

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nové trendy v budování přenosových vedení

Martin Kononov

Plzeň 2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

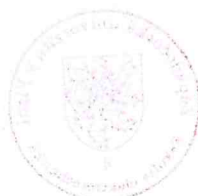
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KONONOV**
Osobní číslo: **E15N0104P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Nové trendy v budování přenosových vedení**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

Nové trendy v budování přenosových vedení.

1. Popište možnosti přenosu elektrické energie v systémech se dvěma napěťovými hladinami a v systémech AC/DC.
2. Porovnejte oba druhy vedení z hlediska přenášeného výkonu a Joulových ztrát.
3. Vyšetřete rozložení elektrického a magnetického pole v okolí vedení pro obě varianty.
4. Provedte vyhodnocení vlivu vedení na životní prostředí s ohledem na hygienické normy.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

1. **Overhead lines, CIGRE green book, 2015**
2. **T.J.Hammons, V.F. Lescale: State of the Art in UHV Transmission, Proc.IEEE, Vol.100, No.2, 2012**
3. **D.A. Woodford, L.O.Barthold, D.A.Douglas: Upgrading AC Transmission to DC for Maximum Power Transfer Capacity, IEEE 2008**

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

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



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na porovnání střídavých (AC/AC) a hybridních (AC/DC) vedení z hlediska přenášeného výkonu, Jouleových ztrát a rozložení elektromagnetického pole v jejich okolí. V práci jsou popsány možné varianty obou vedení pro různé stožárové konstrukce. Na základě popsaného postupu je proveden analytický výpočet intenzity elektrického a magnetického pole a vykresleny 3D grafy. V závěru jsou obě varianty vedení porovnány s ohledem na vypočtené parametry a hygienické normy.

Klíčová slova

Hybridní vedení, AC/DC, HVDC, Jouleovy ztráty, přenášený výkon, hygienické normy, výpočet intenzity magnetického pole, výpočet intenzity elektrického pole

Abstract

Kononov, Martin. New trends in overhead transmission lines building [Nové trendy v budování přenosových vedení]. Pilsen, 2017. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia, Faculty of electrical engineering. Department of Electroenergetics and Ecology. Supervisor: Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.

The Master's thesis is focused on comparison of AC/AC and hybrid (AC/DC) transmission lines from the point of view of the transmitted power, Joule losses and the electromagnetic field in the vicinity of the transmission lines. In the thesis are described possible versions of both types of transmission lines. According to the described method the calculation of electric and magnetic field intensity and 3D charts are carried out. In conclusion the results of both types of transmission lines are compared.

Key words

Hybrid transmission lines, AC/DC, HVDC, Joule losses, transmission power, safety standards, calculation of electric field intensity, calculation of magnetic field intensity

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 19. 5. 2017

.....

Martin Kononov

Obsah

1	Úvod	3
2	Střídavá vedení AC/AC	4
2.1	Dosahované napěťové hladiny ve světě.....	5
3	Stejnoseměrná vedení	6
3.1	Historický vývoj HVDC vedení v PS	6
3.2	Popis řetězce HVDC vedení	6
3.2.1	Měničový transformátor	7
3.2.2	Měniče v režimu střídač / usměrňovač	7
3.2.3	Vyhlazovací tlumivky a filtry.....	8
3.3	Konfigurace DC sítí.....	9
3.3.1	Jednopolová konfigurace.....	9
3.3.2	Dvoupopolová konfigurace	9
3.3.3	Tříopolová konfigurace	10
3.3.4	Vedení nulové délky (Back-to-back vedení).....	11
3.4	Výhody a nevýhody DC oproti AC vedení.....	11
3.4.1	Výhody DC.....	11
3.4.2	Nevýhody DC	12
3.5	Porovnání AC a DC vedení	12
4	Hybridní vedení AC/DC	14
4.1	Stožáry vhodné pro hybridní vedení.....	15
4.2	Přenášený výkon	16
4.3	Vliv koróny	17
4.3.1	Hluk	17
4.3.2	Rádiové rušení (Radio Interference RI)	18
4.4	Ztráty korónou	19
4.4.1	Výpočet ztrát korónou na DC vedení	20

4.4.2	Výpočet ztrát korónou na AC vedení	21
4.4.3	Výpočet celkových ztrát korónou.....	22
4.5	Jouleovy ztráty	24
4.5.1	Výpočet pasivních parametrů	24
4.5.2	Výpočet Jouleových ztrát	25
4.6	Izolátory hybridního vedení.....	26
5	Výpočet intenzity elektrického a magnetického pole	28
5.1	Řešení magnetického pole	28
5.2	Řešení elektrického pole	29
5.2.1	Výpočet nábojů v M-vodičovém systému	29
5.2.2	Výpočet nábojů v M-vodičovém systému se zemnicími lany.....	30
5.2.3	Výpočet intenzity elektrického pole	31
5.3	Analytický výpočet	33
5.4	Výsledné rozložení elektrického pole.....	35
5.4.1	AC/AC vedení	35
5.4.2	AC/DC vedení	37
5.5	Výsledky výpočtů magnetického pole.....	41
5.5.1	AC/AC vedení	41
5.5.2	AC/DC vedení	43
5.6	Speciální AC/DC vedení.....	45
6	Závěr	48
	Přílohy.....	53

Seznam symbolů a zkratk

ENTSO-E.....	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
FACTS.....	Flexible Alternating Current
HVAC.....	High Voltage Alternating Current Transmission System
HVDC.....	High Voltage Direct Current
SVC.....	Static Var Compensator
LCC.....	Line Commutated Convertor
CSC.....	Current Source Convertors
SCC.....	Self Commutated Convertor
VSC.....	Voltage Source Convertors
RI.....	Radio Interference
ESDD.....	Equivalent Salt Deposit Density
SNR.....	Signal-to-Noise Ratio

Seznam veličin

E ($V \cdot m^{-1}$).....	intenzita elektrického pole
Q (C).....	elektrický náboj
φ (V).....	elektrický potenciál
\mathbf{A}	matice potenciálových koeficientů
α_{ii} ($V \cdot C^{-1}$).....	vlastní potenciálový koeficient
α_{ij} ($V \cdot C^{-1}$).....	vzájemný potenciálový koeficient
\mathbf{B}	matice kapacitních koeficientů
β_{ii} ($F \cdot m^{-1}$).....	kapacitní koeficient vodiče na jednotku délky
β_{ij} ($F \cdot m^{-1}$).....	kapacitní koeficient vodiče i na vodič j
H ($A \cdot m^{-1}$).....	intenzita magnetického pole
B (T).....	magnetická indukce

P_{AC} (MW).....	přenášený výkon AC vedení
P_{DC} (MW).....	přenášený výkon DC vedení
ΔP_k (MW)	ztráty korónou
ΔP_j (MW).....	Jouleovy ztráty
α (K^{-1}).....	teplotní součinitel odporu
δ (-).....	poměrná hustota vzduchu
r_{ekv} (m)	ekvivalentní poloměr svazkového vodiče
h (m).....	výška vodiče nad zemí
d (m).....	vzdálenost mezi dvěma vodiči

1 Úvod

Zvyšující se spotřeba, rostoucí požadavky na přenos elektrické energie, ale také vysoké přetoky energie ze severu na jih Evropy přes území států v rámci ENTSO-E vedou ke snaze zavádět nové technologie. Současně potřeba co nejefektivnějšího přenášení výkonu na dlouhé vzdálenosti vede ke zkoumání stejnosměrných vysokonapěťových vedení jako nového řešení přenosu elektrické energie. Připustíme-li ale skutečnost, že výstavba nových koridorů stejnosměrných linek je z důvodu majetkoprávních vztahů velice omezená, přistupuje se k možnosti přezbrojení již stávajících linek a vzniku tzv. hybridních vedení.

Jako hybridní vedení označujeme vedení, u kterých je stožárová konstrukce využívána pro vedení střídavé i stejnosměrné tedy AC/DC. Problematika těchto kombinovaných vedení je značně komplikovaná z mnoha důvodů, ať už se jedná o vybudování nových stejnosměrných stanic, úprava stávajících stožárů či řešení možného vzájemného ovlivňování při běžném provozu nebo při poruchových stavech. Kompletní řešení vedení AC/DC vyžaduje pozornost mnoha oborů jak v elektrotechnice (např.: výkonové tyristory ve stanicích, speciální vypínače a přístroje) tak i v jiných než elektrotechnických oborech (speciální stožárové konstrukce, popřípadě majetkoprávní vztahy). Tato diplomová práce je ale zaměřena na samotné vedení a analýzu jeho parametrů.

Cílem této diplomové práce je popsat možnosti přenosu elektrické energie na vedení se dvěma střídavými napěťovými hladinami (AC/AC) a na vedení hybridním (AC/DC). Dalším cílem práce je oba druhy vedení porovnat z hlediska velikosti Joulových ztrát, možného přenášeného výkonu a vlivu na životní prostředí (rozložení elektrického a magnetického pole v okolí vedení). Na základě výpočtů a grafických znázornění následně vyhodnotit, které z vedení je vhodnější pro výstavbu.

2 Střídavá vedení AC/AC

Všechny elektrizační soustavy po celém světě jsou tvořeny výrobkami, elektrickými stanicemi a sítěmi střídavého napětí. Provozovatelé přenosových soustav operují pak s vedeními a se stanicemi o napěťových hladinách VVN, ZVN a UVN. K vysokým napěťovým hladinám na vedení se přistupuje zejména z důvodu nižších ztrát a přenosu co možná největšího výkonu. Vybudovaná vedení elektrizačních soustav však v dnešní době přestávají stačit požadované přenosové kapacity, a tak je potřeba stavět nová vedení nebo přezbrojovat stávající koridory. Ukazuje se, že přezbrojení stávajícího vedení je dnes stále častější, protože výstavba nových přenosových linek je z hlediska doby trvání výstavby a vyjednávání majetkoprávních vztahů nevýhodná. Přistupuje se tedy k návrhům přezbrojovat dvojitá vedení buďto na vyšší napěťovou hladinu (ČR vedení 220 kV na vedení 400 kV) nebo k rozsáhlejší zásahům do koridorů v podobě vystavění speciálních stožárů až pro čtyři potahy jedné napěťové hladiny nebo v podobě sdružených vedení.

K dalším možnostem [1] navýšení přenosových schopností venkovních vedení a efektivnějšího využití stávajících prvků elektrizačních soustav je využití klimaticky závislého řízení zatížitelnosti na základě okolních podmínek. V závislosti na okolních podmínkách by pak bylo možné v daných časových intervalech měnit horní mez zatížení každého prvku elektrizačních soustav a získat tak možnost překonat běžné i mimořádné stavy bez nutného vypínání prvků ES. Takové řešení ale vyžaduje online řízení všech prvků soustavy, což je v případě ČR momentálně těžko dosažitelné. Oproti dnešním neměnným mezím by se v takovém systému zvýšila vlivem flexibility spolehlivost a bezpečnost dodávky.

K největším trendům patří zapojování prvků výkonové elektroniky do všech úrovní elektrizačních soustav. Vzhledem k tomu, že výkonová elektronika zaznamenala obrovský pokrok z hlediska dosahovaných parametrů, nastává také rozvoj zařízení známé pod zkratkou FACTS. Tato zařízení jsou instalována v přenosových soustavách za účelem zvýšit přenosovou schopnost systému a zlepšit říditelnost celé soustavy. Zařízení FACTS se používá zejména pro regulaci napětí a jalových výkonů, regulaci výkonových toků a stabilitu sítí. Mezi výhody použití zařízení FACTS v elektrizačních soustavách oproti klasickým řešením řadíme zvýšení dynamické stability soustavy a omezení kruhových toků, lepší využití stávajících zařízení přenosových soustav, zvýšení spolehlivosti a dostupnosti přenosové soustavy a zvýšení kvality dodávky pro citlivé odběry. Klasická řešení jsou samozřejmě levnější, ale svými dynamickými vlastnostmi ne vždy vyhovují požadavkům. Podle způsobu

připojení zařízení k soustavě můžeme rozlišovat FACTS systémy sériové, paralelní a kombinované.

2.1 Dosahované napěťové hladiny ve světě

V 70. letech 20. století se hned v několika zemích světa začaly objevovat výzkumy na realizovatelnost venkovních přenosových vedení o napěťové hladině 1000 kV a výše. Na základě zkoumání byly postaveny zkušební několikasetmetrové projekty v Rusku, Japonsku, USA, Brazílii a Číně. Při takto vysokých napěťových hladinách se na zkušebních projektech měřil hluk, rádiové rušení, koróna, produkce ozónu korónou a mnoho dalších parametrů. Výsledkem všech studií bylo potvrzení, že vedení o napětí 1000 kV je proveditelné. První realizovaná vedení [2, 3] o napětí 1000 kV byla v Japonsku a v Rusku. Kvůli problémům s provozem bylo však napětí ruského vedení po několika letech sníženo na hladinu 500 kV, později pak opět zvýšeno na dnešní hladinu 750 kV. Japonsko své vedení provozuje již od spuštění na hladině 500 kV se snahou v budoucnu přejít na hladinu 1 MV. Nejrozsáhlejší studie byly provedeny v Číně a USA, kde kromě střídavých vedení byla zkoumána také vedení stejnosměrná. U stejnosměrných vedení se potvrdila realizovatelnost napěťové hladiny ± 800 kV DC. Zatímco v roce 2005 [3] na světě neexistovala vedení s napěťovými hladinami nad 1000 kV AC a ± 800 kV DC, dnes je v Číně [4] v provozu minimálně pět střídavých vedení o napětí 1000 kV a sedm stejnosměrných vedení o napětí ± 800 kV. Střídavá elektrická vedení dalších států zabývající se ultra vysokonapěťovým přenosem dosahují zpravidla nejvyššího napětí 750 kV.

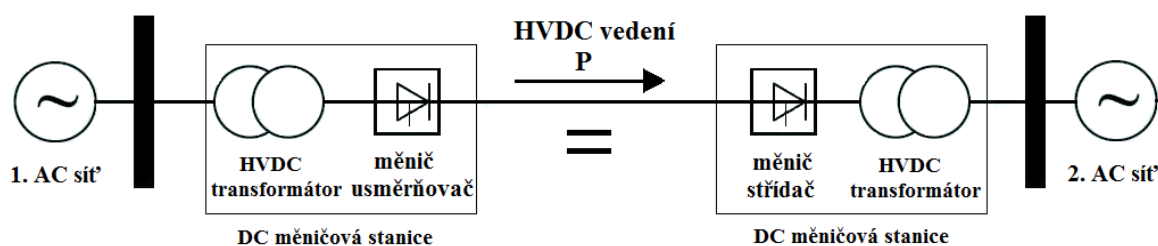
3 Stejnoseměrná vedení

3.1 Historický vývoj HVDC vedení v PS

Stejnoseměrná vedení se ve světě dnešní energetiky používají nejčastěji v elektrické trakci. V dnešní době se ale čím dál častěji objevují v oblasti přenosu energie zejména na dlouhé vzdálenosti. Z historického hlediska [5–6] byl upřednostňován střídavý rozvod elektrické energie z důvodu snadné transformace pomocí transformátoru. Díky vynálezu rtuťových usměrňovačů a následně tyristorových měničů ve 20. století se však problémy s přeměnou DC napětí na vyšší napěťové hladiny odstranily. V roce 1954 realizovala firma ABB [6] první komerční stejnoseměrný přenos podmořským kabelem mezi Švédskem a ostrovem Gotland, přenášející výkon 20 MW na vzdálenosti 96 km při napětí 100 kV. V dalších letech se vybuďovalo podmořské spojení pomocí HVDC kabelů mezi dalšími státy jako např.: propojení Anglie a Francie, Sardinie a Korsiky, Itálie a Řecka a mnoha dalších. Nejdelší podmořský kabel o délce 580 km je uložen mezi Norskem a Nizozemím (NorNed) a je provozován na napětí ± 450 kV s přenášeným výkonem 700 MW. Řada dalších přenosů je stále ve výstavbě, přičemž se běžně dosahuje přenášených výkonů 1000 MW a napětí ± 800 kV. Nejdelší venkovní vedení o napětí ± 800 kV DC, o přenášeném výkonu 6400 MW měří 1953 km a je ve vlastnictví čínské státní sítě [4].

3.2 Popis řetězce HVDC vedení

Vedení HVDC se skládá ze třech základních prvků – z měniřny v režimu usměrňovače na začátku vedení, ze samotného vedení a z měniřny v režimu střídače na jeho konci. Mezi základní prvky měniřen řadíme měničové transformátory, pulzní tyristorové nebo IGBT měniče, vyhlazovací tlumivky, ochrany a střídavé a stejnoseměrné filtry. Na obrázku č. 1 je znázorněné zjednodušené schéma řetězce HVDC vedení.



Obr. 1: Schéma přenosu pomocí HVDC vedení

3.2.1 Měničový transformátor

Měničový transformátor [7-8] je srdcem celého HVDC přenosu. Mezi jeho hlavní funkce patří přenos výkonu mezi AC systémem a DC vedením a zvýšení velikosti napětí na vstupní hodnotu měniče, který je připojen hned za transformátorem. Měničový transformátor se také používá k zajištění náležitého rozsahu odboček pro část DC napětí. Pro takto vysoké napětí musí být transformátor konstrukčně připraven na zvýšené namáhání izolace stejnosměrným napětím a průchodem vyšších harmonických složek proudu. Obrázek HVDC měničového transformátoru je v příloze A na obrázku A1.

3.2.2 Měniče v režimu střídač / usměrňovač

Měničové prvky [8] jsou zpravidla 12-ti pulzní, složeny ze dvou v sérii zapojených 6-ti pulzních můstkových měničů. U přenosu nejvyšších výkonů se kvůli velikosti všech zařízení a nezbytných izolačních vzdáleností někdy realizuje rozdělení na dva sériově či paralelně spojené 12-ti pulzní měniče. Každá varianta má své výhody či nevýhody a řešení problematiky je velice náročné. Samotné používané měniče se dělí dle typu výkonových součástí na dva typy – CSC (Current Source Convertors) a VSC (Voltage Source Convertors). Oba dva typy mají své výhody a nevýhody popsané níže.

3.2.2.1 CSC (LCC)

CSC (také označovány jako Line Commutated Convertors – LCC) měniče [7] využívají pouze tyristory. Komerčně se tyto měniče označují HVDC Classic (firma ABB i Siemens). Tyto měniče se chovají jako ideální proudové zdroje a proud teče přes vedení stále v jednom směru. Pro změnu toku výkonu je na tyristory potřeba přivést napětí opačné polarity – tedy je potřebná změna polarity napětí v obou měnících na začátku a konci vedení. Měniče CSC (LCC) jsou objemnější než měniče VSC. Dle [7] se jedná o nejekonomičtější variantu, jak přenášet výkon přes dlouhé vzdálenosti s maximálním přenosem výkonu až 8000 MW. Zábor plochy například pro 600MW přenos se odhaduje na 200 x 120 x 22 m.

3.2.2.2 VSC (SCC)

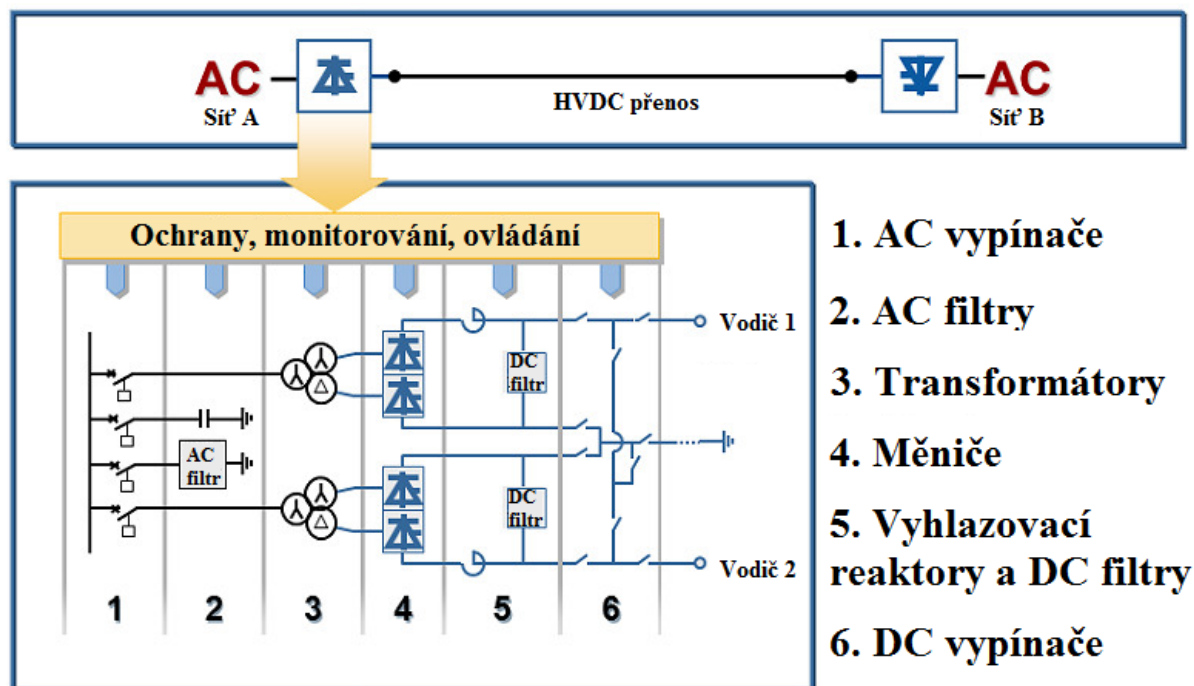
Modernější měniče VSC (také označovány jako Self Commutated Convertors – SCC) [7, 9] využívající IGBT tranzistory umožňují vypnutí a zapnutí pomocí řízeného hradla. Tranzistory jsou nezávislé na komutaci, což umožňuje spínat prvky s vyšší frekvencí. Tato výhoda má ale svou daň v podobě vyšších ztrát. Díky řízenému vypínání tranzistorů lze měničem dodávat jalový výkon do střídavé sítě. Měniče VSC jsou komerčně označovány jako

HVDC Light (ABB) či HVDC plus (Siemens) a dosahují výkonů od 50 MW do 2500 MW. Rozměrově jsou i o polovinu menší než měniče CSC, a tak se využívají ve stanicích, které jsou budovány na otevřeném moři, kde je potřeba co největší úspora místa (záběr plochy se odhaduje např. pro přenos 1200 MW jako plocha o rozměrech 100 x 150 x 20 m). Obrázek měničů VSC [7] je v příloze A.

3.2.3 Vyhlažovací tlumivky a filtry

Vyhlažovací tlumivky, jak již název napovídá, vyhlazují DC proud a omezují vznik přerušovaných proudů (způsobují přepětí). Další funkci plní jako omezovače nadproudů či brání vzniku rezonance.

Vlivem použití polovodičové techniky vznikají při nesymetrickém odběru vyšší harmonické, které je potřeba odstranit pomocí filtrů. Filtry jsou umístěny na straně střídavé (AC filtry) i na straně stejnosměrné (DC filtry).



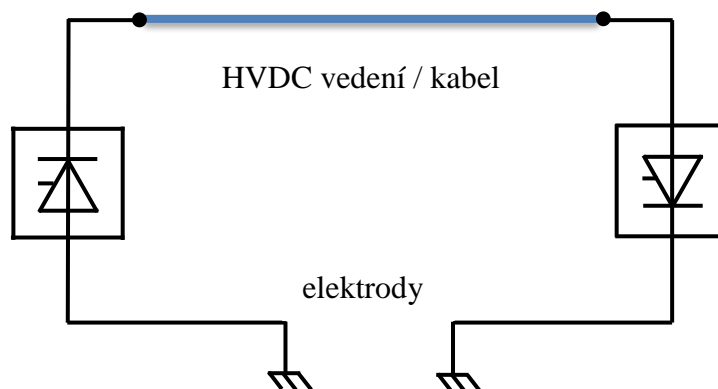
Obr. 2: Schéma měničky s jednotlivými prvky [převzato z 11]

3.3 Konfigurace DC sítí

Existují v zásadě tři typy konfigurací [11] a to jednopólové, dvoupólové nebo tzv. vedení nulové délky v angličtině označováno jako Back-to-back vedení. Spojením jednopólové a dvoupólové konfigurace vznikla konfigurace trojpólová.

3.3.1 Jednopólová konfigurace

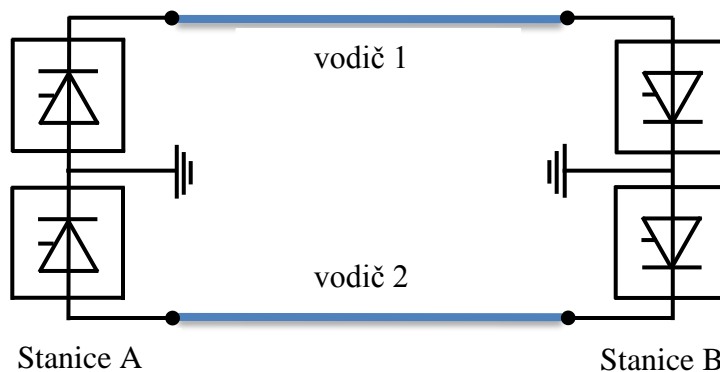
Jak už název napovídá, toto uspořádání [11] využívá k přenosu výkonu pouze jeden vodič, který propojuje měnírny. Tato konfigurace se používá pro přenos výkonu do 1500 MW. Návrat proudu mezi měnírnami je uskutečněn zemí případně mořem pomocí elektrod. V mnoha případech ale není z důvodu již dříve vybudované infrastruktury či z důvodu omezení životního prostředí použití elektrod možné. V takových případech se pro zpětnou cestu proudu používá přídatný vodič, který bohužel zvyšuje jak investiční náklady tak i ztráty. Tato konfigurace je tedy ideální pro podmořské kabely, kde je často možné použít elektrody pro návrat proudu.



Obr. 3: Jednopólové uspořádání s návratem proudu zemí

3.3.2 Dvoupólová konfigurace

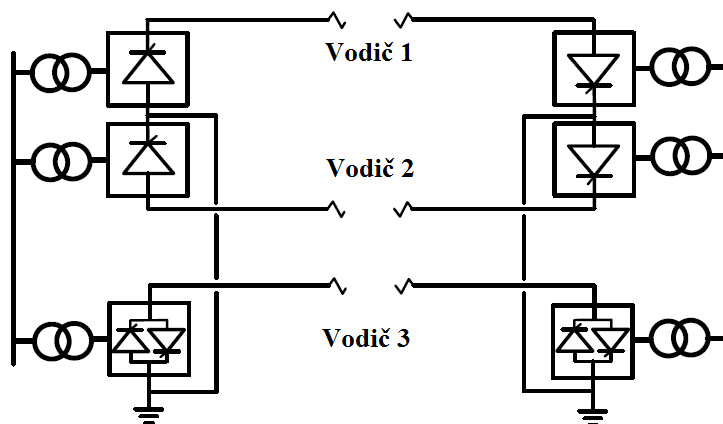
V případě, že požadovaný přenos výkonu převyšuje kapacitu přenosu jednopólového uspořádání, použije se uspořádání dvoupólové umožňující přenos výkonu až 10 GW. Toto uspořádání využívá dva vodiče se stejnou velikostí napětí, ale s opačnou polaritou. Pokud je k dispozici zpětná cesta zemí, teče mezi měnírnami v bezporuchovém stavu pouze malý vyrovnávací proud. Během údržby či poruchy na jednom z vodičů může být stále přenášen výkon druhým vodičem a jako návratovou cestu proudu využít zem nebo třetí vodič, pokud je k dispozici. To přináší do systému větší spolehlivost provozu a oproti jednopólovému uspořádání dvojnásobnou přenosovou kapacitu. V případě poruchy jednoho z měničů lze provozovat vedení jako jednopólové.



Obr. 4: Dvoupólové uspořádání se zemním návratem [11]

3.3.3 Třípólová konfigurace

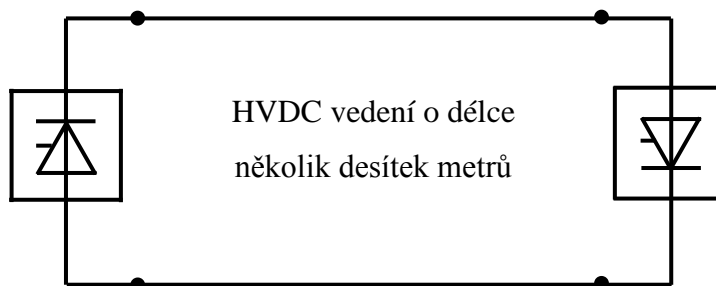
Kombinací již dobře technicky zvládnutých dvoupólových a jednopólových konfigurací vzniká speciální třípólová konfigurace využívající pro přenos tři vodiče podobně jako střídavý systém. Třípólový systém zachovává stejnou polaritu na dvou vodičích, zatímco na třetím reverzibilním vodiči je schopný měnit polaritu napětí i proudu. Tím se odstraní předpokládaný návrat proudu zemí, který je spojen s jednopólovou konfigurací. Změna polarity je docílena dvěma antiparalelně zapojenými měniči, jak je vidět na obrázku 5. Díky třetímu reverzibilnímu vodiči lze docílit takřka nulového zpětného proudu zemí. Taková konfigurace umožňuje maximální přenos pomocí všech třech vodičů.



Obr. 5: Schéma třípólové konfigurace [12]

3.3.4 Vedení nulové délky (Back-to-back vedení)

Vedení nulové délky se používá pro propojení dvou sousedních nesynchronních AC sítí nebo sítí s rozdílnou frekvencí. Usměrňovač i střídač jsou umístěny a propojeny stejnosměrným vedením v jedné měnící stanici. Tato vedení pracují s mnohem nižším napětím než dálková vedení, což vede i ke zmenšování izolačních vzdáleností a tím i zmenšení celé stanice. Tato vedení se používají také pro určení toku energie v AC sítích nebo pro poskytnutí více jalového výkonu do AC sítě.



Obr. 6: Vedení nulové délky (Back-to-back)

3.4 Výhody a nevýhody DC oproti AC vedení

Stejnoseměrná vedení vysokého napětí mají oproti střídavému vedení výhody i nevýhody [5], které jasně definují oblast vhodného využití DC vedení v praxi.

3.4.1 Výhody DC

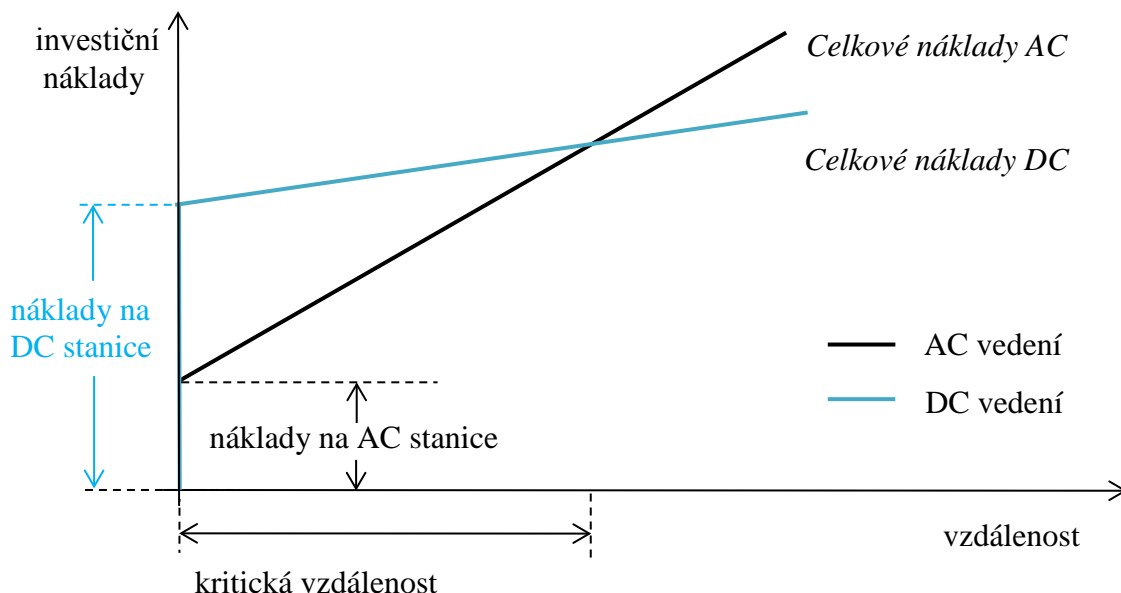
Mezi hlavní výhody DC vedení patří absence frekvence, fáze a i jalového výkonu, což vede ke snadnějšímu řízení přenosové soustavy, kdy v případě využití DC vedení není nutné udržovat všechna zařízení v synchronismu a není třeba kompenzovat jalový výkon jako u AC vedení. Další podstatnou výhodou jsou menší ztráty na vedení na velké vzdálenosti, které jsou dle původních průzkumů [13] nižší o jednu třetinu než u střídavých za předpokladu přenášení stejného výkonu na obou vedeních. Při přenosu na dostatečně velké vzdálenosti mají DC vedení nižší pořizovací náklady než AC vedení [13]. V případě poruchy jednoho vodiče na běžně používaných dvoupólových uspořádáních lze vedení stále provozovat s poloviční kapacitou, což přispívá ke stabilitě přenosové soustavy. K přenosu na rozdíl od třífázových střídavých vedení postačují pouze dva vodiče případně pouze jeden za předpokladu návratu proudu zemí. Při stejné efektivní hodnotě napětí jsou zapotřebí menší izolační vzdálenosti oproti AC vedení. Další výhodou může být i možnost částečného či kompletního přezbrojení střídavých vedení na hybridní či stejnosměrné.

3.4.2 Nevýhody DC

K nevýhodám HVDC vedení [8, 13, 14] patří stále obtížná změna napětí oproti jednoduché a ekonomicky výhodné transformaci střídavého napětí. Další a největší nevýhodou jsou několikanásobné náklady na měnírny oproti nákladům na výstavbu střídavých stanic. HVDC vedení je tedy vhodné jen pro přímé spojení dvou míst na dlouhou vzdálenost, protože pro každou odbočku z kmenového vedení by se musela znovu vybudovat další finančně nákladná měnírna, což by navýšilo celkové náklady na výstavbu. Při kratších vzdálenostech přenosu se výrazně projeví ztráty na polovodičových součástkách v koncových měnírnách vedení. U vysokých napěťových hladin (nad ± 500 kV) se projevuje u vodiče s kladným potenciálem vyšší výskyt korónového výboje, který je spojen s hlukem.

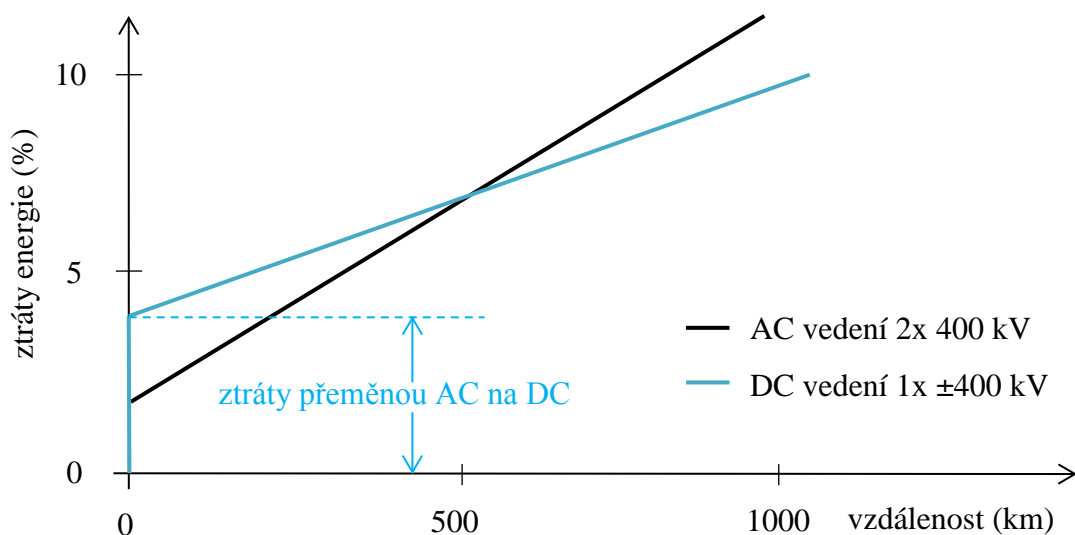
3.5 Porovnání AC a DC vedení

Při porovnávání AC a DC vedení z hlediska investičních a provozních nákladů zjistíme, že počáteční investice do stejnosměrných stanic je více než dvojnásobná oproti investici do střídavé technologie. Provozní náklady linek jsou ale odlišné, což vyplývá z velikosti ztrát na obou vedeních. Z grafu na obr. 7 lze pak odvodit, že výstavba DC vedení se vyplatí jen pro velké vzdálenosti. Kritická vzdálenost, od které je DC vedení levnější, závisí na mnoha parametrech, a tak je poměrně náročné přesně vypočítat její hodnotu.



Obr. 7: Porovnání závislosti investičních nákladů vedení AC a DC na délce vedení [7]

Porovnáme-li AC a DC vedení z hlediska ztrát [7], zjistíme, že u DC vedení je značná ztráta energie již při přeměně druhu napětí v elektrické stanici (viz obr. 8). S rostoucí délkou linky však ztráty DC vedení rostou méně než na AC vedení. Pro extrémně dlouhé koridory pak vykazují AC vedení větší energetické ztráty. Rozdíl velikosti ztrát je dán počtem vodičů, na kterých ztráty vznikají (DC 2 vodiče, AC 3 vodiče). Ke ztrátám na AC vedení se také přidávají ztráty jalové, které se na DC vedení nevyskytují.



Obr. 8: Porovnání závislosti ztrát na vedení AC a DC na délce vedení [7]

4 Hybridní vedení AC/DC

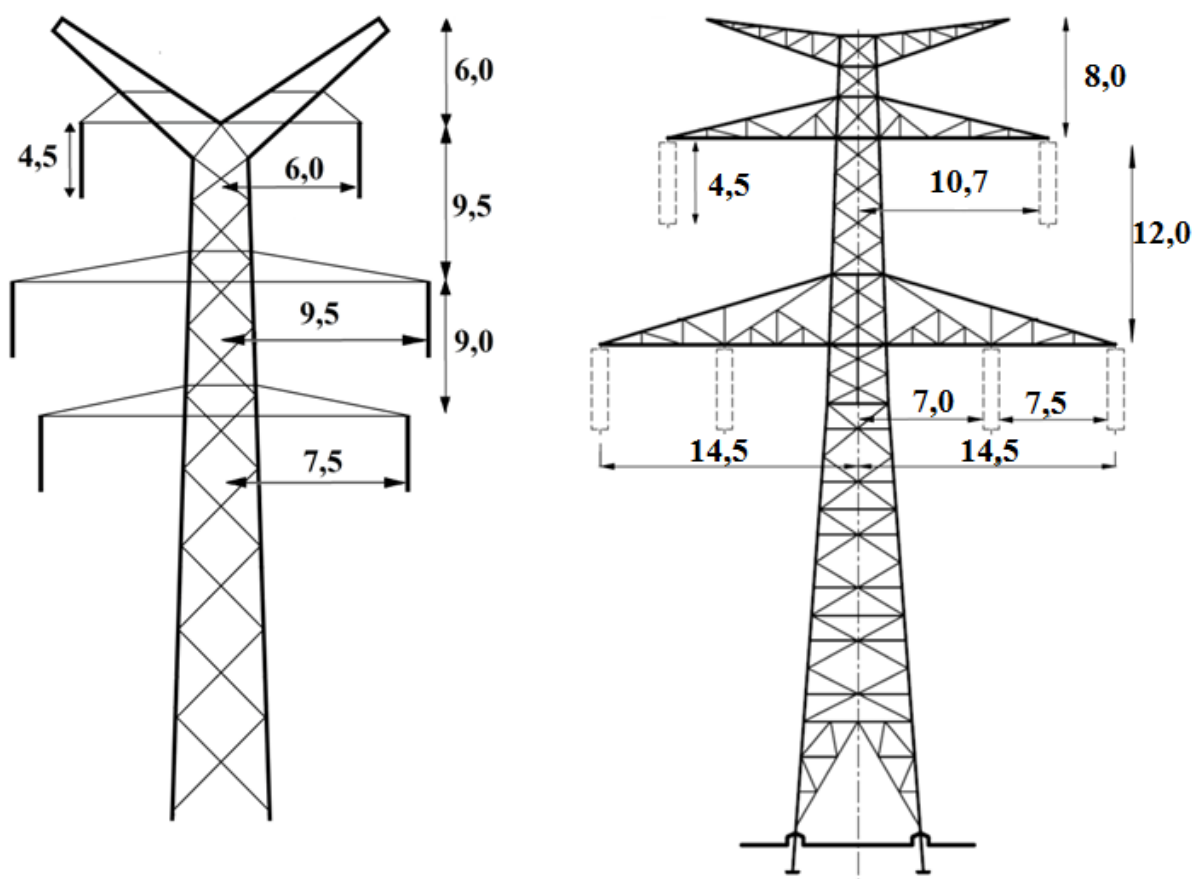
K řešení přenosu výkonu pomocí hybridního vedení se přistupuje až za určitých podmínek, které nastaly např. ve Spolkové republice Německo. Jelikož je prakticky nereálné z důvodu majetkoprávních vztahů a obtížného vykupování pozemků propojit sever a jih země novým koridorem, je nutné přezbrojit stávající střídavé vedení. Protože je ale na trase ze severu na jih střídavé napětí neustále potřeba, začalo se uvažovat o přezbrojení pouze jednoho potahu ze stávajícího dvojitého vedení. Vzniklé hybridní vedení by vyřešilo problematickou situaci zatěžování střední Evropy přetoky elektrické energie z větrných parků na severu Německa na jih Evropy. K navýšení přenosové kapacity pomocí hybridního vedení se tedy přistupuje až tehdy, když je výstavba nového koridoru tak časově náročná, že je vzhledem k rostoucí spotřebě nutné najít jiné a rychlejší řešení.

Přiblížením dvou druhů napětí dojde ale k vzájemnému ovlivňování obou vedení – ve střídavém elektromagnetickém poli stávajícího střídavého vedení vznikne stejnosměrná složka, naopak v elektromagnetickém poli od stejnosměrného vedení vznikne složka střídavá. Jak bude vzájemné ovlivnění velké, záleží na napěťové hladině, konfiguraci fází a na vzdálenostech jednotlivých lan. Pokud se bude uvažovat o přezbrojení jednoho potahu ve dvojitém vedení, je vhodné zvolit takovou napěťovou hladinu, aby nebylo nutné měnit konstrukci stožáru a délku izolátorů z důvodu izolačních vzdáleností.

Od roku 2010 bylo vypracováno mnoho studií a výzkumů zabývajících se proveditelností hybridního vedení v centrální Evropě. Mezi nejčastěji zkoumanou problematiku týkající se AC/DC vedení patří maximální možná velikost napěťové hladiny DC vedení, výpočet rozložení elektromagnetického pole v okolí vedení, vliv koróny, izolační vzdálenosti, rádiové rušení či měření rušivého hluku. Kompletní analýza zahrnuje mnohem více problémů (sycení přístrojových transformátorů a jejich následná nepřesnost, zvýšení hluku transformátorů, vznik vyšších harmonických, indukované napětí...), avšak ve studiích zabývajících se přestavbou dvojitého vedení na hybridní se nejvíce zkoumají právě výše zmiňované otázky.

4.1 Stožáry vhodné pro hybridní vedení

Pro rekonfiguraci stávajícího vedení na hybridní se nejvíce hodí dvojitě vedení, u kterého se jeden potah AC vedení nahradí bipolárním DC vedením s třetím neutrálním vodičem sloužící jako zpětný vodič. Pro dvojitě vedení jsou nejvíce vhodné stožáry Donau a Soudek. Protože v Evropě je pro přenos nejpoužívanější napěťová hladina 400 kV, bylo pro rekonfiguraci zvoleno právě dvojitě vedení 2x400 kV. Pro rekonfiguraci takového vedení na hybridní lze z důvodů minimálních vzdušných vzdáleností [15] uvažovat hladiny napětí DC ± 400 až ± 500 kV jak v jednopólové, tak v bipolární konfiguraci. Pro následující výpočty jsou tedy pro stožáry Donau a Soudek určeny tři varianty AC/DC vedení: 400/ ± 400 kV, 400/ ± 450 kV a 400/ ± 500 kV. Tyto varianty jsou pak porovnány s AC/AC vedením 2x400 kV.



Obr. 9: Stožáry Soudek (vlevo) a Donau (vpravo) 2x400 kV [18]

Na obou stožárech jsou použita AlFe lana 490-AL1/64-ST1A [17] o průměru 30,6 mm ve trojsvazku s krokem 40 cm. Stejnoseměrný odpor při 20° C činí $R_{ss} = 0,059 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Proudová zatížitelnost je 960 A. Při použití trojsvazku je pak maximální proudová zatížitelnost

trojnásobná, tedy 2880 A. Jako ochrana před atmosférickým přepětím byla použita dvě kombinovaná zemnicí lana AL3/A20SA 177/43-21,7 s průměrem 20,0 mm a odporem $R_{ss} = 0,172 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$.

Proveditelnost hybridního vedení přezbrojením stávajících stožárů byla potvrzena mnoha výzkumy a studii [14, 16]. Pokud se ale mají hybridní vedení v budoucnu realizovat, je zapotřebí prozkoumat a ověřit proveditelnost i jiných než stávajících stožárů. Provozovatel PS v Německu Amprion [16] se proto rozhodl provést teoretické a experimentální vyšetření speciálního návrhu stožáru Soudek nesoucí celkem čtyři vedení o napětí 400 kV (dvě bipolární vedení ± 400 DC a dvě dvojitá vedení 400 kV AC). V takové konfiguraci jsou umístěny střídavé a stejnosměrné obvody vedle sebe a nad sebou. Celá konstrukce takového stožáru musí být od základů vyšetřena z hlediska mechanického a elektrického návrhu. V této práci je zařazena do výpočtů jako ukázka bez ohledu na realizovatelnost. Rozměry a konfigurace fází stožáru jsou zobrazeny na obrázku B1 v příloze B. Jako fázová lana byla použita 264-AL1/34-ST1A [17] ve čtyřsvazku s odporem $R_{ss} = 0,1094 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ a průměrem 22,4 mm.

4.2 Přenášený výkon

Při návrhu linky se vychází z požadovaného přenášeného výkonu. Pro porovnání linek AC/AC a AC/DC je uveden následující modelový příklad, pro který jsou vyčísleny další veličiny. Modelový příklad vychází z vedení AC/AC 2x 400 kV s celkovým přenášeným výkonem 2 GW, tedy na jeden potah $P_{AC} = 1$ GW. Pro potřebné navýšení výkonu se jeden potah AC přezbrojí na DC bipolární vedení s požadovaným navýšením přenášeného výkonu potahu o 60 %, tedy $P_{DC} = 1,6$ GW. Celkový přenášený výkon hybridní linky P_{Celk} tedy bude dán součtem $P_{Celk} = P_{AC} + P_{DC} = 2,6$ GW. Pro porovnání jsou zvoleny 3 velikosti DC napětí a to ± 400 kV, ± 450 kV a ± 500 kV. Z předpisů pro výpočet přenášených výkonů jsou následovně vypočteny proudy.

Přenášený činný výkon na AC vedení je dán jako:

$$P_{AC} = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4-1)$$

Činný výkon pro DC vedení s bipolární konfigurací je definován jako:

$$P_{DC} = 2 \cdot U_{DC} \cdot I \quad (4-2)$$

Již při porovnání vzorců je jasné, že bipolární konfigurace u DC vedení nabízí větší přenosovou schopnost díky jedné velikosti napětí a absenci účinníku. Hodnota účinníku pro AC vedení byla zvolena jako $\cos \varphi = 0,9$. Proudů pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Přenášený výkon a proud pro jednoduchá AC a DC vedení

	Přenášený výkon (MW)	provozní napětí (kV)	Proud (kA)
AC	1000	400	1,6
DC	1600	±400	2,0
	1600	±450	1,8
	1600	±500	1,6

4.3 Vliv koróny

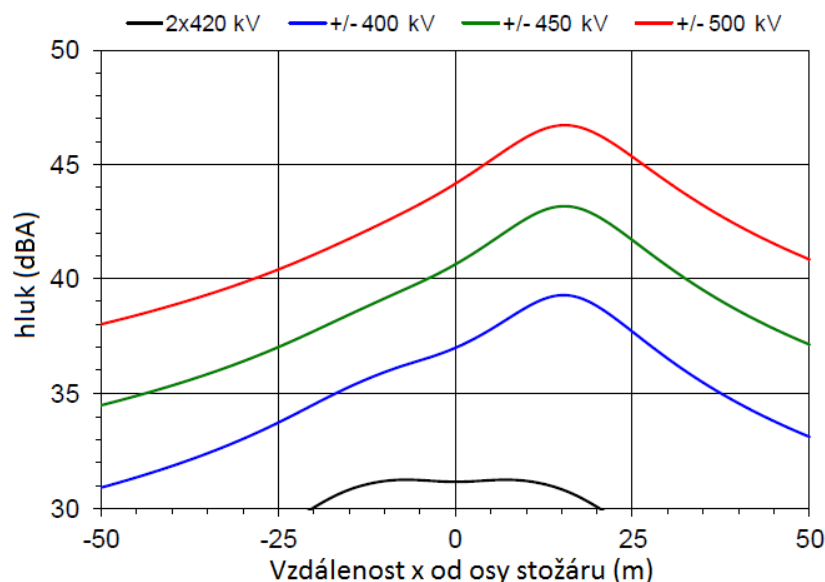
Korónový výboj [14] přináší do systému hned několik negativních parametrů, mezi které patří ztráty energie korónou, hluk a rádiové rušení. Vznik koróny ovlivňuje mnoho faktorů jako velikost síťového napětí, počet vodičů ve svazku, výška svazkových vodičů nad zemí, konfigurace fází, vzdálenost fázových lan, materiál lan a v neposlední řadě okolní podmínky (teplota, tlak, vlhkost, vítr, déšť atd.). Určit vznik či chování koróny je velice obtížné. Kromě toho je tento jev odlišný pro stejnosměrné a střídavé vedení, což je u hybridního vedení nutné vzít v potaz.

4.3.1 Hluk

Výsledkem mnoha nekorelovaných korónových výbojů v okolí vodičů je širokopásmové spektrum šumu, které pokrývá celou řadu slyšitelných frekvencí. Pro linky střídavého napětí je hluk nejvyšší během deště [14], zatímco u stejnosměrných linek je hluk větší při suchém než při deštivém počasí. Tuto zvláštnost lze fyzikálně vysvětlit následovně. I přes to, že se počet zdrojů koróny během deště zvyšuje, prostorový náboj v okolí stejnosměrných vodičů omezuje amplitudy vznikajících výbojů. Zároveň během deště mají atomy kyslíku obsažené v každé molekule vody tendenci zachycovat záporné ionty a elektrony. U střídavého napětí navíc dochází díky neustálé změně polarit napětí k opětovnému průrazu vzduchových mezer mezi vodičem a kapkami vody. Během každé kladné půlvlny vznikají na AC vedení další výboje, což se na stejnosměrném vedení neděje.

Výsledky měření hluku jsou zpracovány do grafů pro určitou úroveň překročení L_x . Úroveň překročení L_x je definována jako úroveň hluku, která je překročena x % času. Například L_{50} je úroveň hluku v dB, která je překročena 50 % času měření. Graf na obr. 10 je vykreslen pro hybridní vedení na stožáru Donau s vedením 400 kV AC na jedné straně

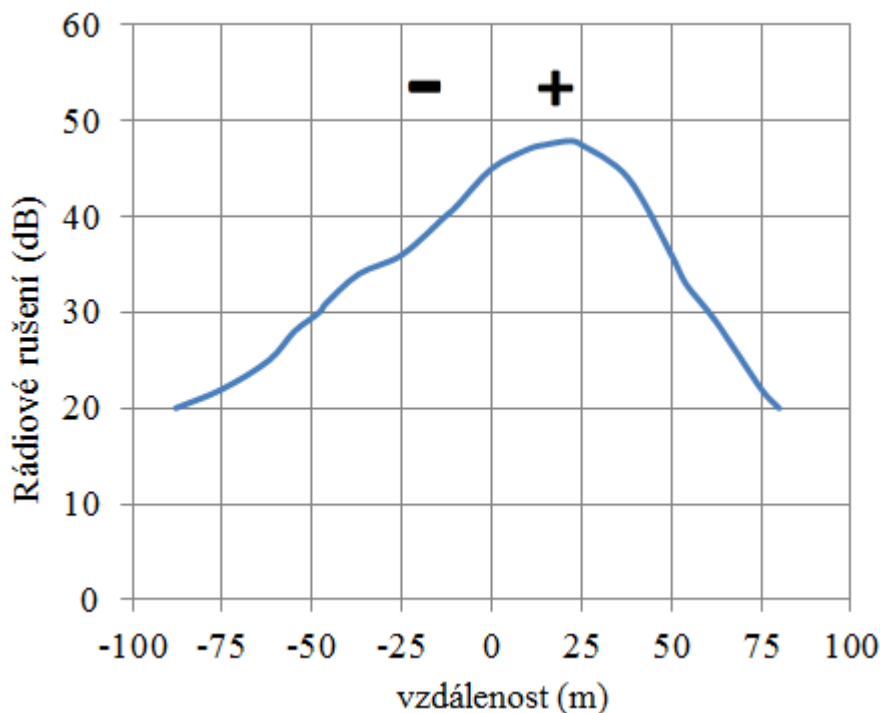
stožáru a bipolárním vedením ± 400 kV případně ± 450 či ± 500 kV na straně druhé. Graf je znázorněn pro suché počasí pro úroveň překročení L_{50} . Pro porovnání je v grafu znázorněna černá křivka reprezentující profil hluku AC vedení před změnou na hybridní. Maxima jednotlivých křivek odpovídají poloze DC vedení.



Obr. 10: Graf rozložení hluku pro úroveň L_{50} pro suché počasí [14]

4.3.2 Rádiové rušení (Radio Interference RI)

Jakékoliv rušení v rádiovém kmitočtovém spektru je obecně označováno jako rádiové rušení (RI). Protože rádiové frekvence FM jsou na poruchy méně citlivé, týká se RI zejména příjmu signálu AM. Rádiové rušení je vyhodnocováno porovnáním úrovně šumu a rádiového signálu, tj. poměrem signál / šum (SNR – signal to noise ratio). Hodnota RI je vyjádřena v dB. Vzhledem k tomu, že rádiové rušení i hluk jsou způsobeny korónovými výboji, které se objevují na kladném vodiči nebo v průběhu kladné půlvlny, je během změn počasí chování RI analogické k chování míry hluku. Proto je během deště pro střídavé linky rušení největší a pro stejnosměrná vedení naopak nižší. Protože je RI závislé na okolních podmínkách, prezentují se výsledky měření buď jako jeden průběh pro průměrné klimatické podmínky (viz obr. 11) nebo jako statistické rozložení úrovně RI pro jednu klimatickou podmínku.



Obr. 11: Typické rozložení rádiového rušení pod bipolárním DC vedením [14]

4.4 Ztráty korónou

Ztráty korónou [19, 20] jsou způsobeny pohybem kladných a záporných iontů vytvořených korónou. Ztráty na AC a DC vedení se ale fyzikálně liší. Zatímco u AC linek jsou ionty vytvořené korónou vystaveny střídavému poli v blízkosti vodičů a jejich pohyb je proto omezen na velmi úzkou oblast okolo vodičů, na DC linkách se ionty se stejnou polaritou jako vodič odpuzují a dostávají se tak dále od vodiče. Ionty opačné polarity jsou přitahovány k vodiči a při kontaktu s ním se neutralizují. Takže kladný vodič během koróny působí na své okolí jako zdroj kladných iontů, které vyplňují celý okolní prostor a naopak záporný vodič se chová jako zdroj iontů záporných. U jednopólových DC konfigurací vyplňuje prostorový náboj celý prostor mezi vodičem a zemí, zatímco u bipolárních konfigurací nastává mezi vodiči k částečné rekombinaci, což je výhodnější.

Teoretický výpočet ztrát korónou vyžaduje kompletní řešení elektrického pole na vodičích a určení prostorového náboje. Vznik koróny však ovlivňují i ostatní atmosférické změny jako je vlhkost, tlak či rychlost větru, a tak je prakticky nemožné přesně ztráty vyčíslit. Vzhledem ke složitosti teoretických výpočtů a velkému počtu faktorů ovlivňující korónu je často výhodnější použít empirické vzorce odvozené z dat dlouhodobého měření ztrát na zkušebních linkách s různými svazkovými vodiči a během různých klimatických podmínek. Existuje hned několik empiricky odvozených vzorců na výpočet ztrát, avšak je

nutné rozlišit výpočet pro AC a DC vedení. Protože vzorce pro výpočet ztrát přímo na hybridním vedení zatím nebyly vytvořeny, jsou ztráty korónou počítány zvlášť pro střídavé a zvlášť pro stejnosměrné vedení. Výsledné ztráty pro hybridní linku jsou pak dány součtem dílčích ztrát.

Ačkoliv takto vypočtené ztráty korónou nemusí 100% korespondovat s následným měřením koróny na zkušební lince, měly by se i tak ztráty vypočítat a následně je při návrhu přestavby stávajícího vedení na hybridní zahrnout do výpočtu nákladů. Výzkumy [14, 18] odhadují, že ztráty korónou by mohly činit přibližně 25 % ztrát Jouleových. U některých jednopólových DC konfigurací hrozí, že ztráty korónou budou dokonce i vyšší než 25 % činných ztrát, a to ve zvláštním případě, kdy se koróna objeví i na zemnicím laně [14]. U bipolární konfigurace se takový jev může vyskytnout pouze výjimečně, když je dočasně v provozu jako jednopólová.

4.4.1 Výpočet ztrát korónou na DC vedení

Pro bipolární konfiguraci bylo odvozeno mnoho vzorců, ale každý udává jiné výsledky, protože byly odvozeny pro různé klimatické podmínky. Následující vzorce jsou dle [20] doporučeny jako nejvhodnější, protože jejich výsledky nejvíce odpovídaly měřeným ztrátám na mnoha zkušebních linkách. Rozlišují se dva vzorce, jeden pro dešť a druhý pro suché počasí:

$$P_{suché} = P_{0_suché} + 50 \log \left(\frac{E_v}{E_0} \right) + 30 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + 20 \log \left(\frac{n}{n_0} \right) - 10 \log \left(\frac{h \cdot d}{h_0 \cdot d_0} \right) \quad (4-3)$$

$$P_{dešť} = P_{0_dešť} + 40 \log \left(\frac{E_v}{E_0} \right) + 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + 15 \log \left(\frac{n}{n_0} \right) - 10 \log \left(\frac{h \cdot d}{h_0 \cdot d_0} \right), \quad (4-4)$$

kde	$P_{suché}, P_{dešť}$	ztráty korónou na bipolárním DC vedení v dB
	P_0	ref. hodnota ztrát korónou pro suché $P_{0_suché} = 2,9$ dB či deštivé počasí $P_{0_dešť} = 11$ dB
	r	poloměr vodiče (cm)
	n	počet vodičů ve svazku
	h	výška vodiče (m)
	d	vzdálenost vodičů + a – (m)
	E_v	maximální intenzita elektrického pole na vodiči ($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)

Referenční hodnoty s indexem 0 byly odvozeny od nejčastějších hodnot daných veličin. Maximální intenzita elektrického pole na povrchu vodiče E_{v0} je odvozena z elektrické pevnosti vzduchu $E_{vzduch} = 30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ s 15% rezervou, tedy $E_{v0} = 25 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Poloměr $r_0 = 1,525 \text{ cm}$ je zvolen pro nejčastěji používané lano pro vysokonapěťový přenos, počet vodičů ve svazku je určen $n_0 = 3$, výška vodičů od země činí $h_0 = 15 \text{ m}$ a vzdálenost kladného a záporného vodiče na DC vedení, kde je kladný vodič na jedné straně stožáru a záporný na druhé odpovídá hodnotě $d_0 = 15 \text{ m}$. Hodnoty P_0 byly odvozeny pro suché i deštivé počasí tak, aby minimalizovaly aritmetický průměr rozdílů mezi vypočtenými a naměřenými ztrátami. Přepočtení ztrát z hodnoty v dB na hodnotu ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ plyne z předpisu pro útlum:

$$P(\text{W} \cdot \text{m}^{-1}) = 10^{\frac{P(\text{dB})}{10}} \quad (4-5)$$

Na korónový výboj má velký vliv intenzita elektrického pole. Při použití svazkových vodičů se pole rozloží nerovnoměrně s maximy a minimy intenzity v různých bodech. Nerovnoměrnost rozložení pole je tím větší, čím více vodičů svazek obsahuje. Výpočet průměrné (E_a) a maximální (E_m) intenzity pro n svazkových vodičů bipolárního DC vedení [20] lze vyjádřit předpisem:

$$E_a = \frac{U}{n \cdot r \cdot \ln \frac{2h}{r_{eq} \cdot \sqrt{\left(\frac{2h}{d}\right)^2 + 1}}} \quad (4-6)$$

$$E_m = E_a \left[1 + (n - 1) \frac{r}{R} \right], \quad (4-7)$$

kde R poloměr svazku (cm) – u trojsvazku $R = \frac{a}{\sqrt{3}}$, (a je vzdálenost vodičů ve svazku)
 r_{eq} ekvivalentní poloměr svazku (cm) – $r_{eq} = R \sqrt{\frac{nr}{R}}$

4.4.2 Výpočet ztrát korónou na AC vedení

Empirické vzorce pro výpočet ztrát korónou na AC vedení jsou díky dlouhodobému zkoumání a měření přesnější než vzorce pro DC vedení. Jako nejvhodnější vzorec se ukázal Petersonův [22]:

$$P_k = \frac{112f}{\left(\ln \frac{a}{r}\right)^2} U^2 \cdot \phi_c \cdot 10^{-6} \text{ (kW} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (4-8)$$

$$\phi_c = \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + 2 \cdot \ln \frac{U}{U_0} - 1 \quad (4-9)$$

$$U_0 = \frac{21,1 \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \left[\ln \frac{d}{cr} + (n-1) \cdot \ln \frac{2d}{2r-cr} \right]}{\frac{1}{cr} + \frac{n-1}{2r-cr}} m_2 \quad (4-10)$$

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}} \quad (4-11)$$

kde	f	frekvence	d	vzdálenost vodičů (cm)
	r	poloměr vodiče (cm)	m_2	je činitel respektující vliv počasí
	U	ef. hodnota fázového napětí (kV);	U_0	je kritické napětí koróny (kV)
	n	počet vodičů ve svazku;	c, ϕ_c	pomocné proměnné

δ je poměrná hustota vzduchu, pro kterou platí vztah:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t}, \quad (4-12)$$

kde	p	aktuální atmosférický tlak (kPa),
	p_0	referenční atmosférický tlak (101,3 kPa),
	t_0	referenční teplota (25 °C),
	t	aktuální teplota (°C).

4.4.3 Výpočet celkových ztrát korónou

Výpočet ztrát korónou byl proveden pro dvě různé klimatické podmínky, které jsou popsány v tabulce č. 2. Kvůli různým vzdálenostem fázových lan stožárů Donau a Soudek se velikost ztrát liší a je nutné pro každý stožár počítat ztráty znovu. Výsledky zaokrouhlené na jednotky jsou uvedeny v tabulkách č. 3 a 4, kde jsou vždy vyčísleny zvlášť ztráty pro AC a DC vedení. Výsledné ztráty korónou jsou určeny pro délku koridoru $l = 100$ km.

Tab. 2: Klimatické podmínky

	podmínka 1 – sucho	podmínka 2 – déšť
p (hPa)	1030	1018
t (°C)	30	10
m_2 (-)	1	0,9
δ (-)	0,98	1,04

Činitel m_2 respektující mokré či suché počasí může nabývat hodnot 0,8 až 1, kde hodnota 0,8 představuje extrémní déšť a 1 suché počasí. Samotný koeficient tedy dokáže výsledné ztráty výrazně ovlivnit. Nepatrná změna m_2 znamená podstatnou změnu ve velikosti ztrát.

Tab. 3: Vypočítané ztráty korónou stožáru Donau pro suché a deštivé počasí

Donau		AC/AC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Provozní napětí (kV)		400/400	400/±400	400/±450	400/±500
podmínka 1 sucho	P_{kAC} (kW·km ⁻¹)	16	8	8	8
	P_{kDC} (kW·km ⁻¹)	0	5	8	14
	P_{k_sucho} (kW)	1600	1300	1600	2200
podmínka 2 dešť	P_{kAC} (kW·km ⁻¹)	30	15	15	15
	P_{kDC} (kW·km ⁻¹)	0	30	48	73
	$P_{k_dešť}$ (kW)	3000	4500	6300	8800

Každý sloupec tabulky představuje jiné vedení o jiných napěťových hladinách. V prvním sloupci jsou hodnoty ztrát pro dvojité AC vedení 2x400 kV, a tak jsou ztráty dány Petersonovým vzorcem. Během deště jsou ztráty korónou pro AC/AC vedení takřka dvojnásobné. Pro hybridní vedení toto tvrzení již neplatí, protože ztráty na bipolárním vedení během deště značně převyšují ztráty při suchém počasí. Například pro hladinu DC napětí ±400 kV zaznamenáváme během deště stejné ztráty jako pro celou linku v případě AC vedení 2x400 kV. Pro vyšší napěťové hladiny DC logicky roste i velikost ztrát. Nejvyšší ztráty tedy nastávají pro hybridní vedení 400/±500 kV, kdy celkové ztráty korónou pro dešť činí $P_{k_dešť} = 8800$ kW, zatímco během suchého počasí, ta samá konfigurace vykazuje celkové ztráty 4x menší $P_{k_sucho} = 2200$ kW.

Tab. 4: Vypočítané ztráty korónou stožáru Soudek pro suché a deštivé počasí

Soudek		AC/AC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Provozní napětí (kV)		400/400	400/±400	400/±450	400/±500
podmínka 1 sucho	P_{kAC} (kW·km ⁻¹)	10	5	5	5
	P_{kDC} (kW·km ⁻¹)	0	3	6	10
	P_{k_sucho} (kW)	1000	800	1100	1500
podmínka 2 dešť	P_{kAC} (kW·km ⁻¹)	22	11	11	11
	P_{kDC} (kW·km ⁻¹)	0	21	34	52
	$P_{k_dešť}$ (kW)	2200	3200	4500	6300

Ztráty korónou na stožáru Soudek jsou jak pro suché tak deštivé počasí o poznání menší než ztráty na stožáru Donau. To je způsobené rozdílnou vzdáleností a pozicí fázových lan na jednotlivých stožárech. Zatímco u stožáru Soudek jsou vodiče nad sebou, což je výhodnější, u stožáru Donau jsou dva vodiče na spodní konzoli vedle sebe. Protože vzdálenost těchto vodičů je menší než vzdálenost vodičů na stožáru Soudek, je zde i větší šance vzniku koróny. Celkové ztráty během suchého počasí na stožáru Soudek jsou potom v průměru o cca 0,5 MW

nižší než na stožáru Donau. Při dešti jsou ztráty ještě větší. Celkové ztráty korónou na hybridním vedení stožáru Soudek jsou oproti stožáru Donau nižší v průměru o více než 1 MW. Největších ztrát opět logicky dosahovalo hybridní vedení 400/±500 kV pro dešť a to $P_{k_dešť} = 6300$ kW. Je ale nutné podotknout, že takové ztráty vykazovala konfigurace 400/±450 kV na stožáru Donau.

Aby byly oba stožáry z hlediska ztrát korónou porovnatelné, je nutné umisťovat na stožáru Donau vždy jeden z vodičů pod napětím na horní konzoli. Pak je zajištěna větší vzdálenost bipolárního vedení, a tak i nižší ztráty, které by v takovém případě byly velice blízké ztrátám na stožáru Soudek.

4.5 Jouleovy ztráty

Velikost Jouleových ztrát ΔP_j je přímo úměrná odporu jednoho fázového vodiče a kvadrátu efektivní hodnoty procházejícího proudu.

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \quad (4-13)$$

Při přesném výpočtu činných ztrát se berou v úvahu ztráty na odporech svazkových vodičů fáze v podélném směru, ztráty na svodech svazkových vodičů v příčném směru, ztráty na odporech zemnicích lan a ztráty korónou. Největší podíl na celkových Jouleových ztrátách mají ztráty na podélném odporu fázových vodičů, ztráty svodem v příčném směru tvoří přibližně 5 %. Ztráty na zemnicích lanech zpravidla nepřevyšují ani 1 % celku. V této práci je proveden výpočet ztrát na podélném odporu fázových vodičů a výpočet ztrát korónou. Ztráty svodem byly zpětně dopočítány z předpokládaného podílu z celkových ztrát. Ztráty na zemnicích lanech byly zanedbány. Přesný výpočet ztrát na dvojitém AC vedení byl proveden v [23].

4.5.1 Výpočet pasivních parametrů

Velikost stejnosměrného odporu R_{ss} vedení pro teplotu 20° C vztažený na 1 km délky je dána výrobcem jako katalogový údaj. S rostoucí teplotou se odpor zvyšuje, a tak je nutné odpor přepočítat, což lze vyjádřit předpisem pro teplotní závislost:

$$R_1 = R_2 \cdot [1 + \alpha(t_2 - t_1)], \quad (4-14)$$

kde α je teplotní součinitel odporu $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

R_1, R_2 odpor vodiče odpovídající teplotě t_1, t_2

Jako modelový příklad pro výpočet ztrát bylo určeno vedení o délce 100 km s provozní teplotou vodičů 50 °C.

Odpor svazkového vodiče činí:

$$R_{svazku} = R_{ss} \cdot l \cdot \frac{(1+\alpha\Delta T)}{3} = 0,059 \cdot 100 \cdot \frac{(1+0,004 \cdot 30)}{3} = 2,20 \Omega \quad (4-15)$$

Jouleovy ztráty na jednom potahu AC vedení jsou dány relací:

$$\Delta P_{jrAC} = 3 \cdot R_{svazku} \cdot I_{AC}^2 \quad (4-16)$$

Jouleovy ztráty bipolárního DC vedení jsou pak dány předpisem:

$$\Delta P_{jrDC} = 2 \cdot R_{svazku} \cdot I_{DC}^2 \quad (4-17)$$

4.5.2 Výpočet Jouleových ztrát

V Tab. č. 5 jsou vyčísleny ztráty na odporech vodičů pro AC a DC vedení. Z nich jsou pak určeny ztráty na svodech jako 5 % z celkových činných ztrát. Každý sloupec tabulky představuje jiné vedení o jiných napěťových hladinách. V posledním řádku tabulky jsou uvedeny celkové Jouleovy ztráty.

Tab. 5: Vypočtené hodnoty Jouleových ztrát pro AC/AC a AC/DC vedení

	AC/AC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Provozní napětí (kV)	400/400	400/±400	400/±450	400/±500
ΔP_{jAC} (MW)	34,0	17,0	17,0	17,0
ΔP_{jrDC} (MW)	0,0	17,6	14,3	11,3
ΔP_{jg} (MW)	1,8	1,9	1,7	1,5
ΔP_j (MW)	35,8	36,5	33,0	29,8

Přičteme-li ke ztrátám ΔP_j celkové ztráty korónou P_k z tabulky č. 3 či 4, získáme celkové Jouleovy ztráty pro dvě různé atmosférické podmínky. Celkové činné ztráty jsou vypočteny v tabulce č. 6 pro stožár Donau a v tabulce č. 7 pro stožár Soudek. Tabulky jsou doplněné o výpočet poměrných ztrát Δp (%) definované jako poměr celkových činných ztrát a celkového činného přenášeného výkonu.

Tab. 6: Celkové Jouleovy a poměrné ztráty pro AC/AC a AC/DC vedení na stožáru Donau

Donau		AC/AC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Provozní napětí (kV)		400/400	400/±400	400/±450	400/±500
podmínka 1 sucho	ΔP_{j_celk} (MW)	37,4	37,8	34,6	32,0
	Δp (%)	1,9	1,5	1,3	1,2
podmínka 2 děšť	ΔP_{j_celk} (MW)	38,3	41,0	39,3	38,6
	Δp (%)	1,9	1,6	1,5	1,5

Tab. 7: Celkové Jouleovy a poměrné ztráty pro AC/AC a AC/DC vedení na stožáru Soudek

Soudek		AC/AC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Provozní napětí (kV)		400/400	400/±400	400/±450	400/±500
podmínka 1 sucho	ΔP_{j_celk} (MW)	36,8	37,3	34,1	31,3
	Δp (%)	1,8	1,4	1,3	1,2
podmínka 2 děšť	ΔP_{j_celk} (MW)	38,0	39,7	37,5	36,1
	Δp (%)	1,9	1,5	1,4	1,4

Nejdůležitějším ukazatelem ztrát jsou poměrné ztráty Δp . K největší poměrné ztrátě nastává na AC/AC vedení a to přibližně 1,9 % z celkového 2 GW přenášeného výkonu. Naopak nejnižší ztráty jsou zaznamenány pro hybridní vedení 400/±500 kV, kdy je proud svazkovými vodiči bipolárního vedení nejnižší ($I = 1600$ A), a tudíž vytváří nejmenší Jouleovy ztráty. Porovnáme-li z hlediska velikosti ztrát oba stožáry, dojdeme k závěru, že rozdíl celkových ztrát je minimální, protože je tvořen pouze ztrátami korónou, které z celkových ztrát nezastupují ani 1 %. Výpočet potvrdil nižší ztráty u DC vedení oproti AC vedení.

4.6 Izolátory hybridního vedení

Původní keramické izolátory pro AC napětí nemohou být použity [14, 16] pro DC napětí z důvodu problémů se znečištěním a korozí. Při přezbrojování původního vedení na hybridní se ale také klade důraz na to, aby délka izolátorů zůstala stejná. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější jeví kompozitní izolátory, které vykazují lepší vlastnosti než konvenční skleněné či keramické izolátory. Návrh izolátorů pro střídavá přenosová vedení je nejvíce ovlivněn možným přepětím, které určuje přeskokovou vzdálenost možného oblouku. U DC vedení jsou přepětí poměrně nízká a návrh izolátorů určuje zejména míra znečištění v dané oblasti. Pro správný návrh izolátorů pro DC napětí se doporučuje podrobná statistická výpočetní metoda, která je založena na určení znečištění na izolátorech v kombinaci s charakteristikami

odolnosti vůči znečištění. Úroveň znečištění by měla být dána přesným a dlouhodobým sběrem dat a mapováním příslušné oblasti. Míra znečištění se udává zpravidla pro 2% ekvivalentní hustotu usazování solí (ESDD) v $\text{mg}\cdot\text{cm}^2$, kde se průměrné hodnoty dle normy IEC 60815-1 pohybují okolo $0,04 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Pro představu je níže uvedena tabulka vypočtených rozměrů izolátorů pro stejnosměrné napětí $\pm 400 \text{ kV}$ pro 3 různé míry znečištění.

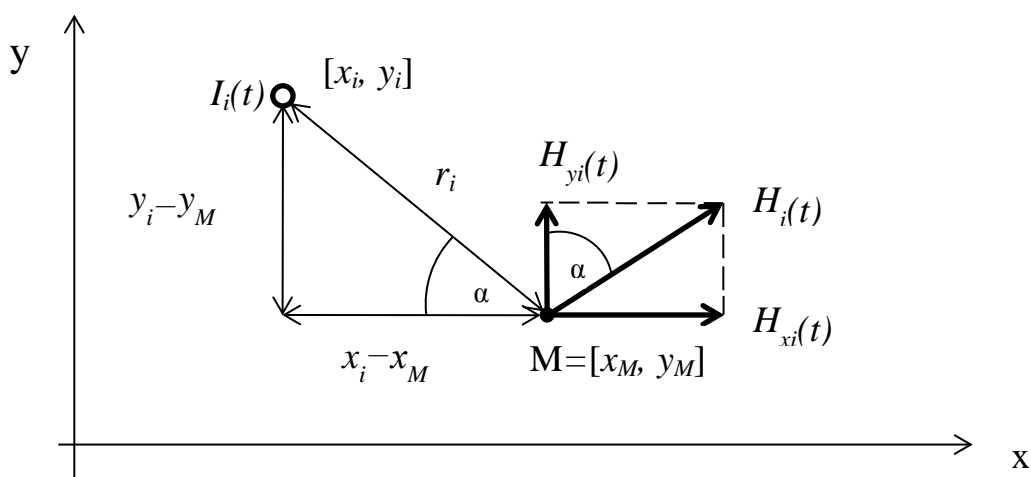
Tab. 8: Délky izolátorů pro různé úrovně znečištění 2% ESDD pro DC napětí $\pm 400 \text{ kV}$

znečištění ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0,02	0,04	0,06
délka izolátoru (m)	3,4	4	4,8

5 Výpočet intenzity elektrického a magnetického pole

5.1 Řešení magnetického pole

Výpočet intenzity magnetického pole vychází z první Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru, ze které vyplývá, že v blízkosti vodičů kterými protéká elektrický proud, vzniká magnetické pole. Při výpočtu se uvažují dlouhé rovnoběžné vodiče, harmonický průběh proudu a ustálený stav. Výsledné magnetické pole v okolí vedení je dáno superpozicí intenzit magnetického pole od jednotlivých vodičů. Superpozici je nutné provádět vždy po složkách vektoru a vzhledem k přítomnosti stejnosměrné složky je nezbytné řešit výpočet v časové oblasti.



Obr. 12: Rozložení intenzity magnetického pole do složek x a y

Z obrázku výše se x-ová složka intenzity magnetického pole ve zvoleném bodě M s danými souřadnicemi $[x_m, y_m]$, vypočte dle vztahu:

$$H_{xi}(M) = H_i(t) \cdot \sin \alpha = H_i(t) \cdot \frac{y_i - y_M}{r_i} = \frac{I_i(t) (y_i - y_M)}{2\pi r_i^2} \quad (5-1)$$

Výpočet y-ové složky je analogický:

$$H_{yi}(M) = H_i(t) \cdot \cos \alpha = H_i(t) \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i} = \frac{I_i(t) (x_i - x_M)}{2\pi r_i^2} \quad (5-2)$$

$$\text{kde} \quad r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5-3)$$

$I_i(t)$... časový průběh proudu i -tého vodiče (A)

$[x_i, y_i]$... souřadnice i -tého vodiče

Pro získání celkové intenzity v dané složce je potřeba provést superpozici všech složek

od jednotlivých vodičů pro daný čas t :

$$H_{xM}(t) = \sum_i H_{xMi}(t) \quad H_{yM}(t) = \sum_i H_{yMi}(t) \quad (5-4)$$

Výsledná intenzita magnetického pole je pak dána vztahem:

$$H_M(t) = \sqrt{|H_{xM}(t)|^2 + |H_{yM}(t)|^2} \quad (5-5)$$

Velikost magnetické indukce B (T) v daném bodě je potom možné vypočítat pomocí permeability vzduchu $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

$$B_M = \mu \cdot H_M(t) \quad (5-6)$$

Celý výpočet je realizován v podobě skriptu v programu MATLAB. Pro urychlení výpočtu lze předem určit matici proudů jednotlivými vodiči pro 2000 časových okamžiků v časovém intervalu od $t_1 = 0$ s do $t_2 = 0,02$ s (jedna perioda). Pro jednotlivé posuny bodu M v pásu ± 40 m od osy stožáru, byly vždy pro všechny časové okamžiky vypočteny a superponovány jednotlivé složky intenzity magnetického pole. Z takto vypočtených hodnot lze znázornit časoprostorové rozložení intenzity magnetického pole v podobě 3D grafu. Pro snadnější interpretaci výsledků se z 3D mapy vytvoří 2D prostorová projekce – závislost $H(x)$ zobrazující rozložení intenzity pod vedením. Z té se následně snadno určí poloha a hodnota maximální intenzity dané konfigurace. Limitní hodnota magnetické indukce [14] činí $B_{\text{MAX}} = 10 \mu\text{T}$.

5.2 Řešení elektrického pole

Pro výpočet intenzity elektrického pole je nutné znát náboje na vodičích, které lze vypočítat ze známého napětí na jednotlivých vodičích. Pomocí metody zrcadlení lze určit základní vztahy mezi náboji a potenciály.

5.2.1 Výpočet nábojů v M-vodičovém systému

Vztah mezi napětím a náboji [24] jednotlivých vodičů lze popsat pomocí potenciálových α_{ij} a kapacitních β_{ij} koeficientů.

$$\underline{U}_0 = \mathbf{A}\mathbf{q} \quad (5-7)$$

kde, $\underline{U}_0^T = [U_{10}, U_{20}, \dots, U_{M0}]$, $\mathbf{U}_{i0}(t)$ je časový průběh napětí i -tého vodiče vůči zemi

$\underline{q}^T = [q_1, \dots, q_M]$, $\mathbf{q}_i(t)$ je časový průběh náboje i -tého vodiče

$\mathbf{A}(M, M) = \{\alpha_{ij}\}$ je matice potenciálových koeficientů

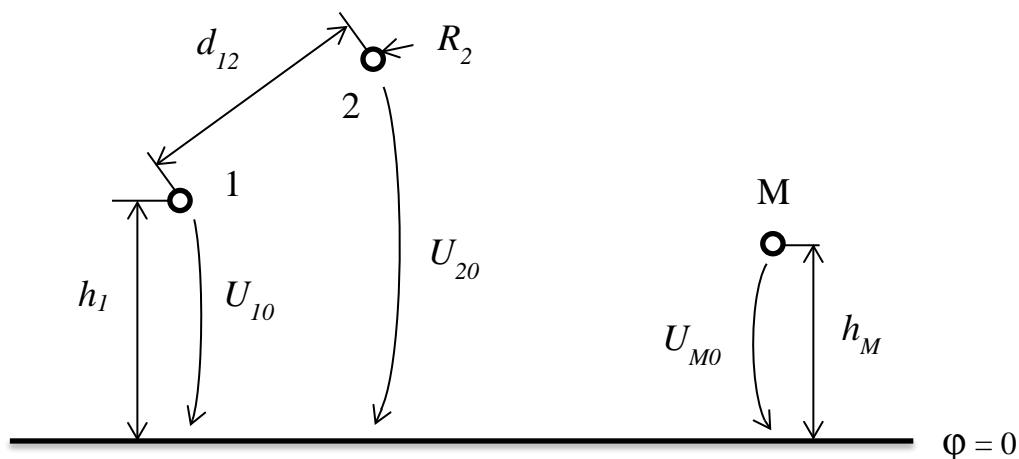
$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}}, \quad (5-8)$$

kde h_i je výška i -tého vodiče nad zemí

R_i je vlastní poloměr vodiče

b_{ij} je vzdálenost mezi i -tým vodičem a obrazem j -tého vodiče (z metody zrcadlení)

d_{ij} je vzdálenost mezi i -tým a j -tým vodičem

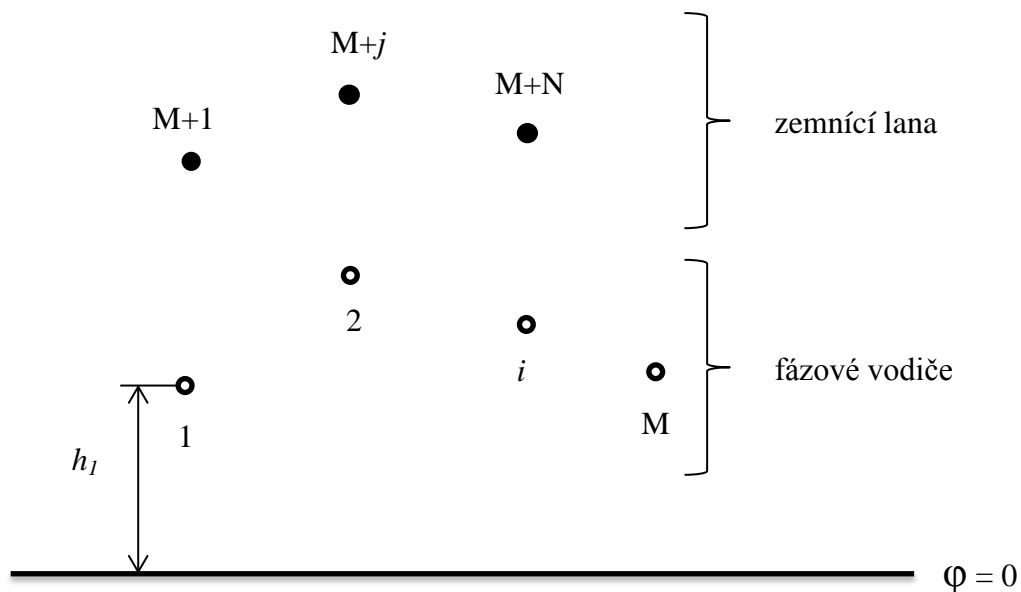


Obr. 13: Uspořádání M fázových vodičů

5.2.2 Výpočet nábojů v M -vodičovém systému se zemnicími lany

Při uvažování zemnicích lan [24] do výpočtu zahrneme i uzemněná zemnicí lana, která mají nulové napětí $U_i = 0$ pro $i = M+1, \dots, M+N$. Podobným způsobem můžeme popsat vztahy mezi napětími a náboji jednotlivých vodičů s respektováním zemnicích lan pomocí maticové rovnice

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{MM} & \mathbf{A}_{MN} \\ \mathbf{A}_{NM} & \mathbf{A}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_M \\ \mathbf{q}_N \end{bmatrix} \quad (5-9)$$



Obr. 14: Uspořádání s M fázovými vodiči a s N zemnicími lany [24]

Z druhé řádky rovnice (5) můžeme vypočítat náboje zemnicích lan $\underline{\mathbf{q}}_N$.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{NM} \underline{\mathbf{q}}_M + \mathbf{A}_{NN} \underline{\mathbf{q}}_N &= 0 \\ \Rightarrow \underline{\mathbf{q}}_N &= -\mathbf{A}_{NN}^{-1} \mathbf{A}_{NM} \underline{\mathbf{q}}_M \end{aligned} \quad (5-10)$$

Po dosazení zpět do původní rovnice (5) získáme vztah pro napětí a náboje fázových vodičů.

$$\underline{\mathbf{U}}_M = (\mathbf{A}_{MM} - \mathbf{A}_{MN} \mathbf{A}_{NN}^{-1} \mathbf{A}_{NM}) \underline{\mathbf{q}}_M \quad (5-11)$$

Matice kapacitních koeficientů je tedy definována jako

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}_{MM} - \mathbf{A}_{MN} \mathbf{A}_{NN}^{-1} \mathbf{A}_{NM})^{-1} \quad (5-12)$$

a matice nábojů fázových vodičů jako

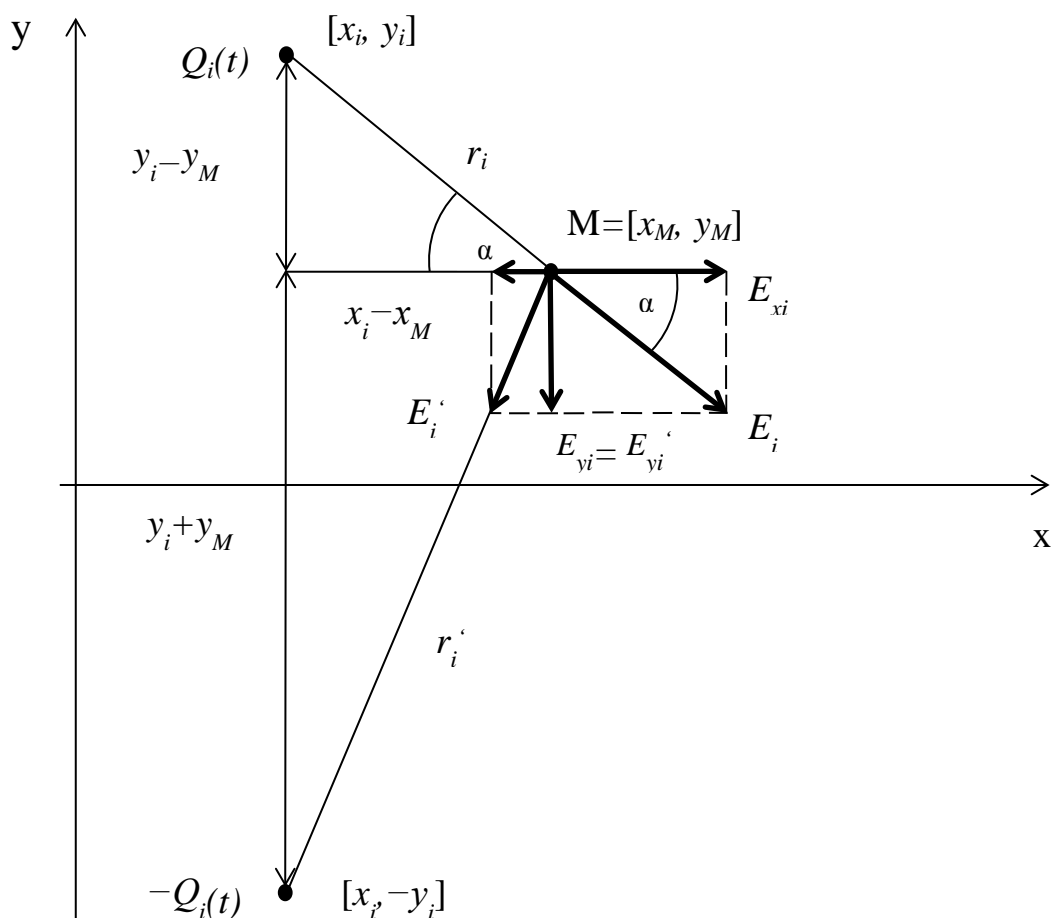
$$\underline{\mathbf{q}}_M = \mathbf{B} \underline{\mathbf{U}}_M \quad (5-13)$$

Na základě předchozích rovnic můžeme vyjádřit náboje zemnicích lan jako

$$\underline{\mathbf{q}}_N = -\mathbf{A}_{NN}^{-1} \mathbf{A}_{NM} \mathbf{B} \underline{\mathbf{U}}_M \quad (5-14)$$

5.2.3 Výpočet intenzity elektrického pole

Pro výpočet rozložení elektrického pole [25] je nutné předpokládat přímé a paralelní vodiče umístěné nad dokonale vodivou zemí ve výšce y_i . Se znalostí velikosti nábojů na jednotlivých vodičích a jejich polohou lze určit jednotlivé příspěvky elektrické intenzity od jednotlivých vodičů a jejich obrazů v daném bodě. Tyto příspěvky se rozloží do složek x a y .



Obr. 15: Rozložení intenzity elektrického pole do složek x a y od i -tého vodiče a jeho obrazu
Pro x -ové složky intenzity můžeme z trojúhelníků na obr. 11 psát následující rovnice:

$$E_{xi}(t) = E_i(t) \cdot \cos \alpha = E_i(t) \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i} \quad (5-15)$$

$$E_{xi}'(t) = E_i'(t) \cdot \cos \alpha' = E_i'(t) \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i'} \quad (5-16)$$

Podobně pro y -ové složky intenzity dostáváme rovnice:

$$E_{yi}(t) = E_i(t) \cdot \sin \alpha = E_i(t) \cdot \frac{y_i - y_M}{r_i} \quad (5-17)$$

$$E_{yi}'(t) = E_i'(t) \cdot \sin \alpha' = E_i'(t) \cdot \frac{y_i + y_M}{r_i'} \quad (5-18)$$

Pro složky $E_x(t)$ a $E_y(t)$ intenzity elektrického pole vzniklé působením i -tého vodiče a jeho obrazu v libovolném bodě prostoru M s definovanými souřadnicemi $[x_m, y_m]$, platí tedy následující vztahy:

$$E_{xi}(M) = kQ_i(t)D_{xi} \quad E_{yi}(M) = kQ_i(t)D_{yi}, \quad (5-19)$$

kde

$$k = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot l} = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ (F}^{-1}\text{) pro } l = 1 \text{ m} \quad (5-20)$$

$$D_{xi} = (x_M - x_i) \cdot \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_i'^2} \right) \quad D_{yi} = \frac{y_i - y_M}{r_i^2} + \frac{y_i + y_M}{r_i'^2} \quad (5-21)$$

$$r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad \text{vzdálenost bodu M od } i\text{-tého vodiče} \quad (5-22)$$

$$r_i' = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M + y_i)^2} \quad \text{vzdálenost bodu M od obrazu } i\text{-tého vodiče} \quad (5-23)$$

Pro získání celkové intenzity v dané složce je potřeba provést superpozici všech složek vzniklé působením náboje na jednotlivých vodičích:

$$E_{xM}(t) = \sum_i E_{xMi}(t) \quad E_{yM}(t) = \sum_i E_{yMi}(t) \quad (5-24)$$

Výslednou hodnotu intenzity elektrického pole v bodě M je možné určit ze vztahu:

$$E_M(t) = \sqrt{|E_{xM}(t)|^2 + |E_{yM}(t)|^2} \quad (5-25)$$

Celý výpočet je opakován obdobně jako u výpočtu magnetického pole. Výsledkem jsou opět 3D grafy a z nich vytvořené 2D prostorové projekce.

5.3 Analytický výpočet

Výpočet intenzity elektrického i magnetického pole byl proveden pro stožáry Donau a Soudek, jejichž rozměry odpovídají obrázku číslo 9. Pro oba stožáry se uvažovaly varianty hybridního a střídavého vedení. Samotný výpočet byl zjednodušen několika předpoklady. Svazkové vodiče byly nahrazeny jedním vodičem o ekvivalentním poloměru:

$$r_{ekv} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{n}{R} \cdot r} \quad (5-26)$$

kde R je poloměr svazku, n je počet vodičů svazku a r je poloměr jednoho z vodičů ve svazku.

Další zjednodušení se týká zemnicích lan. Při provozu zemnicího lana se uplatní induktivní a kapacitní vazby s ostatními vodiči. Vlivem induktivních vazeb protéká zemnicím lanem naindukovaný proud. Tento proud byl pro výpočet intenzity magnetického pole zanedbán. Vliv kapacitních vazeb je ale ve výpočtu intenzity elektrického pole zohledněn. Výsledkem výpočtů jsou časoprostorová rozložení intenzity elektrického a magnetického pole ve výšce 1,8 m nad zemí v pásu ± 40 m od osy stožáru. Výška 1,8 m odpovídá výšce hlavy

dospělého člověka a je určena z normy.

Nejprve bylo vyšetřeno AC/AC vedení o napětí 2x400 kV s celkovým přenášeným výkonem $P = 2 \text{ GW}$ a efektivní hodnotou proudu jednoho svazku $I = 1603 \text{ A}$. U dvojitých AC vedení existuje 36 různých uspořádání všech fázových vodičů, ale jen 6 z nich vykazuje jiné výsledky. Z těchto šesti konfigurací byly pro výpočet vybrány dle [27] tři konfigurace, které vykazují nejnižší hodnoty magnetické i elektrické intenzity.

Tab. 9: Zvolené konfigurace fází pro stožár Donau 2x400 kV AC

Konfigurace	1.		2.		3.	
uspořádání fází	W	V'	W	U'	W	W'
	U V	W' U'	U V	W' V'	U V	U' V'

Tab. 10: Zvolené konfigurace fází pro stožár Soudek 2x400 kV AC

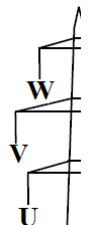

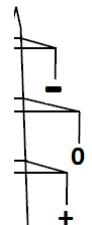
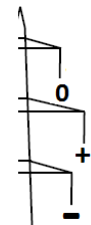

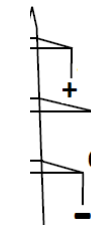
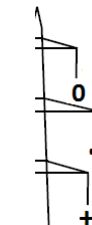
konfigurace	1.		2.		3.	
uspořádání fází	W	U'	W	U'	W	W'
	V	V'	V	W'	V	U'
	U	W'	U	V'	U	V'

Pro hybridní linku pak byla pro AC část vedení zachována právě 1. konfigurace, která se pro další výpočty hybridního vedení neměnila. Na druhé straně stožáru pro hybridní vedení bylo analyzováno všech šest možných variant uspořádání kladného, záporného a zpětného vodiče. Z výpočtů vyplynulo, že pouze tři konfigurace vykazují změnu v rozložení obou polí, jak je ukázáno v tabulkách. Další prezentace výsledků se tedy omezila kvůli přehlednosti jen na tyto tři konfigurace. Pro stožár Donau a Soudek jsou zvolené konfigurace v tabulkách 14 a 15. V obou tabulkách je jako první AC konfigurace levé části stožáru, která se nemění a pouze se kombinuje s konfiguracemi A až F. Výpočet intenzity magnetického i elektrického pole byl proveden pro výšku spodních vodičů od země $h = 12 \text{ m}$.

Tab. 11: Konfigurace hybridního vedení stožáru Donau

konfigurace	1A	1B	1C	1D	1E	1F

Tab. 12: Konfigurace hybridního vedení stožáru Soudek

konfigurace	2A	2B	2C	2D	2E	2F
						

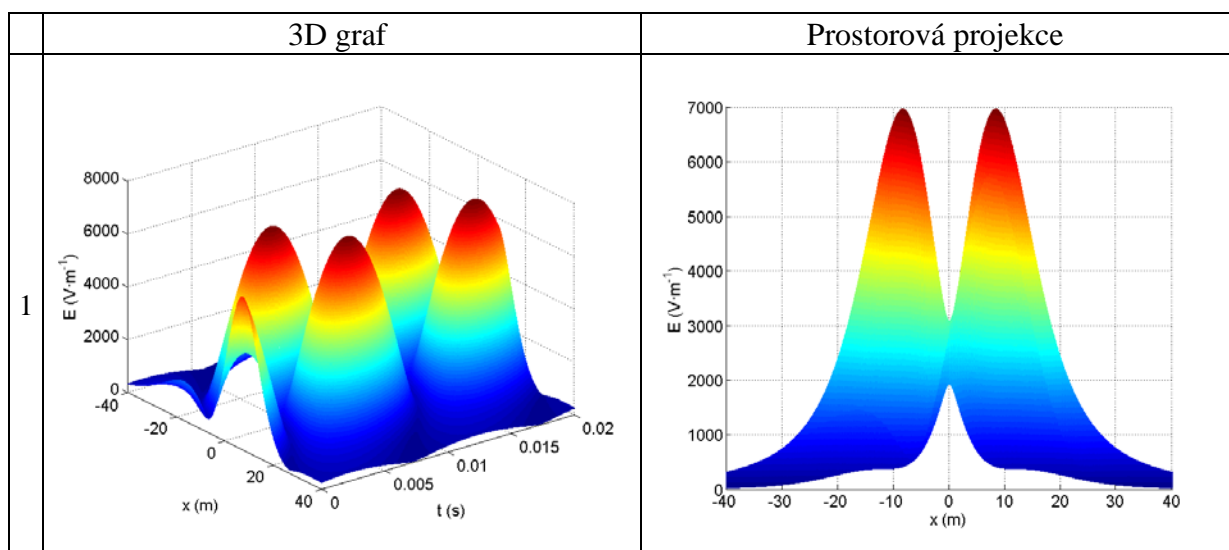
Nejdůležitějším výstupem je maximální hodnota elektrické intenzity E_{MAX} pro elektrické pole a maximální hodnota magnetické indukce B_{MAX} pro pole magnetické. Tyto hodnoty jsou shrnuty pro různá napětí a konfigurace AC a DC vedení v tabulkách a porovnány s hygienickými limity $E_{limit} = 10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ a $B_{limit} = 10 \text{ }\mu\text{T}$.

5.4 Výsledné rozložení elektrického pole

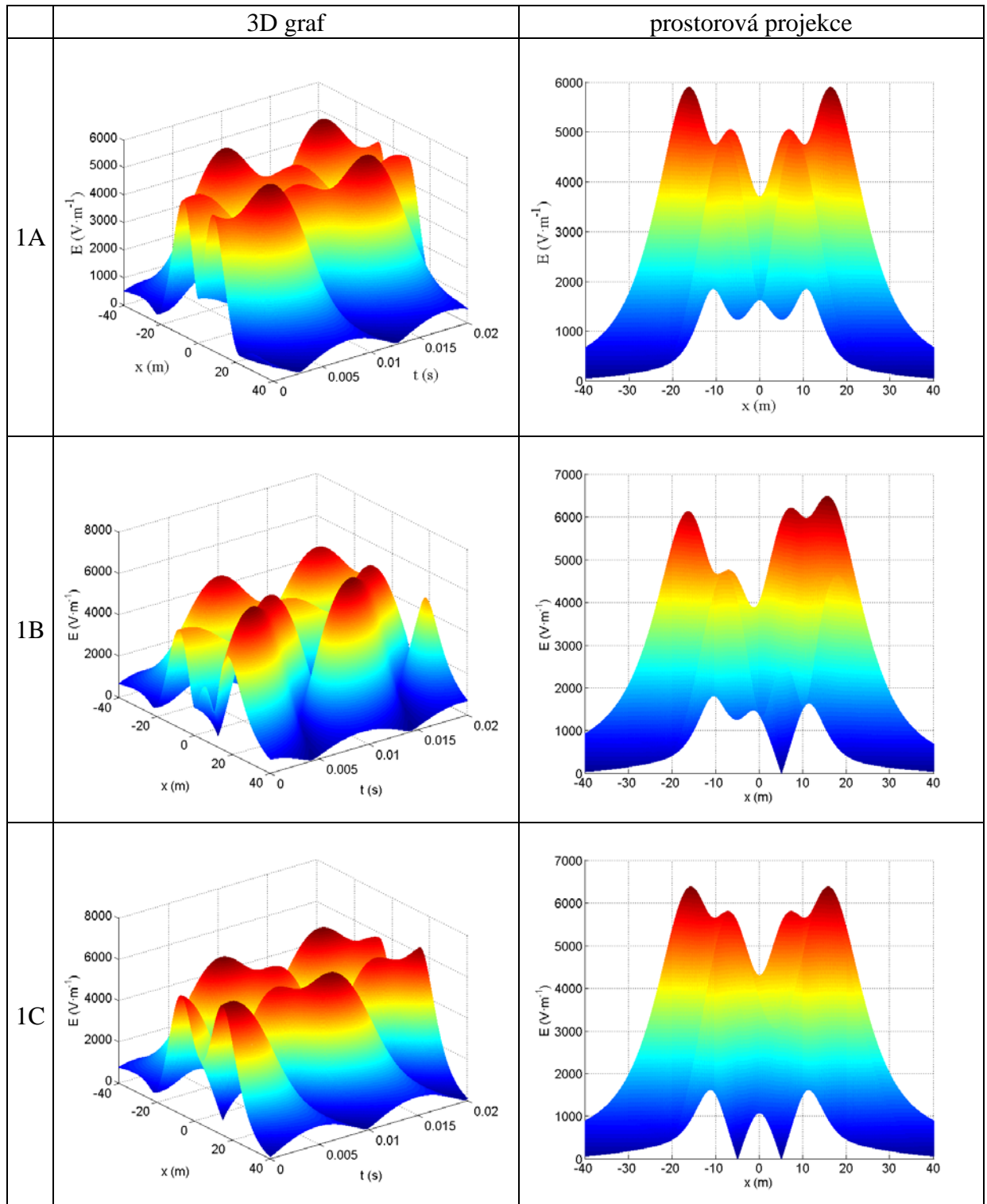
5.4.1 AC/AC vedení

Protože pro hladinu napětí 400 kV je více používaný stožár Donau, jsou právě pro tento stožár vykresleny grafy pro všechny konfigurace uvažované v tabulce č. 9. Jelikož jsou si rozložení elektrického pole obou stožárů dost podobné, byl pro stožár Soudek vykreslen pouze jeden graf pro nejvýhodnější konfiguraci – tedy konfiguraci 1. Maximální hodnoty intenzity elektrického pole jsou pak pro každou konfiguraci daného stožáru shrnuty v tabulkách.

Tab. 13: 3D graf a prostorová projekce intenzity elektrického pole pro 1 konfiguraci stožáru Soudek 2x400 kV AC



Tab. 14: 3D grafy a prostorové projekce intenzity elektrického pole pro 3 konfigurace stožáru Donau 2x400 kV AC



Na stožáru Donau dochází díky vhodnému uspořádání fázových vodičů do trojúhelníka k velké kompenzaci elektrického pole. Protože je elektrické i magnetické pole stožáru Donau koncentrovanější než na stožáru Soudek, lze vhodnou konfigurací dosáhnout nižší hodnoty intenzit elektrického i magnetického pole. Tento fakt je potvrzen při porovnání vypočtených hodnot maximální intenzity elektrického pole pro stožár Soudek a Donau v tabulkách 15 a 16.

Tab. 15: Maximální hodnoty intenzity elektrického pole pod stožárem Soudek 2x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.
$E_{MAX} (V \cdot m^{-1})$	6951	7416	7882

Tab. 16: Maximální hodnoty intenzity elektrického pole pod stožárem Donau 2x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.
$E_{MAX} (V \cdot m^{-1})$	5889	6469	6369

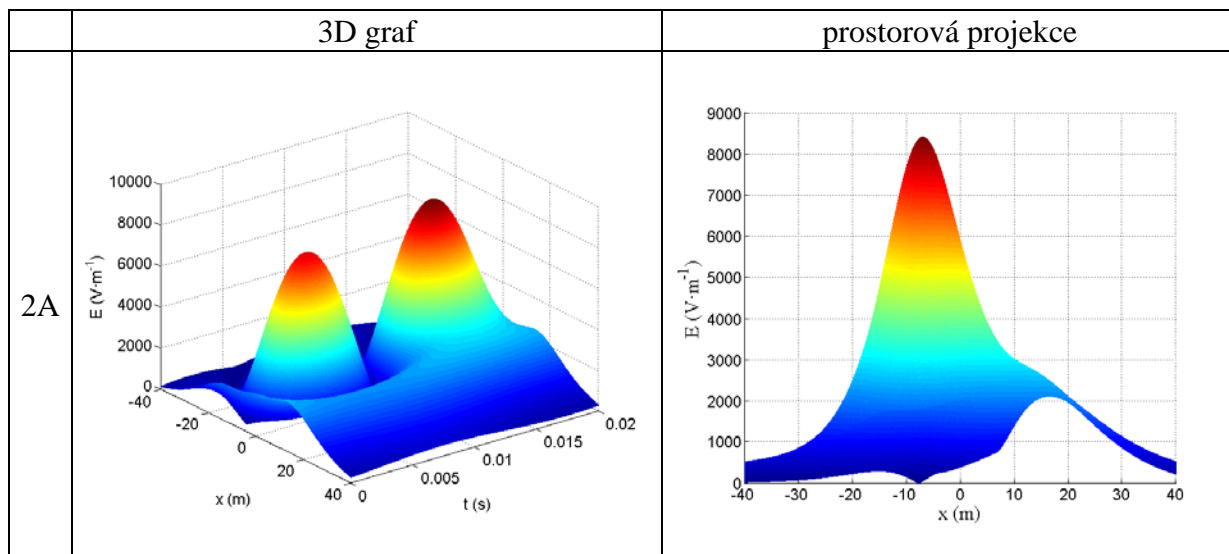
Pro stejnou výšku spodních vodičů od země byla maximální dosažená hodnota elektrické intenzity pro stožár Soudek minimálně o $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ větší ve všech počítaných konfiguracích. Nejpriznivější rozložení elektrické intenzity představuje 1. konfigurace, kde jsou shodné fáze prvního a druhého potahu umístěny co nejdále od sebe, jak je znázorněno v tabulkách č. 9 a 10. Na grafu prostorové projekce 1. konfigurace je pak i vidět symetrické rozložení intenzity podél osy stožáru. Maxima pak odpovídají poloze vodičů. Lokální minima vznikají u všech konfigurací v ose stožáru, kde se účinky pole vykompenzují. Rozložení pole je symetrické i pro třetí prostorovou projekci, což opět odpovídá stejné konfiguraci na obou stranách stožáru. Všechny konfigurace jak pro stožár Donau, tak pro stožár Soudek vyhovují hygienickému limitu $E_{lim} = 10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

5.4.2 AC/DC vedení

Grafy intenzity elektrického pole pro hybridní vedení byly opět znázorněny pouze pro stožár Donau s vedeními o napětí 400/±400 kV. Grafy byly zobrazeny pouze pro první 3 konfigurace (1A až 1C) z tabulky 11, protože zbylé konfigurace nevykazují oproti prvním třem žádnou změnu. Výpočty se shodují pro taková uspořádání, kde je pouze zaměněna poloha kladného a záporného vodiče, což je logické, protože elektrické pole od vodičů bipolárního vedení je stejné bez ohledu na polaritu vodičů. Konkrétně se tedy u obou stožárů shoduje rozložení jak elektrického tak magnetického pole pro konfigurace A a D, B a E, C a F. Grafy prostorových projekcí těchto konfigurací jsou naprosto shodné, ale u 3D map lze přece jen zaznamenat rozdíl. Podle toho, jak se v čase sčítají účinky polí od AC a DC vedení,

začíná průběh intenzity elektrického pole v čase z jiné hodnoty. Výsledné působení hybridního vedení na okolí je ale shodné jako pro první tři konfigurace. Pro stožár Soudek je opět vykreslena pro ilustraci pouze konfigurace 2A. Pro další varianty hybridního vedení jsou vyčísleny maximální hodnoty intenzity pro různé konfigurace. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách č. 18 (stožár Soudek) a č. 19 (stožár Donau).

Tab. 17: 3D graf a prostorová projekce intenzity elektrického pole pro hybridní vedení 400/±400 kV Soudek

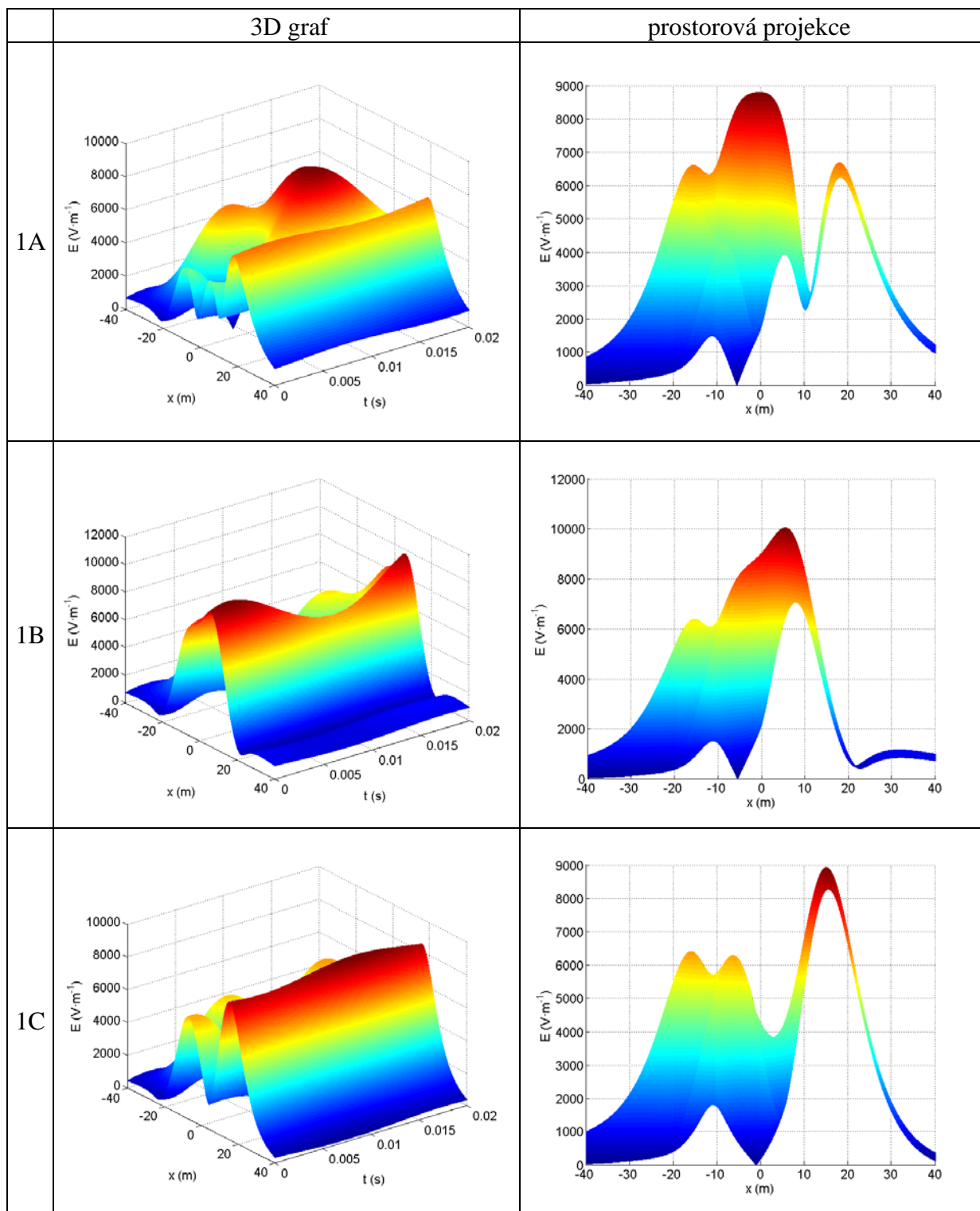


Porovnáme-li grafy rozložení intenzity stožáru Soudek pro hybridní vedení s grafy se střídavým vedením v tabulce č. 13, zjistíme, že strana AC vedení je tvarem stejná pro oba druhy vedení. Vlivem DC vedení se maximální hodnota intenzity zvýšila z původních $5889 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ pro AC/AC vedení na $8394 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ pro AC/DC vedení 400/±400 kV. U stožáru Soudek vyhověla limitům pouze konfigurace 2A a to pro všechny varianty hybridního vedení, jak lze vidět v tabulce 18.

Tab. 18: Maximální hodnoty intenzity elektrického pole pod hybridním vedením pro varianty 400/±400 kV, 400/±450 kV a 400/±500 kV – stožár Soudek

konfigurace	2A	2B	2C	2D	2E	2F
$E_{\pm 400} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	8394	12089	10316	8394	12089	10316
$E_{\pm 450} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	8455	13380	11358	8455	13380	11358
$E_{\pm 500} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	8517	14678	12409	8517	14678	12409

Tab. 19: 3D grafy a prostorové projekce intenzity elektrického pole pro hybridní vedení 400/±400 kV Donau



Z grafů v tabulce 19 lze pozorovat značné ovlivnění celého průběhu silným polem vznikající od DC vodičů na pravé straně stožáru. Maximum celého průběhu prostorového rozložení elektrického pole ale nemusí být vždy v místě DC vodičů. Pro konfiguraci 1A vzniklo maximum průběhu přímo v ose stožáru (hodnota x odpovídající 0 m), kde se intenzita elektrických polí od AC a DC vedení sečetla. Další lokální maximum vzniklo ve vzdálenosti 18 m od osy stožáru na straně DC vedení. U konfigurace 1B se vliv střídavého pole výrazně projevil ve stejnosměrném poli, kde nastává maximum 5 metrů vpravo od osy stožáru. U konfigurace 1C se pole v ose stožáru značně vykompenzovala. Rozložení intenzity od AC vedení je velice podobné prostorovému rozložení intenzity pro vedení AC/AC v konfiguraci 1. Maximální hodnota intenzity nastává ve vzdálenosti 14,5 metrů vpravo od osy stožáru, což odpovídá poloze kladného vodiče. Nejpriznivější konfigurací z hlediska rozložení pole je uspořádání 1A, u kterého je maximum v ose stožáru. Tato konfigurace vyhověla napět'ovým hladinám DC vedení ± 400 kV a ± 450 kV. U napětí ± 500 kV překročila maximální přípustnou hodnotu pouze o $101 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Pro napětí DC ± 500 kV, byla maximální intenzita daná normou překročena u všech konfigurací stožáru Donau.

Tab. 20: Maximální hodnoty intenzity elektrického pole pod hybridním vedením pro varianty $400/\pm 400$ kV, $400/\pm 450$ kV a $400/\pm 500$ kV – stožár Donau

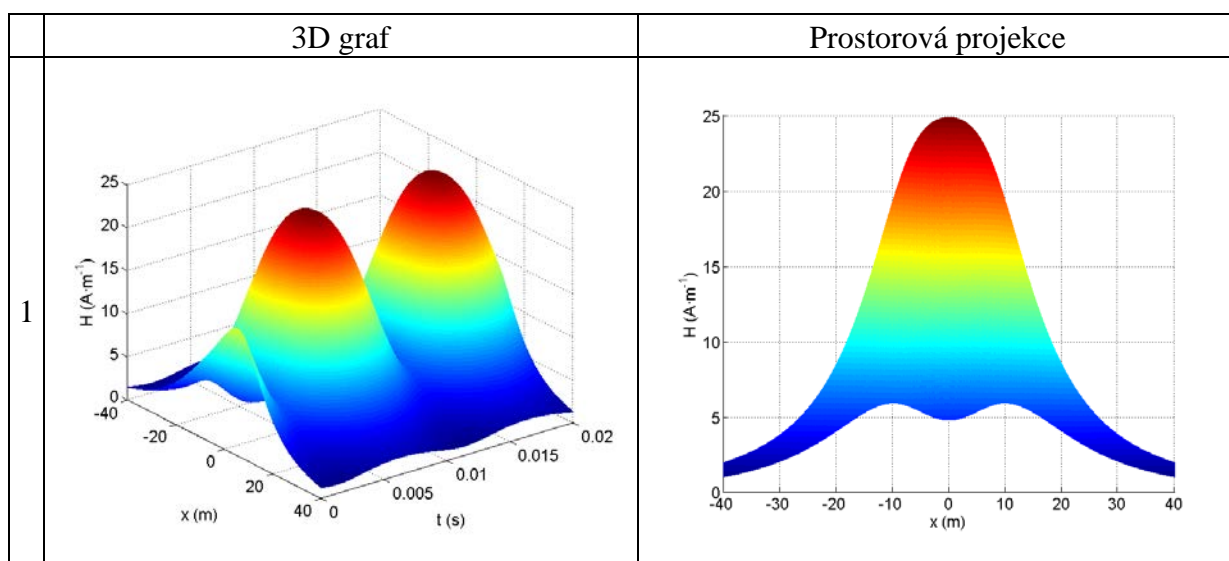
konfigurace	1A	1B	1C	1D	1E	1F
$E_{\pm 400} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	8782	10036	8913	8782	10036	8913
$E_{\pm 450} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	9417	11061	9985	9417	11061	9985
$E_{\pm 500} (\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	10101	12093	11057	10101	12093	11057

5.5 Výsledky výpočtů magnetického pole

5.5.1 AC/AC vedení

Obdobně jako u výpočtu elektrického pole i zde jsou vykresleny grafy pro jednu konfiguraci stožáru Soudek a všechny konfigurace stožáru Donau. V tabulkách jsou následně uvedeny maximální hodnoty intenzity magnetického pole a z nich vypočtené maximální hodnoty magnetické indukce B .

Tab. 21: 3D graf a prostorová projekce intenzity magnetického pole pro 1 konfiguraci stožáru Soudek 2x400 kV AC

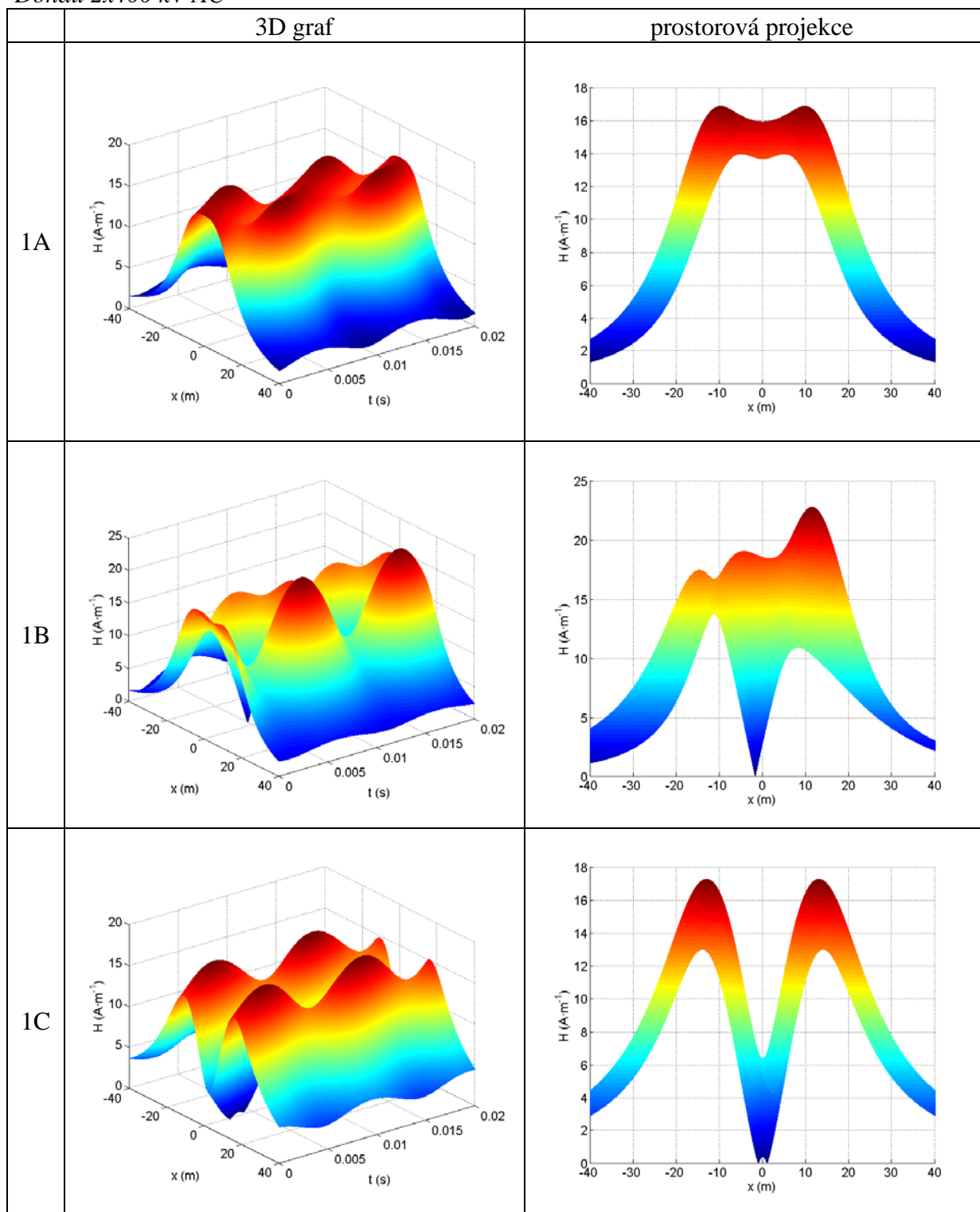


Maximální hodnota intenzity magnetického pole vznikla přímo v ose stožáru. Symetrické rozložení magnetického pole odpovídá i zvolené konfiguraci stožáru Soudek. U všech konfigurací byla překročena limitní hodnota magnetické indukce, jak je vidět v tabulce 22.

Tab. 22: Maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole pod stožárem Soudek 2x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.
H_{MAX} ($A \cdot m^{-1}$)	24,8	22,1	20,6
B_{MAX} (μT)	31,2	27,8	25,9

Tab. 23: 3D grafy a prostorové projekce intenzity magnetického pole 3 konfigurací stožáru Donau 2x400 kV AC



U stožáru Donau je rozložení magnetického pole pro AC vedení jiné než u stožáru Soudek. Pro 1. a 3. konfiguraci jsou prostorové projekce symetrické s dvěma maximy odpovídající poloze vodičů. Naopak v ose stožáru pole slábne a klesá. Konfigurace č. 2 je nesymetrická s maximální hodnotou intenzity vpravo od osy stožáru, což byla i největší

hodnota intenzity ze třech konfigurací stožáru Donau. Porovnáme-li tabulky maximálních hodnot magnetické indukce pro oba stožáry, zjistíme, že první dvě konfigurace stožáru Soudek dosahovaly indukce okolo $30 \mu\text{T}$, ale u stožáru Donau dosahovaly indukce mírně přes $21 \mu\text{T}$, což dává do výhody právě stožár Donau nabízející lepší kompenzaci pole. I tak je ale limitní hodnota indukce překročena pro oba stožáry. Velikost magnetické indukce je ovlivněna velikostí proudu. Je potřeba zdůraznit, že zde se jedná o modelovou situaci, kde hodnota proudu byla určena ze zvoleného přenášeného výkonu. Pro AC vedení byl zvolen poměrně vysoký přenášený výkon, kterému pak odpovídá i vysoký proud kolem kterého vzniká silné magnetické pole. Další parametr, který ovlivňuje výsledné výpočty je zvolený průhyb vodičů, resp. vzdálenost vodičů od země. I tato vzdálenost je pevně stanovena a v realitě se může lišit. Stejně tak i průhyb vodičů byl určen

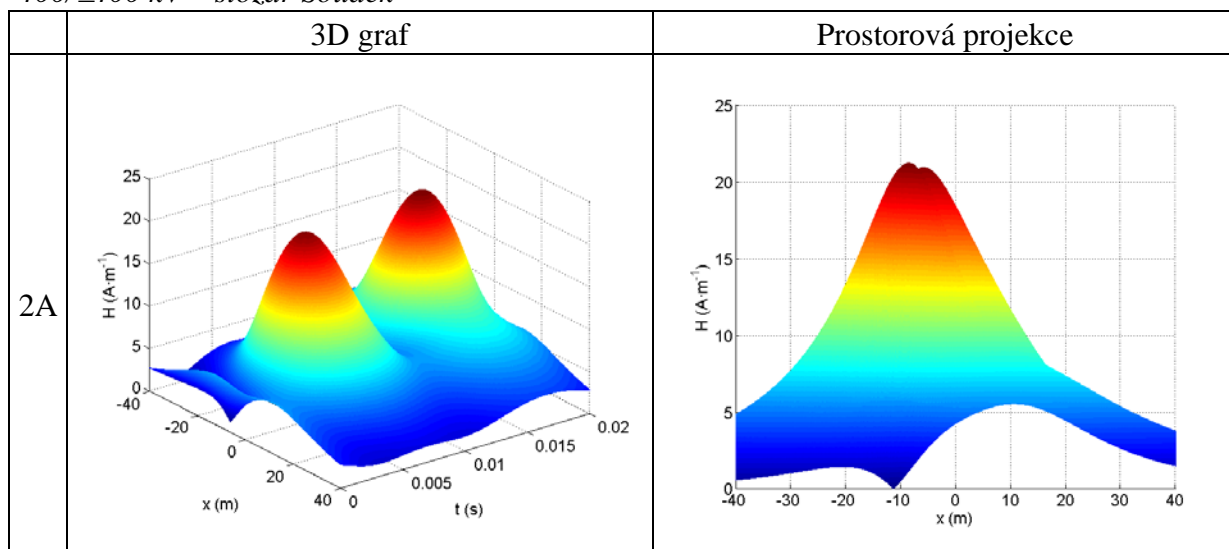
Tab. 24: Maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity pod stožárem Donau 2x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.
$H_{\text{MAX}} (\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	16,8	22,8	17,3
$B_{\text{MAX}} (\mu\text{T})$	21,2	28,6	21,6

5.5.2 AC/DC vedení

U hybridního vedení, kde byl předpoklad zvýšení napěťové hladiny DC vedení, ale zachován přenášený výkon, vycházelo magnetické pole slabší z důvodu nižších proudů fázovými vodiči. Mírný pokles lze vyčíst ze souhrnných tabulek pro oba stožáry.

Tab. 25: 3D graf a prostorová projekce intenzity magnetického pole pod hybridním vedením 400/±400 kV – stožár Soudek

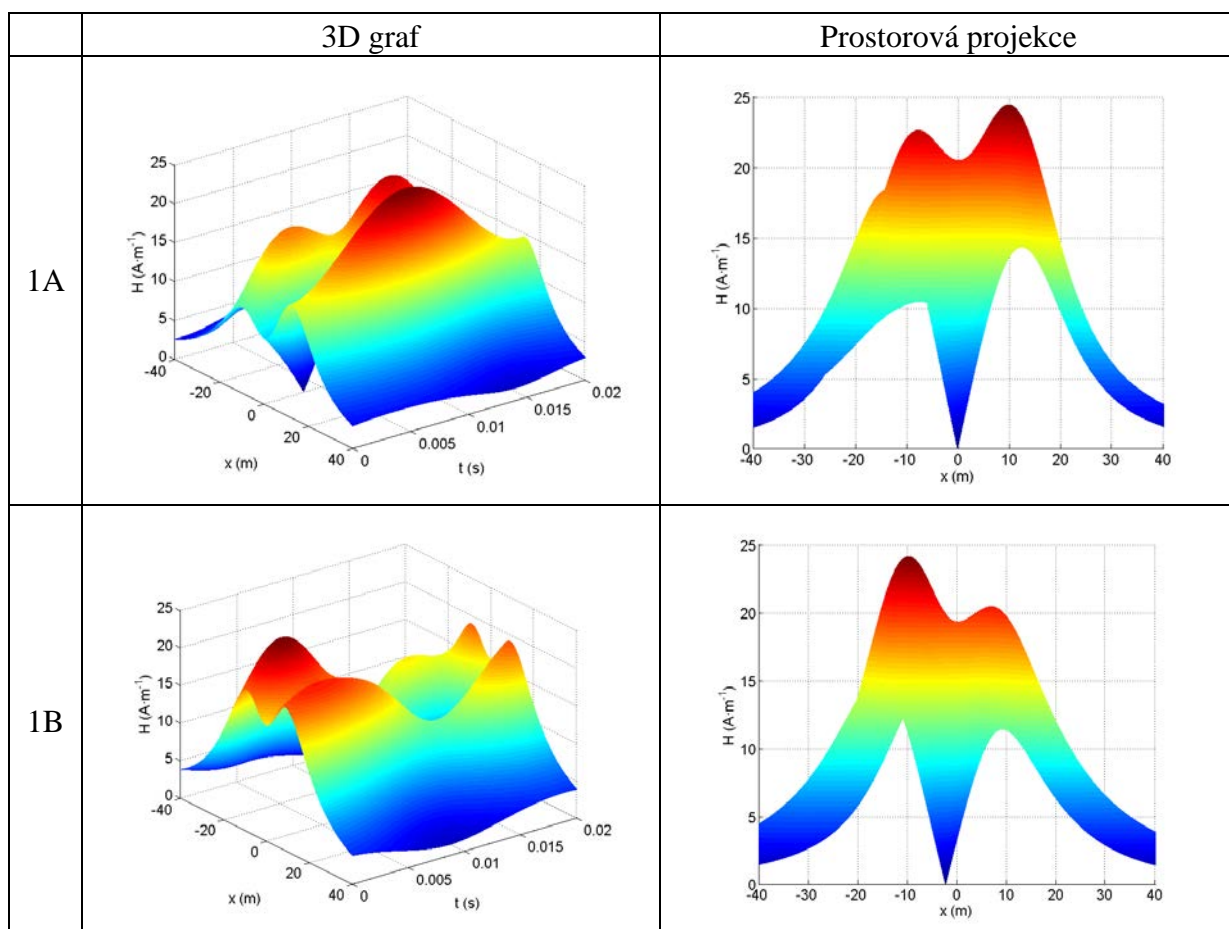


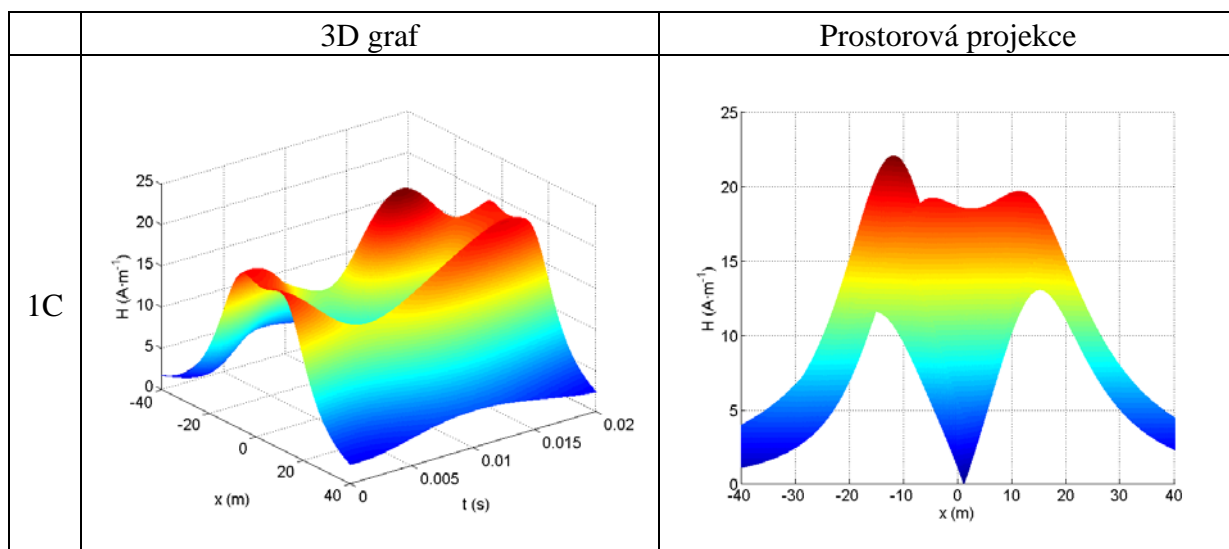
Z grafů pro stožár Soudek je zajímavé, že maximální hodnota intenzity magnetického pole vznikla na straně AC vedení, kterým protéká menší proud (o 400 A). Zajímavé také je, že je intenzita AC/DC vedení menší než pro vedení AC/AC, což značí dobré vykompenzování AC a DC pole. Nejpříznivější konfigurací byla pro stožár Soudek konfigurace 2A a 2C, které byly nižší než konfigurace stožáru Donau. Ale ani tyto konfigurace nesplnily limit magnetické indukce.

Tab. 26: Maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pod hybridním vedením pro varianty 400/±400 kV, 400/±450 kV a 400/±500 kV – stožár Soudek

Soudek	konfigurace	2A	2B	2C
400/±400 kV	H _{MAX} (A·m ⁻¹)	21,2	25,3	22,1
	B _{MAX} (μT)	26,6	31,7	27,7
400/±450 kV	H _{MAX} (A·m ⁻¹)	21,1	24,1	21,9
	B _{MAX} (μT)	26,4	30,3	27,5
400/±500 kV	H _{MAX} (A·m ⁻¹)	20,9	23,2	21,6
	B _{MAX} (μT)	26,3	29,1	27,2

Tab. 27: 3D grafy a prostorové projekce intenzity magnetického pole pod hybridním vedením 400/±400 kV – Donau





Rozložení intenzity magnetického pole odpovídá opět pozici jednotlivých vodičů. Vzájemná interakce polí způsobuje, že je značně (cca 3x) překročena limitní hodnota indukce jak pro stožár Soudek, tak pro Donau, jak je vidět v tabulkách.

Tab. 28: Maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pod hybridním vedením pro varianty 400/±400 kV, 400/±450 kV a 400/±500 kV – stožár Donau

Donau	konfigurace	1A	1B	1C
400/±400 kV	H_{MAX} ($A \cdot m^{-1}$)	24,4	24,1	22,0
	B_{MAX} (μT)	30,6	30,3	27,6
400/±450 kV	H_{MAX} ($A \cdot m^{-1}$)	22,5	23,6	21,7
	B_{MAX} (μT)	28,3	29,6	27,2
400/±500 kV	H_{MAX} ($A \cdot m^{-1}$)	21,6	23,0	21,3
	B_{MAX} (μT)	27,2	28,9	26,8

5.6 Speciální AC/DC vedení

Stožár Soudek je vhodný i pro čtyři vedení ať už pro sdružená AC vedení [27] nebo jak navrhuje německý provozovatel PS Amprion [14] pro vedení hybridní. V této kapitole je vyšetřeno elektromagnetické pole a vypočtený přenášený výkon a Jouleovy ztráty pro jednu konfiguraci stožáru Soudek, jehož rozměry a uspořádání fází je znázorněno v příloze B na obrázku B1.

Stožár nese celkem čtyři vedení o napětí 400 kV (dvě bipolární vedení ±400 DC a dvě vedení 400 kV AC). Pro porovnatelnost budeme uvažovat stejný přenášený výkon pro jeden potah AC vedení $P_{AC} = 1$ GW. Bipolární DC vedení má přenosovou schopnost $P_{DC} = 1,6$ GW. Celkový přenášený výkon takového vedení je potom $P_{celk} = 2P_{AC} + 2P_{DC} = 5,2$ GW.

Jako fázová lana byla použita 264-AL1/34-ST1A [17] ve čtyřsvazku s odporem $R_{ss} = 0.1094 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ a průměrem 22,4 mm. Odpor svazku při 50 °C je pak dán pro délku linky $l = 100 \text{ km}$ dle vzorce:

$$R_{sv} = \frac{0,1094}{4} \cdot [1 + 0,004(50 - 20)] = 3,06 \Omega$$

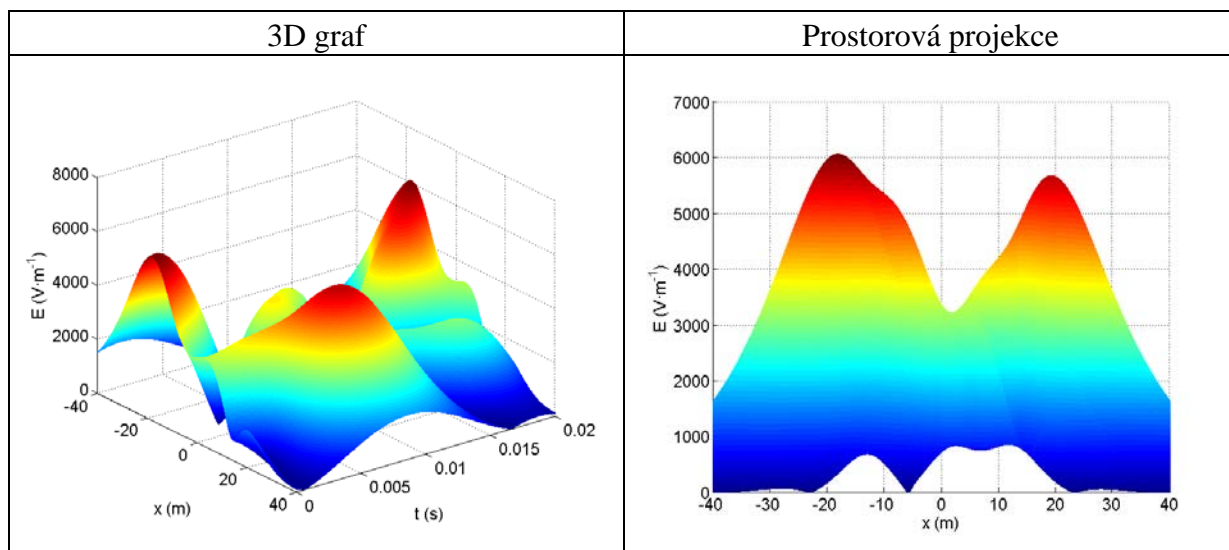
Jouleovy ztráty na obou AC a DC vedeních jsou pak dány dle vzorců (4-16) a (4-17) jako:

$$\Delta P_{jAC} = 2 \cdot 3 \cdot 3,06 \cdot 1603^2 \doteq 47 \text{ MW} \quad \Delta P_{jDC} = 2 \cdot 2 \cdot 3,06 \cdot 2000^2 \doteq 49 \text{ MW}$$

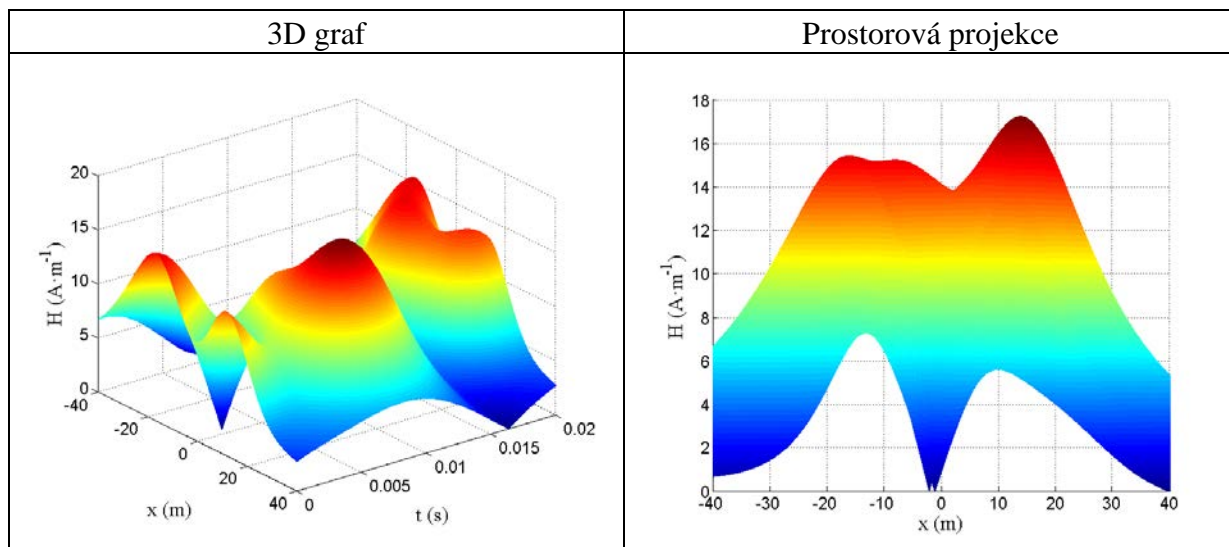
Přičteme-li ke ztrátám na odporech fázových vodičů ještě ztráty na svodech $\Delta P_{jg} = 5 \text{ MW}$, činí potom celkové Jouleovy ztráty $\Delta P_{j_celk} \doteq 101 \text{ MW}$.

Vypočtené poměrné ztráty o velikosti $\Delta p = 1,94 \%$ by se daly ještě více snížit použitím fázových lan s větším poloměrem a tím pádem nižším odporem. I tak jsou ale poměrné ztráty blízké ztrátám na dvojitým AC/AC vedení a tudíž porovnatelné. Výpočet ztrát korónou nebyl proveden, protože v použitých vzorcích () se neuvažuje vzájemné ovlivňování více vedení najednou, a tak by jejich výsledky neodpovídaly skutečnosti.

Výpočet intenzit elektrického a magnetického pole byl proveden pro výšku spodních vodičů od země $h = 15 \text{ m}$, což představuje extrémní průhyb. Výsledky jsou pro danou konfiguraci na obrázku č. 16 a 17.



Obr. 16: Grafy rozložení intenzity elektrického pole pod hybridním vedením Soudek se čtyřmi vedeními $2 \times 400 \text{ kV}$ a $2 \times \pm 400 \text{ kV}$



Obr. 17: Grafy rozložení intenzity magnetického pole pod hybridním vedením Soudek se čtyřmi vedeními $2\times 400\text{ kV}$ a $2\times \pm 400\text{ kV}$

Maximální hodnota intenzity elektrického pole činí $6054\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, což vyhovuje hygienickým limitům. Jak již bylo zmíněno, bylo záměrně počítáno pro extrémní průhyb fázových vodičů, který by v realitě pravděpodobně nenastal. I tak je ale vidět, že rozložení elektrického pole nebude dosahovat limitních hodnot. Maximální hodnota intenzity magnetického pole činí $17,2\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ a magnetická indukce $B = 21,6\text{ }\mu\text{T}$. Tyto hodnoty překročily zvolený hygienický limit, což by se dalo řešit zvolením lepší konfigurace fází. Kvůli značné výšce se ale dá předpokládat, že rozložení elektromagnetického pole v okolí bude vyhovovat hygienickým normám.

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala porovnáním přenosového vedení AC/AC s hybridním vedením AC/DC. Hlavními tématy bylo posoudit obě linky z hlediska Jouleových ztrát, velikosti přenášeného výkonu a rozložení elektromagnetického pole v jejich okolí. K tomuto účelu byly vybrány stožárové konstrukce Donau a Soudek s napětím 2x400 kV.

Výpočet byl proveden pro modelový příklad 100 km dlouhého AC/AC vedení 2x400 kV, kde bylo potřeba navýšit přenosovou kapacitu přezbrojením na hybridní linku. Jeden z původních potahů o $P_{př_1} = 1$ GW byl nahrazen bipolárním DC vedením o $P_{př_2} = 1,6$ GW. Celkový přenášený výkon 2 GW byl přezbrojením navýšen o 30 %, tedy na $P_{celk} = 2,6$ GW. Pro DC linku byly stanoveny tři napěťové hladiny ± 400 , ± 450 a ± 500 kV. Z přenášených výkonů na vedeních byly vypočteny proudy a následně Jouleovy ztráty.

Při vyhodnocování Jouleových ztrát byly do výpočtu zařazeny také ztráty způsobené korónou, které závisí na počasí, napěťové hladině a na vzdálenosti fázových vodičů. Pro výpočet ztrát korónou byly uvažovány dvě situace – sucho a déšť. Největší ztráty korónou vznikají za deště, konkrétně stožár Donau při konfiguraci 400/ \pm 500 kV vykazoval ztráty $P_{koróna_D} = 8,8$ MW, zatímco ztráty na stožáru Soudek činily $P_{koróna_S} = 6,3$ MW. Ztráty korónou na stožáru Soudek byly vždy nižší než na Donau z důvodu větší vzdálenosti mezi fázovými vodiči. Při porovnání velikosti ztrát korónou na hybridním a střídavém vedení, bylo zjištěno, že během suchého počasí je velikost ztrát podobná. Pro déšť však ztráty korónou na AC/DC vedení značně (1,5x až 3x) převyšují ztráty na AC/AC, ale přesto jsou celkové Jouleovy ztráty na AC/AC vedení větší, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Hlavní část práce byla věnována analytickému výpočtu intenzity elektrického a magnetického pole v okolí obou vedení. Na výsledné rozložení polí má velký vliv uspořádání vodičů jednotlivých vedení. Pro střídavá vedení byly zvoleny tři nejvýhodnější konfigurace fází na základě [27]. Při posuzování rozložení elektromagnetického pole se vycházelo z hygienických norem předepisující maximální intenzitu elektrického pole $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ a maximální magnetickou indukci $10 \text{ }\mu\text{T}$ ve výšce 1,8 m nad zemí. Proto byly i všechny grafy rozložení elektrického či magnetického pole vykresleny pro výšku 1,8 m nad zemí v rozsahu 40 m na obě strany od osy stožáru.

U vedení AC/AC nastává oproti hybridnímu vedení k častější kompenzaci účinků pole. Vzhledem k výhodnějšímu uspořádání fázových vodičů na stožáru Donau, je pole v jeho okolí koncentrovanější a tím se jeho účinky více redukuje. Hodnoty intenzity elektrického pole

AC/AC vedení stožáru Donau byly v průměru o $1 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ menší než pro stožár Soudek. Obdobně pak i rozložení magnetického pole bylo příznivější pro stožár Donau. Maximální povolená hodnota magnetické indukce B , však byla překročena 3x pro stožár Soudek a 2x pro stožár Donau. Maximální intenzita elektrického pole $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ nebyla překročena ani u jednoho ze stožárů.

Pro hybridní vedení byla zvolena na levé straně stožáru jedna základní konfigurace fází střídavého vedení a na pravé straně stožáru 6 možných uspořádání kladného, záporného a zpětného vodiče DC vedení. Později se ukázalo, že odlišné výsledky mají pouze tři ze šesti zvolených konfigurací. Proto byly vykresleny vždy jen tři dvojice (3D a 2D) grafů pro různá uspořádání. Maximální povolenou hodnotu intenzity elektrického pole nepřekročila pouze jedna konfigurace stožáru Soudek. Stožár Donau vyhověl ve dvou konfiguracích, ale pouze do napětí $400/\pm 450 \text{ kV}$. Magnetické pole hybridního vedení dosahovalo až trojnásobku maximální povolené indukce B . Zde je nutné podotknout, že výpočet byl proveden pro modelové vedení se zvoleným přenášeným výkonem, z kterého se následně určil proud. S vyšším přenášeným výkonem jsou vyšší i proudy ve vodičích, což má za následek zvýšení magnetického pole.

V práci byl také proveden výpočet jedné konfigurace speciálního stožáru nesoucí čtyři vedení ($2 \times 400 \text{ kV AC}$ a $2 \times \pm 400 \text{ kV DC}$), který by byl vhodný pro nový koridor vedení AC/DC. Protože se jedná o vysokou stožárovou konstrukci, je elektromagnetické pole v blízkosti země mnohem slabší než u předchozích stožárů. Problémy z hlediska hygienických norem by mohly nastat při měření hluku způsobeným korónou. Koróna i hluk se počítají empiricky a u takového stožáru původní vzorce pro jednoduché vedení ztrácejí zpravidla platnost.

Výhodou přezbrojení stávajícího AC/AC vedení na hybridní AC/DC je navýšení přenosové kapacity linky, snížení Jouleových ztrát a zejména rychlá výstavba. O tom, zda se přestavba vyplatí, však rozhodují zejména investiční náklady, které v této práci nebyly posouzeny. Následující závěrečná doporučení stojí tedy pouze na technických výpočtech v této práci. Vzhledem k tomu, že stožár Donau je na hladině 400 kV užíván mnohem častěji než stožár Soudek, je pravděpodobnější, že k realizaci hybridního vedení dojde právě na stožáru Donau. S ohledem na výsledky elektrického pole by však napětí DC vedení nemělo překročit hodnotu $\pm 450 \text{ kV}$. Pro co největší omezení ztrát korónou je nutné umístit kladný a záporný vodič nad sebe a zajistit tak co největší vzdálenost těchto vodičů. V případě, že by se pro hybridní vedení přezbrojil stožár Soudek, měl by mít kladný a záporný vodič DC vedení

umístěné co nejvýše, tedy na horní a prostřední konzoli, jak tomu bylo u jediné vyhovující konfigurace tohoto stožáru. Při porovnání obou stožárů z hlediska elektromagnetického pole v jejich okolí vykazuje nižší hodnoty intenzity elektrického i magnetického pole konstrukce Soudek. Výpočty elektrického pole zároveň potvrdily realizovatelnost hybridního vedení 400/±500 kV, což u Donau pro stejnou výšku vodičů nad zemí není z důvodu překročení hygienických norem možné. Ačkoliv je tedy pravděpodobnější, že se hybridní vedení realizuje na stožáru Donau, z hlediska ztrát korónou a rozložení elektromagnetického pole je výhodnější Soudek.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Tlustý, Josef. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [2] Huang et al.: Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects, 2009
- [3] R. Lings, Overview of transmission lines above 700 kV, IEEE PES 2005
- [4] Ultra High Voltage Projects. *State Grid Corporation of China* [online]. [cit. 17-04-26]. Dostupné z: <http://www.sgcc.com.cn/ywlm/projects/ultrahighvoltage/>
- [5] Majling, Eduard. HVDC stejnosměrný přenos elektrické energie. O energetice [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: 1url.cz/dtTsu
- [6] Technologie ABB, které změnily svět. HVDC. ABB [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: 1url.cz/ctTs1
- [7] ABB Review Special Report: 60 years of HVDC. In: ABB [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://1url.cz/8tEAK>
- [8] Hammons, et al.: State of the Art in Ultrahigh-Voltage Transmission. Proceedings of the IEEE 2012
- [9] HVDC Light (VSC). ABB [online] [cit. 2016-12-11] Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-light>
- [10] HVDC transformers. ABB [online] [cit. 2016-12-11] Dostupné z: <http://new.abb.com/products/transformers/power/hvdc-converter>
- [11] HVDC configuration. Energy Siemens [online] [cit. 2016-12-12] Dostupné z: <http://www.energy.siemens.com/br/en/power-transmission/hvdc/applications-benefits/configurations/>
- [12] Edris, Woodford et al: Upgrading AC Transmission to DC for Maximum Power Transfer Capacity, IEEE, 2008
- [13] Hammons, Woodford: Role of HVDC transmission in future energy development. IEEE Power Engineering Review, 2000
- [14] Cigre Working Group B2.41. *Guide to the conversion of existing AC lines to DC operation*. Cigre, 2014
- [15] ČSN EN 50 341-1 *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV*
- [16] Sander, Lundquist et al: Conversion of AC multi-circuit lines to AC-DC hybrid lines with respect to the environmental impact, Cigre, 2014
- [17] ACSR Steel Reinforced Aluminum Conductors. *4sProducts* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: 1url.cz/TtTVq
- [18] *Provozní dokumentace vedení, ČEPS a.s. – technická část*
- [19] Addendum to Electric and Magnetic Fields Produced by Transmission Systems”, Cigré Technical Brochure No. 61, 1996.
- [20] Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects”, JWG B2/B4/C1.17, Cigré Technical Brochure No. 388, 2009

-
- [21] N. Knudsen, F. Iliceto, "Contribution to the Electrical Design of HVDC Overhead Lines", IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 1, January/February 1974, pp. 233-239.
- [22] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, 3. přepracované vydání, Praha: SNTL, 1982.
- [23] Nazarčík, T. *Výpočet činných ztrát na transponovaném a netransponovaném vedení*. ZČU Plzeň, 2013.
- [24] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004
- [25] Benešová, Z., Beran, M., Šroubová, L.: *Reduction of Electric and Magnetic Field of Double-Circuit Overhead Lines*, AMTEE 2003, Plzeň, 2003
- [26] Nazarčík, T. *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení*, ZČU Plzeň, 2012
- [27] Kononov, M. *Návrh řešení sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy*, ZČU Plzeň, 2015

Přílohy

Příloha A

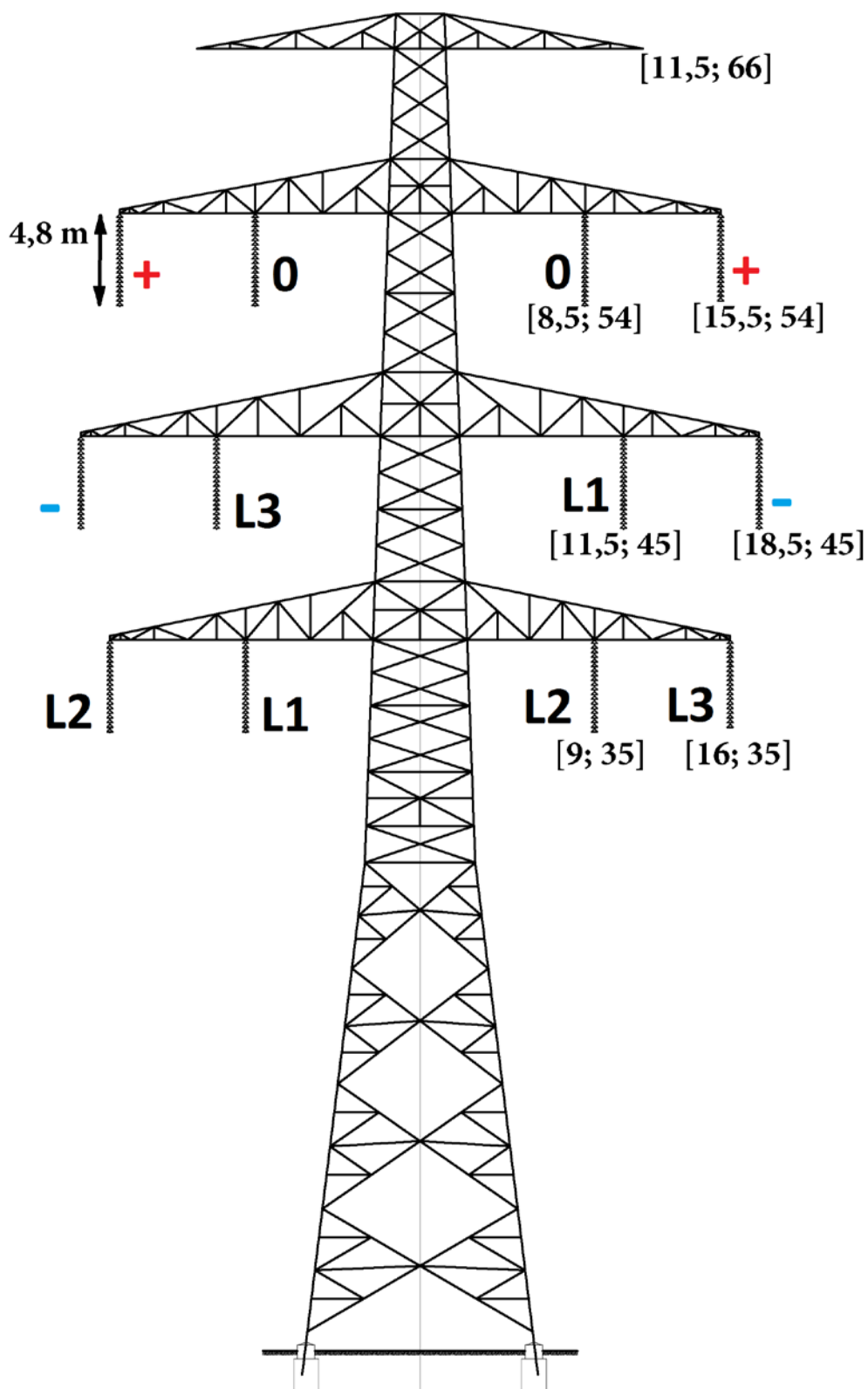


Obr. A1: Prototyp měničového transformátoru ABB o napětí 1100 kV [10]



Obr. A2: Polovodičové prvky VSC ABB [7]

Příloha B



Obr. B1: Hybridní stožár soudek s vedením AC a DC na jedné straně stožáru [16, 18]