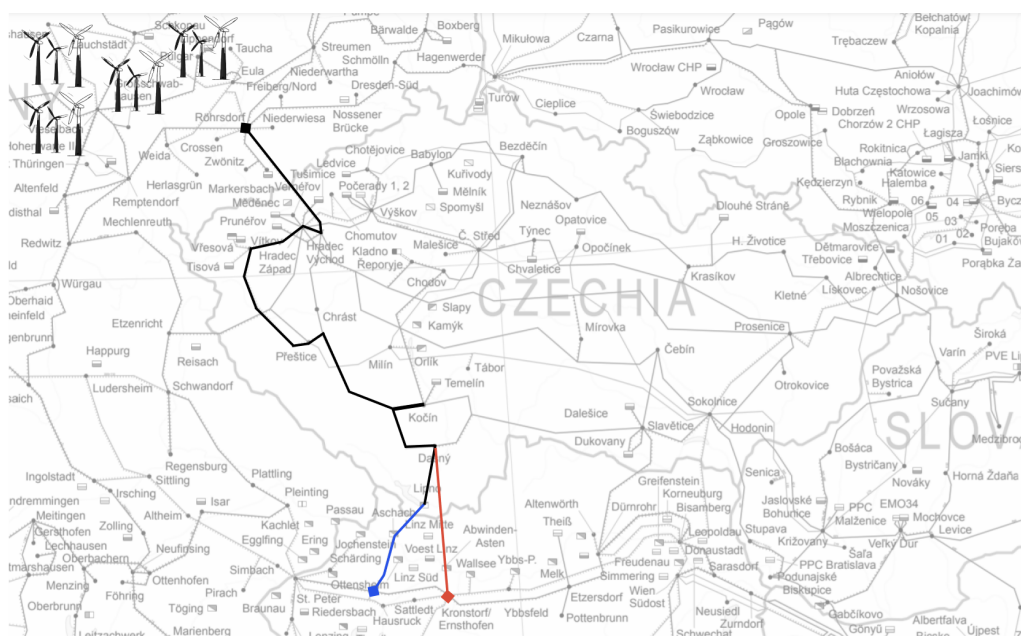
5.5 Navržená HVDC trasa varianta 4

Číslo vedení	Trasa vedení	Délka vedení km	Rok výstavby	Typ vedení	Ztráty HVAC GWh/rok
445/446	Hradec – Röhrsdorf	81,54	1976	Dvojité vedení – Dunaj	29,7
223/224	Hradec – Vítkov	69,962	1960	Dvojité vedení – převážně Soudek	9,2
221/222	Přeštice – Vítkov	86,163	1963	Dvojité vedení – Dunaj	7,9
432	Přeštice – Kočín	115,556	1979	Převážně jednoduché vedení – Kočka	13,4
473	Dasný – Kočín	35,708	1995	Většinou jednoduché vedení – Kočka	4,6
Nové vedení	Dasný – Ernsthofen	156-171 ¹		Výstavba nového vedení	

¹ Vzdálenost se bude lišit v závislosti na koridoru vedení.

Tabulka 5.5: Navržená HVDC trasa varianta 4

Celková délka trasy vedení je 508,929 - 523,929 km.



Obrázek 5.4: Navržená trasa varianta 4. Modře je označen úsek Dasný - Lipno - Aschach, červeně je označen úsek Dasný - Ernsthofen.

Kapitola 6

Náklady na výstavbu nového HVDC vedení

Cílem kapitoly jsou výpočet a porovnání investičních a provozních nákladů na výstavbu čtyřech různých variant HVDC vedení a následný výběr optimální trasy pomocí ekonomických ukazatelů.

6.1 Parametry navržených tras

Pro výpočet nákladů je zaprvé potřeba určit konfigurace vedení, vybrat součástky, odpovídající parametrům přenosu (přenosová schopnost, maximální proud atd). Hlavní komponenty HVDC vedení byly popsány v kapitole 4. Detail výpočtu některých parametrů (ztráty 6.1.1, průhyb 6.1.1) je uveden v dalších podkapitolách. V tabulce 6.1 je souhrn technického provedení čtyřech tras.

Provozní napětí a výkon byly zvoleny pro zajištění spolehlivého provozu soustavy v souvislosti s potřebou zvýšení přenosové schopnosti vedení mezi jednotlivými státy.

Pro správný návrh typu vodiče bylo nutné určit maximální proud podle vzorce 6.1.

$$I_p = \frac{P_{max}}{n \cdot U} \quad (6.1)$$

I_{max}	je proud jedním vodičem [A]
P_{max}	je maximální výkon jedním pólem [W]
U	je napětí vedení [V]
n	je počet vodičů v jednom pólu

Návrhy na hybridní (umožňující současné HVAC a HVDC vedení) stožáry pro jednoduché a dvojité vedení jsou představeny v příloze C.

		Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Výkon vedení	MW	3 000	3 000	3 000	3 000
Napětí vedení	kV	±500	±500	±500	±500
Maximální proud jedním pólem	A	3000	3000	3000	3000
Maximální proud jedním vodičem	A	750	750	750	750
Roční přenesená energie	GWh	6 784	6 784	6 784	6 784
Délka vedení	km	465,209	583,918	627,638	508,929
Délka vodiče s uvažováním průhybu	km	466,106	585,044	628,848	509,910
Průhyb vodiče	m	9,41	9,41	9,41	9,41
Maximální roční ztrátový výkon	MW	76	95	102	83
Roční ztráty na vedení	GWh	171	215	231	187
Roční ztráty v měničích	GWh	244	244	244	244
Typ síťového připojení		Bod-Bod	Bod-Bod	Bod-Bod	Bod-Bod
Typ vodiče		AlFe Falcon	AlFe Falcon	AlFe Falcon	AlFe Falcon
Počet vodičů v obou fázích	ks	8	8	8	8
Typ měniče		VSC	VSC	VSC	VSC
Potřeba přípravy nové trasy vedení		Ano	Ne	Ne	Ano
Počet měničových transformátorů	ks	4	4	4	4
Vzdálenost mezi stopy	km	0,35	0,35	0,35	0,35

Tabulka 6.1: Parametry navržených tras

6.1.1 Ztráty HVDC vedení

Pro výpočet nákladů na ztráty je potřeba střední cena elektřiny v hodinách špiček (podle OTE je označena jako vážený průměr cen Peak v roční zprávě o trhu 2022) za období 1.01.2022 - 1.04.2022. Dosažena cena je právě ve špičkách zatížení, protože ve špičkách ztráty jsou nejvyšší.

Ztráta elektrické energie v uvažovaném období T se určí podle vzorce 6.2.

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P_z(t) dt \quad (6.2)$$

ΔW je ztráta elektrické energie [Wh]

ΔP_z je ztráta elektrického výkonu [W]

T je období, za které počítáme ztráty [h]

Protože hlavním účelem dané bakalářské práce není přesné stanovení ztrát vedení, bude pro hodnoty ztrátové energie použit zjednodušený výpočet pomocí doby plných ztrát T_z 6.3.

$$\Delta W = \Delta P_z T_z \quad (6.3)$$

ΔW	je ztráta elektrické energie [Wh]
ΔP_z	je ztráta elektrického výkonu [W]
T_z	je doba plných ztrát [h]

Ztrátový výkon HVDC vedení

Všechny navržené trasy vedení budou schopny přenášet výkon 3000 MW a napětí ± 500 kV. Pro tyto parametry je zvolen vodič ACSR Falcon, jeho charakteristiky jsou uvedeny v příloze B. Vodič byl vybrán s uvazováním maximálního proudového zatížení, viz 6.1.

Pro výpočet maximálního ztrátového výkonu se použije zjednodušený vzorec 6.4.

$$\Delta P_z = I_{max}^2 \cdot R \cdot q \cdot n \cdot l \quad (6.4)$$

ΔP_z	je ztráta elektrického výkonu [W]
I_{max}	maximální proud, tekoucí jedním vodičem [A]
R	je odpor vodiče [Ω/km]
n	je počet pólů
q	je počet vodičů u jednoho pólu
l	je délka vodiče [km]

Doba plných ztrát

Pro období, za které počítáme ztráty, existuje vzorec pro výpočet doby plných ztrát [31]:

$$T_z = t \left(0,2 \frac{A}{P_m t} + 0,8 \frac{A^2}{P_m^2 t^2} \right) \quad (6.5)$$

T_z	je doba plných ztrát [h]
t	je počet provozních hodin zařízení [h]
A	je elektrická energie přenesená vedením za rok [Wh]
P_m	je roční maximum zatížení [W]

Dobu plných ztrát lze vyjádřit ze znalosti doby využití maximálního odebíraného výkonu na konci vedení pomocí vzorce:

$$T_z = 8760 \left(0,2 \frac{T_m}{8760} + 0,8 \frac{T_m^2}{8760^2} \right) \quad (6.6)$$

T_z	je doba plných ztrát [h]
T_m	je doba využití maxima celkové zátěže [h]

Průměrná doba využití maxima celkové zátěže u jednotlivého vedení přenosové soustavy ČR je okolo 4 000 h/rok. Z toho plyne, že T_z je kolem 2 261 h/rok.

Průhyb vodiče a celková délka vodiče

Délka vodiče mezi stožáry se určí podle 6.7.

$$L = x + \frac{8D^2}{3x} \quad (6.7)$$

- L je délka vodiče mezi stožáry [m]
 D je průhyb vodiče [m]
 x je vzdálenost mezi stožáry [m]

Pro přibližné výpočty průhybu vodiče je použit vzorec 6.8 a parametry ACSR, uvedené v příloze B. Vlivy jako pokrytí vodiče ledem, vystavení silnému větru, různé výšky země nejsou pro zjednodušení zahrnuty do výpočtu. Za normálního počasí mechanické napětí ve vodiči se pohybuje mezi 15 % - 20 % od jmenovité pevnosti vodiče [32].

$$D = \frac{w \cdot x^2}{8T} \quad (6.8)$$

- D je průhyb vodiče [m]
 w je váha vodiče [kg/m]
 x je vzdálenost mezi stožáry [m]
 T je mechanické napětí ve vodiči [N]

6.2 Provozní náklady

Provozní náklady jsou částí celkových nákladů a jsou počítány ročně. Skládají se z ročních nákladů na údržbu, které jsou odhadnuty na 0,5 % od celkových investičních nákladů a z ročních nákladů na ztráty, které jsou uvedeny v tabulce 6.1. Výpočet celkových ztrát na vedení je komplexní úloha. V bakalářské práci je počítáno jenom s podélnými ztrátami. O ostatních typech ztrát lze dočíst například v [33].

Ztráty se dělí na:

- podélné ztráty,
- ztráty korunou,
- ztráty svodem,
- ztráty v zařízeních (měniče, transformátory atd.).

Výpočty podélných ztrát jsou uvedeny v následujících podkapitolách, ztráty v měničích, transformátorech a ostatních zařízeních vedení jsou podle [34] 3,6 % od celkové roční přenesené energie. Ztráty v měničích se hodně liší u různých projektů a nelze je přesně stanovit bez provozních zkoušek [35].

Roční náklady v mil. Kč	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Celkem	2 172	2 404	2 486	2 255
Činné ztráty	816	1 025	1 101	893
Ztráty v měničích	1 164	1 164	1 164	1 164
Údržba	192	215	221	198

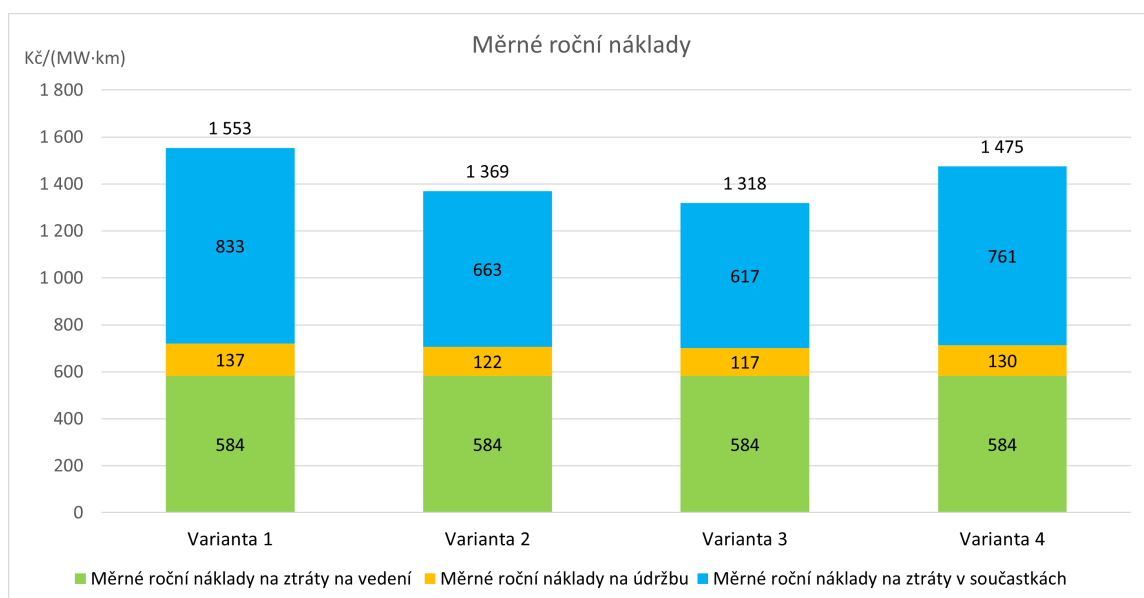
Tabulka 6.2: Souhrn ročních provozních nákladů

6.2.1 Porovnání měrných ročních nákladů různých variant vedení

Čtyři navržené varianty vedení mají různou délku a proto pro jejich porovnání byla zvolena metoda měrných ročních nákladů. Na obrázku 6.1 jsou znázorněny měrné roční náklady, vypočtené podle vzorce 6.9.

$$n_p = \frac{N_{vr}}{P_{max} \cdot l} \quad (6.9)$$

- n_p jsou měrné roční náklady [Kč/(MW · km)]
 N_{vr} jsou ekvivalentní roční náklady [Kč]
 P_{max} je maximální výkon vedení [MW]
 l je délka vedení [km]



Obrázek 6.1: Porovnání měrných ročních nákladů různých variant vedení.

Nejmenší měrné roční náklady $n_p = 1\,318$ Kč/(MW · km) má varianta 3, která má nejdelší délku vedení. Největší měrné roční náklady $n_p = 1\,553$ Kč/(MW · km) má varianta 1, která má nejmenší délku vedení.

6.3 Investiční náklady

Celkové investiční náklady na HVDC se skládají především z nákladů na vodiče, stožáry, měniče AC/DC a DC/AC, transformátory a jiné součástky, terénní úpravy pro výstavbu nových úseků vedení, zbourání původního vedení, průzkumné, geologické, projektové práce atd. Detailnější přehled je uveden v tabulce 6.3.

Data pro náklady na výstavbu nového vedení jsou převzaty z odhadu cen, provedeného americkou organizací MISO [36]. Skutečné ceny nákladů se mohou lišit v rozmezí od -50 % do +100 % od spočtené ceny investice.

U dvou variant bude potřeba budování úplně nových úseků vedení. Většinou nové vedení bude procházet přes pole, proto náklady na přípravu krajiny pro ochranná pásma nejsou vysoké.

Plocha půdy, kterou základy stožáru průměrně zaberou včetně ochranného pásma o šířce 1 m je cca 60 m^2 [26].

Současné vedení HVAC bude zbořeno kvůli vypršení jeho životnosti. Beton (vhodný jako druhotná surovina ve stavebnictví), železo a ocel budou prodány za 10 % od ceny nových materiálů.

Náklady na vývoj projektu jsou odhadnuty jako cca 7 % z celkové investice.

Věcná břemena

Se všemi vlastníky pozemků, na kterých proběhne výstavba vedení, musí být vypořádána majetková práva k pozemkům, většinou formou věcných břemen.

Provozovatel přenosové a distribuční soustavy je povinen zřídit věcné břemeno umožňující využití cizí nemovitosti nebo její části, a to smluvně s vlastníkem nemovitosti za jednorázovou náhradu. Odhadnutá jednorázová částka na základy stožárů včetně ochranného pásma o šířce 1 m činí $500 \text{ Kč}/\text{m}^2$ a na ochranná pásma o šířce 40 m činí $50 \text{ Kč}/\text{m}^2$.

Věcné břemeno umožňuje vést přes pozemek stavbu, umístit technická zařízení, umožňuje vlastníkovi a provozovateli vstup na pozemek za účelem kontroly, údržby a opravy [37].

Investiční náklady v mil. Kč	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Vodiče celkem	1 269	1 594	1 713	1 389
Cena vodiče	850	1 067	1 147	930
Instalace	365	458	492	400
Príslušenství	16	21	22	18
Ochranné vodiče	37	47	50	41
Měniče celkem	18 600	18 600	18 600	18 600
4 VSC měniče	18 567	18 567	18 567	18 567
Řízení a ochrana	33	33	33	33
Stožáry	8 442	10 596	11 389	9 235
Materiál železo	2 356	2 956	3 178	2 577
Materiál beton	1 958	2 458	2 642	2 142
Ostatní části	594	745	801	650
Instalace	3 534	4 435	4 767	3 865
Budování nových tras	258	-	-	258
Příprava krajiny	9	-	-	9
Věcná břemena na ochranná pásma	239	-	-	239
Věcná břemena na stožáry	10	-	-	10
Filtry, izolace, odpojovače atd	56	56	56	56
Měničové transformátory	3 230	3 230	3 230	3 230
Zbourání stávajícího vedení celkem	3 450	5 835	6 272	3 886
Zbourání	3 770	6 377	6 854	4 247
Prodej betonu, železa a oceli	320	541	582	361
Vývoj projektu	3 000	3 000	3 000	3 000
Celkem	38 305	42 909	44 260	39 654

Tabulka 6.3: Souhrn investičních nákladů

6.4 Optimální varianta, ekonomické ukazatele

Životnost investice je 40 let. Za diskontní sazbu byla dosažena míra výnosnosti investice WACC plus 2 % inflace. WACC je jedním z parametrů ovlivňujících výši nákladu regulovaných společností. Předpokládaná diskontní sazba v energetickém sektoru pro rok 2021-2025 podle ERU je 6,54 % před zdaněním.

NPV

Pro zjištění současné hodnoty budoucích ročních nákladů se použije ukazatel ekonomické efektivity NPV podle vzorce 6.10. Pro zjednodušení výpočtů lze před-

pokládat, že hodnoty ročních nákladů v jednotlivých letech jsou konstantní. Tato metoda se používá pro srovnání investičních a ročních nákladů čtyřech navržených tras.

$$NPV = CE + OE \cdot \frac{1 - (1 - r)^{-LT}}{r} \quad (6.10)$$

OE jsou konstantní roční náklady OpEx [Kč]

r je diskontní sazba [%]

LT je životnost projektu [rok]

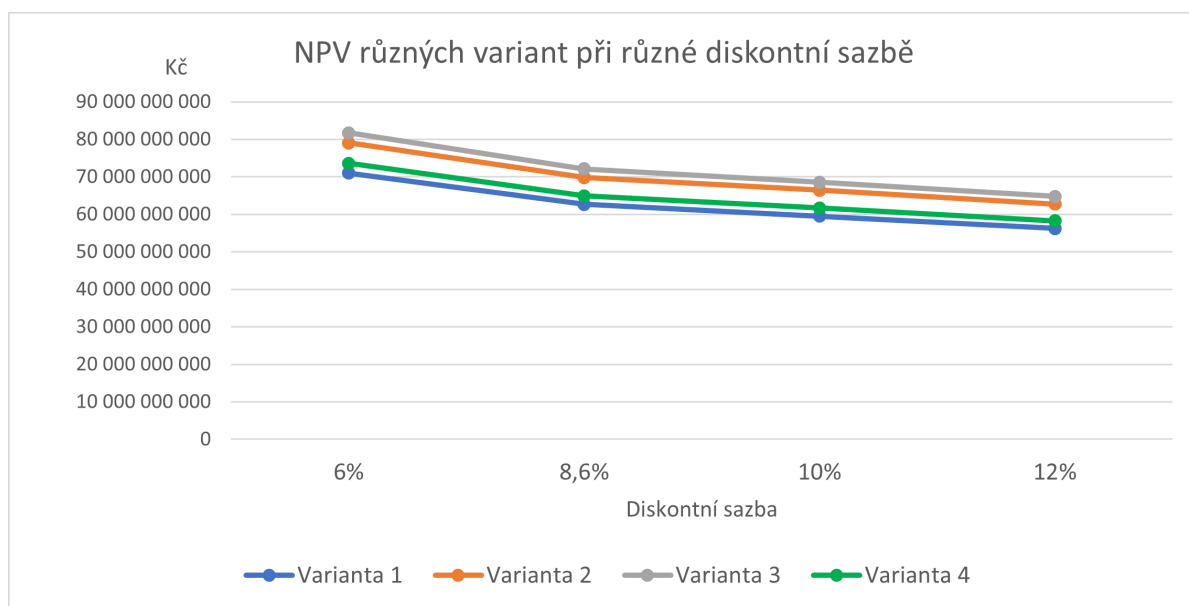
CE je cena počáteční investice CapEx [Kč]

V tabulce 6.4 je uveden souhrn NPV různých variant vedení. Nejmenší NPV má varianta 1 s NPV = 62 632 mil. Kč při diskontní sazbě 8,6 %. Pak následuje varianta 4, její NPV je 64 916 mil. Kč, nejvyšší NPV mají varianta 2 s NPV = 69 828 mil. Kč a varianta 3 s NPV = 72 112 mil. Kč.

V tabulce 6.4 a taky na grafu 6.2 jsou uvedeny výsledky jednoparametrové analýzy citlivosti při změně diskontní sazby.

NPV v mil. Kč	r	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
	6 %	70 989	79 075	81 680	73 595
	8,6 %	62 632	69 828	72 112	64 916
	10 %	59 547	66 415	68 580	61 713
	12 %	56 212	62 724	64 762	58 250

Tabulka 6.4: NPV různých variant při různé diskontní sazbě



Obrázek 6.2: NPV různých variant při různé diskontní sazbě.

RCF

Roční ekvivalentní peněžní tok nebo RCF se používá pro znázornění rozdělení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let po celou dobu životnosti projektů. Jedná se o čistou současnou hodnotu (NPV) projektu vynásobenou anuitním faktorem. Pro výpočet RCF se použije vzorec 6.11.

$$RCF = \frac{(1+r)^{LT} \cdot r}{(1+r)^{LT} - 1} \cdot NPV \quad (6.11)$$

r je diskontní sazba [%]

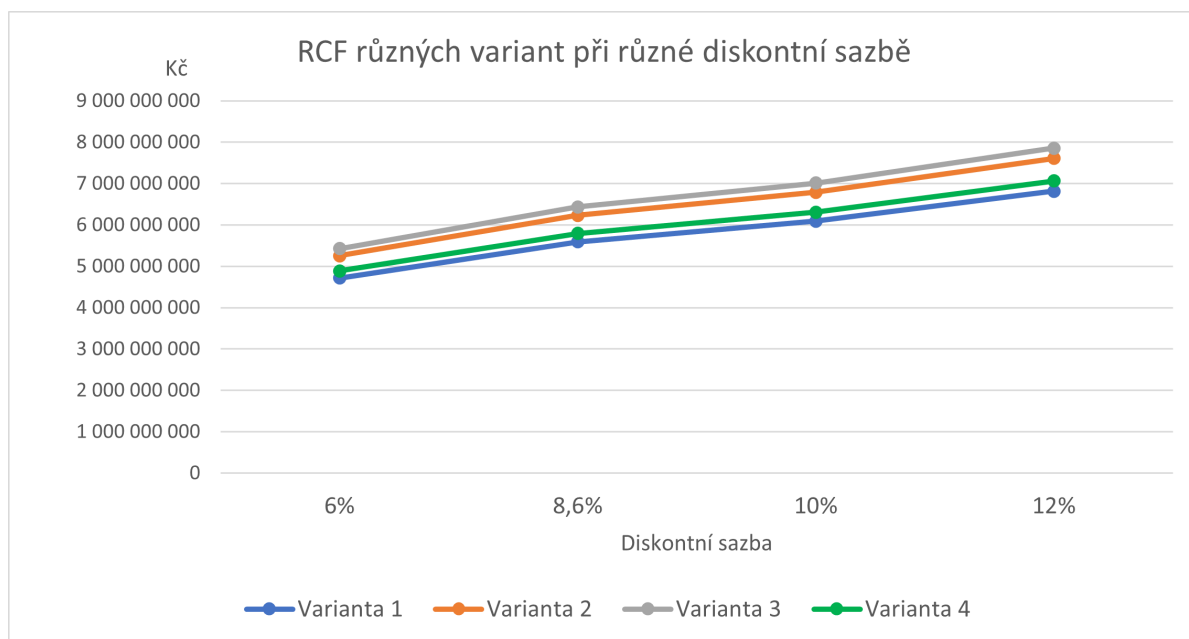
LT je životnost projektu [rok]

V tabulce 6.5 je uveden souhrn RCF různých variant vedení. Nejmenší RCF má varianta 1 s RCF = 5 593 mil. Kč při diskontní sazbě 8,6 %. Pak následuje varianta 4, její RCF je 5 797 mil. Kč, nejvyšší RCF mají varianta 2 s RCF = 6 235 mil. Kč a varianta 3 s RCF = 6 439 mil. Kč.

V tabulce 6.5 a taky na grafu 6.3 jsou uvedeny výsledky jednoparametrové analýzy citlivosti při změně diskontní sazby.

RCF v mil. Kč	r	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
	6 %	2 172	5 255	5 429	4 891
	8,6 %	5 593	6 235	6 439	5 797
	10 %	6 089	6 792	7 013	6 311
	12 %	6 819	7 609	7 856	7 066

Tabulka 6.5: RCF různých variant při různé diskontní sazbě



Obrázek 6.3: RCF různých variant při různé diskontní sazbě.

Závěr

V této bakalářské práci byly prozkoumány různé možnosti výstavby nového hybridního (HVDC a HVAC) vedení. Ekonomické porovnání provozních a investičních nákladů čtyřech navržených variant ukazuje, že první varianta trasy je optimálním řešením. Současná hodnota budoucích ročních nákladů při diskontní sazbě 8,6 % činí 62 632 milionů korun, roční ekvivalentní peněžní tok při stejné diskontní sazbě je 5 593 milionů korun.

První varianta je náročnější a složitější, protože bude potřeba výstavby úplně nového úseku HVDC vedení od české rozvodny Dasný do rakouské rozvodny Ernstthofen. Také budování nového úseku se může hodně prodloužit kvůli dlouhému procesu stavebních povolení a zkoumání ekologických a veřejných dopadů při výstavbě. Na druhou stranu, první varianta má nejmenší délku vedení a tím jsou sníženy náklady na provoz a počáteční investice.

Bakalářská práce přispívá k výzkumu v oblasti rekonstrukce a modernizace evropských přenosových soustav. Zahrnuje v sobě analýzu realizovaných projektů a taky návrhy na nové projekty v České republice. Navíc tato práce dává alternativní pohled na možnost přestavby zastaralé střídavé přenosové soustavy, než jsou klasická řešení společnosti ČEPS, která jsou popsány v páté kapitole.

Práce by mohla být podkladem pro budoucí zkoumání možnosti hybridního vedení jak v České republice tak i v ostatních zemích Evropy. Současné hybridní HVAC a HVDC vedení splňuje požadavky na zvýšení přenosové schopnosti při vedeních na dlouhé vzdálenosti. Následujícím krokem by byla detailnější analýza vlivu střídavého vedení na stejnosměrné a naopak. Též je třeba prozkoumat potenciální výnosy ze stavby HVDC při prodeji přeshraniční přenosové kapacity sousedním státům. Navíc by bylo vhodné výzkumem ověřit, jestli není potřeba prodloužení navržené trasy například do jiných částí Německa a Rakouska a nebo i do dalších zemí.

Jinou možností pokračování práce by mohl být studium realizace multiterminálního provedení s třemi body: Röhrsdorf, Hradec, Erntstthofen. Přidáním rozvodny v Hradci by byly zvýšeny přenosové schopnosti ČR a umožněn bezpečný a spolehlivý přenos elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie.

Bibliografie

1. KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR v kontextu evropského vývoje* | Národní digitální knihovna | Kramerius - Digital Library. Praha: ČEPS, 2004.
2. KUBÍN, Miroslav. Proměny české energetiky | Národní digitální knihovna | Kramerius - Digital Library. *Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2009*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:326ff3a0-ffa2-11e4-9d6f-005056827e51?page=uuid:061d0280-476d-11e5-8851-005056827e51>.
3. The 50 Year Success Story – Evolution of a European Interconnected Grid. *Secretariat of UCTE*. [B.r.]. Dostupné také z: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/110422_UCPTE-UCTE_The50yearSuccessStory.pdf.
4. ŠOLC, Pavel. Poruchy v provozu přenosových soustav v roce 2006 (aneb jak dál?) *Elektroenergetika, ČEPS, a.s.* [B.r.]. Dostupné také z: https://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0095/009517_SolcProEnergy_1.pdf.
5. MAJLING, Eduard. *Blackouty – 2. část: Významné události 21. století*. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/elektrina/blackouty-2-cast-vyznamne-udalosti-21-stoleti>.
6. *ČEPS, a.s. slaví 20 let od svého vzniku*. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceps-slavi-20-let-od-sveho-vzniku>.
7. *Elektrizační soustava ČR*. Dostupné také z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/dlouhodobavrovnovaha/mapy-ke-stazeni>.
8. GRANT, Jordon. Review of HVDC technology, applications and future prospects. 2017.
9. *HVDC Links in System Operations*. Dostupné také z: www.entsoe.eu.
10. *Informační portál energetické gramotnosti*. Dostupné také z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/prenosova-soustava>.
11. GALETKA, Martin. *Přenosová soustava elektrické energie*. Dostupné také z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>.
12. VRBA, Miroslav. *Jednotná evropská elektrizační přenosová soustava: skutečnost nebo fikce?* Dostupné také z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jednotna-evropska-elektrizacni-prenosova-soustava-skutecnost-nebo-fikce_15916.html.
13. *Voltage Source Converters*. Dostupné také z: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/voltage-source-converters>.

14. ALASSIA, Abdulrahman; BAÑALESA, Santiago; ELLABBANA, Omar; ADAMB, Grain; MACIVERB, Callum. HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, s. 25.
15. MUKHEDKAR, Dr. Radnya A. *LCC & VSC - Comparison*. Dostupné také z: https://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/LCC_vs_VSC_ALSTOM.pdf.
16. KAMALAPUR, G.; ARAKERI, Keerti. A Comparative Study of Monopolar and Bipolar HVDC Transmission Systems. 2020.
17. CONVENER, J. Lundquist; BARTHOLD, L.O.; BEUTEL, A.; BRITTEN, A.C.; DOUGLASS, D.A.; IGLESIAS, J.; JANKOV, V.; JARDINI, J.A.; MUF-TIC, D.; STEEVENS, S. *GUIDE TO THE CONVERSION OF EXISTING AC LINES TO DC OPERATION*. CIRGE, 2014. ISBN 978-2-85873-279-1.
18. LUNDBERG, P.; GUSTAFSSON, A.; JEROENSE, M. Recent advancements in HVDC VSC systems, HVDC and Power Electronics technology and development. *CIRGE*. 2015, s. 7.
19. BU, Siqi; DU, W.; WANG, H. Investigation on Probabilistic Small-Signal Stability of Power Systems as Affected by Offshore Wind Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014, roč. 30, s. 1–8. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2367019.
20. PIERRI, Erika; BINDER, Ole; HEMDAN, Nasser G.A.; KURRAT, Michael. Challenges and opportunities for a European HVDC grid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, s. 70. ISSN 1364-0321. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.233>.
21. CARLSON, Aake. Specific requirements on HVDC converter transformers. *ABB transformers*. 1996, s. 1–4.
22. SECKÝ, Filip. TECHNICKÁ POLITIKA - ROZVOJ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ A TECHNOLOGICKÝCH PRVKŮ V DSO PŘÍLOHA č.5 – KONCEPCE VENKOVNÍCH SÍTÍ VN. *ČEZ Distribuce, a. s.* 2006, s. 11.
23. *Elektrické stožáry aneb poznáš kočku na poli?* Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/slug/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli>.
24. NOVITSKIY, Alexander; WESTERMANN, Dirk. DC Components in the AC Networks Containing AC/DC Hybrid Transmission Lines. 2016, s. 6.
25. MALICKI, Pawel; PAPENHEIM, Simon; KIZILCAY, Mustafa. Shielding failure analysis of a hybrid transmission line with AC and DC systems on the same tower. *Electric Power Systems Research*. 2017, s. 2–8.
26. Výstavba přenosové soustavy / Building the transmission system. *ČEPS a.s.* 2012, s. 26.
27. CHENGYAN, Duan. *Cable systems for HVDC Power Transmission*. 2018. Bachelor thesis. České vysoké učení technické v Praze.
28. Desetiletý plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2021 – 2030. *ČEPS a.s.* 2020, s. 166.

29. *Šedesát let transformovny Hradec u Kadaně*. Dostupné také z: <https://allforpower.cz/rozvody-energii/sedesat-let-transformovny-hradec-u-kadane-538>.
30. DUŠKOVÁ, Petra. *Zvýšení přenosové schopnosti propojení Německa s Rakouskem přes území ČR*. 2020. Bachelor thesis. České vysoké učení technické v Praze.
31. Elektrotechnické předpisy ČSN. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách. 1963, č. ČSN 34 1610 (341610).
32. DOUGLASS, D.A.; THRASH, Ridley. *Sag and Tension of Conductor*. 2006, s. 39.
33. ING. LADISLAV RUDOLF, Ph.D. *KOMPLEXNÍ ROZBOR ELEKTRICKÝCH ZTRÁT VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY*. 2009. Habilitation thesis. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
34. GUL, Mehr; TAI, Nengling; HUANG, Wentao; NADEEM, Muhammad Haroon; AHMAD, Muhammad; YU, Moduo. *Technical and Economic Assessment of VSC-HVDC Transmission Model: A Case Study of South-Western Region in Pakistan*. 2019, s. 14.
35. STANOJEV, Ognjen; GARRISON, Jared; HEDTKE, Soren; FRANCK, Christian M.; DEMIRAY, Turhan. *Benefit Analysis of a Hybrid HVAC/HVDC Transmission Line: a Swiss Case Study*. 2019, s. 7.
36. *Transmission Cost Estimation Guide*. MISO. 2021, s. 2.
37. *Věcná břemena liniových staveb a jejich ocenění*. Dostupné také z: <https://www.odhadonline.cz/clanky/vecna-bremena-liniovych-staveb-a-jejich-oceneni-art172/>.
38. VYHODNOCENÍ ZTRÁT KORÓNOU A ZTRÁT NA IZOLÁTOROVÝCH ZÁVĚSECH V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČEPS, a.s. *EGÚ-Laboratoř velmi vysokého napětí a.s. Areál VÚ*. 2009, s. 31.
39. *Aluminium Conductor Steel Reinforced - ACSR*. Dostupné také z: <https://www.nexans.com.br/.rest/catalog/v1/product/pdf/ID540012805>.
40. VIQUES, Karol Patricia Cruz. *FEASIBILITY STUDY TO IMPLEMENT A HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT TRANSMISSION LINK*. 2017. Master thesis. České vysoké učení technické v Praze.

Příloha A

Parametry HVAC stávajícího vedení

Číslo	Název		délka	Typ stožáru	Typ vodiče	Typ izolátorů	Ztráty korunou kW - Rusko			
							sucho	sníh	dešť	námraza
V210	CHT-BEZ	jednoduché	93.07	PORTÁL	450 AlFe 6	LS 75/21	31.4	100.6	362.1	1195.3
V210	CHT-BEZ	dvojité	4.89	DONAU	450 AlFe 6	neuveđen	2.3	7.4	27.8	85.0
V210 celkem			97.96				33.7	108.0	389.9	1280.3
V211	VYS-CHT	jednoduché	25.86	PORTÁL	450 AlFe 6	neuveđen	8.7	27.9	100.6	332.1
V211	VYS-CHT	dvojité	4.33	DONAU	450 AlFe 6	neuveđen	2.1	6.6	24.7	75.4
V211 celkem			30.19				10.8	34.5	125.3	407.4
V216	PRE-MIL	jednoduché	63.84	PORTÁL	450 AlFe 6	neuveđen	21.6	69.0	248.4	819.8
V221	VIT-PRE	dvojité	86.11	DONAU	450 AlFe 6	neuveđen	40.8	130.9	489.9	1497.2
V222	VIT-PRE		86.11	DONAU	450 AlFe 6	neuveđen	40.8	130.9	489.9	1497.2
V223	HRA-VIT	jednoduché	0.12	SOUDEK	Crocus 412	2 2xLG 60/22/1200	0.1	0.2	0.8	2.2
V223	HRA-VIT	dvojité	69.95	SOUDEK	Crocus 412	1 2xLG 60/22/1200, 2 2xLG 60/22/1200	37.0	118.9	454.1	1311.4
V223 celkem			70.07				37.1	119.1	454.9	1313.7
V224	HRA-VIT	dvojité	69.95	SOUDEK	Crocus 412	1 2xLG 60/22/1200, 2 2xLG 60/22/1200	37.0	118.9	454.1	1311.4
V225	VYS-HRA	dvojité	30.07	PORTÁL	AL/ST 210/50	2 1xHubbell 234393-3001	15.3	48.7	160	568.9
V226	VYS-HRA	dvojité	30.06	PORTÁL	AL/ST 210/50	1 1xHubbell 234393-3001	15.3	48.7	160	568.9
V243	SOK-BIS	dvojité	50.57	SOUDEK	350 AlFe 4	1 2xLG 60/22/1200, 2 2xLG 60/22/1200	25.9	83.2	318.0	928.1
V244	SOK-BIS		50.57	SOUDEK	350 AlFe 4	1 2xLG 60/22/1200, 2 2xLG 60/22/1200	25.9	83.2	318.0	928.1
V245	LIS-BUJ	dvojité	23.38	SOUDEK	TACSR/ACS 380/50	2 1x H 220.120.2380.C.C.16L	13.9	44.7	170.9	487.9
V246	LIS-KPA		23.38	SOUDEK	TACSR/ACS 380/50	2 1x H 220.120.2380.C.C.16L	13.9	44.7	170.9	487.9
V251	PRN-SOK	dvojité	20.12	SOUDEK	350 AlFe 4	2 2xLS 75/21, 1 2xLS 75/21	10.3	33.1	126.5	369.3
V251	PRN-SOK		63.72	SOUDEK	350 AlFe 4	LS 75/21, PSG 21	32.7	104.8	400.7	1169.4
V251 celkem			83.84				43.0	137.9	527.2	1538.7
V252	PRN-SOK	dvojité	20.12	SOUDEK	350 AlFe 4	2 2xLS 75/21, 1 2xLS 75/21	10.3	33.1	126.5	369.3
V252	PRN-SOK		63.72	SOUDEK	350 AlFe 4	LS 75/21, PSG 21	32.7	104.8	400.7	1169.4
V252 celkem			83.84				43.0	137.9	527.2	1538.7
V253	LIS-PRN	dvojité	71.33	SOUDEK	350 AlFe 4	LG 60/22, 1 4xL100BH550	43.8	140.8	537.2	1522.1
V254	LIS-PRN		71.33	SOUDEK	350 AlFe 4	LG 60/22, 1 4xL100BH550	43.8	140.8	537.2	1522.1
V270	LIS-PBY	jednoduché	61.37	PORTÁL	350 AlFe 4	2 2xLG 60/22, 2 2xLS 75/21	27.0	86.7	329.4	987.3
V280	SOK-SEN	jednoduché	66.21	PORTÁL	450 AlFe6	1 2xLS 75/21, 2 2xLS 75/21	22.4	71.6	257.6	850.3

Obrázek A.1: Základní parametry a ztráty korunou na vedeních 220 kV za různého počasí [38].

Číslo vedení	Rozvodna A	Rozvodna B	Délka	R_1	X_1	B_1	P_p	Z_v	I_{max}	U_n	ΔP_j
			km	[Ω]	[Ω]	[μS]	[MW]	[Ω]	[A]	[kV]	[MW]
430	HRADEC	CHRÁST	79,787	1,98	24,58	318	575	278	1968	400	4,3571
431	CHRÁST	PŘEŠTICE	32,618	0,75	9,16	122	584	274	1600	400	1,6998
432	PŘEŠTICE	KOČÍN	115,556	2,64	33	426	575	278	1800	400	5,8348
445/446	HRADEC	ROHRSDORF	81,54	2,46	21,89	349	639	250	1740	400	2 x 6,53035
473	KOČÍN	DASNÝ	35,708	0,83	10	141	601	266	1800	400	1,98363
221/222	VÍTKOV	PŘEŠTICE	86,163	5,32	34,7	221	122	396	656	220	2 x 1,71647
223/224	HRADEC	VÍTKOV	69,962	6,23	26,85	174	123	393	580	220	2 x 1,98744
433	DASNÝ	SLAVĚTICE	142,688	3,31	40,04	539	587	273	1968	400	7,61073
437/438	SLAVĚTICE	DURNROHR	96,021	2,08	29,57	345	547	293	2000	400	2 x 4,19666

Obrázek A.3: Parametry střídavého vedení, kde R_1 je odpor vedení, X_1 je indukční reaktance, B_1 je kapacitní vodivost, P_p je přirozený činný výkon, Z_v je vlnová impedance, I_{max} je maximální proud, U_n je jmenovité napětí, ΔP_j jsou činné ztráty.

Příloha B

Parametry vodiče AlFe Falcon

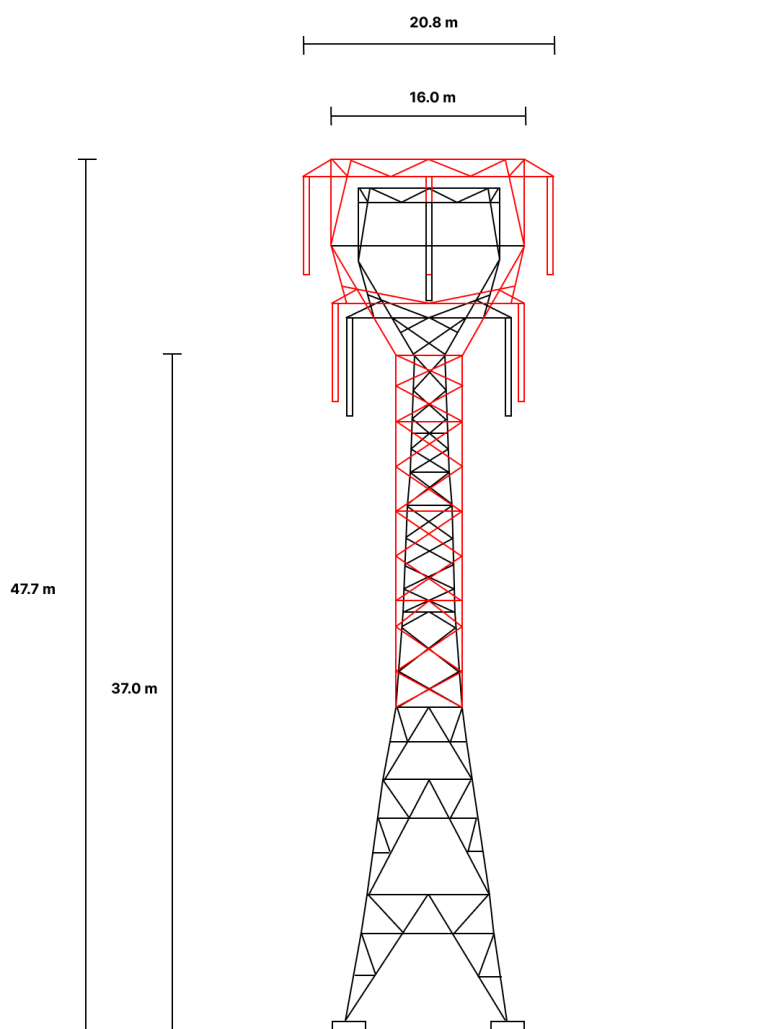
CHARACTERISTICS

Construction characteristics	
Type of cable	Falcon
Type of conductor	Circular, stranded
Conductor material	aluminum / Steel Core
Conductor flexibility	-
Conductor shape	Circular non compacted
Dimensional characteristics	
Conductor cross-section	1590 kcmil
Aluminium cross-section	806.23 mm ²
Conductor cross-section	908.66 mm ²
Number of aluminium wires	54
Diameter of aluminium wires	4.36 mm
Number of steel wires	19
Diameter of steel wires	2.62 mm
Diameter of steel core	13.1 mm
Conductor diameter	39.26 mm
Average geometric radius	0.01589 m
Aluminium content	2244.6 kg/km
Steel content	801.7 kg/km
Approximate weight	3046.3 kg/km
Nominal outer diameter	39.26 mm
Number of cores	1
Number of round wires	-
Electrical characteristics	
Max. DC resistance of the conductor at 20°C	0.0361 Ohm/km
Max. electric resistance AC 60Hz 75°C	0.045 Ohm/km
Inductive reactance	0.3124 Ohm/km
Capacitive reactance	0.1877 MOhm.km
Ampacity	1360.0 A
Mechanical characteristics	
Rated breaking load (Class A)	24779 kgf
Rated breaking load (Class B)	24095 kgf
Hardness type	1350-H19
Usage characteristics	
Length	1250 m
Reel net weight	3800 kg
Packaging	Reel 210/100

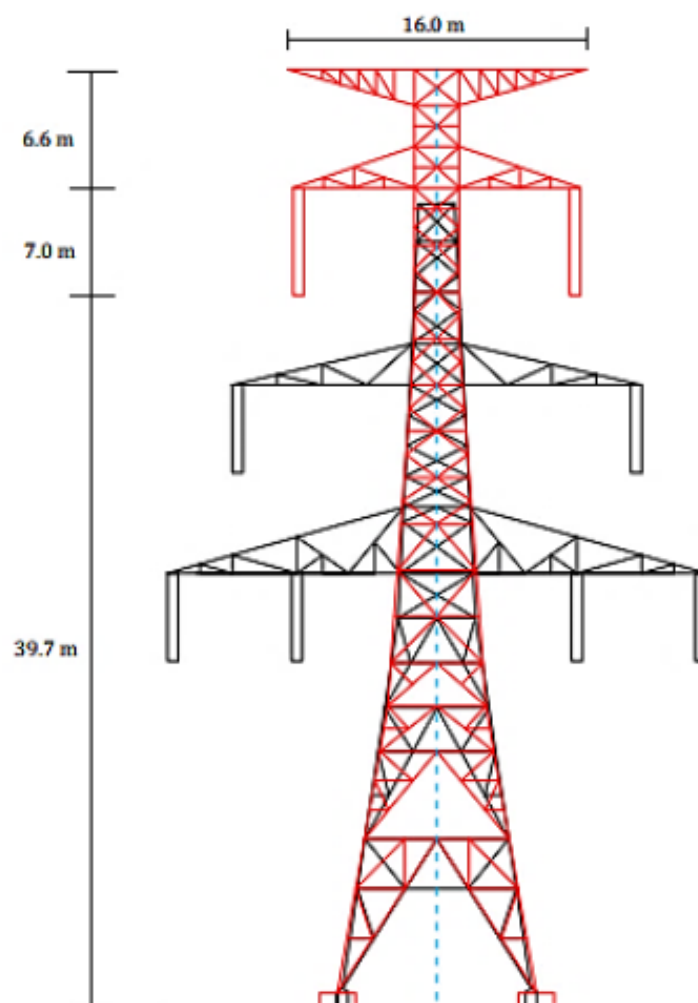
Obrázek B.1: Charakteristiky vodiče AlFe Falcon pro ± 500 HVDC vedení [39].

Příloha C

Navržené hybridní stožáry



Obrázek C.1: Navržený hybridní stožár pro jednoduché vedení. Černým je označena konstrukce klasického 400 kV HVAC vedení, červeným je navržený hybridní stožár s dvěma póly ± 500 kV HVDC a 400 kV HVDC.



Obrázek C.2: Navržený hybridní stožár pro dvojité vedení[40]. Černě je označena konstrukce klasického 400 kV dvojitého HVAC vedení, červeně je navržený hybridní stožár s dvěma póly ± 500 kV HVDC a dvojitým 400 kV HVDC.