



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**

Použitelnost sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy

Application of Combined Transmission and Distribution Power Lines

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Musil Ladislav Ph.D.

Alma Deleut

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Deleut** Jméno: **Alma** Osobní číslo: **466248**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Použitelnost sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy

Název bakalářské práce anglicky:

Application of Combined Transmission and Distribution Power Lines

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte srovnání kombinovaného vedení přenosové a distribuční soustavy s realizací vedení na samostatných stožárech.

Srovnání bude mimo jiné obsahovat:

- Hygienické limity elektrického a magnetického pole
- Typy konstrukce podpěrných bodů
- Vzájemný vlivy kombinovaného vedení
- Projekční a konstrukční provedení

Seznam doporučené literatury:

- Nařízení vlády 2015/219
- Metodický návod ke sjednocení postupu orgánů ochrany veřejného zdraví
- Konstantin O. Papailiou: Overhead Lines: CIGRE GREEN BOOK

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ladislav Musil, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.11.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Ladislav Musil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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 předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 24.5.2019

.....

Alma Deleut

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práci Ing. Ladislavu Musilovi, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práci, cenné rady, připomínky, trpělivost, ochotu a věnovaný čas. Zároveň bych poděkovala firmě EGU - HV Laboratory a.s. za možnost použití výpočetního programu OverHead.

V Praze 24.5.2019

.....

Alma Deleut

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnatelností sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy s realizací vedení na samostatných stožárech. Dále popisuje elektromagnetické pole v okolí sdruženého, přenosového a distribučního vedení. Cílem této práce je zhodnocení výsledků měření sdružených vedení a posudek, který z typů realizace má lepší elektrické parametry.

Klíčová slova

sdružená vedení, přenosová soustava, distribuční soustava, vzájemné vlivy vedení, napěťová nesymetrie, elektromagnetické pole vedení, hygienické limity

Abstract

The bachelor thesis deals with the comparability of combined transmission and distribution lines with the implementation of lines on separate poles. Furthermore, it describes electromagnetic field of combined, transmission and distribution power lines. The aim of this work is to evaluate the results of measurements of combined power lines and check which of the types of implementation has better electrical parameters.

Key words

combined power lines, transmission power lines, distribution power lines, mutual influences of power lines, asymmetric tension, electromagnetic field of power lines, hygiene limits

OBSAH

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	8
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM GRAFŮ	12
1. ÚVOD	13
2. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	14
2.1. Přenosová soustava.....	14
2.2. Distribuční soustava.....	16
2.3. Sdružená vedení	17
3. PROJEKČNÍ A KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ	18
3.1. Fázové vodiče.....	19
3.2. Zemnicí lana.....	20
4. TYPY STOŽÁRŮ VENKOVNÍCH VEDENÍ	21
4.1. Základní typy stožárů pro přenosovou soustavu	22
4.2. Základní typy stožárů pro distribuční soustavu.....	23
4.3. Základní typy stožárů pro sdružená vedení PS a DS	23
5. OCHRANNÉ PÁSMO VEDENÍ.....	25
5.1. Ochranná pásma vedení 110 kV a 400 kV.....	25
5.2. Ochranné pásmo sdruženého vedení.....	26
6. ŘEŠENÍ ELEKTRICKÉHO POLE A VÝPOČET INTENZITY	27
6.1. Normy a předpisy	27
6.2. Výpočet elektrického pole	27
6.3. Sdružená vedení PS a DS.....	30
6.4. Realizace vedení na samostatných stožárech	33
6.5. Porovnání hodnot intenzity elektrického pole sdruženého vedení a provedení na samostatných stožárech	35
7. ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO POLE A VÝPOČET INDUKCE	36
7.1. Normy a předpisy	36

7.2.	Výpočet magnetického pole	36
7.3.	Sdružené vedení PS a DS	38
7.4.	Realizace vedení na samostatných stožárech	39
7.5.	Porovnání hodnot magnetické indukce sdruženého vedení a realizace vedení na samostatných stožárech	40
8.	VZÁJEMNÉ VLIVY VEDENÍ	41
8.1.	Elektrické parametry	41
8.2.	Impedanční matice vedení	41
8.3.	Výpočet úbytků napětí na sdruženém vedení	44
8.4.	Výpočet úbytků napětí na provedení PS a DS na samostatných stožárech	47
8.5.	Porovnání výsledků úbytků napětí	49
9.	ZÁVĚR	50
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
	SEZNAM PŘÍLOH	54

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Al	hliník
AlFe	lano složené z oceli a hliníku
B [T]	magnetická indukce
C_1 [F/km]	provozní kapacita
CENELEC	The European Committee for Electrotechnical Standardization
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČEZ	České energetické závody
ČR	Česká republika
ČSN	České technické normy
DS	distribuční soustava
d [cm]	průměr použitého vodiče
D_g [m]	hloubka vodiče v zemi
$d_{i,j}$ [m]	vzdálenost mezi skutečnými vodiči i a j
E [V/m]	intenzita elektrického pole
ENTSO – E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ENV	The European Pre-standard
ES	elektrizační soustava
f [Hz]	frekvence střídavého proudu
Fe	železo
FV	fázový vodič
G_1 [S/km]	svod
H [A/m]	intenzita magnetického pole
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IZ	izolátorový závěs
$j = \sqrt{-1}$	imaginární jednotka
l [km]	délka vedení
L_1 [H/km]	provozní indukčnost
KZL	kombinované zemní lano
OPV	ochranné pásmo vedení
PRE	Pražská energetika, a.s.
PS	přenosová soustava

\vec{Q}_{Vi}	lineární hustotu náboje
R [Ω/km]	činný odpor
R_{DC} [Ω/km]	stejnoseměrným elektrickým odporem vodičů
S [MVA]	instalovaný výkon na vedení
U [kV]	napětí na vedení
$ \hat{U}_{2,0} $ [V]	velikost zpětné a netočivé složky napětí
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
WHO	World Health Organization
X [m]	vzájemná horizontální poloha vodiče
X_1 [Ω/km]	indukční reaktance
Y [m]	vzdálenosti vodiče od zemi
Y_{\min} [m]	minimální vzdálenost od zemi
$y^i, y^{i'}$	vzdálenosti vodičů V^i a $V^{i'}$ od zemi
\hat{Y}_{q1} [S/km]	komplexní příčná admitance
\hat{Z}_{l1} [Ω/km]	komplexní podélná impedance
ZL	zemní lano
ZVN	zvlášť vysoké napětí
ε [F/m]	permitivita
ξ [-]	součinitel, který respektuje nerovnoměrné rozložení proudu
$\delta_{i,j}$	matice potenciálových součinitelů
$\vec{\varphi}$ [V]	elektrický potenciál
$\varphi_{2,0}$ [-]	úhel fázoru zpětné a netočivé složky
μ [H/m]	permeabilita
ρ [Ωm]	měrný odpor země

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: <i>Ochranné pásmo nadzemního vedení</i>	25
Tabulka 2: <i>Maximální dovolené hodnoty pro intenzitu elektrického pole</i>	27
Tabulka 3: <i>Uspořádání fází fázových vodičů sdruženého vedení</i>	31
Tabulka 4: <i>Uspořádání fází fázových vodičů vedení na samostatných stožárech</i>	34
Tabulka 5: <i>Maximální dovolené hodnoty pro magnetickou indukci</i>	36
Tabulka 6: <i>Uspořádání fází fázových vodičů sdruženého vedení</i>	38
Tabulka 7: <i>Uspořádání fází fázových vodičů vedení na samostatných stožárech</i>	39
Tabulka 8: <i>Hodnoty pro měření napěťové nesymetrie u sdruženého vedení</i>	44
Tabulka 9: <i>Amplituda netočivé a zpětné složky napětí na vedení 2x110 kV pro sdružené vedení</i>	46
Tabulka 10: <i>Úhel fázoru netočivé a zpětné složky napětí na vedení 2x110 kV pro sdružené vedení</i>	46
Tabulka 11: <i>Hodnoty pro měření napěťové nesymetrie u vedení přenosové a distribuční soustavy</i>	47
Tabulka 12: <i>Netočivá a zpětná složka napětí na vedení 2x110 kV pro přenosové a distribuční vedení</i>	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: <i>Schéma elektrizační soustavy [1]</i>	14
Obrázek 2: <i>Přenosová soustava České republiky [1]</i>	15
Obrázek 3: <i>Mapa distribuční soustavy České republiky [21]</i>	16
Obrázek 4: <i>Porovnání koridoru vedení 2x110 kV a 2x400 kV a sdruženého vedení 2x110kV/2x400kV</i>	17
Obrázek 5: <i>Vodiči 490-AL1/64-ST1A a 679-AL1/86-ST1A [Příloha D]</i>	19
Obrázek 6: <i>Základní typy stožárů elektrického vedení [14]</i>	22
Obrázek 7: <i>Typy stožárů pro sdružené vedení PS a DS</i>	24
Obrázek 8: <i>Složky vektoru intenzity elektrického pole [7]</i>	28
Obrázek 9: <i>Uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan na stožáru sdruženého vedení</i>	30
Obrázek 10: <i>Kombinace uspořádání fází fázových vodičů na sdruženém vedení</i>	31
Obrázek 11: <i>Uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan na stožárech 2x400 kV a 2x110 kV</i>	33
Obrázek 12: <i>Kombinace uspořádání fází fázových vodičů na samostatných stožárech</i>	34
Obrázek 13: <i>Pozice vodičů pro výpočet magnetické indukce [12]</i>	37
Obrázek 14: <i>Soustava n-vodičů vedení ve vzájemné vzdálenosti D_g [7]</i>	41
Obrázek 15: <i>Dvojitá třífázová soustava vedení – fáze vodičů</i>	43
Obrázek 16: <i>Kombinace uspořádání fází fázových vodičů 400 kV na sdruženém vedení pro výpočet nesymetrie</i>	46
Obrázek 17: <i>Sled fází fázových vodičů 400 kV pro výpočet napěťové nesymetrie</i>	48

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: <i>Průběh intenzity elektrického pole pro různé sledy fází sdruženého vedení.....</i>	32
Graf 2: <i>Průběh intenzity elektrického pole pro různé sledy fází vedení na samostatných stožárech.....</i>	35
Graf 3: <i>Průběh magnetické indukce pro různé sledy fází sdruženého vedení.....</i>	39
Graf 4: <i>Průběh magnetické indukce pro různé sledy fází vedení na samostatných stožárech.....</i>	40

1. ÚVOD

Mezi hlavní činnosti provozovatelů elektrizační soustavy patří bezpečný a spolehlivý provoz elektroenergetické přenosové a distribuční soustavy a jejich rozvoj. Kvůli rostoucím požadavkům na přenos a rozvod elektrické energie jsou provozovatelé donuceni stavět nová nebo rekonstruovat existující venkovní vedení. [1]

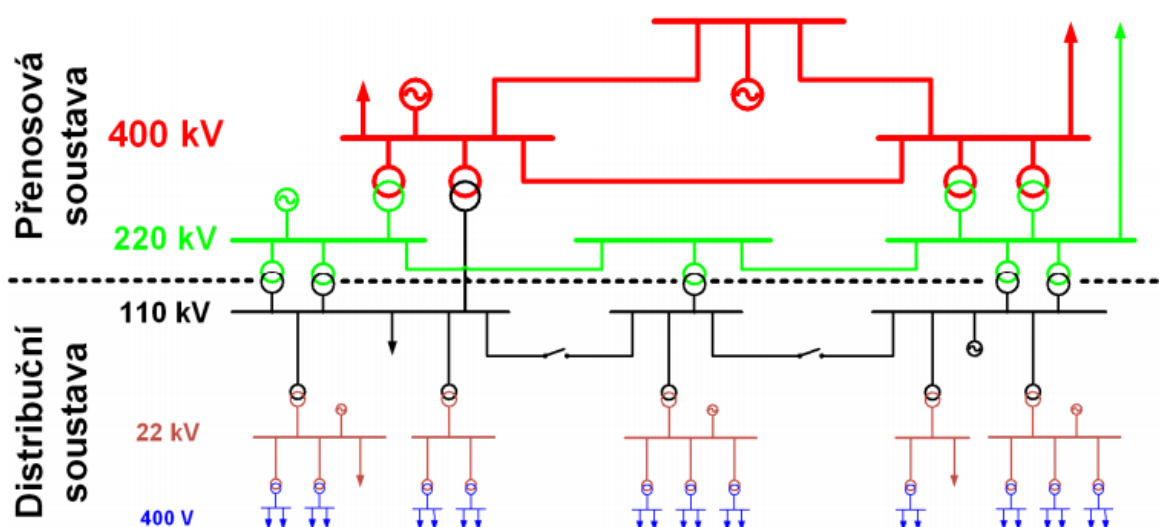
Koridory pro přenosové linky jsou přísně omezovány státní správou a vlastníky pozemků zejména v hustě osídlených a hospodářsky rozvinutých oblastech. Plné využití koridoru přenosového vedení může zlepšit kapacitu přenosu energie. Na základě zkušeností v rozvinutých zemích, budování sdružených vedení různých napěťových hladin maximalizuje použitelnost stávajících koridorů.

Sdružená vedení jsou vedení, u kterých se jedna stožárová konstrukce používá pro vedení dvou různých napěťových hladin. Jedná se zejména o vedení distribuční a přenosové soustavy. Sdružená vedení byla široce využívána v mnoha zemích, například v Číně, Japonsku a Německu. V České republice se v následujících letech bude kvůli zúžení koridoru pro nová vedení přenosové a distribuční soustavy stavět sdružená vedení PS a DS. Jsou navrženy 2 nové linky, jejichž část bude sdružené vedení: V415/495 - Chodov – Čechy Střed a V409/419 Výchov – Praha Sever – Čechy Střed. [2] Toto sdružené vedení bude typu 2x400 kV a 2x110 kV. To znamená, že na jedné stožárové konstrukci bude dvojité vedení přenosové soustavy s napěťovou hladinou 400 kV a dvojité vedení distribuční soustavy s napěťovou hladinou 110 kV.

Cílem této práce je porovnat sdružené vedení s dvěma souběžnými vedeními stejných parametrů. Porovnání bude zaměřeno především na elektrickou část vedení. Budou porovnány hygienické limity elektrického a magnetického pole a vypočtená intenzita elektrického pole a magnetická indukce obou provedení. Dále budou posouzeny vzájemné vlivy vedení a vypočtena napěťová nesymetrie. V této práci se taky posoudí ochranné pásmo vedení a typy konstrukce stožárů.

2. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

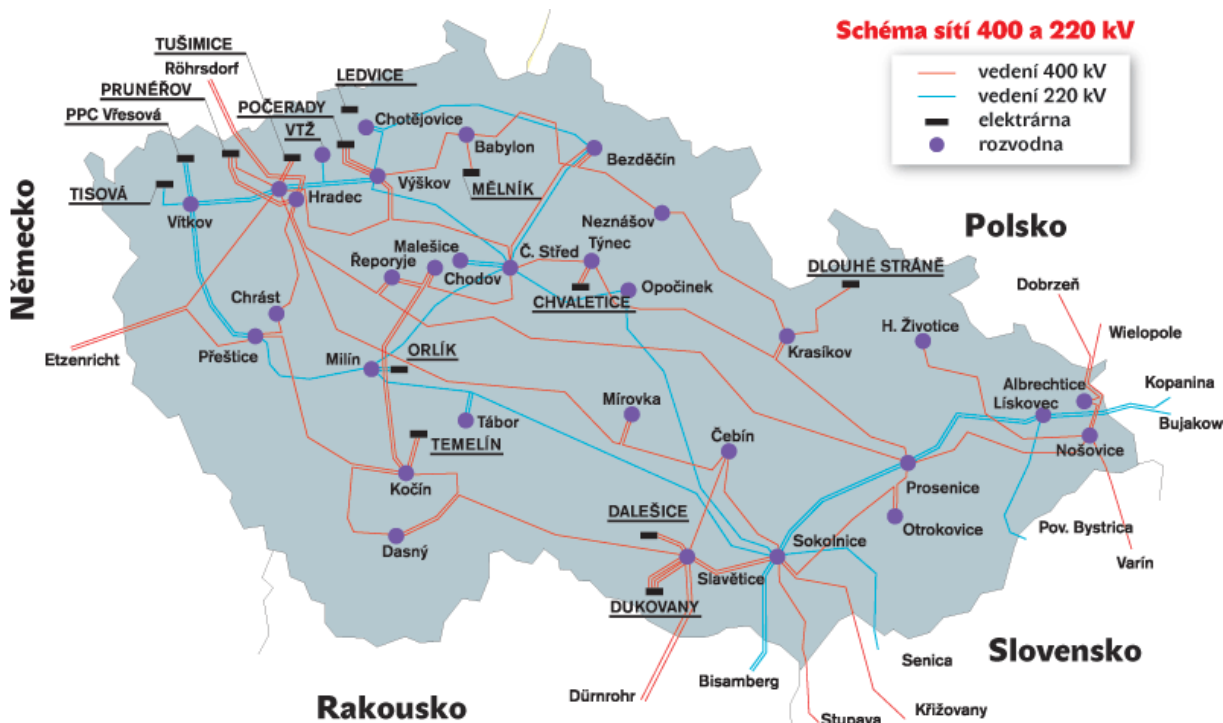
Elektrizační soustava („ES“) je skupina zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie. Základ elektrizační soustavy tvoří zdrojová část (tepelné, vodní, jaderné, větrné, solární a plynové elektrárny) a síť složená z rozvodů, vedení, kompenzačních prostředků a transformátorů. [7,15] Hlavním úkolem ES je zajištění rovnováhy mezi zdroji a potřebou elektrické energie s ohledem na bezpečnost, spolehlivost a kvalitu dodávky. Elektrizační soustavu dělíme na přenosovou a distribuční soustavu.



Obrázek 1: Schéma elektrizační soustavy [1]

2.1. Přenosová soustava

Elektrická přenosová soustava („PS“) je systém, který zajišťuje přenos elektrické energie na velké vzdálenosti od zdrojů elektrické energie k velkým rozvodnám. Přenosová soustava v České republice je tvořena ze sítě velmi vysokého napětí („VVN“) 110 kV a 220 kV a zvláště vysokého napětí („ZVN“) 400 kV. V zahraničí se setkáváme i s napětíovou hladinou 1000 kV. Všechna vedení a transformátory přenosové soustavy jsou propojeny mezi sebou, což znamená, že se všechny prvky vzájemně elektricky ovlivňují. [7] Při výpadku jednoho vedení nebo transformátoru převezmou jeho zátěž ostatní vedení, která jsou v provozu. K přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti se využívá zvláště vysoké napětí z důvodu snížení přenosových ztrát, které vznikají průchodem elektrického proudu. [1,15]



Obrázek 2: Přenosová soustava České republiky [1]

Provozovatelem PS České republiky je společnost ČEPS, a.s.. Dle zákona č. 458/2000 Sb. § 24 Provozovatel přenosové soustavy: „Provozovatel přenosové soustavy zajišťuje bezpečný, spolehlivý a efektivní provoz, obnovu a rozvoj přenosové soustavy a zajišťuje propojení přenosové soustavy s jinými soustavami, a za tím účelem zabezpečuje podpůrné služby a dlouhodobou schopnost přenosové soustavy uspokojovat přiměřenou poptávku po přenosu elektřiny, spolupracuje s provozovateli propojených přenosových soustav a spolupracuje na integraci vnitřního evropského trhu s elektřinou.“ [5]

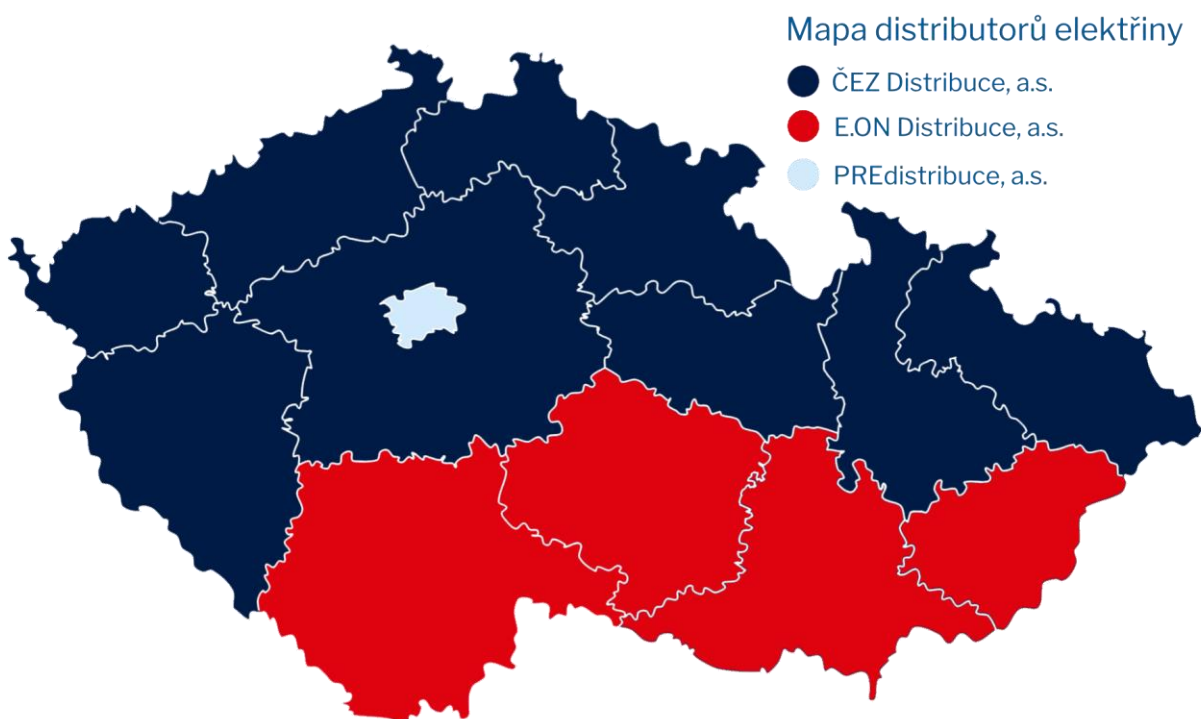
Pro přenos energie se využívají výhradně venkovní vedení. Celková délka vedení 400 kV je 3 735 km (z toho dvojitě a vícenásobné vedení 1 371 km) a vedení 220 kV je 1 909 km (z toho dvojitě a vícenásobné vedení 1 038 km). PS má smyčkový charakter, kdy počet vedení je větší než počet rozvodů. Přenosovou soustavu činí ještě 13 elektráren a 42 rozvodů se 75 transformátory pro napěťové hladiny 400 kV a 220 kV, celkový instalovaný výkon je 18 830 MVA. [1] Přenosová soustava České republiky je součástí přenosové soustavy kontinentální Evropy ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) a propojuje ji se zahraničím přes 17 hraničních vedení.

2.2. Distribuční soustava

Distribuční soustava („DS“) slouží k distribuci výkonu k odběratelům. Přenáší výkon na kratší vzdálenosti a jsou do ní připojeny elektrárny nižších výkonů. [7] Napětí 400 a 220 kV se v transformačních stanicích transformuje na vysoké napětí 110 kV. Toto napětí se potom částečně přivádí do velkých podniků těžkého průmyslu a částečně se distribuuje k dalším spotřebitelům (lehký průmysl, města), kde se transformuje na napětí 35 a 22 kV. Poslední transformace je z napětí 22 kV na nízké napětí 230 V a 400 V. [15] Hlavní úkoly DS jsou dodávka elektrické energie v požadované kvalitě, nepřetržitost dodávek a kvalita napětí (velikost, stálost a symetrie).

Pro přenos elektrické energie se v distribuční soustavě používají venkovní a kabelová vedení. Pro síť 110 kV jsou to venkovní vedení, která jsou z 70% dvojitá. Venkovní vedení se běžně používají i pro síť 22 a 35 kV. Pro síť městských a venkovských rozvodů (6 kV, 10 kV, 400 V) se používají vedení venkovní, kabelová a kombinace venkovní kabelová.

V České republice je provoz distribuční soustavy podle území rozdělen mezi tři společnosti: ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce a.s. a PREdistribuce, a.s..



Obrázek 3: Mapa distribuční soustavy České republiky [21]

2.3. Sdružená vedení

Sdružené vedení lze technicky popsat jako množinu zařízení složenou ze dvou podmnožin:

- hlavní vedení spolu se stožárem, konzolami, zemnicím lanem, izolátory, armatury a vodiči
- přidružené vedení spolu s izolátory, armaturami a vodiči pro druhé vedení

Varianty vedení, které mohou být zkoumány:

- vedení VN – VN
- vedení VVN – VN
- vedení VVN – VVN
- vedení ZVN – VVN

V této práci se budeme především zabývat kombinací vedení ZVN – VVN (kombinace PS a DS).

Kabelizace vedení ZVN není obecně preferovaným řešením, proto se používá sdružené vedení v místech s omezeným koridorem. Další důvody použití sdružených vedení jsou i omezení negativních vlivů na okolí, rostoucí ceny náhrad za omezené vlastnického práva k pozemkům a problémy při projednávání nových energetických koridorů. [9]

Nevýhodami sdruženého vedení jsou bezpečnostní rizika a provozní spolehlivost (vzájemné ovlivňování provozu osazených vedení), zvýšená četnost úderů blesků a zpětných přeskoků kvůli výšce stožárů a omezení provozu vedení VVN při práci na vedení ZVN. [10]



Obrázek 4: Porovnání koridoru vedení 2x110 kV a 2x400 kV a sdruženého vedení 2x110kV/2x400kV [14,20]

3. PROJEKČNÍ A KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ

Podle stavebního zákona existují různé stupně projektové dokumentace, které se dělají pro stavbu nového nadzemního vedení:

- Studie stavby
- Dokumentace pro územní rozhodnutí/řízení (DUR)

Tato dokumentace se řídí vyhláškou 503/2006 Sb. ze stavebního zákona. Na základě této dokumentace vydá příslušný stavební odbor povolení k umístění stavby dle jednotlivých daných parametrů.

- Dokumentace pro stavební povolení/ohlášení stavby (DSP/DOS)

Stavba nadzemních vedení je obvykle považována za veřejně prospěšnou stavbu, ale stejně se musí projednat se všemi dotčenými orgány v koridoru vedení (obce, ministerstvo životního prostředí a dotčení provozovatelé jiných sítí).

- Dokumentace pro provedení stavby (DPS)

Tato dokumentace již obsahuje přesně navržené materiály, výkaz výměr a souhrn potřebného materiálu a prací. Na základě této dokumentace se vybírají zhotovitelé a dodavatelé materiálu.

- Dokumentace skutečného provedení

Tato dokumentace se vypracovává, pokud se během realizace stavby změni navrhované modely a skutečné provedení se výrazně liší od schválené dokumentace.

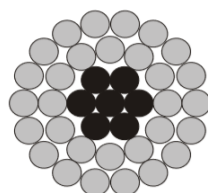
Sdružené vedení přenosové a distribuční soustavy má za výhodu oproti realizaci vedení na samostatných stožárech to, že se pro sdružené vedení vypracovává společná projektová dokumentace. U realizace vedení na samostatných stožárech se musí dělat projektová dokumentace pro vedení PS a zvlášť projektová dokumentace pro vedení DS. Sdružené vedení zabírá menší plochu než provedení na samostatných stožárech a seznam dotčených orgánů, které vedení ovlivní, je menší.

V rámci projektové dokumentace se taky zpracovávají situační výkresy, které uvádí přesný koridor vedení po zpracování všech připomínek dotčených orgánů a posouzení všech křižovatek s veřejnými komunikacemi a jinými sítěmi. Z elektrické stránky projektová dokumentace nového vedení spočívá v návrhu vodičů dimenzovaných podle maximálního proudu a v kontrole mechanického namáhání vodičů. V projektové dokumentaci dále musí být i návrh izolátorových závěsů a uchycení vodičů na stožárech, a také i návrh zemnicích lan. Další elektrická část dokumentace je návrh stožárových konstrukcí a základů stožárů. Při vypracování projektové dokumentaci se musí dávat pozor na podmínky dané legislativními normami a hygienickými limity. [2]

3.1. Fázové vodiče

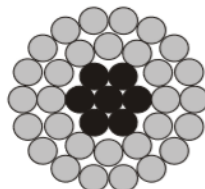
Hlavní funkcí fázového vodiče je přenést výkon. Fázovým vodičem teče proud a má definované napětí vůči zemi (podle napěťové hladiny). Volba vodičů venkovního vedení ovlivní i bezpečnostní provoz vedení kvůli průhybům. Na volbě vodiče samozřejmě závisí i ztráty elektrické energie a úbytky napětí. Vodiče jsou vystavené klimatickým jevům jako dešti, větru, námraze a změnám teploty. Vodič musí mít velkou pevnost, malé ztráty při oteplení, odolnost vůči poškození při montáži a vůči chemickým vlivům. [13]

Pro co nejlepší porovnání sdruženého vedení a realizaci vedení na samostatných stožárech byly zvoleny vodiče 400 kV a 110 kV pro obě realizace vedení stejné. Pro napěťovou hladinu 400 kV byl zvolen typ vodiče AlFe s označením 490-AL1/64-ST1A o průřezu 553,83 mm², průměru 3,06 cm a poměru hliníku a železa 7,71. Pro napěťovou hladinu 110 kV byl zvolen typ fázového vodiče AlFe s označením 679-AL1/86-ST1A o průřezu 764,54 mm², průměru 3,6 cm a poměru hliníku a železa 7,89. Při návrhu vodičů sdruženého vedení se musí dávat pozor i na vzájemná ovlivňování a průhyby mezi vedení různých napěťových hladin.



M 2 : 1

Typ lana:	679-AL1/86-ST1A
-----------	-----------------



M 2 : 1

Typ lana:	490-AL1/64-ST1A
-----------	-----------------

Obrázek 5: Vodiči 490-AL1/64-ST1A a 679-AL1/86-ST1A [Příloha D]

3.2. Zemnicí lana

Zemnicí lano je úmyslně uzemněný vodič umístěný na vrcholech stožáru nad fázovými vodiči. Dle typu stožáru je na něm instalováno jedno nebo dvě zemnicí lana. Zemnicí lano se používá kvůli ochraně vedení před přímým úderem blesku. Zemnicí lano se konstrukčně nijak zvlášť neliší od klasických fázových vodičů. V současnosti je už také požadavek na co nejvodivější zemnicí lano kvůli zkratům. Kombinované zemnicí lano je zemnicí lano, které slouží jako prostředek pro komunikaci po vedení. Pro komunikaci slouží optické vlákno v kombinovaném zemnicím lanu. Optická vlákna se používají pro komunikaci v DS a PS, také se pronajímají ostatním společnostem provozujícím internetové připojení, telefonní sítě nebo kabelové televize. Kombinované zemnicí lano je konstruované tak, že jsou optická vlákna uprostřed vodiče a jsou obklopena hliníkovou trubičkou, na které jsou navinuty ocelové a hliníkové dráty. [13]

Pro sdružené vedení jsou použita dvě zemnicí lana typu 195-AL4/42-A20SA s průměrem 2,01 cm a stejnosměrným odporem 0,169 Ω /km. Pro realizaci vedení na samostatných stožárech je použité to samé lano kvůli porovnatelnosti. Na vedení 400 kV jsou nainstalována dvě zemnicí lana 195-AL4/42-A20SA a na vedení 110 kV je jedno zemnicí lano 195-AL4/42-A20SA.

4. TYPY STOŽÁRŮ VENKOVNÍCH VEDENÍ

Stožáry jsou podpěrné body, ke kterým jsou přes izolátorové závěsy připevněny holé vodiče. Stožáry jsou nezbytnou součástí nadzemního elektrického vedení, které zajišťují, aby se elektrické vodiče (části pod napětím) nedotýkaly země, okolních předmětů a objektů. Jeden z hlavních požadavků na konstrukci stožáru je odolnost proti extrémním povětrnostním a námrazovým vlivům. Musí odolávat větru o minimální rychlosti 120 km/h. Také musí být dimenzovány tak, aby vydržely namáhání a splňovaly bezpečnostní požadavky po celou dobu jejich životnosti.

Stožáry jsou většinou vyrobeny z ocelové či dřevěné konstrukce. Na ocel může být přidána i povrchová ochrana proti korozi (nátěr, pozinkování).

Stožár elektrického vedení se může pozorovat jako soustava tří částí. Částmi stožáru jsou hlava stožáru, dřík a pata (také patka nebo zhlaví). Pata je první částí stožáru od země, která je spojena se zemí prostřednictvím základu. Dřík spojuje patu a hlavu stožáru a někdy se označuje jako noha stožáru. Izolátorové závěsy jednotlivých vodičů (fází) elektrického vedení jsou na stožár uchyceny přes konzoly nebo ramena. [14]

Stožár je spojen se zemí přes svoji základní část. Část základu stožáru nad zemí prezentují čtyři betonové válce o průměru řádek desítek centimetrů a podobné výšce. Do každého z válců je ukotvena jedna základová noha stožáru.

Většina stožárů vyšších napěťových hladinách má nainstalovaná i zemnicí lana, která mají za úkol chránit vedení před atmosférickým přepětím. [16]

Výběr typu stožáru záleží na funkci stožáru a geometrickém uspořádání (konfiguraci) vodičů a zemnicích lan. Tyto parametry hlavně ovlivňují tvar hlavy stožáru.

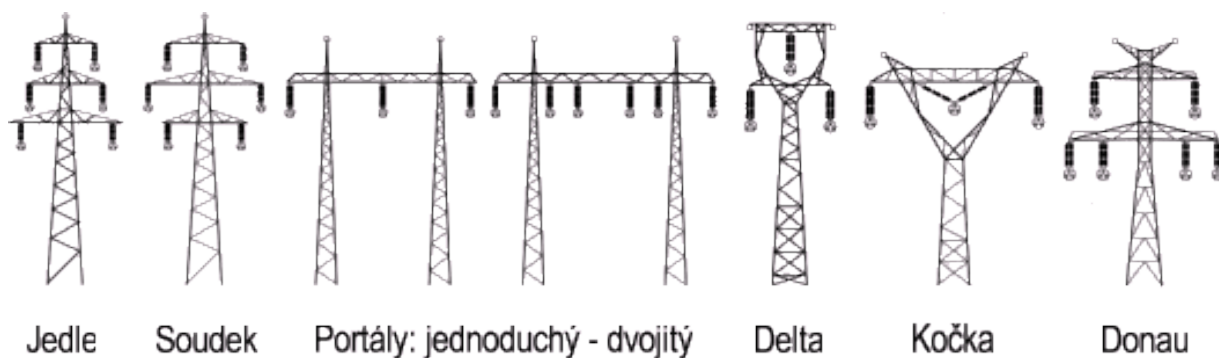
Při navrhování výšek stožáru musí být dodrženy minimální vzdálenosti nejspodnějšího vodiče od terénu a speciálních křižovatek, vzdálenosti mezi jednotlivými fázemi, vzdálenosti od zemnicích lan, konstrukce a souběžného vedení. Minimální bezpečná vzdálenost vodičů od terénu nebo jiných elektrických vedení přenosové a distribuční soustavy je stanovena normami. Tyto vzdálenosti musí být dodrženy pro všechny provozní stavy, aby vedení bylo provozováno. Proto je vzdálenost vodičů od terénu hlavním parametrem při výběru výšky stožáru. Výška závisí i na délce izolátorových závěsů a na průřezu. [16]

Stožáry lze rozdělit do skupin podle účelu na: nosné (N), rohové (R), výztužné (V), rohové výztužné (RV), odbočné (O) a zákrutové (Z) stožáry. Dále jsou podrobně popsány nosné a výztužné stožáry.

Nosné stožáry jsou mezilehlé stožáry přímé trasy, na kterých jsou vodiče zavěšeny pomocí svislých izolátorových závěsů. Vodorovné složky tahů vodičů se na izolátorech ruší, takže je stožár ve směru vedení namáhán vodorovnou silou pouze od tlaku větru na stožár. Kolmo na směr vedení je zatížení dáno zatížením větrem.

Výztužné stožáry se nazývají kotevní. Jejich hlavním úkolem je vytvářet pevné body na trase. Ke kotevním stožárům jsou vodiče připojeny přes kotevní izolátorové závěsy. Na vodiče působí plný tah vodičů. Mezi oběma stranami stožáru přechází vodič mezi izolátorovými závěsy přes přeponku, která není mechanicky namáhána.

Vedení jsou obvykle sestavena převážně z nosných stožárů kvůli nákladům a jednoduššímu návrhu vedení. Výztužné stožáry se vkládají mezi nosné. Přes výztužné stožáry se omezuje případné šíření mechanických poruch dále po vedení.



Obrázek 6: Základní typy stožárů elektrického vedení [14]

4.1. Základní typy stožárů pro přenosovou soustavu

Na stožáry pro přenosovou soustavu jsou kvůli vysokému přenášenému výkonu kladeny vysoké požadavky na výšku a hmotnost. Výběr typu stožárů přenosové soustavy je dán trasami vedení, klimatickými a větrnými podmínkami a typem vedení. Nejčastěji používanými typy stožárů jsou konstrukce tvaru Dunaj, Kočka, Portál a Soudek. Konstrukce tvaru Kočka a Portál se používají pro jednoduchá vedení, tvary Dunaj a Soudek se používají pro dvojitá nebo vícenásobná vedení. Jediný typ vícedřívového stožáru používaného v přenosové soustavě je tvaru Portál. Portálový stožár je složen ze dvou dřívů, které spojuje dlouhý příčník. [1]

Konstrukce tvaru Dunaj má dvě konzoly, u kterých je na horní konzole umístěn jeden fázový vodič a na spodní zbylé dva. Kvůli požadavkům napětových hladin 220 a 400 kV je konstrukce doplněna i o 2 zemnicí lana. Konstrukce stožárů se skládá z dřívku čtvercového průřezu u kotevních stožárů a obdélníkového u nosných stožárů, na jehož vrcholech jsou upevněny dva držáky pro zemnicí lano. Hlava stožáru se skládá z horní a dolní konzol, s vodiči uspořádanými do trojúhelníku. [5,8] V této práci jsme použili konstrukce Dunaj s dvojitým vedením 400 kV. Výkres tohoto stožáru je v příloze B.

Konstrukce tvaru Soudek se používá jak na napětových hladinách 220 a 400 kV, tak i na hladině 110 kV. Soudek má tři konzoly nad sebou a na každé po jednom fázovém vodiči. Stejně jako Dunaj se používá pro dvojitá vedení přenosové a distribuční soustavy. V případě kotevního stožáru je dřívok rozkročen. Na tuto konstrukce se obvykle dává i zemnicí lano.

Pro jednoduchá vedení se obvykle používají stožáry tvaru Kočka, Delta nebo Portál. Delta a Kočka mají fázové vodiče uspořádané do trojúhelníku, což znamená, že jsou vyšší, ale užší. [16]

4.2. Základní typy stožárů pro distribuční soustavu

Typy stožáru pro distribuční soustavu jsou velice podobné jako pro soustavu přenosovou. Převládají typy, u kterých se dřívky směrem k základu rozšiřují. Šířka hlavy u stožáru pro distribuční soustavu je 4krát menší než u stožáru pro přenosovou soustavu. Stožáry pro distribuční soustavu můžeme rozdělit do dvou skupin: stožáry pro vedení vysokého napětí 22 a 35 kV a velmi vysokého napětí 110 kV. První skupina stožárů je charakterizována tím, že jejich konstrukce nemusí být ocelová a jsou značně lehčí než stožáry pro napětovou hladinu 110 kV. Typickým příkladem stožáru pro dvojitě vedení 2 x 110 kV je tvar Soudek s přidaným zemnicím lanem, který byl použit jako vzor pro DS v realizaci vedení na samostatných stožárech. [Příloha B]

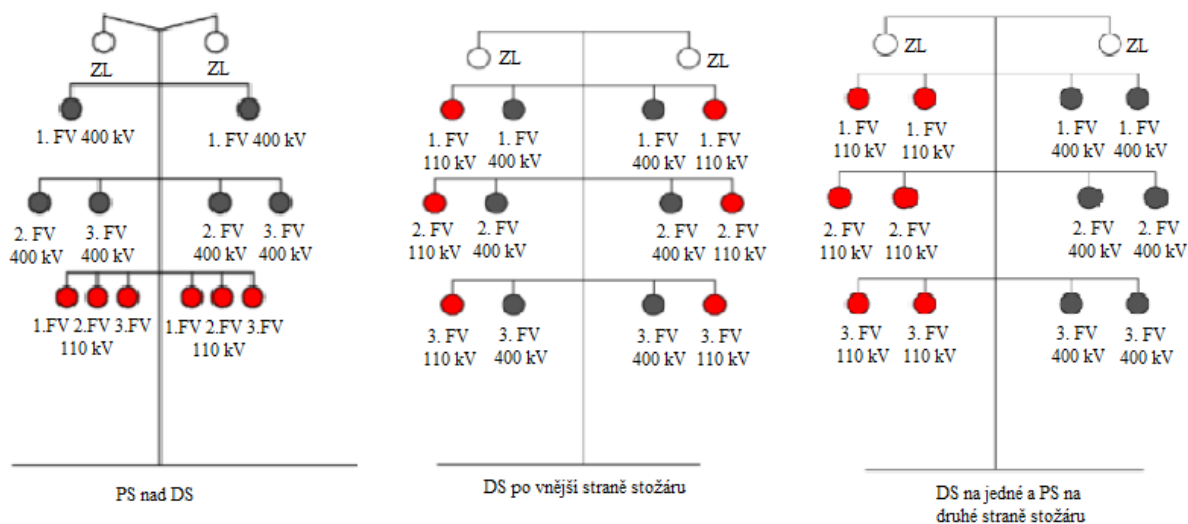
4.3. Základní typy stožárů pro sdružená vedení PS a DS

Jsou navrženy tři základní typy stožárů pro sdružené vedení na základě vzájemného uspořádání vodičů vedení přenosové a distribuční soustavy.

Prvním typem je kombinace s vedením PS nad vedením DS. Tento typ je navržen pro dvojitě vedení 400 kV a dvojitě vedení 110 kV. Tato kombinace je nejvhodnější z hlediska důležitosti vedení přenosové soustavy. Při opravách vedení DS ve spodní části není nutno vypínat vedení přenosové soustavy. V opačných případech se kvůli důležitosti PS akceptuje vliv na provoz distribuční soustavy. Výška stožáru je z pohledu konstrukce nevýhodou takového typu stožáru. Větší vzdálenost od země na druhou stranu pozitivně ovlivní elektromagnetické pole v okolí vedení. V této bakalářské práci budeme dále posuzovat tento typ stožáru, který byl vybrán na základě svých technických vlastností.

Druhým typem je kombinace sdruženého vedení s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce. Sdružené vedení je navrženo pro dvojitě vedení PS, z jeho vnější strany se nachází dvojitě vedení DS. V případě práce na jednom vedení je druhé vedení na stejné straně stožáru značně ovlivněno. Výhodou tohoto typu stožáru je užší stožárová konstrukce a nižší nároky na šířku koridoru. [20]

Třetím typem konstrukce stožáru je kombinace, u které je vedení DS na jedné straně a vedení PS na druhé straně stožáru. V případě omezení provozu na jednom vedení není druhé vedení ovlivněno. Tato kombinace je vhodná pro jednoduchá vedení PS a DS. Dvojitá vedení PS a DS jsou na tomto stožáru problematická kvůli vzájemným vlivům dvojitě vedení jedné napěťové hladiny.



Obrázek 7: Typy stožárů pro sdružené vedení PS a DS

5. OCHRANNÉ PÁSMO VEDENÍ

5.1. Ochranná pásma vedení 110 kV a 400 kV

Podle zákona 458/2000 Sb. je ochranné pásmo zařízení elektrizační soustavy prostor v bezprostřední blízkosti tohoto zařízení určený k zajištění jeho spolehlivého provozu a k ochraně života, zdraví a majetku osob. [5] Zařízení elektrizační soustavy, která mají ochranné pásmo, jsou nadzemní a kabelová vedení a elektrické stanice přenosové a distribuční soustavy.

Pod pojmem ochranné pásmo nadzemního vedení se uvádí prostor vymezený svislými rovinami vedenými po obou stranách vedení ve vodorovné vzdálenosti měřené kolmo na vedení. Vzdálenost se počítá od krajního vodiče vedení na obě jeho strany. Šířka ochranného pásma vedení je dána napětovou hladinou, na které je toto vedení provozované.

Napětová hladina [kV]	Ochranné pásmo [m]
1 – 35	7
35 – 110	12
110 – 220	15
220 – 400	20
> 400	30

Tabulka 1: Ochranné pásmo nadzemního vedení

Vedení 110 kV a 400 kV, kterými se v této práci zabýváme, mají šířku ochranného pásma 12 a 20 m. V ochranném pásmu nadzemního vedení jsou kvůli bezpečnosti zakázány následující činnosti:

- stavění staveb či komunikací a podobných zařízení bez souhlasu vlastníka těchto zařízení
- uskladňování hořlavé a výbušné látky,
- zemní práce,
- činnosti ohrožující spolehlivost a bezpečnost provozu těchto zařízení,
- činnosti, které by mohly ohrozit život, zdraví a majetek osob,
- činnosti znemožňující nebo podstatně znesnadňující přístup k zařízením a
- vysazování chmelnic a nechávání růstu porostu nad výšku 3 m.

Závaznými normami je určena minimální vzdálenost dřevin od živých částí vedení (vodiče pod napětím), která činí 3 m u vedení 110 kV a 5 m u vedení 400 kV. [4]

Vlastníkem nadzemních vedení jsou provozovatelé přenosové a distribuční soustavy. V České republice ČEPS a.s. vlastní nadzemní vedení přenosové soustavy (220 a 400 kV) a dle lokality ČEZ Distribuce a.s., Eon Distribuce a.s. nebo PREdistribuce a.s. vlastní vedení distribuční soustavy. Tyto společnosti mají za úkol také i vydávat stanoviska o provádění činnosti v OPV (stanovisko o křížení vedení s komunikacemi, silnicemi a objekty v blízkosti nebo v ochranném pásmu vedení).

5.2. Ochranné pásmo sdruženého vedení

U sdruženého vedení OPV přenosové soustavy svým rozsahem překrývá na obou stranách OPV distribuční soustavy, a proto je požadován nadstandardní vyšší stupeň ochrany. Ochranná pásma sdruženého vedení vznikají pro každou soustavu zvlášť, a i když se překrývají, kvůli bezpečnostním rizikům není možné je sloučit. Provozovatelé PS a DS zachovávají svoje povinnosti a úkoly v rámci OPV. Souhlas pro činnosti v OPV vydávají oba subjekty, i provozovatel PS i DS. Vzdálenosti od krajního vodiče vedení jsou zachovány jak pro vedení 400 kV, tak pro vedení 110 kV (20 a 12 m). Ještě není stanovená přesná legislativa, která by stanovila pravidla pro vydávání vyjádření k existenci zařízení technické infrastruktury (vedení) a udělení souhlasu s činnostmi v OPV, ale počítá se s tím, že do procesů musí být zahrnuti oba provozovatelé. Provozovatelé se snaží společně pracovat na nalezení správného řešení, u kterého se nebude muset žádat o dvě různá stanoviska, jako je tomu v současnosti. [2]

6. ŘEŠENÍ ELEKTRICKÉHO POLE A VÝPOČET INTENZITY

6.1. Normy a předpisy

Různé evropské a české normy stanovují maximální dovolenou hodnotu intenzity elektrického pole pro nízké frekvence (0 Hz až 10 kHz). Evropské normy, které se zabývají touto tematikou, jsou: ENV 50166-1 (Human exposure to electromagnetic field; Low frequency (0 Hz to 10 kHz) vydaná CENELECem v roce 1995) a směrnice ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) z roku 1999, schválena WHO. České normy, které upřesňují tyto hodnoty, jsou Nařízení vlády 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením a norma ČSN 332040 z roku 1993 (Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy).[3,6,18]

Protože elektrizační soustava České republiky pracuje na frekvenci 50 Hz, následující limity jsou brány v úvahu:

		Emax [kV/m]
ENV 50166-1	pro zaměstnance	30
	pro veřejnost	10
ICNIRP	pro zaměstnance	10
	pro veřejnost	5
ČR nařízení vlády 1/2008	pro zaměstnance	10
	pro veřejnost	5
ČSN 332040 (1993)	na pracovištích	15
	veřejně přístupné zařízení	10

Tabulka 2: Maximální dovolené hodnoty pro intenzitu elektrického pole

6.2. Výpočet elektrického pole

Pro vyhodnocení maximální dovolené hodnoty intenzity elektrického pole v okolí vedení musíme spočítat vektor intenzity elektrického pole \vec{E} . [11]

Intenzitu elektrického pole dostaneme z vztahu

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad [V/m] \quad (1)$$

Pro výpočet je nutné zjistit potenciál v elektrickém poli mezi vodiči.

Dva vodiče délky l ve vzájemné vzdálenosti $d_{ViVi'} \ll l$, první s lineární hustotou náboje \vec{Q}_{Vi} a druhý s hustotou $\vec{Q}_{Vi'} = -\vec{Q}_{Vi}$, vyvolávají v libovolném bodě M potenciál

$$\vec{\varphi} = \frac{\vec{Q}_{Vi}}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{MV^i}}{d_{MV^i}} \quad \text{kde } \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2)$$

kde $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m] prezentuje permitivitu vakua, (3)

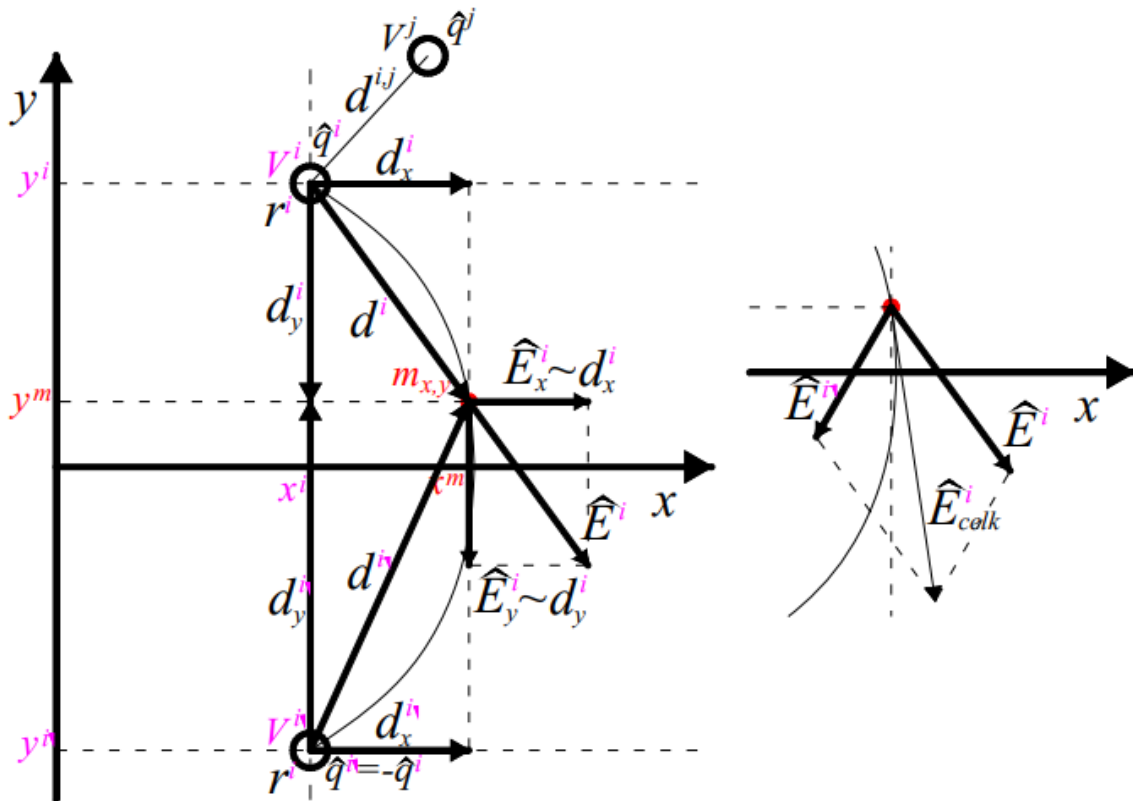
$\epsilon_r = 1$ proměnou permitivitu vzduchu a

d_{MV^i} a d_{MV^i} [m] kolmou vzdálenost bodu M od vodiče V^i a $V^{i'}$.

Pokud poloha bodu M je na povrchu vodiče $m_{x,y}$, bude jeho potenciál roven potenciálu vodiče m (při zanedbání jeho konců):

$$\vec{\varphi}_m = \sum_{V^i, V^{i'}=1}^n \frac{\vec{Q}_{Vi}}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{mV^i}}{d_{mV^i}} \quad (4)$$

U venkovních vedení se musí vedle vodičů fází a zemnicích lan respektovat i rovina povrchu ideální země. Pro výpočet se používá metoda zrcadlení, u které se vytvoří dvojice bodu (V^i a $V^{i'}$). Kterýkoliv bod ležící na povrchu země má od obou vodičů stejnou vzdálenost $d_{z_{yi}}=d_{z_{yi'}}$. Dostáváme nulový potenciál na povrchu země. Pak je povrch země ekvipotenciální plochou s nulovým potenciálem. Toto umožňuje nahradit soustavu n skutečných fázových vodičů, zemnicích lan a země uspořádáním n dvojice vodičů, skládajících se ze skutečného vodiče V^i s odpovídající hustotou náboje \vec{Q}_{yi} a fiktivním vodičem $V^{i'}$ s hustotou $-\vec{Q}_{Vi}$. [15]



Obrázek 8: Složky vektoru intenzity elektrického pole [7]

Rovnici (3) lze psát ve tvaru

$$\vec{\varphi}_m = \sum_{V^i=1}^n \delta_{V^i V^i} \vec{Q}_{V^i} \quad (5)$$

kde

$$\delta_{V^i V^i} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2y^i}{d_{i,j}} \quad (6)$$

jsou potenciálové součinitele, které se určí ze zadaného geometrického uspořádání vodičů a zemních lan vedení. Vzdálenosti vodičů V^i a $V^{i'}$ od země jsou označeny jako y^i a $y^{i'}$. Vzdálenost mezi skutečnými vodiči i a j je $d_{i,j}$.

$$\delta_{i,j} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{4y^i y^j + d_{i,j}^2}}{d_{i,j}} \quad i \neq j \quad (7)$$

Protože rovnice (5) platí pro každý vodič (fáze nebo zemnicí lana), lze jí napsat pomocí maticového tvaru s čtvercovou, symetrickou, regulární maticí (δ) typu (n, n) potenciálových součinitelů.

S pomocí této matice je možné vyjádřit vztah mezi napětím a náboji

$$(\vec{U}) = (\delta)(\vec{Q}) \quad (8)$$

$$(\delta)^{-1} = (k) \quad (9)$$

$$(\vec{Q}) = (k)(\vec{U}) \quad (10)$$

kde (\vec{U}) je sloupcová matice typu $(n, 1)$ potenciálů nebo napětí proti zemi,

(\vec{Q}) je sloupcová matice typu $(n, 1)$ lineárních hustot nábojů a

(k) je matice stejných vlastnosti jako (δ) s prvky, které jsou kapacitní součinitele.

Dosažením rovnice (5) do rovnice (1) dostáváme

$$|\vec{E}_x| = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial x} \quad (11)$$

$$|\vec{E}_y| = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial y} \quad (12)$$

Potom amplituda vektoru intenzity elektrického pole představuje horní odhad intenzity a rovná se

$$|\vec{E}| = \sqrt{|\vec{E}_x|^2 + |\vec{E}_y|^2} \quad (13)$$

$$\vec{E} = E_x + jE_y \quad (14)$$

Druhý způsob vyjádření vektoru intenzity elektrického pole \hat{E} je přes metodu zrcadlení, kde dostaneme příspěvky od všech vodičů do kontrolního bodu m . Tyto příspěvky jsou rozloženy do složek x a y vektoru $\hat{E}_x^i(d^i)$ a $\hat{E}_y^i(d^i)$ pro skutečný vodič:

$$\hat{E}_x^i(d^i) = \hat{E}^i(d^i) \cdot \left(\frac{d_x^i}{d^i}\right) = \hat{E}^i(d^i) \cdot \left(\frac{-(x^i - x^m)}{d^i}\right) \quad (15)$$

$$\hat{E}_y^i(d^i) = \hat{E}^i(d^i) \cdot \left(\frac{d_y^i}{d^i}\right) = \hat{E}^i(d^i) \cdot \left(\frac{-(y^i - y^m)}{d^i}\right) \quad (16)$$

$$\text{kde } \hat{E}^i(d^i) = \frac{\hat{q}^i}{2\pi d^i \varepsilon} \text{ je příspěvek od } i\text{-tého vodiče do kontrolního bodu a} \quad (17)$$

d^i vzdálenost vodiče od kontrolního bodu.

Pro fiktivní vodič analogicky dostaneme

$$\hat{E}_x^{i'}(d^{i'}) = \hat{E}^{i'}(d^{i'}) \cdot \left(\frac{d_x^{i'}}{d^{i'}}\right) = \hat{E}^{i'}(d^{i'}) \cdot \left(\frac{-(x^i - x^m)}{d^{i'}}\right) \quad (18)$$

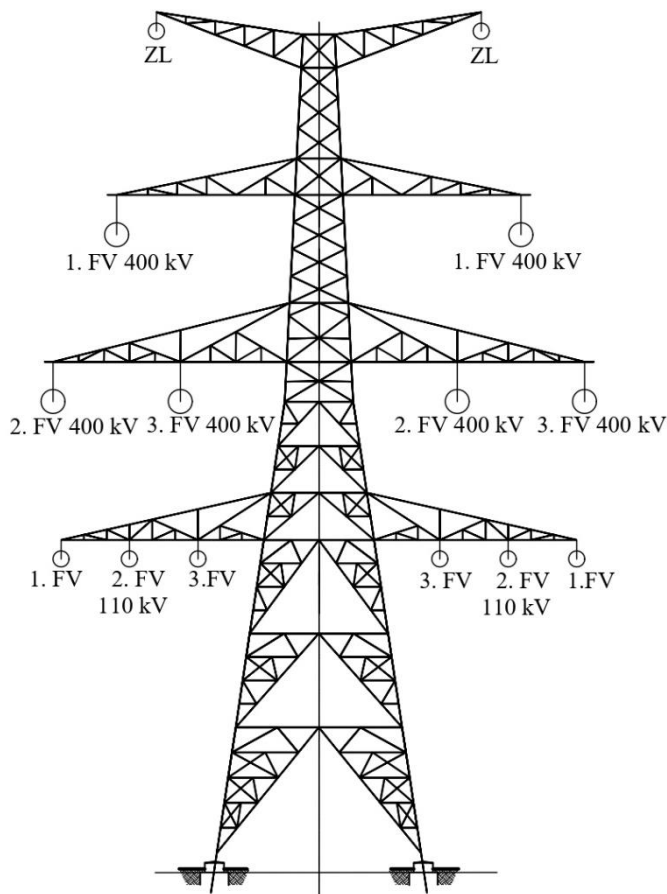
$$\hat{E}_y^{i'}(d^{i'}) = \hat{E}^{i'}(d^{i'}) \cdot \left(\frac{d_y^{i'}}{d^{i'}}\right) = \hat{E}^{i'}(d^{i'}) \cdot \left(\frac{-(y^i - y^m)}{d^{i'}}\right) \quad (19)$$

$$\hat{E}^{i'}(d^{i'}) = \frac{-\hat{q}^i}{2\pi d^{i'} \varepsilon} \quad (20)$$

Suma všech příspěvků do hodnoty intenzity elektrického pole je

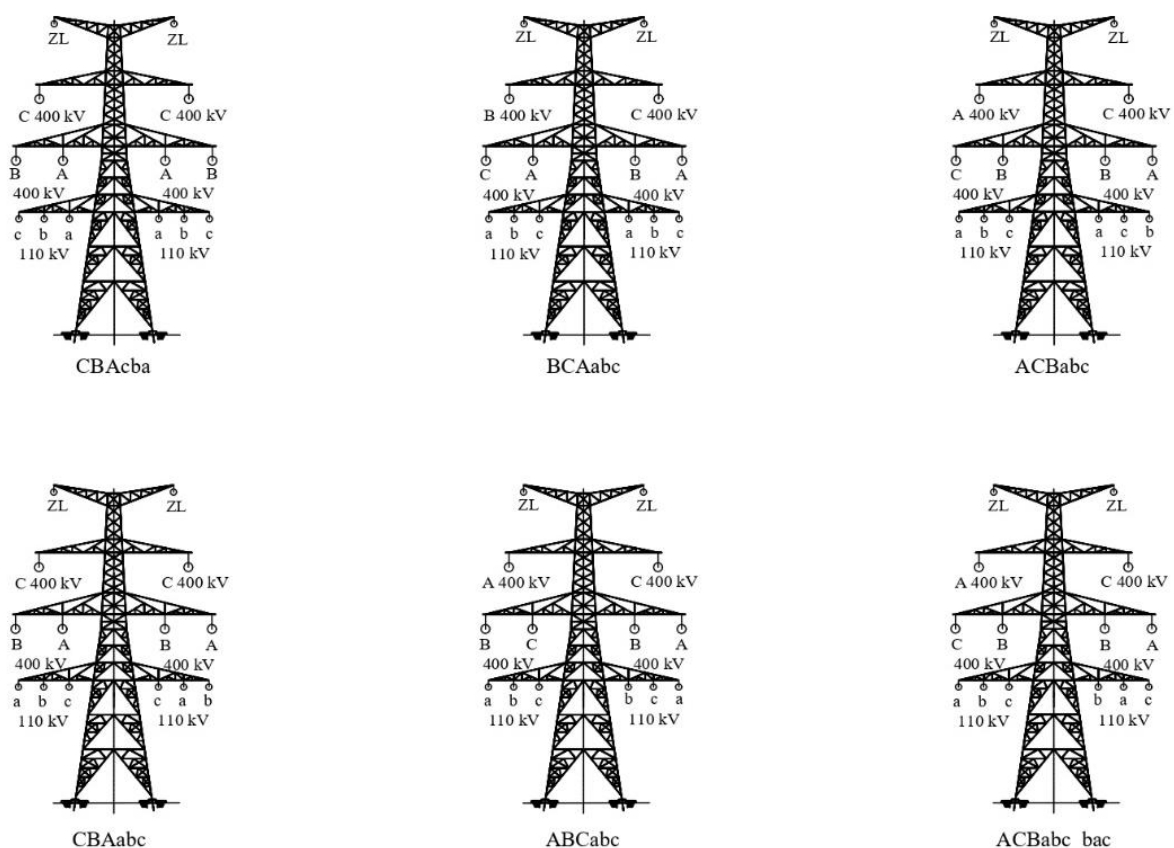
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n (\vec{E}^i) + \sum_{i=1}^n (\vec{E}^{i'}) \quad (21)$$

6.3. Sdružená vedení PS a DS



Obrázek 9: Uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan na stožáru sdruženého vedení

Pro výpočet elektrického pole byl použit program Overhead⁽¹⁾, který funguje na základě popsaných rovnic z kapitoly 7.1. Počítalo se s kombinací dvojitého vedení 400 kV a dvojitého vedení 110 kV. V programu se počítalo s amplitudami fázových napětí vůči zemi, minimálními navrženými výškami fázových vodičů, a také s průměrem, průřezem a stejnosměrným elektrickým odporem vodičů. Pro vedení 400 kV se použil vodič typu 490-AL1/64-ST1A (s průměrem 3,06 cm a odporem 0,05898 Ω/km). Pro vedení 110 kV byl vybrán vodič typu 679-AL1/86-ST1A (s průměrem 3,6 cm a odporem 0,04259 Ω/km). Taky se brala v úvahu dvě zemnicí lana typu 195-AL4/42-A20SA s parametry: průměr 2,01 cm a stejnosměrný odpor 0,169 Ω/km . Výšky fázových vodičů použitých při výpočtech jsou uvedeny v příloze B.



Obrázek 10: Kombinace uspořádání fází fázových vodičů na sdruženém vedení

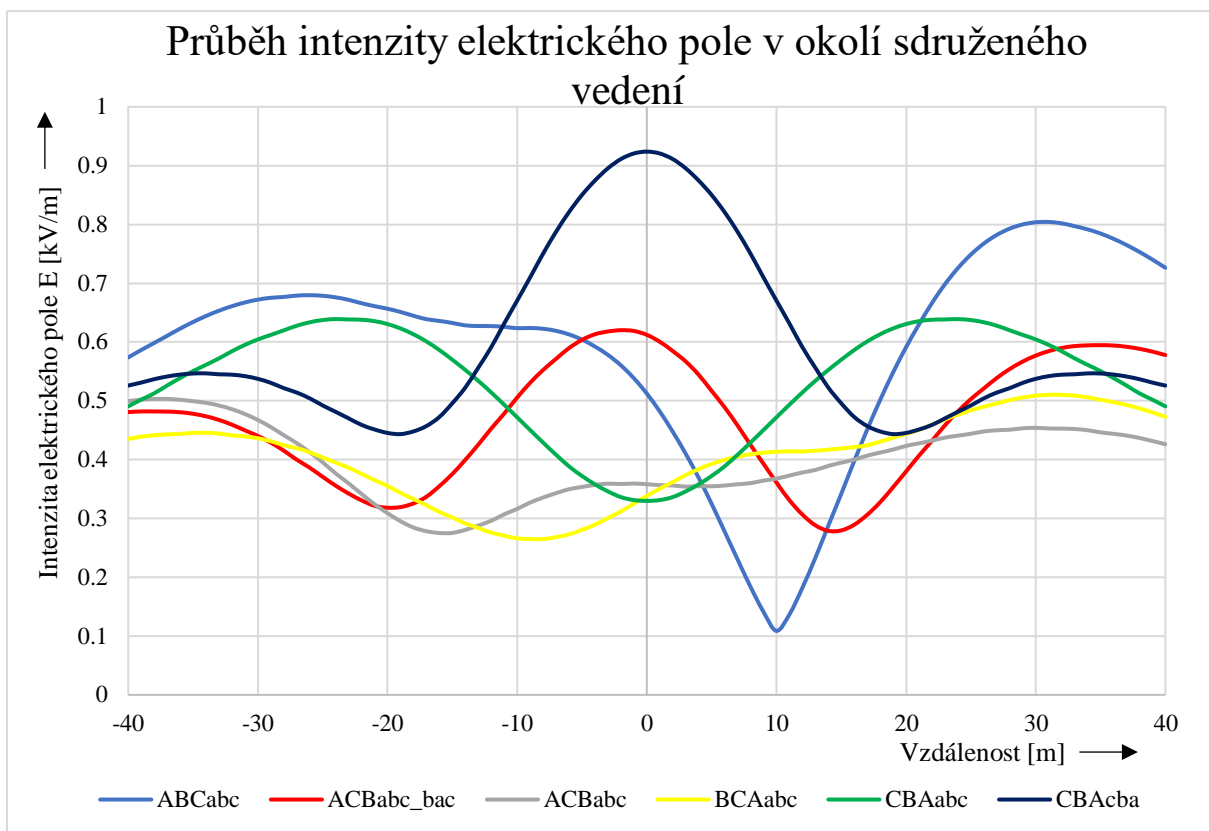
Různé konfigurace sledu fází:

Konfigurace	CBAcba		BCAabc		ACBabc		CBAabc		ABCabc		ACBabc_bac	
Uspořádání fází	C	C	B	C	A	C	C	C	A	C	A	C
	BA	AB	CA	BA	CB	BA	BA	BA	BC	BA	CB	BA
	cba	abc	abc	abc	abc	acb	abc	cab	abc	bca	abc	bac

Tabulka 3: Uspořádání fází fázových vodičů sdruženého vedení

⁽¹⁾ EGU – HV Laboratory a.s.

Vzhledem k tomu, že máme celkem 14 vodičů umístěných na stožáru (12 fázových a 2 zemnicích), je možných 196 (14^2) kombinací sledu fází. Kvůli vzájemné interakci čtyř přítomných vedení bylo vybráno 6 kombinací ze 196, pro které je spočítána intenzita elektrického pole. Protože se jedná o vzájemné vlivy vedení, některé z kombinací jsou symetrické, ukazují stejné parametry a nebyly brány v úvahu. Vybrané kombinace ukazují nejlepší rozložení elektromagnetického pole a mají největší počet symetrických kombinací. [9]. U každé konfigurace jsou vodiče vedení 400 kV umístěny do trojúhelníku a pod nimi jsou vodiče 110 kV horizontálně uspořádané. Dvojité vedení 400 kV je označeno pomoci písmenek A, B a C, a dvojité vedení 110 kV pomocí a, b a c (1., 2. a 3. fázový vodič). Každá konfigurace také má i dvě zemnicí lana nad vodiči vedení 400 kV.

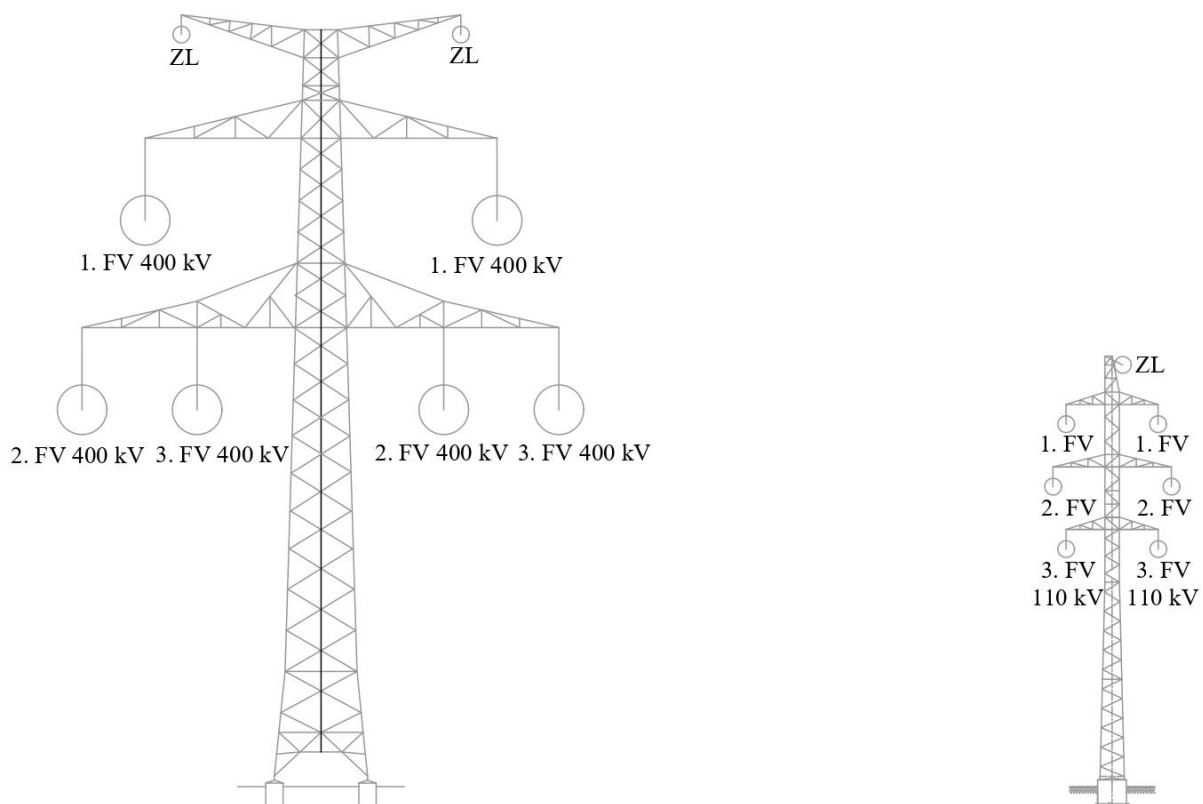


Graf 1: Průběh intenzity elektrického pole pro různé sledy fází sdruženého vedení

Z naměřených průběhů je vidět, že intenzita elektrického pole sdruženého vedení nepřesahuje limity dané normami. Hodnoty intenzity se pohybují mezi 0 a 1 kV/m a žádná z vypočtených intenzit nepřesahuje 1 kV/m. Intenzita elektrického pole je uvedena ve vzdálenosti 40 m na obě strany stožáru. U různých kombinacích sledu fází je patrné, že se průběhy intenzity liší. Kombinace CBAcba (3. fázový vodič obou vedení 400 kV je na první konzole stožáru a sled fází obou vedení 400 kV je shodný) má největší hodnoty intenzity elektrického pole kolem 0,92 kV/m. Nejmenší hodnoty intenzity elektrického pole nastávají u kombinace ABCabc (0,1 kV/m), která nemá shodné uspořádání ani vedení 400 kV ani

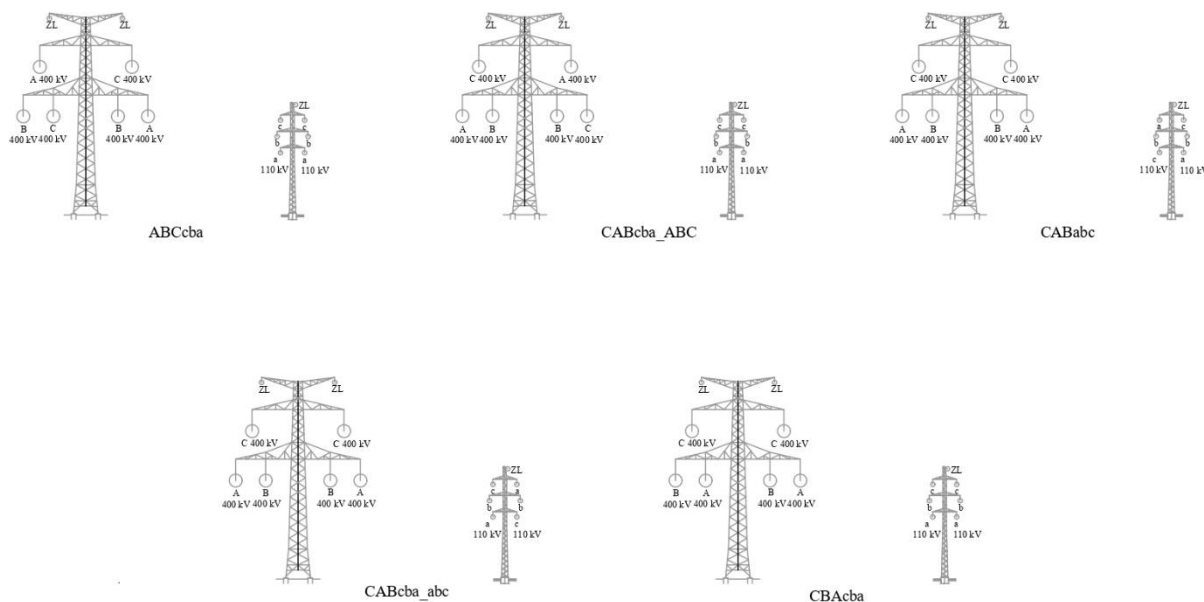
vedení 110 kV. U kombinace BCAabc se vyskytlo nejmenší rozmezí hodnot intenzity elektrického pole na celém rozsahu 40 m na obě strany stožáru. Hodnoty se pochybují mezi 0,26 kV/m a 0,51 kV/m. Naopak konfigurace ABCabc má největší rozmezí hodnot intenzity mezi 0,1 kV/m a 0,8 kV/m. Konfigurace, která má shodné sledy fází obou vedení 400 kV, CBAabc, má minimum intenzity v ose stožáru a můžeme říct, že nejlépe kompenzuje elektrické pole v okolí stožáru. Na druhé straně, konfigurace CBAcba a ACBabc_bac mají svá maxima přímo v ose stožáru.

6.4. Realizace vedení na samostatných stožárech



Obrázek 11: Uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan na stožárech 2x400 kV a 2x110 kV

Pro porovnání s elektrickým polem sdruženého vedení byl proveden i výpočet elektrického pole vedení na samostatných stožárech. Vzorovým příkladem je konstrukce stožárů Dunaj pro dvojité vedení 400 kV s dvěma zemnicími lany a Soudek pro dvojité vedení 110 kV s jedním zemnicím lanem. Pro porovnatelnost hodnot byla vybrána vzdálenost stožáru 30 m od krajních vodičů. Analogicky jako u sdruženého vedení do programu Overhead se zadaly parametry a výšky fázových vodičů, fázová napětí a vzdálenosti mezi stožáry. Také byly použité vodiče 490-AL1/64-ST1A pro vedení 400 kV a 679-AL1/86-ST1A pro 110 kV kvůli přesnějšímu porovnání. Všechna tři zemnicí lana byla typu 195-AL4/42-A20SA Výšky fázových vodičů použité při výpočtech jsou uvedeny v příloze C. [2]



Obrázek 12: Kombinace uspořádání fází fázových vodičů na samostatných stožárech

Konfigurace fází:

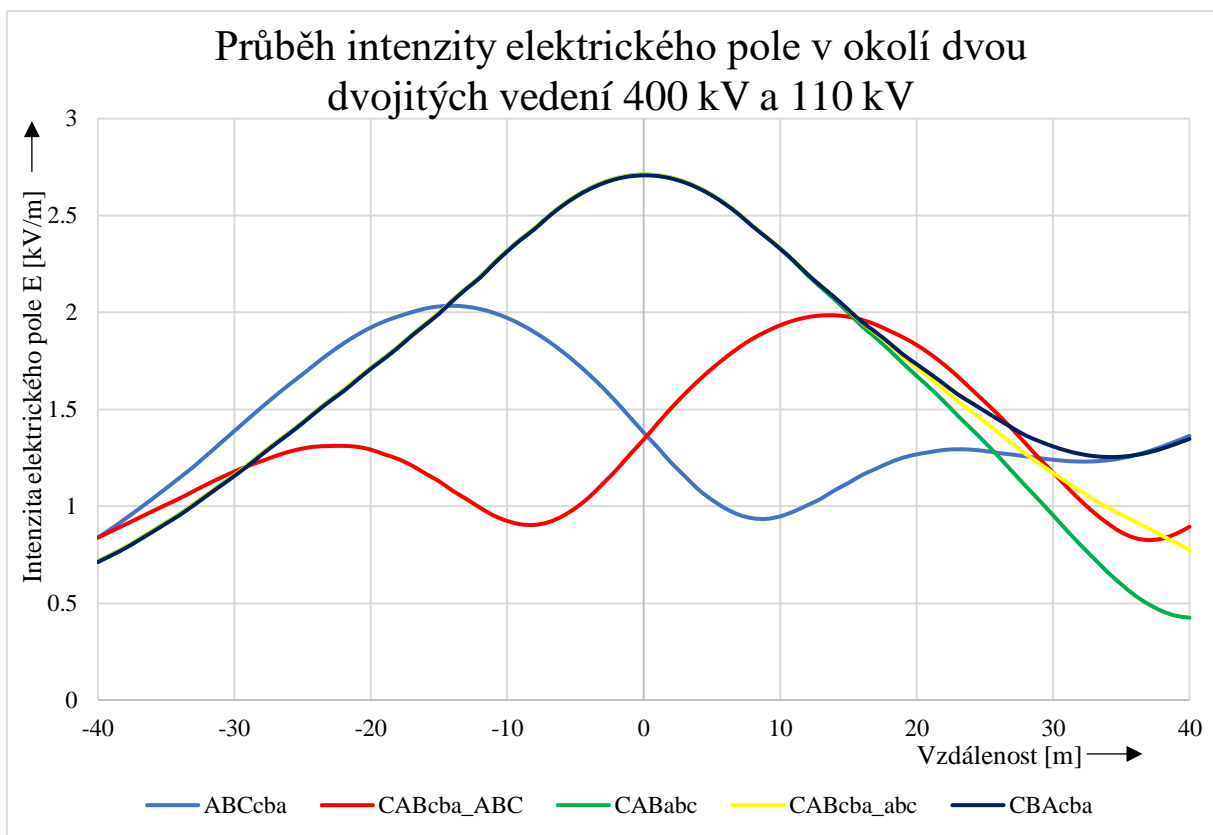
Sled fází	ABCcba				CABcba_ABC				CABabc				CABcba_abc				CBAcba			
	A	C	c	c	C	A	c	c	C	C	a	c	C	C	c	a	C	C	c	c
BC	BA	b	b	AB	BC	b	b	AB	BA	b	b	AB	BA	b	b	BA	BA	b	b	
		a	a			a	a			c	a			a	c			a	a	

Tabulka 4: Uspořádání fází fázových vodičů vedení na samostatných stožárech

Na kombinaci dvou stožárů máme celkem 15 vodičů (6 fázových 400 kV, 6 fázových 110 kV a 3 zemnicí – 2 na stožáru 400 kV a 1 na stožáru 110 kV). Vzhledem k tomu, že u tohoto provedení je vliv sledu fází jedné dvojice vedení na druhé kvůli vzdálenosti zanedbatelný, bylo vybráno 5 kombinací, u každé se měnil sled fází jen jednoho vedení. Na stožáru typu Dunaj 2x400 kV jsou fáze označené pomocí velkých písmenek A, B a C. Podobně fáze na stožáru typu Soudek 2x110 kV jsou označené pomocí malých písmenek a, b a c. U kombinací ABCcba a CABcba_ABC se měnily sledy fází levého, respektive pravého vedení 400 kV na stožáru Dunaj a sledy fází vedení 110 kV zůstaly neměnné. Podobně u kombinací CABabc a CABcba_abc se otočily fázové vodiče vedení 110 kV a vodiče 400 kV se neměnily.

Průběh vypočtené intenzity elektrického pole odpovídá vzájemným vlivům dvou dvojitých vedení 400 kV a 110 kV. To znamená, že je vzhledem k elektromagnetickým vlivům možné stavět dvě vedení různých napěťových hladin vedle sebe na vzdálenosti 30 m. Konfigurace fází CBAcba (základní uspořádání vodičů), CABabc a CABcba_abc (sledy fází vedení 110 kV pootočený) mají největší hodnoty intenzity elektrického pole – kolem 2,7 kV/m. Tato hodnota je přímo v ose stožáru Dunaj 2x400 kV. Naopak konfigurace CABabc má nejmenší hodnoty intenzity elektrického pole – 0,4 kV/m. Kombinace

ABCcba se rozprostřela v nejmenším rozmezí hodnot intenzity na celém rozsahu 40 m na obě strany stožáru. Hodnoty se pohybují mezi 0,94 kV/m a 2,06 kV/m. Naopak konfigurace CABabc má největší rozmezí hodnot intenzity mezi 0,4 kV/m a 2,7 kV/m.



Graf 2: Průběh intenzity elektrického pole pro různé sledy fází vedení na samostatných stožárech

6.5. Porovnání hodnot intenzity elektrického pole sdruženého vedení a provedení na samostatných stožárech

Z grafů 1 a 2 můžeme vyčíst, že obě dvě konfigurace vedení splňují požadavky norem na maximální hodnotu intenzity elektrického pole. Nejprísnější normy předepsané hodnoty říkají, že intenzita nesmí být větší než 5 kV/m. Maximální hodnota intenzity u sdruženého vedení je 0,92 kV/m a u provedení na samostatných stožárech je to 2,7 kV/m. Normy nechávají velké rezervy kvůli nežádoucím vlivům na vedení, které mohou tento výsledek zhoršit. Také je zřejmé, že intenzita elektrického pole vedení na samostatných stožárech je větší než intenzita elektrického pole sdruženého vedení. Ten výsledek je důsledkem složitější kompenzace elektrického pole u stožárů sdruženého vedení.

7. ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO POLE A VÝPOČET INDUKCE

7.1. Normy a předpisy

Jak pro elektrické, tak i pro magnetické pole normy stanovují maximální dovolenou hodnotu magnetické indukce. Posuzujeme magnetické pole podle 4 normy (evropské a české), které již byly uvedeny v kapitole 7. Hodnoty jsou opět pro nízké frekvence (0 Hz až 10 kHz). [4,18]

		B _{max} [μT]
ENV 50166-1	pro zaměstnance	1600
	pro veřejnost	640
ICNIRP	pro zaměstnance	500
	pro veřejnost	100
ČR nařízení vlády 1/2008	pro zaměstnance	500
	pro veřejnost	100
ČSN 332040 (1993)	na pracovištích	500
	veřejně přístupné zařízení	100

Tabulka 5: Maximální dovolené hodnoty pro magnetickou indukci

7.2. Výpočet magnetického pole

Pro výpočet magnetické indukce je potřeba zjistit proudy zemnicími lany vypočteny pomocí impedanční matice, u které v prezentuje vedení 110 kV (a, b, c) a V prezentuje vedení 400 kV (A, B, C).

$$\begin{bmatrix} \Delta \widehat{U}_v \\ \Delta \widehat{U}_V \\ \Delta \widehat{U}_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{Z}_{vv} & \widehat{Z}_{vV} & \widehat{Z}_{vZ} \\ \widehat{Z}_{Vv} & \widehat{Z}_{VV} & \widehat{Z}_{VZ} \\ \widehat{Z}_{Zv} & \widehat{Z}_{ZV} & \widehat{Z}_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{I}_v \\ \widehat{I}_V \\ \widehat{I}_Z \end{bmatrix} \quad (22)$$

U zemnicích lan je pravidlem, že jsou uzemněna spojitě (v každém místě podél vedení, nikoliv jen na stožárech).

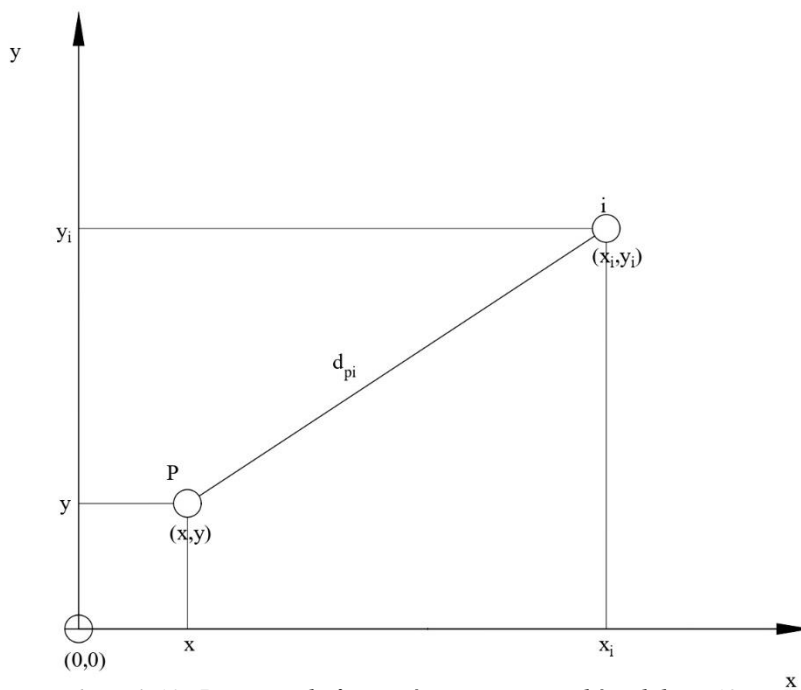
$$\Delta \widehat{U}_Z = 0 \quad (23)$$

Z rozepsaného tvaru maticové rovnice (22) dostaneme proud v zemních lanech

$$\widehat{I}_Z = -\widehat{Z}_{ZZ}^{-1} (\widehat{Z}_{Zv} \widehat{I}_v + \widehat{Z}_{ZV} \widehat{I}_V) \quad (24)$$

Amperův zákon (také i První Maxwellova rovnice v integrálním tvaru) vyjadřuje, že magnetické napětí, které obíhá po libovolné uzavřené křivce ve stacionárním magnetickém poli, je rovno proudu procházejícímu plochou ohraničenou touto křivkou. [7]

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (25)$$



Obrázek 13: Pozice vodičů pro výpočet magnetické indukce [12]

Závislost mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H se nazývá materiálový vztah

$$B = \mu H \quad [T; H/m; A/m] \quad \mu = \mu_r \mu_0 \quad (26)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] permeabilita vakua a kde μ_r relativní permeabilita.

Z vzorců (25) a (26) dostáváme rovnici pro magnetickou indukci v bodě vně vodiče

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d_{pi}} \quad [T] \quad (27)$$

kde d_{pi} je vzdálenost mezi dvěma vodiči p a i .

Rozložení magnetické indukce B na složky v směru osách x a y

$$B_x = \pm B \cdot \sin \left(\arctg \left| \frac{y_i - y}{x_i - x} \right| \right) \quad (28)$$

$$B_y = \pm B \cdot \cos \left(\arctg \left| \frac{y_i - y}{x_i - x} \right| \right) \quad (29)$$

kde x_i, x jsou vzdálenosti vodičů i a p od osy x a y_i, y jsou vzdálenosti vodičů i a p od osy y .

Celková hodnota magnetické indukce v bodě je

$$B_s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n B_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n B_{yi} \right)^2} \quad (30)$$

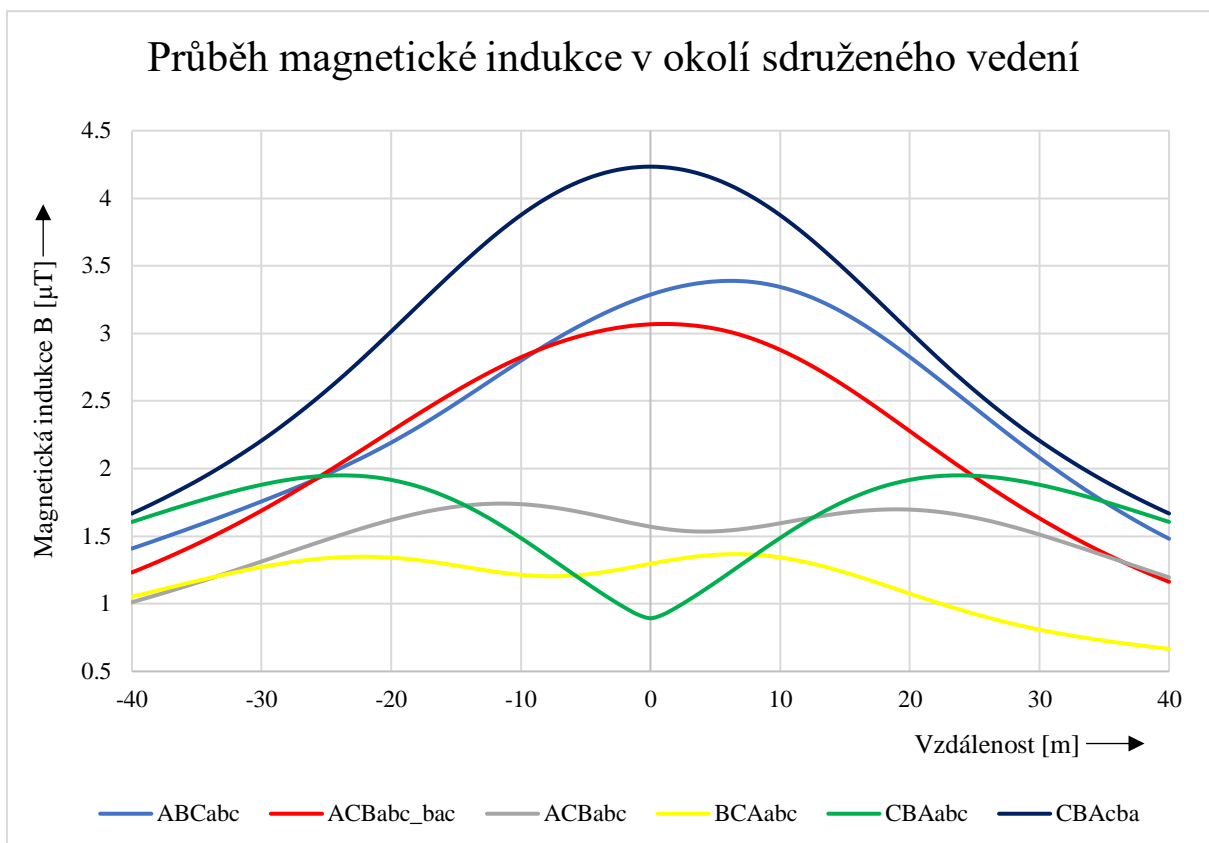
7.3. Sdružené vedení PS a DS

Analogicky s elektrickým polem jsme i magnetické pole počítali pomocí programu Overhead. Používali jsme stejnou kombinaci dvojitého vedení 400 kV a dvojitého vedení 110 kV, jako pro výpočet elektrického pole, který je popsán v kapitole 7. Parametry, které bylo potřeba zadat do používaného programu, jsou stejné, jako u již popsaného výpočtu elektrického pole (minimální výšky fázových vodičů, parametry vodičů a fázové napětí). Navíc jsme pouze zadávali velikost amplitud proudů v jednotlivých fázích. Tyto hodnoty jsou pro napětovou hladinu 400 kV 790 A a pro vedení 110 kV 370 A. Obdobně jako pro výpočet elektrického pole jsme i pro magnetické pole, kvůli vzájemným vlivům vedení, počítali různé kombinace sledu fází. Různé kombinace uspořádání fází jsou popsány v tabulce 7 nebo na obrázku 4 v kapitole 7. Dvojité vedení 400 kV je označeno pomocí písmenek A, B a C, a dvojité vedení 110 kV pomocí a, b a c. U všech kombinací jsou vedení 400 kV umístěna do trojúhelníku a pod nimi je dvojité vedení 110 kV horizontálně uspořádané. [2,9]

Konfigurace	CBAcba		BCAabc		ACBabc		CBAabc		ABCabc		ACBabc_bac	
Uspořádání fází	C	C	B	C	A	C	C	C	A	C	A	C
	BA	AB	CA	BA	CB	BA	BA	BA	BC	BA	CB	BA
	cba	abc	abc	abc	abc	acb	abc	cab	abc	bca	abc	bac

Tabulka 6: Uspořádání fází fázových vodičů sdruženého vedení

Z průběhu magnetické indukce v okolí sdruženého vedení (graf 3) je vidět, že velký vliv na maximální hodnoty indukce má výběr uspořádání fází. Největší hodnota magnetické indukce je zaznamenána v konfiguraci fází CBAcba (3. fázový vodič obou vedení 400 kV je na první konzole stožáru) 4,234 μT . U kombinace CBAcba a ACBabc_bac jsou maximální hodnoty zaznamenány v ose stožáru. Naopak kombinace CBAabc má své minimum přímo v ose stožáru. Nejnižší hodnota magnetické indukce všech kombinací je u konfigurace BCAabc 0,66 μT . Tato kombinace má nejmenší rozsah svých hodnot magnetické indukce – ve vzdálenosti 40 m na obě strany stožáru se indukce pohybuje v rozmezí 0,66 μT až 1,36 μT . Na druhou stranu, největší rozmezí hodnot má konfigurace CBAcba mezi 4,23 μT a 1,66 μT .



Graf 3: Průběh magnetické indukce pro různé sledy fází sdruženého vedení

7.4. Realizace vedení na samostatných stožárech

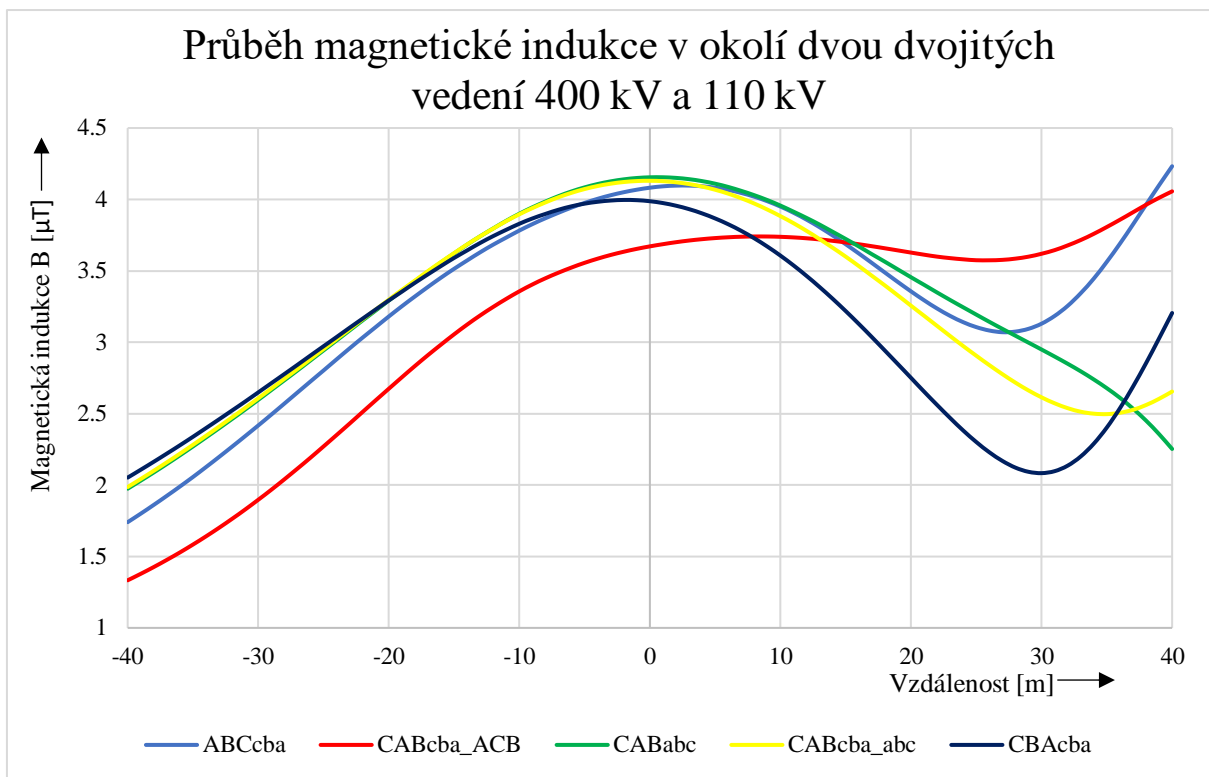
Podobně jako u elektrického pole, i zde byl proveden výpočet magnetického pole vedení na samostatných stožárech. Jsou použity stejné typy stožárů jako u elektrického pole – Dunaj 2x400 kV a Soudek 2x110 kV. Pro výpočet magnetického pole tohoto uspořádání jsme potřebovali stejné parametry jako u výpočtu elektrického pole (podrobnosti popsané v podkapitole 7.4.).

Jak bylo zmíněno u výpočtu elektrického pole, pro výpočet vedení na samostatných stožárech bylo vybráno 5 kombinací, u kterých se vždy mění sled fází pouze jednoho vedení. Zopakujeme značení fází jednotlivých vedení – u stožáru Dunaj 2x400 kV jsou fáze popsány pomocí písmenek A, B a C a u stožáru Soudek 2x110 kV máme popis pomocí písmenek a, b a c. V tabulce 6 a na obrázku 6 (kapitola 7) jsou znázorněny všechny konfigurace uspořádání fází.

Sled fází	ABCcba				CABcba_ABC				CABabc				CABcba_abc				CBAcba			
	A	C	c	c	C	A	c	c	C	C	a	c	C	C	c	a	C	C	c	c
BC	BA	b	b	AB	BC	b	b	AB	BA	b	b	AB	BA	b	b	BA	BA	b	b	
		a	a			a	a			c	a			a	c			a	a	

Tabulka 7: Uspořádání fází fázových vodičů vedení na samostatných stožárech

Z grafu průběhu magnetické indukce v okolí dvou dvojitých vedení 400 kV a 110 kV je patrné, že uspořádání sledu fází nemá velký vliv na tento průběh. Maximální hodnoty většiny kombinací (až na CABcba_ACB) jsou přímo v ose stožáru dvojitého vedení 400 kV a pohybují se v rozmezí 3,98 μT až 4,13 μT . Všechny kombinace mají podobné rozmezí hodnot magnetické indukce – mezi 1,33 μT až 4,13 μT . Kombinace CBAcba má své minimum blízko ose stožáru dvojitého vedení 110 kV.



Graf 4: Průběh magnetické indukce pro různé sledy fází vedení na samostatných stožárech

7.5. Porovnání hodnot magnetické indukce sdruženého vedení a realizace vedení na samostatných stožárech

Jako u elektrického pole, oba typy provedení vedení jsou velice poddimenzovány. Nejmenší nepřekročitelná hodnota magnetické indukce žádána v normách je 100 μT a maxima obou provedení se pohybují kolem 4,25 μT . Na rozdíl od elektrického pole, sdružená vedení a realizace vedení na samostatných stožárech mají podobná maxima magnetické indukce. Také mají i podobná minima, která se pohybují kolem 1 μT . U většiny kombinací sdruženého vedení jsou maxima přímo v ose stožáru. U realizace vedení na samostatných stožárech jsou maxima podobně v ose vedení 2x400 kV.

8. VZÁJEMNÉ VLIVY VEDENÍ

8.1. Elektrické parametry

Pro posouzení vzájemných vlivů vedení je potřeba spočítat, jaké úbytky napětí se naindukují na vedení. Pro výpočet napěťové nesymetrie potřebujeme impedanční matice vedení. Abychom mohli porovnat dosažené hodnoty, musíme spočítat impedanční matice sdruženého vedení, a také matice dvou souběžných vedení. Proudová nesymetrie nebyla předmětem této práce.

V elektrických soustavách se určují 4 základní parametry, uváděny na 1 km délky a pro 1 fázi vedení [7,11]:

- Činný odpor – R_1 [Ω/km]
- Provozní indukčnost – L_1 [H/km]
- Svod – G_1 [S/km]
- Provozní kapacita – C_1 [F/km]

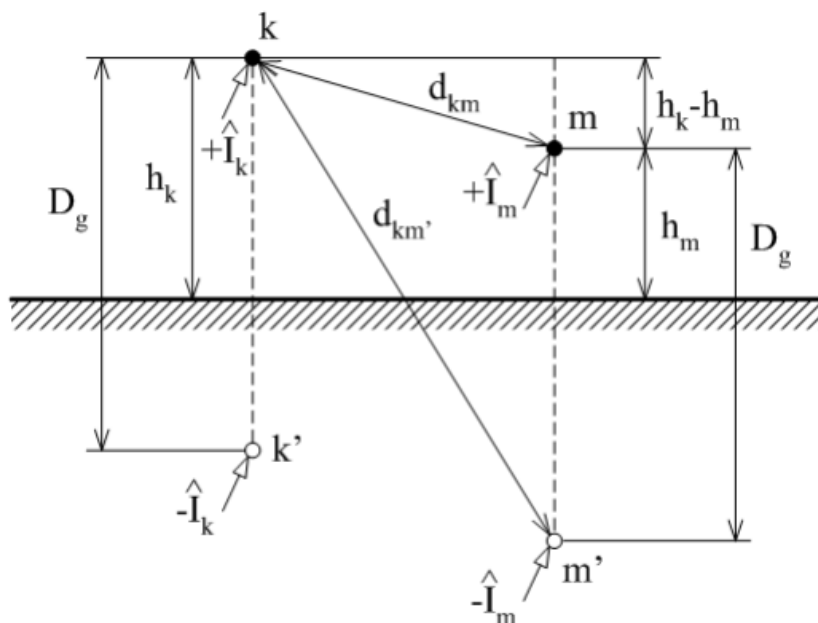
A další odvozené (sekundární) parametry:

- Indukční reaktance – $X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1$ [$\Omega/\text{km}; 1/\text{s}; \text{H}/\text{km}$] (31)

- Komplexní podélná impedance – $\hat{Z}_{l1} = R_1 + jX_1$ [Ω/km] (32)

- Komplexní příčná admittance – $\hat{Y}_{q1} = G_1 + jB_1$ [S/km] (33)

8.2. Impedanční matice vedení



Obrázek 14: Soustava n -vodičů vedení ve vzájemné vzdálenosti D_g [7]

Pro soustavu n vodičů vzdálenost n skutečných vodičů a země se nahrazuje n skutečnými vodiči a n fiktivními vodiči ve vzájemné vzdálenosti D_g , která se nazývá hloubka vodiče v zemi a odpovídá rovnici:

$$D_g = \frac{0.178\sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} [m; \Omega m; Hz] \quad (34)$$

kde ρ [Ωm] je měrný odpor země a f [Hz] frekvence střídavého proudu (v posuzovaných systémech se rovná 50 Hz).

Vlastní indukčnost, která je vytvořena mezi vodičem k a fiktivním vodičem k' , se počítá jako:

$$M_{kk} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r_k} [mH/km; m, m] \quad (35)$$

kde r_k [m] je poloměr k -tého vodiče a ξ [-] součinitel, který respektuje nerovnoměrné rozložení proudu v průřezu vodiče a permeabilitu feromagnetického materiálu (pro AlFe lano přibližně 0,809-0,826). Součinitel ξ počítáme pomocí μ_r - poměrné permeability materiálu vodiče a α - součinitele, který respektuje nerovnoměrné rozdělení proudu po průřezu vodiče:

$$\xi = 10^{\frac{-0,05\mu_r\alpha}{0,46}} [-; H/km; -] \quad (36)$$

Pro výpočet vlastní impedance (impedance ve smyčce vodič – zem na jednotku délky) musíme brát v úvahu i rezistenci smyčky vodič – zem na jednotku délky R_{kk} , která se skládá z rezistence země na jednotku délky R_{1g} a rezistence vodiče R_{1k}

$$R_{kk} = R_{1k} + R_{1g} [\Omega/km] \quad (37)$$

$$R_{1g} = \pi^2 f 10^{-7} [\Omega/km] \quad (38)$$

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_{1k} + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r_k} [\Omega/km] \quad (39)$$

Vzájemná indukčnost a impedance, které jsou vytvořeny mezi vodičem k , skutečným vodičem m a jeho odpovídajícím fiktivním vodičem m' , se vzhledem k tomu, že platí $d_{km} \ll D_g$, mohou počítat jako:

$$M_{km} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{km}} = M_{mk} [mH/km; m, m] \quad (40)$$

$$\hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{mk} = R_{km} + j\omega L_{km} = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{d_{km}} [\Omega/km] \quad (41)$$

kde d_{km} je vzdálenost skutečných vodičů k a m .

Podle Ohmova zákona je úbytek napětí ve skutečném vodiči k způsobený vlivem vlastní a vzájemné indukčnosti:

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m [V/km] \quad (42)$$

Z vztahu (37) dostáváme provozní impedanci a indukčnost. Indukčnost jednoho osamocenému vodiče (k) způsobí stejný úbytek napětí jako n vodičů v n -vodičovém systému (tato indukčnost je obvykle komplexní a je dána provozním stavem). [11]

$$\Delta \hat{U}_k = \hat{Z}_k \hat{I}_k [V/km] \quad (43)$$

$$\hat{Z}_k = \frac{\sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k} [\Omega/km] \quad (44)$$

$$\hat{L}_k = \frac{\sum_{m=1}^n M_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k} [H/km] \quad (45)$$

Rovnici (38) můžeme pro přehlednost napsat v maticovém tvaru:

$$[\Delta \hat{U}] = [\hat{Z}][\hat{I}] \quad (46)$$

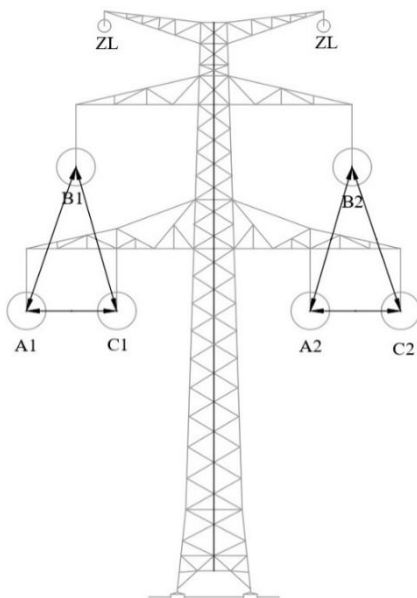
Budeme-li počítat se symetrickou zátěží, dostáváme fázory proudu:

$$\hat{I}_a = \hat{I}_a \quad \hat{I}_b = \hat{a}^2 \hat{I}_a \quad \hat{I}_c = \hat{a} \hat{I}_a \quad (47)$$

kde \hat{a} vyjadřuje úhel natočení fázi

$$\hat{a} = e^{+j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (48)$$

$$\hat{a}^2 = e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (49)$$



Obrázek 15: Dvojitá třífázová soustava vedení – fáze vodičů

Pomocí rovnice (44) dostaneme hodnoty úbytků napětí na všech fázích vedení. Protože dostaneme nesymetrické napětí, potřebujeme převést tyto hodnoty do soustavy sousledné (1), zpětné (2) a netočivé (0) složky. Jako referenční fázi budeme uvažovat fázi A. Dostáváme maticový zápis vztahů mezi napětími \hat{U}_{ABC} a \hat{U}_{120} .

$$\hat{U}_{ABC} = \begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Pro výpočet použijeme inverzní zápis matice (48)

$$\hat{U}_{120} = \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} \quad (51)$$

Pro porovnání zpětné a netočivé složky napětí vyjádříme velikost těchto napětí $|\hat{U}_{2,0}|$ a úhel fázoru φ :

$$|\hat{U}_{2,0}| = \sqrt{\text{Re}(\hat{U}_{2,0})^2 + \text{Im}(\hat{U}_{2,0})^2} \quad [V] \quad (52)$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(\hat{U}_{2,0})}{|\hat{U}_{2,0}|} \quad \sin \varphi = \frac{\text{Im}(\hat{U}_{2,0})}{|\hat{U}_{2,0}|} \quad (53)$$

8.3. Výpočet úbytků napětí na sdruženém vedení

Pozorované sdružené vedení obsahuje čtyři linky netransponovaného vedení (obrázek 6). Tyto linky se navzájem ovlivňují kvůli induktivními a kapacitními vazbami mezi vodiči vedení. Následkem toho jsou úbytky napětí vzniklé po vedení. Pro výpočet uvažujeme linky 2x400 kV a 2x110 kV po třech vodičích. V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty používané pro výpočet impedanční matice – vzájemná horizontální poloha vodiče X, vzdálenosti vodiče od zemi Y, minimální vzdálenost od zemi Y_{\min} , odpor R_{DC} a průměr použitého vodiče d. [2]

		X [m]	Y [m]	Y_{\min} [m]	U [kV]	Vodič	R_{DC} [Ω /km]	d [cm]
1	ZL1	-10,2	51,9	43,8	400	195-AL4/42-A20SA	0,169	2,01
2	ZL2	10,2	51,9	43,8				
3	B1	-12,7	40,3	32,2				
4	B2	12,7	40,3	32,2				
5	A1	-16,7	28,8	20,7				
6	C1	-8,7	28,8	20,7				
7	A2	8,7	28,8	20,7	110	490-AL1/64-ST1A	0,05898	3,6
8	C2	16,7	28,8	20,7				
9	a1	-16,2	21,1	13				
10	b1	-11,9	21,1	13				
11	c1	-7,6	21,1	13				
12	a2	7,6	21,1	13				
13	b2	11,9	21,1	13				
14	c2	16,2	21,1	13				

Tabulka 8: Hodnoty pro měření napětové nesymetrie u sdruženého vedení

Pomocí výpočetního programu firmy EGU – HV Laboratory a.s. pro impedanční matici jsme dostali matici 14x14. Ve výpočtech se počítalo s délkou vedení 1 km. Pro výpočet vzájemných vlivů považujeme linku 110 kV za vypnutou (nulové proudy). Úbytky napětí na zemnicích lanech jsou nulové.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_{Z1} \\ \Delta \hat{U}_{Z2} \\ \Delta \hat{U}_{B1} \\ \Delta \hat{U}_{B2} \\ \Delta \hat{U}_{A1} \\ \Delta \hat{U}_{C1} \\ \Delta \hat{U}_{A2} \\ \Delta \hat{U}_{C2} \\ \Delta \hat{U}_{a1} \\ \Delta \hat{U}_{b1} \\ \Delta \hat{U}_{c1} \\ \Delta \hat{U}_{a2} \\ \Delta \hat{U}_{b2} \\ \Delta \hat{U}_{c2} \end{bmatrix} = [\hat{Z}_{14 \times 14}] \begin{bmatrix} \hat{I}_{Z1} \\ \hat{I}_{Z2} \\ \hat{I}_{B1} \\ \hat{I}_{B2} \\ \hat{I}_{A1} \\ \hat{I}_{C1} \\ \hat{I}_{A2} \\ \hat{I}_{C2} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{b1} \\ \hat{I}_{c1} \\ \hat{I}_{a2} \\ \hat{I}_{b2} \\ \hat{I}_{c2} \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\Delta \hat{U}_{Z1} = \Delta \hat{U}_{Z2} = 0 \quad (55)$$

$$\hat{I}_{a1} = \hat{I}_{b1} = \hat{I}_{c1} = \hat{I}_{a2} = \hat{I}_{b2} = \hat{I}_{c2} = 0 \quad (56)$$

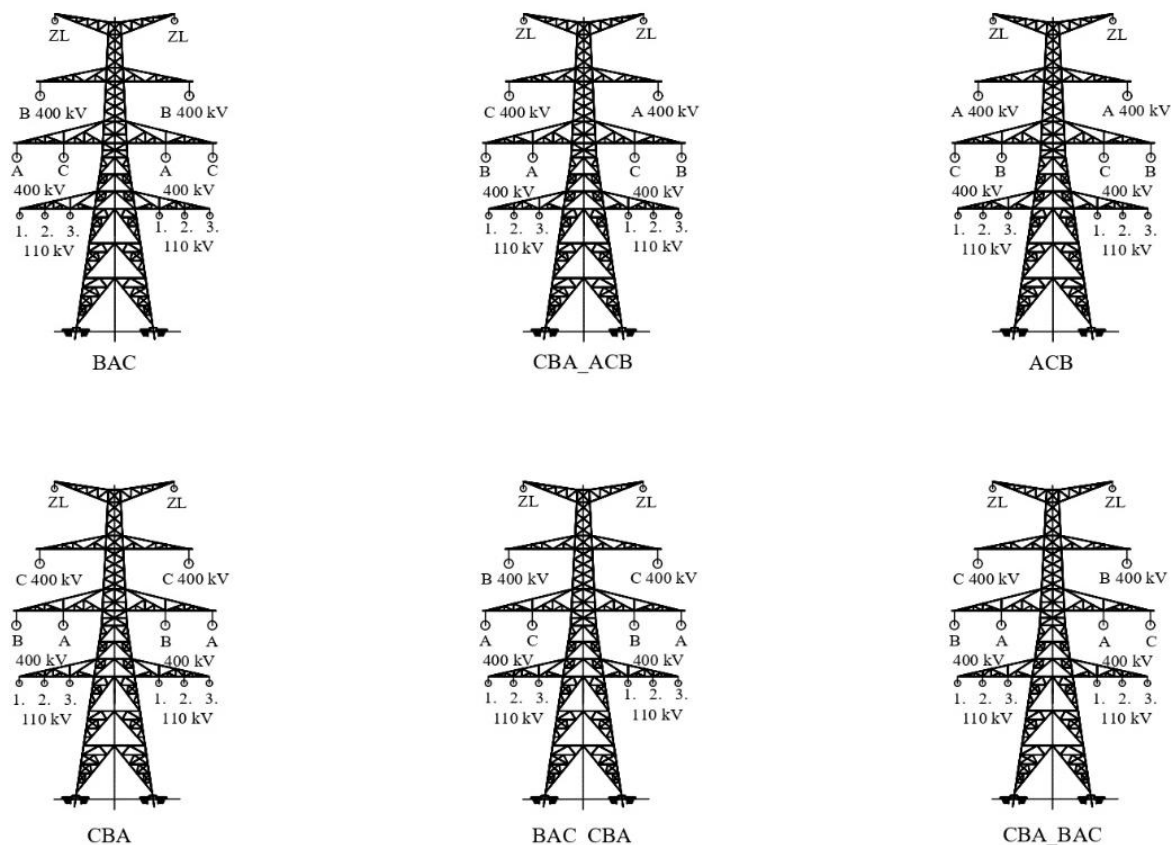
Vodiče 400 kV napěťové hladiny jsou spojeny do trojúhelníku a pod nimi jsou vodiče 110 kV umístěny horizontálně. Maximální dovolený proud na linkách 400 kV vedení je 2500 A. Výpočet byl proveden pro různé konfigurace fází. Jako referenční fáze byla zvolena fáze A (s fázovým proudem 2500 A).

Fázemi B a C protéká proud velikosti:

$$\hat{I}_b = \hat{a}^2 \hat{I}_a = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2500 = -1250 - j2165.063 \text{ [A]} \quad (57)$$

$$\hat{I}_c = \hat{a} \hat{I}_a = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2500 = -1250 + j2165.063 \text{ [A]} \quad (58)$$

Kvůli porovnání úbytků napětí s provedením PS a DS na samostatných stožárech jsme vypočítali různé kombinace uspořádání fází. Protože porováváme nesymetrické napětí, zajímají nás nulová (netočivá) a zpětná složka napětí U_{120} , která se naindukuje na vypnutém vedení 110 kV. Složky vedení 110 kV, které jsou na levé straně stožáru, mají index l , a analogicky složky vedení po pravé straně stožáru mají index p . Pro přehlednost jsou uvedené kombinace s maximálními a minimálními hodnotami těchto složek.



Obrázek 16: Kombinace uspořádání fází fázových vodičů 400 kV na sruženém vedení pro výpočet nesymetrie

Kombinace	BAC		CBA_ACB		ACB		CBA		BAC_CBA		CBA_BAC	
	B	B	C	A	A	A	C	C	B	C	C	B
Uspořádání fází	AC	BC	BA	CB	CB	CB	BA	BA	AC	BA	BA	AC
	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc
$ \hat{U}_{0L} $ [V]	228,819		104,119		228,819		228,819		104,119		107,077	
$ \hat{U}_{2L} $ [V]	21,717		22,577		21,717		21,717		22,578		30,079	
$ \hat{U}_{0P} $ [V]	229,529		103,614		229,528		229,528		103,614		169,85	
$ \hat{U}_{2P} $ [V]	21,5505		22,668		21,5505		21,5505		22,668		30,11	

Tabulka 9: Amplituda netočivé a zpětné složky napětí na vedení 2x110 kV pro sružené vedení

Kombinace	BAC	CBA_ACB	ACB	CBA	BAC_CBA	CBA_BAC
$ \varphi_{0L} $ [-]	2,465	0,092	-1,722	0,371	2,186	0,979
$ \varphi_{2L} $ [-]	0,354	-1,294	2,448	-1,74	0,799	-1,538
$ \varphi_{0P} $ [-]	2,78	-1,118	-1,408	0,686	0,976	2,165
$ \varphi_{2P} $ [-]	0,692	2,336	2,786	-1,402	-1,852	0,494

Tabulka 10: Úhel fázoru netočivé a zpětné složky napětí na vedení 2x110 kV pro sružené vedení

8.4. Výpočet úbytků napětí na provedení PS a DS na samostatných stožárech

K porovnání se sdruženým vedením jsme vypočetli i úbytky napětí na provedení PS a DS na samostatných stožárech (obrázek 8) – stožár vedení 2x400 kV se třema vodiči na obou vedeních a 30 m od krajního vodiče stožár vedení 2x110 kV, také s po třemi vodiči. Abychom dosáhli porovnatelné výsledky, jsme počítali s vypnutými vedení 2x110 kV, analogicky jako ve výpočtech u sdružených stožárů. Tabulka 7 uvádí parametry vedení přenosové a distribuční soustavy, potřebné k výpočtu impedanční matice atice – vzájemná horizontální poloha vodiče X, vzdálenosti vodiče od zemi Y, minimální vzdálenost od zemi Y_{\min} , odpor R_{DC} a průměr použitého vodiče d. [2]

		X [m]	Y [m]	Y_{\min} [m]	U [kV]	Vodič	R_{DC} [Ω /km]	d [cm]
1	ZL1	-8,5	46	36,1		195-AL4/42-A20SA	0,169	2,01
2	ZL2	8,5	46	36,1				
3	B1	-10,7	34,4	24,5	400	490-AL1/64-ST1A	0,05898	3,6
4	B2	10,7	34,4	24,5				
5	A1	-14,5	22,9	13				
6	C1	-7,5	22,9	13				
7	A2	7,5	22,9	13				
8	C2	14,5	22,9	13				
9	ZL3	48,1	25,774	22,1		195-AL4/42-A20SA	0,169	2,01
10	a1	45,3	22,274	18,6	110	679-AL1/86-ST1A	0,04259	3,06
11	a2	50,9	22,274	18,6				
12	b1	44,5	18,474	14,8				
13	b2	51,7	18,474	14,8				
14	c1	45,3	14,674	11				
15	c2	50,9	14,674	11				

Tabulka 11: Hodnoty pro měření napětíové nesymetrie u vedení přenosové a distribuční soustavy

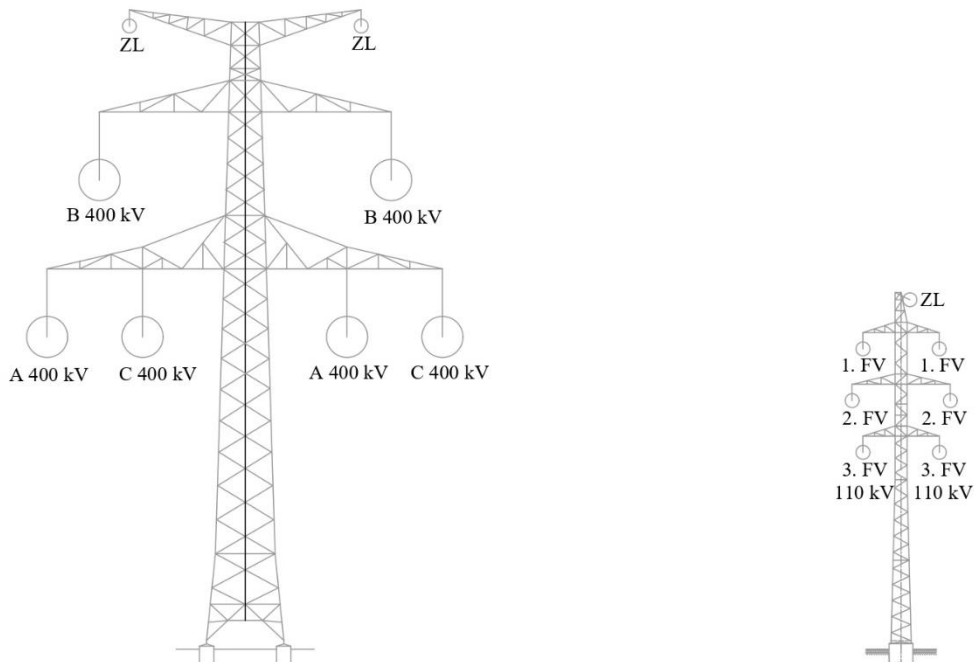
U tohoto uspořádání dostáváme impedanční matici 15x15 (jedno zemnicí láno navíc). Podobně jako u předešlého výpočtu jsou úbytky napětí na zemnicích lanech nulové, stejně jako proudy ve vypnutých vedeních 2x110 kV. Maximální proudy referenční fáze A u vedení 400 kV je 2500 A. Fázemi B a C protékají proudy o hodnotách $-1250 - j2165.063$ A a $-1250 + j2165.063$ A podle vzorců (53) a (54). Analogicky jako u 9.2 nás zajímají netočivá a zpětná složka napětí, naindukované na vypnutém vedení 2x110 kV.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_{Z1} \\ \Delta \hat{U}_{Z2} \\ \Delta \hat{U}_{B1} \\ \Delta \hat{U}_{B2} \\ \Delta \hat{U}_{A1} \\ \Delta \hat{U}_{C1} \\ \Delta \hat{U}_{A2} \\ \Delta \hat{U}_{C2} \\ \Delta \hat{U}_{Z3} \\ \Delta \hat{U}_{a1} \\ \Delta \hat{U}_{a2} \\ \Delta \hat{U}_{b1} \\ \Delta \hat{U}_{b2} \\ \Delta \hat{U}_{c1} \\ \Delta \hat{U}_{c2} \end{bmatrix} = [\hat{Z}_{15 \times 15}] \begin{bmatrix} \hat{I}_{Z1} \\ \hat{I}_{Z2} \\ \hat{I}_{B1} \\ \hat{I}_{B2} \\ \hat{I}_{A1} \\ \hat{I}_{C1} \\ \hat{I}_{A2} \\ \hat{I}_{C2} \\ \hat{I}_{Z3} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \\ \hat{I}_{b1} \\ \hat{I}_{b2} \\ \hat{I}_{c1} \\ \hat{I}_{c2} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$\Delta \hat{U}_{Z1} = \Delta \hat{U}_{Z2} = \Delta \hat{U}_{Z3} = 0 \quad (60)$$

$$\hat{I}_{a1} = \hat{I}_{a2} = \hat{I}_{b1} = \hat{I}_{b2} = \hat{I}_{c1} = \hat{I}_{c2} = 0 \quad (61)$$

U tohoto uspořádání jsme počítali s konfigurací fází, u které je shodný sled fází jednotlivých vedení. Fáze B u stožáru 2x400 kV je na první konzole ze shora na obou stranách. Fáze A a C jsou na druhé konzole a mají shodný sled fází u obou vedení. Na stožáru 2x110 kV máme lineární uspořádání fází a na obou vedení jsou sledy shodné. Netočivá a zpětná složka vypnutých 110 kV vedeních na obou stranách stožáru (l a p) jsou uvedené v tabulce 8.



Obrázek 17: Sled fází fázových vodičů 400 kV pro výpočet napěťové nesymetrie

Kombinace	BAC			
	B	B	a	a
Uspořádání fází	AC	AC	b	b
			c	c
$ \hat{U}_{0L} $	107,757		φ	-3,1
$ \hat{U}_{2L} $	10,1692		φ	-0,569
$ \hat{U}_{0P} $	81,823		φ	3,1
$ \hat{U}_{2P} $	8,239		φ	-0,864

Tabulka 12: Netočivá a zpětná složka napětí na vedení 2x110 kV pro přenosové a distribuční vedení

8.5. Porovnání výsledků úbytků napětí

Netočivá složka levého vedení 110 kV v kombinaci sdruženého vedení je ve většině kombinací větší než netočivá složka levého vedení 110 kV v provedení na samostatných stožárech. V kombinaci CBA_ACB velikost netočivé složky jsou menší než v provedení na samostatných stožárech. Zpětná složka levého vedení 110 kV ve sdruženém vedení je větší než zpětná složka levého vedení 110 kV v provedení samostatných stožárů. Můžeme říci, že napěťová nesymetrie a vzájemné vlivy sdruženého vedení závisí na vybrané kombinaci uspořádání fází. V porovnání s provedením vedení na samostatných stožárech má kombinace CBA_ACB sdruženého vedení lepší vzájemné vlivy.

Netočivá a zpětná složka u pravého vedení jsou v obou případech menší než u levého vedení kvůli vzdálenosti mezi vodiči. Analogicky jako u levého vedení, velikost těchto složek u sdruženého vedení ovlivňuje sled fází jednotlivých vodičů. Naproti tomu vedení na samostatných stožárech kombinace sdruženého vedení, u kterých máme na pravé straně základní uspořádání BAC, mají lepší parametry netočivé a zpětné složky (velmi malé hodnoty velikosti napětí).

9. ZÁVĚR

Tato práce se zabývala porovnáním sdruženého vedení PS a DS s realizací vedení na samostatných stožárech na blízkém koridoru. Bylo uvažováno sdružené vedení 2x400 kV a 2x110 kV s dvěma zemnicími lany. Pro porovnání se použilo vedení na samostatných stožárech Dunaj 2x400 kV s dvěma zemnicími lany a Soudek 2x110 kV s jedním zemnicím lanem. Vzdálenost mezi stožáry byla vybrána 30 m od krajních vodičů.

V první části této práce byly teoreticky popsány přenosová soustava, distribuční soustava a sdružené vedení. Také byly popsány typy stožárů pro PS, DS a sdružené vedení a ochranné vedení obou případů. Sdružené vedení má duplicitní OPV, kde se ochranná pásma PS a DS zachovávají. Přenosová soustava má šířku ochranného pásma 20 m a distribuční soustavy 12 m. Pokud se legislativně ošetří vydání stanoviska o činnosti v OPV, sdružené vedení má šířku ochranného pásma 20 m a je vhodnější než realizace čtyř vedení 2x400 kV a 2x110 kV na samostatných stožárech na vzdálenosti 30 m od krajních vodičů.

V další části této bakalářské práci bylo vypočteno elektrické a magnetické pole v okolí vedení v obou případech. Byl vysvětlen i teoretický rozbor řešení elektrického a magnetického pole. Výpočet byl proveden pro stožáry bez převýšení. Na hodnoty intenzity elektrického pole a magnetické indukce má velký vliv i uspořádání fází jednotlivých vedení. Nejlepší kombinací u sdruženého vedení byly uspořádání, u kterých nemáme shodné sledy fází na levé a pravé straně stožáru stejné napěťové hladiny. U realizace vedení na samostatných stožárech nejvhodnější kombinace byla ta, u které sledy fází vedení 110 kV byly pootočené a sledy fází vedení 400 kV byly shodné. Podle norem maximální hodnota intenzity elektrického pole pro veřejnost může být 5 kV/m a hodnota magnetické indukce 100 μ T. Normy nechávají velké rezervy, jsou předimenzované a v žádné kombinaci se nemůžeme dostat ani blízko maximálních hodnot daných normou. Intenzita elektrického pole byla větší pro realizaci na samostatných stožárech než pro sdružené vedení a magnetická indukce měla podobné hodnoty pro oba případy.

V poslední části této práce byly teoreticky vysvětlené a vypočítané vzájemné vlivy vedení u obou realizací. Počítalo se s vypnutým vedením 110 kV a vypočítaly se netočivé a zpětné složky úbytků napětí dvojitého vedení 110 kV a na základě toho posoudila napěťová nesymetrie vedení. Složky byly vypočítány pro různá uspořádání fází. U většiny kombinací je zpětná složka u sdruženého vedení větší než zpětná složka u provedení na samostatných stožárech. U netočivé složky je to naopak, a netočivá složka je ve většině kombinací menší než netočivá složka vedení 110 kV v provedení na samostatných stožárech.

Na základě velikosti a úhlu fázoru netočivé a zpětné složky můžeme říct, že provedení na samostatných stožárech má lepší vzájemné vlivy vedení (dané napětovou nesymetrií) než sdružené vedení. U sdružených vedení na vzájemné vlivy velice působí i uspořádání sledu fází vodiče. Kombinace s nejlepšími vzájemnými vlivy vedení je kombinace BAC. Její parametry se docela přibližují parametrům uspořádání na samostatných stožárech.

Na konci můžeme konstatovat, že vzhledem k elektromagnetickému poli a ochrannému pásmu jsou sdružená vedení technicky výhodnější volbou pro stavění na úzkém koridoru. Tuto práci můžeme považovat za posudek použitelnosti sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy na základě elektrických parametrů. Tato práce by měla posloužit jako podklad pro výpočty elektrických parametrů a zhotovení projektové dokumentace sdruženého vedení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČEPS a.s.: *Přenosová soustava* [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2011. [cit. 12. 5. 2019].
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/vedeni-ps>
- [2] ČEPS Invest a.s. a ELEKTROTRANS: *Projektová dokumentace sdruženého vedení V415/495*
- [3] ČSN EN 50 341-1 *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV*
- [4] ČSN 33 2040 *Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy*
- [5] *Energetický zákon č. 458/2000 Sb* [online]. 2009 [cit. 12.5.2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>
- [6] *Metodický návod ke sjednocení postupu orgánů ochrany veřejného zdraví*
- [7] FEJT Zdeněk, ČERMÁK Jaroslav: *Elektroenergetika*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1981
- [8] PAPAILIOU Konstantin: *Overhead Lines (CIGRE Green Books)*. Springer Reference
ISBN-13: 978-3319317465
- [9] FENG, GUIHONG, YANXIN Wang a BINGYI Zhang: *Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower*. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference. IEEE, 2008
- [10] WEIDONG L., KUN L., MINGJIU P. a GANG X: *Research on electromagnetic character of 500/220kV mixed-voltage quadruple-circuit transmission line*. 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEE, 2013
- [11] HORÁK, Karel: *Výpočet elektrických sítí*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [12] MAYER, Daniel a Josef POLÁK: *Metody řešení elektrických a magnetických polí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. Praha: SNTL, 1983.
- [13] BUREŠ, Zdeněk, Petr ŠITINA a Jan VÁCLAVEK: *Navrhování venkovních vedení vn a nn*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Praktické elektrotechnické příručky.
- [14] PROCHÁZKA, Radek: *Venkovní vedení VVN (I): Úvod do problematiky přenosové soustavy*. TZB-info [online]. 21.5.2007 [cit. 12.5.2019]. Dostupné z: <http://www.tzbinfo.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i>
- [15] HODINKA, Miloslav, František NĚMEČEK a Štefan FECKO: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989
- [16] KOZÁK, Jiří: *Ocelové stožáry a věže*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990
- [17] MAYER, Daniel: *Elektrodynamika v energetice*. Praha: BEN - technická literatura, 2005
ISBN 80-730-0164-0.

- [18] *Narizení vlády 2015/219*
- [19] SADDAT Hadi: *Power System Analysis*. New York: WCB – McGraw Hill, 1999
- [20] NOVITSKIY A., WESTERMANN D.: *Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons*. 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability. IEEE, 2012.
- [21] GALETKA Martin: *Přenosová soustava elektrické energie*. TZB-info [online]. 11.1.2016 [cit. 12.5.2019]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – <i>Schéma elektrizační soustavy České republiky</i>	55
Příloha B – <i>Hlavní rozměry stožáru 2x400 + 2x110 kV typ N – Stožár nosný [2]</i>	56
Příloha C – <i>Schéma stožárů Dunaj 2 x 400 kV a Soudek 2 x 110 kV [1]</i>	57
Příloha D – <i>Katalogové listy vodičů 490-AL1/64-ST1A, 679-AL1/86-ST1A a 195-AL4/42-A20SA [2]</i>	59
Příloha E – <i>Výpočet vzájemných vlivů vedení pomocí software.u Wolfram Mathematica</i>	62