

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výpočet činných ztrát na transponovaném
a netransponovaném vedení

Autor práce: Bc. Tomáš Nazarčík

Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš NAZARČÍK**
Osobní číslo: **E12N0122P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Výpočet činných ztrát na transponovaném a netransponovaném 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 :


1. Vytvořte model vedení 400kV délky 100 km pro plně transponované vedení a zcela netransponované vedení. Stanovte vliv geometrické nesymetrie parametrů na nesymetrii fázových proudů a napětí.
2. Odvoďte vztahy pro výpočet celkových činných ztrát zahrnující ztráty způsobené proudy ve fázových vodičích a v zemním lanu a ztráty na svodech vedení.
3. Porovnejte velikost celkových činných ztrát vzniklých na transponované a netransponované variantě modelového vedení.
4. Na základě provedených výpočtů proveďte porovnání celkových nákladů transponované a netransponované varianty modelového vedení.

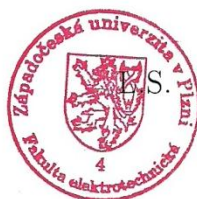
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




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

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na výpočet činných ztrát na venkovním vedení. V práci jsou nejprve odvozeny pasivní parametry pro transponované i netransponované vedení. Na vytvořeném modelu vedení jsou v programu Matlab počítány činné ztráty a vzniklá nesymetrie na zátěži. Výsledky jsou následně porovnány se simulací v programu Dynast. V závěru práce je provedeno ekonomické vyhodnocení uvažující zvýšení nákladů v případě transponovaného i netransponovaného vedení.

Klíčová slova

transponované vedení, netransponované vedení, parametry vedení, zemnicí lano, výpočet činných ztrát, ekonomická efektivnost investic

Abstract

Nazarčík, Tomáš. *Evaluation of Joule's losses on transmission line (transposed and non-transposed)*

The diploma thesis is focused on evaluation of Joule's losses on transmission line. In the thesis the parameters for transposed and non-transposed transmission line are derived. On the created model in the program Matlab the Joule's losses and originated asymmetry are calculated. The results are compared with the simulation in the program Dynast. In the end of the thesis the economic evaluation is carried out. It takes the increasing of costs in the case of transposed and non-transposed transmission line too.

Key words

transposed transmission line, non-transposed transmission line, parameters of transmission line, earth wire, evaluation of Joule's losses, economic efficiency of investment

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 5. května 2014

Tomáš Nazarčík

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Ladislavu Haňkovi, CSc. a jeho kolegům ze společnosti ČEPS a.s. za poskytnutí materiálů k diplomové práci.

Obsah

1. Úvod	1
2. Parametry vedení	2
2.1. Indukčnost vodiče	2
2.2. Indukčnost třífázového vedení	4
2.2.1. Netransponované vedení.....	4
2.2.2. Transponované vedení	7
2.3. Indukčnost třífázového vedení se svazkovými vodiči	8
2.3.1. Netransponované vedení.....	8
2.3.2. Transponované vedení	12
2.4. Indukčnost třífázového systému se zemnicími lany	13
2.4.1. Netransponované vedení.....	14
2.4.2. Transponované vedení	16
2.5. Kapacita	19
2.6. Odpor	21
3. Modelové vedení	23
3.1. Výpočet pasivních parametrů modelového vedení	25
3.2. Matematický model vedení.....	28
4. Činné ztráty modelového vedení	29
5. Výpočet činných ztrát.....	30
5.1. Transponované vedení	30
5.2. Netransponované vedení	35
5.3. Závislost celkových činných ztrát na přenášeném výkonu.....	42
6. Simulace v programu Dynast	45
6.1. Porovnání výpočtu v Matlabu a simulace v Dynastu transponovaného vedení....	47
6.2. Porovnání výpočtu v Matlabu a simulace v Dynastu netransponovaného vedení	47
6.3. Simulace pro málo zatížené vedení	48
7. Ekonomické vyhodnocení celkových činných ztrát	51
7.1. Základní porovnání efektivnosti investic.....	52
7.2. Variantní výpočty efektivnosti investic	53
7.3. Zvýšení nákladů v závislosti na přenášeném výkonu	57
8. Závěr.....	58
Použitá literatura.....	60
Přílohy	61

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Určení vektorového magnetického potenciálu smyčky u vodiče s proudem	2
Obr. 2.2 Určení vlastní a vzájemné indukčnosti 2 vodičů	3
Obr. 2.3 Třífázové netransponované vedení	5
Obr. 2.4 Transpozice vodičů na vedení	7
Obr. 2.5 Svazkové vodiče	8
Obr. 2.6 Vlastní a vzájemná indukčnost svazkového vodiče	12
Obr. 2.7 Geometrické vzdálenosti vodičů	14
Obr. 2.8 Induktivní vazby mezi vodiči	16
Obr. 2.9 Kapacity vícevodičového systému	19
Obr. 2.10 Vyjádření potenciálových koeficientů metodou zrcadlení	20
Obr. 3.1 Konstrukční uspořádání stožáru Portál 400 kV	23
Obr. 3.2 Fiktivní zemnicí lano a geometrické vzdálenosti	24
Obr. 3.3 Model transponovaného vedení jako kaskáda gama článků	25
Obr. 3.4 Značení proudů a postup sestavování rovnic	28
Obr. 5.1 Závislost celkových činných ztrát na délce vedení	34
Obr. 5.2 Závislost činných ztrát transponovaného vedení na přenášeném výkonu	42
Obr. 5.3 Navýšení celkových činných ztrát netransponovaného vedení oproti transponovanému v závislosti na přenášeném výkonu	43
Obr. 6.1 Schéma simulační úlohy v programu Dynast	45
Obr. 6.2 Velikost napětí v různých místech vedení	50
Obr. 7.1 Závislost nákladů na ceně elektřiny – parametr diskontní míra	54
Obr. 7.2 Závislost nákladů na ceně elektřiny – parametr doba životnosti vedení	54
Obr. 7.3 Závislost nákladů na diskontní míře – parametr cena elektřiny	55
Obr. 7.4 Závislost nákladů na diskontní míře – parametr doba životnosti vedení	55
Obr. 7.5 Závislost nákladů na době životnosti vedení – parametr cena elektřiny	56
Obr. 7.6 Závislost nákladů na době životnosti vedení – parametr diskontní míra	56

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Symetrický zdroj i zátěž	30
Tab. 5.2 Nesymetrie zdroje – amplituda fáze a o 2% menší	31
Tab. 5.3 Nesymetrie zdroje – amplituda fáze a o 5% menší	31
Tab. 5.4 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze a o 2% větší	32
Tab. 5.5 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze a o 5% větší	32
Tab. 5.6 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze a o 2% menší	33
Tab. 5.7 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze a o 5% menší	33
Tab. 5.8 Symetrický zdroj i spotřebič	35
Tab. 5.9 Nesymetrie zdroje fáze a – amplituda o 2% menší	36
Tab. 5.10 Nesymetrie zdroje fáze b – amplituda o 2% menší	36
Tab. 5.11 Nesymetrie zdroje fáze c – amplituda o 2% menší	37
Tab. 5.12 Nesymetrie zdroje fáze a – amplituda o 5% menší	37
Tab. 5.13 Nesymetrie spotřebiče fáze a – velikost odporu o 2% větší	38
Tab. 5.14 Nesymetrie spotřebiče fáze b – velikost odporu o 2% větší	38
Tab. 5.15 Nesymetrie spotřebiče fáze c – velikost odporu o 2% větší	39
Tab. 5.16 Nesymetrie spotřebiče fáze a – velikost odporu o 2% menší	39
Tab. 5.17 Nesymetrie spotřebiče fáze b – velikost odporu o 2% menší	40
Tab. 5.18 Nesymetrie spotřebiče fáze c – velikost odporu o 2% menší	40
Tab. 5.19 Nesymetrie spotřebiče fáze a – velikost odporu o 5% větší	41
Tab. 5.20 Nesymetrie spotřebiče fáze c – velikost odporu o 5% menší	41
Tab. 6.1 Symetrický zdroj i spotřebič	47
Tab. 6.2 Symetrický zdroj a nesymetrický spotřebič – odpor fáze a menší o 2%	47
Tab. 6.3 Symetrický zdroj i spotřebič	47
Tab. 6.4 Symetrický zdroj a nesymetrický spotřebič – odpor fáze a menší o 2%	47
Tab. 6.5 Činné ztráty na transponovaném vedení – varianta 1	48
Tab. 6.6 Činné ztráty na transponovaném vedení – varianta 2	49
Tab. 6.7 Činné ztráty na netransponovaném vedení – varianta 1	49
Tab. 6.8 Činné ztráty na netransponovaném vedení – varianta 2	49
Tab. 7.1 Porovnání činných ztrát pro symetrický zdroj i zátěž	51
Tab. 7.2 Náklady na zvýšené činné ztráty pro různé přenášené výkony	57

Seznam použitých zkratek a symbolů

NPV	Net Present Value – čistá současná hodnota	
Φ	magnetický indukční tok	[Wb]
\mathbf{B}	vektor magnetické indukce	[T]
\mathbf{A}	vektorový magnetický potenciál	[Wb \cdot m $^{-1}$]
μ_0	permeabilita vakua = $4\pi 10^{-7}$	[Hm $^{-1}$]
L_{ii}	vlastní indukčnost vodiče i	[H]
L_{ij}	vzájemná indukčnost mezi vodiči i a j	[H]
\mathbf{L}_n	matice indukčností pro netransponované vedení	[H]
\mathbf{L}_t	matice indukčností pro transponované vedení	[H]
R	vlastní poloměr fázového vodiče	[m]
R_0	vlastní poloměr zemnicího lana	[m]
u	okamžitá hodnota napětí	[V]
i	okamžitá hodnota proudu	[A]
\bar{U}	fázor napětí	[V]
\bar{I}	fázor proudu	[A]
ℓ	délka vedení	[km]
d	vzdálenost mezi dvěma vodiči	[m]
b	vzdálenost mezi vodičem a obrazem druhého vodiče	[m]
D_g	střední geometrická vzdálenost	[m]
α_{ii}	vlastní potenciálový koeficient	[V \cdot C $^{-1}$]
α_{ij}	vzájemný potenciálový koeficient	[V \cdot C $^{-1}$]
m	počet parciálních vodičů ve svazku	
h	výška vodiče nad zemí	[m]
\mathbf{A}	matice potenciálových koeficientů	[V \cdot C $^{-1}$]
\mathbf{B}	matice kapacitních koeficientů	[F]
C_{ii}	kapacita vodiče vůči zemi	[F]
C_{ij}	kapacita mezi vodiči i a j	[F]
C_p	provozní kapacita	[F]
Q	elektrický náboj	[C]
\mathbf{q}	vektor elektrických nábojů	[C]
ε_0	permitivita vakua = $8,8541878 \cdot 10^{-12}$	[Fm $^{-1}$]
R_{ekv}	ekvivalentní poloměr	[m]

R_p	provozní odpor vodiče	[Ω]
ρ	rezistivita vodiče	[Ωm]
S	průřez vodiče	[m^2]
α	lineární teplotní součinitel odporu	[K^{-1}]
β	kvadratický teplotní součinitel odporu	[K^{-2}]
ϑ	teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
p	činitel nesymetrie	[%]
f	frekvence	[Hz]
ω	úhlová frekvence	[s^{-1}]
λ	vlnová délka	[m]
ΔP_j	Jouleovy ztráty	[W]
T_z	doba životnosti	[roky]
r	diskontní míra	[%]
V_i	náklady v i -tém roce	[Kč]

1. Úvod

Již od počátku stavby venkovních přenosových vedení se prováděla úplná transpozice vodičů. Jejím cílem je symetrizovat pasivní parametry všech fází. Při transpozici vodičů na trase po každé třetině délky změni polohu takovým způsobem, že na daném úseku se fázový vodič nachází v jiné pozici. S rozvojem přenosové soustavy a s tím spojenou stavbou nových rozvodů se délka nových vedení postupně zkracovala. Stavba transpozičních stožárů je oproti klasickým nosným či kotevním stožárům nákladnější. Právě z ekonomických důvodů bylo snahou u vedení kratších délek transpozici neprovádět. Absence transpozice vodičů na vedení přináší nepříznivé efekty. Nerovnoměrnost pasivních parametrů v jednotlivých fázových vodičích má vliv na chod ochrany. Různá impedance jednotlivých fázových vodičů způsobuje určitou chybu lokátoru poruch distančních ochrany při zkratových poruchách. Neprovedení transpozice vodičů na vedení má vliv na činné ztráty vzniklé při přenosu elektrické energie. Induktivní a kapacitní vazby mezi vodiči indukují vlivem geometrické nesymetrie napětí a proud do zemnicích lan, kterými protéká proud i při běžném bezporuchovém provozu.[7]

Nesymetrie pasivních parametrů ve všech fázích má též za následek proudovou a napěťovou nesymetrii na zátěži i za předpokladu, že zdroj a samotná zátěž je symetrická. Tato nesymetrie vede ke vzniku zpětné a netočivé složky proudu respektive napětí. Ty mohou způsobit přídatné ztráty u elektrických strojů a snížit tak účinnost jejich chodu. Problematice transpozice vedení je věnováno velký počet článků a výzkumných zpráv – např. [3],[5]. Metody a postupy k analýze dané problematiky jsou odlišné, stejně tak i nápravná řešení pro eliminaci nežádoucích jevů plynoucích z netranspozice vedení.

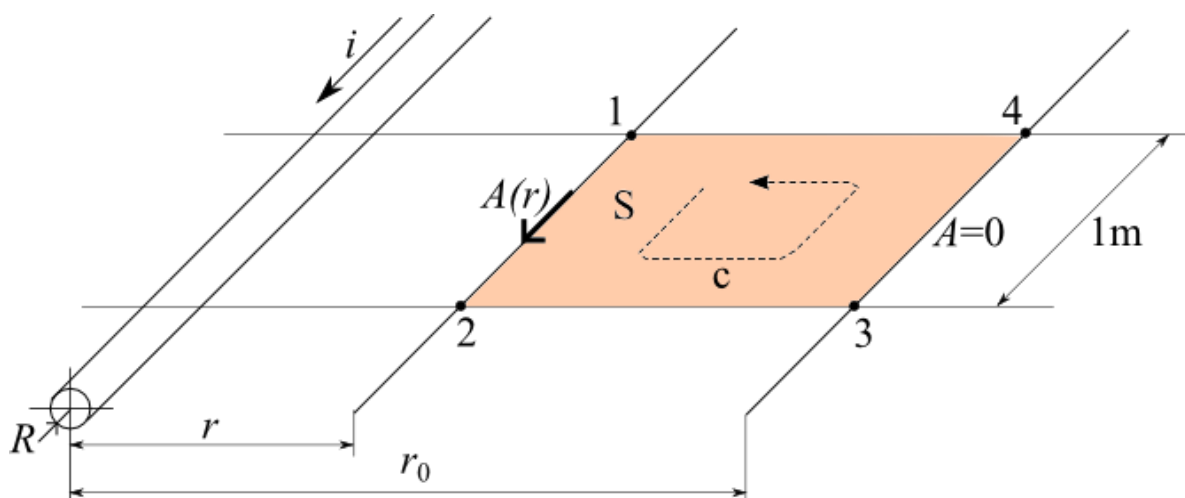
Cílem této diplomové práce je stanovit činné ztráty na vedení při přenosu elektrické energie a to pro variantu transponovaného i pro případ netransponovaného vedení. Výpočet je proveden na modelovém vedení o délce 100 km. Zvolený model respektuje reálné konstrukční a materiálové parametry definovaného stožáru na napěťové hladině 400 kV. Dalším úkolem této diplomové práce je porovnat zvýšení činných ztrát na netransponovaném vedení se zvýšením nákladů na stavbu transpozičních stožárů, a to po dobu předpokládané životnosti. Na základě tohoto porovnání posléze určit, zdali se s ohledem na celkové náklady jeví transpozice jako efektivní.

2. Parametry vedení

K určení činných ztrát je zapotřebí znát velikosti efektivních hodnot proudů v jednotlivých vodičích včetně zemnicích lan. Ty závisí nejen na napětí zdroje a parametrech zátěže, ale jsou též ovlivněny pasivními parametry vedení včetně vazeb elektromagnetického pole. Konkrétně se jedná o induktivní a kapacitní vazby mezi jednotlivými vodiči. Z pasivních parametrů má na velikosti proudů v jednotlivých fázích stěžejní vliv vlastní indukčnost vodiče a induktivní vazby. Z tohoto důvodu je odvození indukčnosti oproti ostatním pasivním prvkům tak podrobné a detailní.

2.1. Indukčnost vodiče

Následující postup výpočtu vychází z algoritmu uvedeného v [1]. Uvažujme nejprve smyčku obdélníkového tvaru definovanou body 1-2-3-4 (Obr. 2.1) tvořenou vodičem, který je ve vzdálenosti r od vodiče protékaného proudem i , a fiktivním vodičem ve vzdálenosti r_0 od vodiče s proudem. Fiktivní vodič je umístěn v místě, kde vektorový magnetický potenciál je roven nule.



Obr. 2.1 Určení vektorového magnetického potenciálu smyčky u vodiče s proudem

Pro magnetický tok spřažený se smyčkou vztahovaný k jednotkové délce smyčky platí:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S \text{rot} \mathbf{A} d\mathbf{S} = \oint_c \mathbf{A} d\mathbf{l} = \mathbf{A}(r) \ell = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (1)$$

kde: Φ ... magnetický indukční tok
 \mathbf{B} ... vektor magnetické indukce
 \mathbf{A} ... vektorový magnetický potenciál
 μ_0 ... permeabilita vakua

Pro další postup uvažujme dále dva paralelní vodiče s proudy i_1 a i_2 (Obr. 2.2).
 Vlastní indukčnost prvního vodiče je dána součtem vnitřní a vnější indukčnosti:

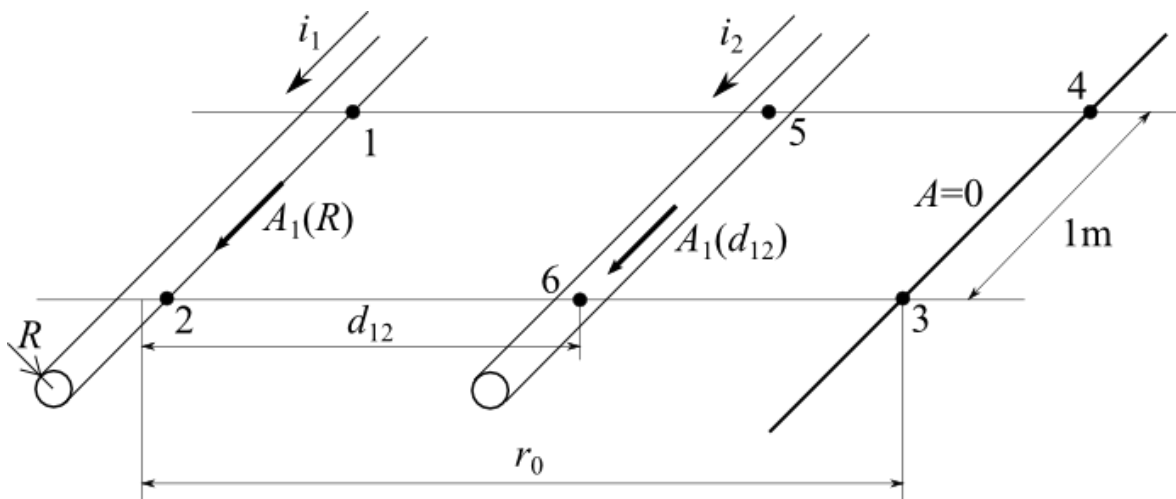
$$L_1 = L_i + L_e \quad (2)$$

L_i ... vnitřní indukčnost [H/m] L_e ... vnější indukčnost [H/m]

kde:

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad L_e = \frac{\Phi_{e1}}{i_1} \quad (3)$$

Φ_{e1} ... magnetický indukční tok spřažený se smyčkou 1-2-3-4, který je možno určit z rovnice (1):



Obr. 2.2 Určení vlastní a vzájemné indukčnosti 2 vodičů

$$\Phi_{e1} = A_1(R) = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi} \ln \frac{r_0}{R} \quad (4)$$

Dosazením rovnic (3) a (4) zpět do rovnice (2) lze získat vztah pro vlastní indukčnost:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_0}{R} \right) \quad (5)$$

Vzájemná indukčnost L_{12} vodičů 1 a 2 je definována jako:

$$L_{12} = \frac{\Phi_{12}}{i_1} \quad (6)$$

kde Φ_{12} je magnetický indukční tok vybuzený proudem i_1 a spřažený se smyčkou definovanou body 5-6-3-4 a odpovídá následujícímu vztahu:

$$\Phi_{12} = A_1(d_{12}) = \frac{i_1 \mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{12}} \quad (7)$$

Z dosazení rovnice (7) do rovnice (6) pak plyne vztah pro vzájemnou indukčnost mezi dvěma vodiči:

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{12}} \quad (8)$$

Stejným způsobem lze definovat i vzájemnou indukčnost L_{21} . S ohledem na analogický postup pak platí $L_{12} = L_{21}$. V elektroenergetice je možné se setkat s pojmem celková indukčnost vodiče. Ta je dána napětím na indukčnosti vodiče respektující induktivní vazby s ostatními vodiči. Napětí na indukčnosti i -tého vodiče na 1 m délky je pak dáno vztahem:

$$u_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \frac{di_j}{dt} \quad (9)$$

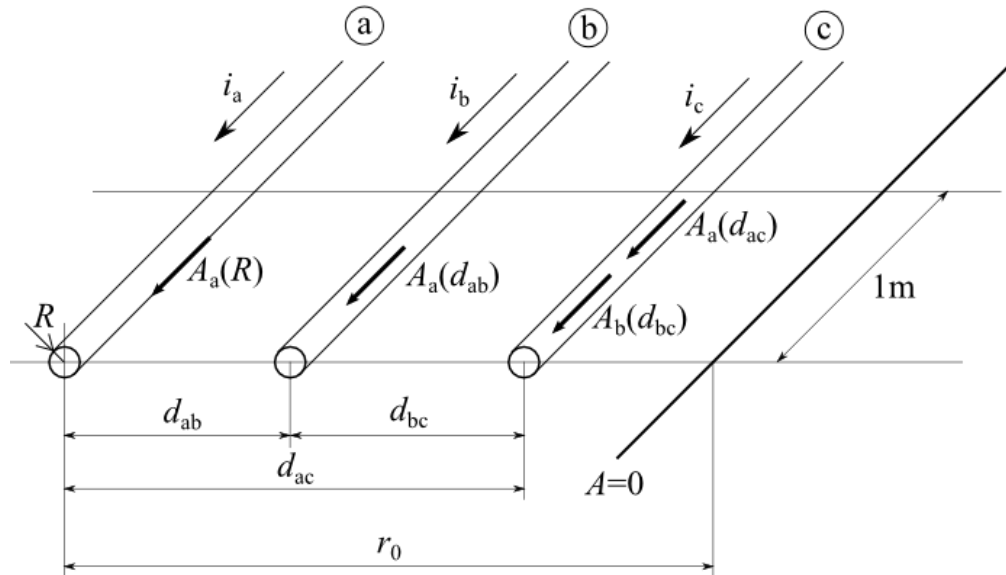
$i = 1, 2, \dots, n$ $n =$ počet vodičů v systému

2.2. Indukčnost třífázového vedení

2.2.1. Netransponované vedení

Pro další postup uvažujme třífázový systém dle obrázku 2.3, kde proudy fázových vodičů tvoří vyváženou soustavu:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (10)$$



Obr. 2.3 Třífázové netransponované vedení

K vyjádření napětí na indukčnostech na i -tém vodiči na 1 m délky je užito maticového zápisu:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{L} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

kde \mathbf{L} je matice indukčností vedení, která respektuje všechny induktivní vazby mezi jednotlivými vodiči. V případě netransponovaného vedení nemá tato matice nulové prvky. Pokud je přímá linie s nulovým vektorovým magnetickým potenciálem v takové vzdálenosti od fázových vodičů, že je splněna následující podmínka:

$$r_0 \gg d_{ij} \gg R \quad i, j = a, b, c \quad i \neq j \quad (12)$$

pak je možné vyjádřit vztah pro vlastní indukčnost fázových vodičů na 1 m délky za předpokladu, že všechny fázové vodiče mají totožný poloměr.

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_0}{R} \right) \quad (13)$$

Analogicky je možné vyjádřit pomocí rovnic (7) a (8) i vzájemné indukčnosti:

$$L_{ab} = \frac{\Phi_{ab}}{i_a} = \frac{A_a(d_{ab})}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ab}} \quad (14)$$

$$L_{ac} = \frac{\Phi_{ac}}{i_a} = \frac{A_a(d_{ac})}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ac}} \quad (15)$$

$$L_{bc} = \frac{\Phi_{bc}}{i_b} = \frac{A_b(d_{bc})}{i_b} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{bc}} \quad (16)$$

Dále se využije skutečnosti, že proudy fázových vodičů tvoří vyvážený systém. Proud fáze c lze vyjádřit jako:

$$i_c = -i_a - i_b \quad (17)$$

pak napětí na jednotlivých fázových vodičích je možné vyjádřit pomocí 2 proudů:

$$\begin{aligned} u_a &= L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} = (L_{aa} - L_{ac}) \frac{di_a}{dt} + (L_{ab} - L_{ac}) \frac{di_b}{dt} \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{ac}}{R} \right) + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{ac}}{d_{ab}} \right] \end{aligned} \quad (18a)$$

$$u_b = L_{ab} \frac{di_a}{dt} + L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{bc}}{d_{ab}} + \frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{bc}}{R} \right) \right] \quad (18b)$$

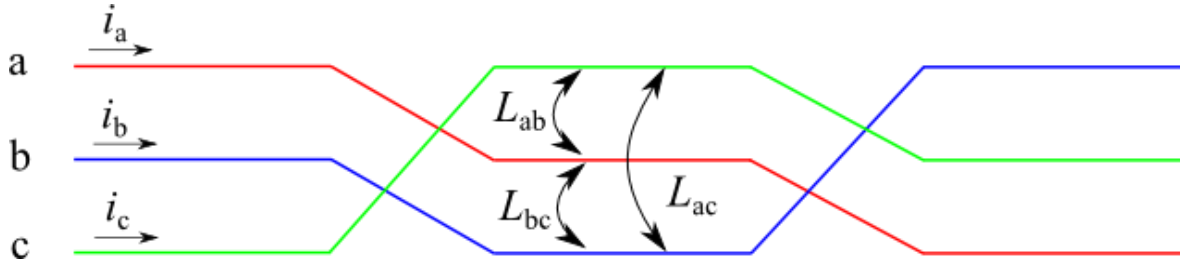
$$u_c = L_{ab} \frac{di_a}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} + L_{cc} \frac{di_c}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{ac}}{d_{bc}} + \frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{ac}}{R} \right) \right] \quad (18c)$$

Přepsání rovnic (18a), (18b) a (18c) do maticového tvaru ukazuje, že vzniklá matice L_n obsahuje oproti matici L nulové prvky. Dále pak došlo k eliminaci vzdálenosti r_0 od fiktivního vodiče s nulovou hodnotou vektorového magnetického potenciálu.

$$L_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{ac}}{R} & \ln \frac{d_{ac}}{d_{ab}} & 0 \\ \ln \frac{d_{bc}}{d_{ab}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{bc}}{R} & 0 \\ 0 & \ln \frac{d_{ac}}{d_{bc}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{ac}}{R} \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.2.2. Transponované vedení

Při transpozici fázový vodič vždy v třetině trasy mění svou polohu takovým způsobem, že vystřídá všechny pozice na stožáru. To je naznačeno na obrázku 2.4:



Obr. 2.4 Transpozice vodičů na vedení

Napětí na indukčnosti ve fázi a je dáno vztahem:

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3} \frac{d}{dt} (3L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{ab}i_c + L_{bc}i_b + L_{ac}i_b + L_{bc}i_c) = \\ &= \frac{1}{3} \frac{d}{dt} (i_a(3L_{aa}) + i_b(L_{ab} + L_{bc} + L_{ac}) + i_c(L_{ac} + L_{ab} + L_{bc})) \end{aligned} \quad (20)$$

Využitím vztahů pro indukčnosti odvozených pro netransponované vedení (13), (14), (15), (16) a s ohledem na fakt, že se opět jedná o vyváženou soustavu proudů, lze zjednodušit vztah pro napětí na indukčnosti ve fázi a :

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{R} \right) \frac{di_a}{dt} \quad (21)$$

Stejným způsobem lze odvodit napětí na indukčnostech ve zbylých fázích b a c . Na transponovaném vedení je toto napětí jednotlivých fázových vodičů stejně veliké. Obecný vztah pro napětí na indukčnosti daného vodiče odpovídá:

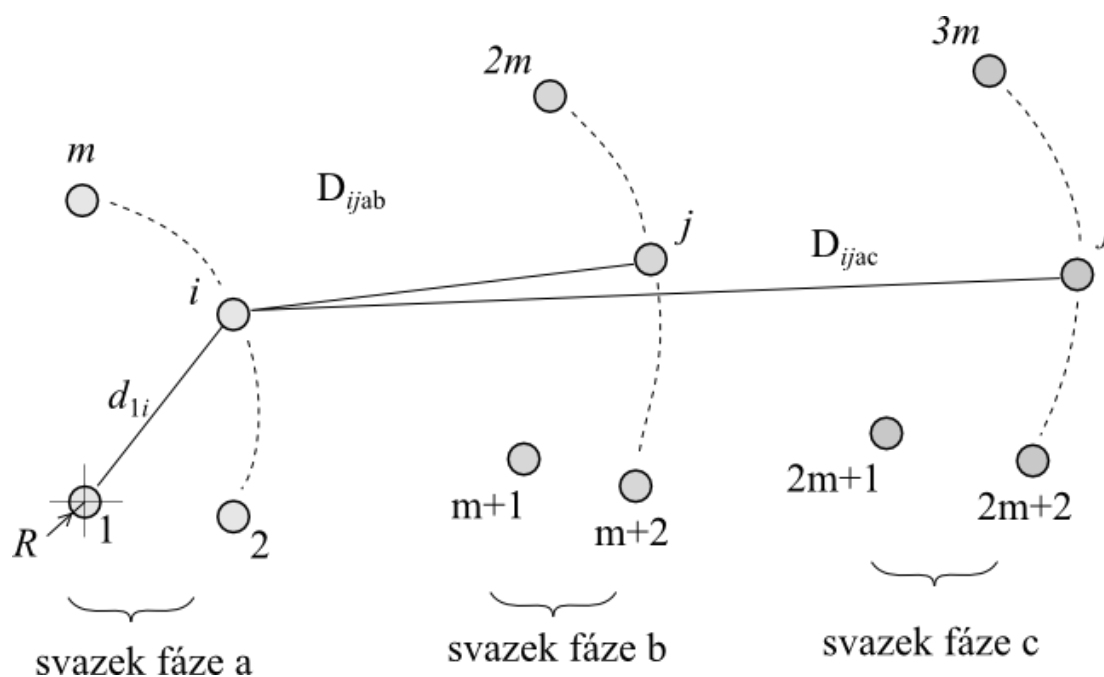
$$u_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{R} \right) \frac{di_i}{dt} \quad i = a, b, c \quad (22)$$

Matice indukčností je v tomto případě diagonální, neboť všechny vzájemné indukčnosti jsou již respektovány v hodnotě celkové indukčnosti vodiče.

$$L_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{R} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.3. Indukčnost třífázového vedení se svazkovými vodiči

Na napěťových hladinách VVN a ZVN se pro přenos elektrické energie často užívá svazkových vodičů, kdy je jedna fáze tvořena několika vodiči. Celkový fázový proud se tak rovnoměrně rozdělí mezi jednotlivé vodiče svazku. Svazkový vodič má vliv na rozložení elektrického a magnetického pole v jeho blízkosti. Tento pozitivní efekt vede ke snížení ztrát korónou. Pro zavedení následujících vztahů uvažujme konfiguraci vodičů podle obrázku 2.5. Parciální vodiče jsou číslovány jako $1, 2, \dots, m; m+1, m+2, \dots, 2m; 2m+1, 2m+2, \dots, 3m$ a všechny mají stejný poloměr R . Velikost proudu parciálního vodiče pak odpovídá i/m .



Obr. 2.5 Svazkové vodiče

2.3.1. Netransponované vedení

Pro jednodušší popis je vhodné zavést hlavní geometrické vzdálenosti:

- vzdálenost i -tého vodiče fáze a od všech zbývajících vodičů této fáze

$$d_{gia} = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m d_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad d_{ii} = R \quad (24a)$$

- analogicky pro i -tý vodič fáze b

$$d_{gib} = \sqrt[m]{\prod_{j=m+1}^{2m} d_{ij}} \quad i = m+1, m+2, \dots, 2m \quad (24b)$$

- vzdálenost všech vodičů ve fázi a

$$d_{ga} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m d_{gia}} \quad (25a)$$

- analogicky pro všechny vodiče ve fázi b

$$d_{gb} = \sqrt[m]{\prod_{i=m+1}^{2m} d_{gib}} \quad (25b)$$

- vzdálenost i -tého vodiče fáze a od všech vodičů ve fázi b

$$D_{giab} = \sqrt[m]{\prod_{j=m+1}^{2m} D_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (26a)$$

- podobně vzdálenost i -tého vodiče fáze a od všech vodičů fáze c

$$D_{giac} = \sqrt[m]{\prod_{j=2m+1}^{3m} D_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (26b)$$

- vzdálenost vodičů ve fázi a a fáze b

$$D_{gab} = \sqrt[m]{\prod_{j=m+1}^{2m} D_{giab}} \quad (27a)$$

- analogicky vzdálenost vodičů ve fázi a a fázi c

$$D_{gac} = \sqrt[m]{\prod_{j=2m+1}^{3m} D_{giac}} \quad (27b)$$

Pomocí vztahu pro vyváženou soustavu (10) je možné vyjádřit indukované napětí u_i na i -tém vodiči fáze a na jednotku délky:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{1}{m} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\sum_{j=1}^m L_{i,j} - \sum_{j=2m+1}^{3m} L_{i,j} \right) + \frac{di_b}{dt} \left(\sum_{j=m+1}^{2m} L_{i,j} - \sum_{j=2m+1}^{3m} L_{i,j} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{m} \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{di_a}{dt} \left[\frac{1}{4} + \ln \left(\frac{D_{giac}}{d_{gia}} \right)^m \right] + \frac{di_b}{dt} \ln \left(\frac{D_{giac}}{D_{giab}} \right)^m \right\} = \quad i = 1, 2, \dots, m \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{giac}}{d_{gia}} \right) + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{D_{giac}}{D_{giab}} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Napětí na celém svazku fáze a je pak:

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m u_i = \frac{1}{m} \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \sum_{i=1}^m \ln \frac{D_{giac}}{d_{gia}} \right) + \frac{di_b}{dt} \sum_{i=1}^m \ln \frac{D_{giac}}{D_{giab}} \right] = \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gac}}{d_{ga}} \right) + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{D_{gac}}{D_{gab}} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

Stejným postupem lze odvodit indukované napětí na i -tém vodiči svazku fáze b a napětí celého svazkového vodiče fáze b :

$$u_b = \frac{1}{m} \sum_{i=m+1}^{2m} u_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{D_{gbc}}{D_{gab}} + \frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gbc}}{d_{gb}} \right) \right] \quad (30)$$

Použitím a úpravou vztahu pro vyváženou soustavu (10):

$$i_a = -i_b - i_c \quad (31)$$

je poté možné určit napětí i -tého vodiče svazku fáze c

$$u_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \ln \frac{D_{giac}}{D_{gibc}} + \frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{giac}}{d_{gc}} \right) \right] \quad i = 2m + 1, \dots, 3m \quad (32)$$

Napětí celého svazkového vodiče fáze c je pak:

$$u_c = \frac{1}{m} \sum_{i=2m+1}^{3m} u_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \ln \frac{D_{gac}}{D_{gbc}} + \frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gac}}{d_{gc}} \right) \right] \quad (33)$$

Pokud jsou pozice parciálních vodičů ve svazku ve všech fázích stejné a platí:

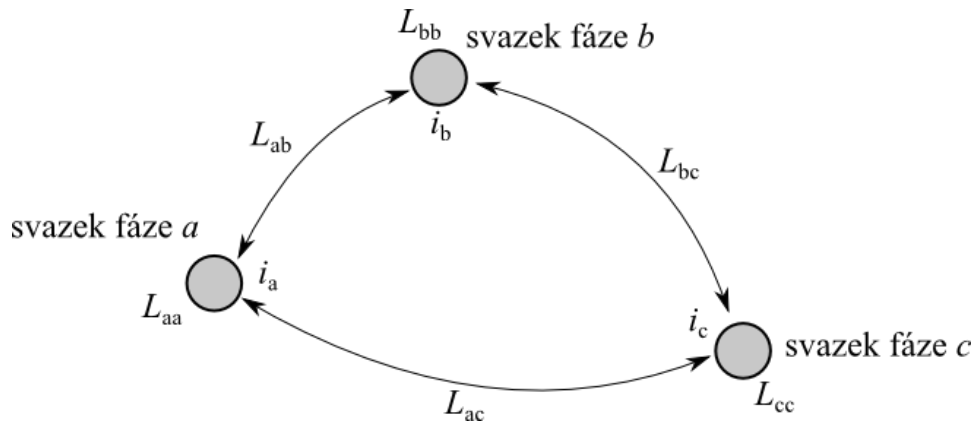
$$d_{ga} = d_{gb} = d_{gc} = d_g \quad (34)$$

Lze následně vyjádřit napětí na indukčnostech na 1 m délky ve všech fázích vyjádřit v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = L_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gac}}{d_g} & \ln \frac{D_{gac}}{D_{gab}} & 0 \\ \ln \frac{D_{gbc}}{D_{gab}} & \frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gbc}}{d_g} & 0 \\ 0 & \ln \frac{D_{gac}}{D_{gbc}} & \frac{1}{4m} + \ln \frac{D_{gac}}{d_g} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (35)$$

2.3.2. Transponované vedení

Svazkové vodiče jsou na vedení transponované v souladu s obr. 2.4. K vyjádření matice indukčností L_t je vhodné zavést fiktivní kvantitativní indukčnosti svazkových vodičů. Konkrétně se jedná o vlastní a vzájemné indukčnosti svazkových vodičů, které jsou naznačeny na obr. 2.6:



Obr. 2.6 Vlastní a vzájemná indukčnost svazkového vodiče

Pro napětí na indukčnosti fáze a platí:

$$u_a = L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} \quad (36)$$

Jestliže je rozmístění parciálních vodičů ve svazku ve všech fázích totožné, pak pro vlastní a vzájemné indukčnosti svazkových vodičů platí:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{1}{d_g} \right) \quad (37)$$

$$L_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{gab}} \quad L_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{gac}} \quad L_{bc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{gbc}} \quad (38)$$

Napříč celou trasou vedení vodič projde po třetinách trasy všemi pozicemi, a tak je dosazením rovnic (37) a (38) do rovnice (36) indukované napětí na indukčnosti fáze a na 1 m délky dáno vztahem:

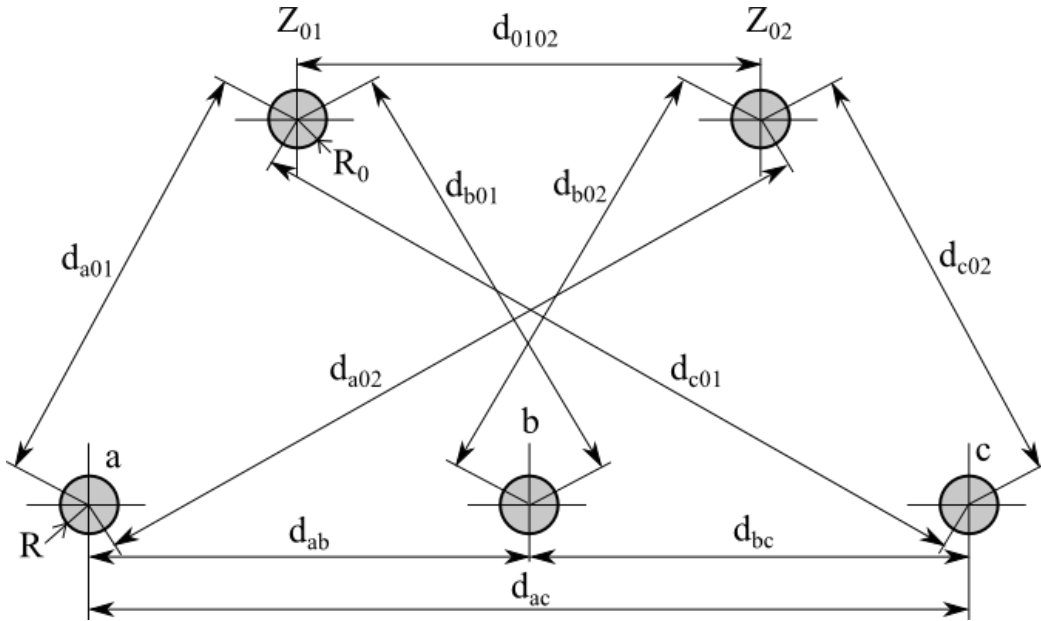
$$\begin{aligned}
u_a &= \frac{1}{3} \left(3L \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{ab} \frac{di_c}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + L_{ac} \frac{di_b}{dt} \right) = \\
&= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{\sqrt[3]{D_{gab} D_{gbc} D_{gac}}}{d_g} \right) \frac{di_a}{dt} \quad (39)
\end{aligned}$$

Stejným způsobem je možné vyjádřit napětí na indukčnostech ve fázi *b* a *c*. Matice indukčností je v tomto případě diagonální.

$$\mathbf{L}_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4m} + \ln \frac{\sqrt[3]{D_{gab} D_{gbc} D_{gac}}}{d_g} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

2.4. Indukčnost třífázového systému se zemnicími lany

Vztahy v této kapitole jsem odvodil podle [1], kde je uvedený postup jen pro jedno zemnicí lano. Analogickým postupem jsem jej zobecnil pro 2 zemnicí lana. Vlivem nesymetrií se do zemnicích lan mohou naindukovat proudy a napětí. Může se jednat o nesymetrii způsobenou geometrií stožáru nebo o nesymetrii vzniklou nesymetrií proudů či napětí v jednotlivých fázích. U zkratových poruch a jiných výrazných nesymetrií protéká část poruchového proudu zemí. Přirozená nesymetrie na netransponovaném vedení je výrazně nižší. Vzájemný poměr velikostí odporu zemnicího lana a země a také vzájemný poměr jejich induktivních vazeb k fázovým vodičům určuje cestu, kterou poteče hlavní část vratného proudu. Pro další postup předpokládám, že vratný proud se uzavírá jen přes zemnicí lana. Konfigurace vodičů odpovídající obr. 2.7:



Obr. 2.7 Geometrické vzdálenosti vodičů

2.4.1. Netransponované vedení

Napětí indukované na indukčnosti ve fázi a na 1 metr délky je opět možné vyjádřit pomocí vlastní a vzájemných indukčností. Odpovídá-li rozložení vodičů v prostoru obr. 2.7, pak indukované napětí na indukčnosti ve fázi a odpovídá následujícímu vztahu:

$$u_a = L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{a01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{a02} \frac{di_{02}}{dt} \quad (41)$$

kde vlastní a vzájemné indukčnosti jsou vyjádřeny jako:

$$L_{aa} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_0}{R} \right) \quad (42)$$

$$L_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ab}} \quad L_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ac}} \quad L_{a01} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{a01}} \quad L_{a02} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{a02}} \quad (43)$$

Je-li splněna podmínka vyvážené soustavy proudů:

$$i_a + i_b + i_c + i_{01} + i_{02} = 0 \quad (44)$$

pak je možné eliminovat v předcházejících rovnicích proud i_{02} . Napětí na jednotlivých indukčnostech všech fázových vodičů i zemnicích lan je poté určeno:

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a02}}{R} \right) + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{ab}} + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{ac}} + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{a01}} \right] \quad (45a)$$

$$u_b = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{b02}}{d_{ab}} + \frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{b02}}{R} \right) + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{b02}}{d_{bc}} + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{d_{b02}}{d_{b01}} \right] \quad (45b)$$

$$u_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{c02}}{d_{ac}} + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{c02}}{d_{bc}} + \frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{c02}}{R} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{d_{c02}}{d_{c01}} \right] \quad (45c)$$

$$u_{01} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{0102}}{d_{a01}} + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{0102}}{d_{b01}} + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{0102}}{d_{c01}} + \frac{di_{01}}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{0102}}{R_0} \right) \right] \quad (46a)$$

$$u_{02} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{b02}} + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{c02}} + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{d_{a02}}{d_{0102}} + \frac{di_{02}}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a02}}{R_0} \right) \right] \quad (46b)$$

Napětí na jednotlivých indukčnostech na 1 m délky je možné vyjádřit maticově:

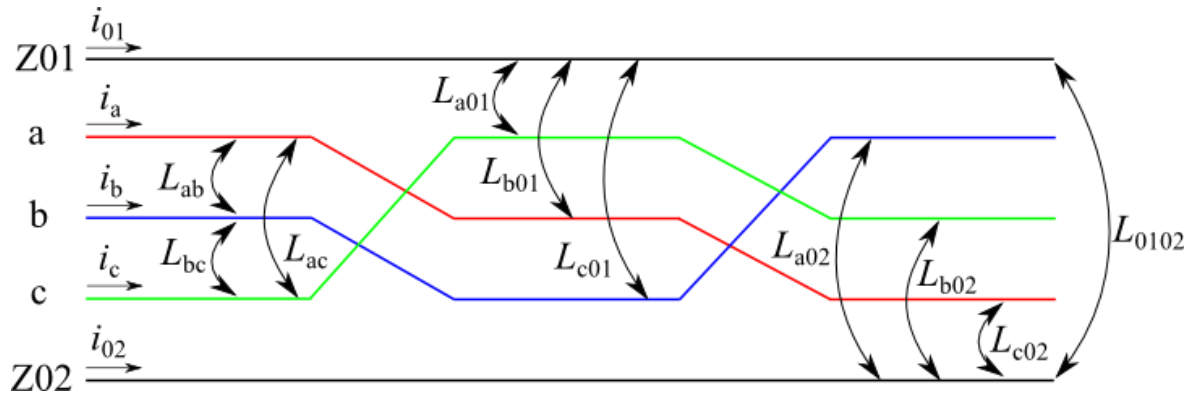
$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_{01} \\ u_{02} \end{bmatrix} = L_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{01} \\ i_{02} \end{bmatrix} \quad (47)$$

kde matice indukčností nabývá tvaru:

$$L_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a02}}{R} & \ln \frac{d_{a02}}{d_{ab}} & \ln \frac{d_{a02}}{d_{ac}} & \ln \frac{d_{a02}}{d_{a01}} & 0 \\ \ln \frac{d_{b02}}{d_{ab}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{b02}}{R} & \ln \frac{d_{b02}}{d_{bc}} & \ln \frac{d_{b02}}{d_{b01}} & 0 \\ \ln \frac{d_{c02}}{d_{ac}} & \ln \frac{d_{c02}}{d_{bc}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{c02}}{R} & \ln \frac{d_{c02}}{d_{c01}} & 0 \\ \ln \frac{d_{0102}}{d_{a01}} & \ln \frac{d_{0102}}{d_{b01}} & \ln \frac{d_{0102}}{d_{c01}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{0102}}{R_0} & 0 \\ 0 & \ln \frac{d_{a02}}{d_{b02}} & \ln \frac{d_{a02}}{d_{c02}} & \ln \frac{d_{a02}}{d_{0102}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a02}}{R_0} \end{bmatrix} \quad (48)$$

2.4.2. Transponované vedení

Pro další postup uvažujme konfiguraci vodičů, která odpovídá obr. 2.8.



Obr. 2.8 Induktivní vazby mezi vodiči

Pro určení napětí na indukčnosti ve fázi a jsou použity vztahy pro vlastní a vzájemné indukčnosti (42), (43). Geometrické uspořádání vodičů v prostoru je totožné s obr. 2.7. Napětí na indukčnosti fáze a je určeno vztahem:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \frac{1}{3} \left(3L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{a01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{a02} \frac{di_{02}}{dt} + L_{ab} \frac{di_c}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} \right. \\
 &\quad \left. + L_{b01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{b02} \frac{di_{02}}{dt} + L_{ac} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + L_{c01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{c02} \frac{di_{02}}{dt} \right) = \\
 &= \frac{1}{3} \left(3L_{aa} \frac{di_a}{dt} + (L_{ab} + L_{bc} + L_{ac}) \frac{di_b}{dt} + (L_{ab} + L_{bc} + L_{ac}) \frac{di_c}{dt} \right. \\
 &\quad \left. + (L_{a01} + L_{b01} + L_{c01}) \frac{di_{01}}{dt} + (L_{a02} + L_{b02} + L_{c02}) \frac{di_{02}}{dt} \right) \quad (49)
 \end{aligned}$$

Eliminací proudů i_b a i_c vede rovnice na tvar:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \frac{1}{3} \left[\frac{di_a}{dt} (3L_{aa} - L_{ab} - L_{bc} - L_{ac}) + \frac{di_{01}}{dt} (L_{a01} + L_{b01} + L_{c01} - L_{ab} - L_{bc} - L_{ac}) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{di_{02}}{dt} (L_{a02} + L_{b02} + L_{c02} - L_{ab} - L_{bc} - L_{ac}) \right] \quad (50)
 \end{aligned}$$

po dosažení vztahů pro vlastní a vzájemné indukčnosti a úpravě:

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{R} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{a01}d_{b01}d_{c01}}} + \frac{di_{02}}{dt} \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{a02}d_{b02}d_{c02}}} \right] \quad (51)$$

Pro lepší přehlednost je vhodné zavést střední geometrické vzdálenosti:

$$D_{gf} = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}} \quad \text{střední geom. vzdálenost mezi fázovými vodiči}$$

$$D_{g01} = \sqrt[3]{d_{a01}d_{b01}d_{c01}} \quad \text{střední geom. vzdálenost fázových vodičů od 1. zemního lana}$$

$$D_{g02} = \sqrt[3]{d_{a02}d_{b02}d_{c02}} \quad \text{střední geom. vzdálenost fázových vodičů od 2. zemního lana}$$

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} + \frac{di_{02}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \right] \quad (52)$$

Analogickým způsobem lze odvodit vztah pro napětí ve fázích b a c

$$u_b = \frac{1}{3} \left(3L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{ab} \frac{di_a}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + L_{b01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{b02} \frac{di_{02}}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{bc} \frac{di_a}{dt} \right. \\ \left. + L_{c01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{c02} \frac{di_{02}}{dt} + L_{ab} \frac{di_c}{dt} + L_{ac} \frac{di_a}{dt} + L_{a01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{a02} \frac{di_{02}}{dt} \right) \quad (53)$$

Eliminací proudů i_a a i_c pro fázi b :

$$u_b = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} + \frac{di_{02}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \right] \quad (54a)$$

Eliminací proudů i_a a i_b pro fázi c :

$$u_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} + \frac{di_{02}}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \right] \quad (54b)$$

Při odvození napětí na indukčnostech zemních lan se postupuje stejným postupem jako u fázových vodičů, jen v rovnicích dochází k eliminaci všech fázových proudů.

$$u_{01} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_{01}}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g01}}{R_0} \right) + \frac{di_{02}}{dt} \ln \frac{D_{g01}}{d_{0102}} \right] \quad (55a)$$

$$u_{02} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_{02}}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g02}}{R_0} \right) + \frac{di_{01}}{dt} \ln \frac{D_{g02}}{d_{0102}} \right] \quad (55b)$$

Vztahy mezi napětími na indukčnostech jednotlivých vodičů a proudy je možné vyjádřit maticově stejně jako v případě netransponovaného vedení (48):

Matice indukčností nabývá tvaru:

$$L_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} & 0 & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \\ 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g01}}{R_0} & \ln \frac{D_{g01}}{d_{0102}} \\ 0 & 0 & 0 & \ln \frac{D_{g02}}{d_{0102}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g02}}{R_0} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Napětí na indukčnostech na jednotlivých fázových vodičích je stejné a je možné ho obecně vyjádřit ve tvaru:

$$u_i = L_V \frac{di_i}{dt} + L_{V01} \frac{di_{01}}{dt} + L_{V02} \frac{di_{02}}{dt} \quad i = a, b, c \quad (57)$$

$L_V = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} \right)$... celková indukčnost fázového vodiče transponovaného vedení

$L_{V01} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g01}}$... vzájemná indukčnost fázového vodiče a 1. zemnicího lana

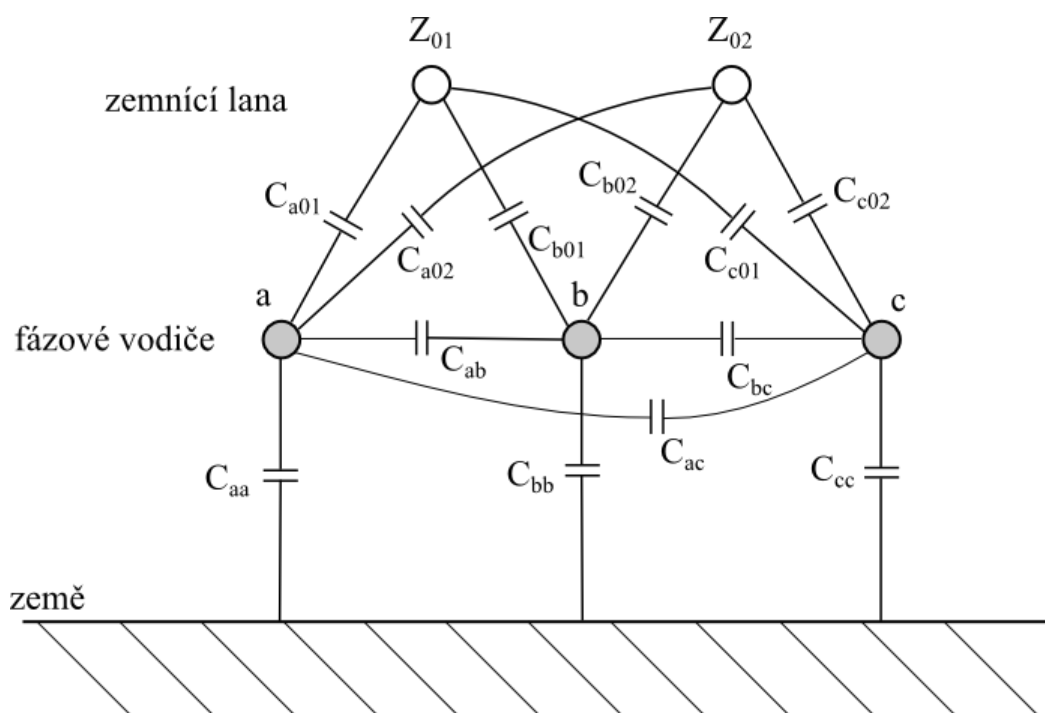
$L_{V02} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g02}}$... vzájemná indukčnost fázového vodiče a 2. zemnicího lana

V případě, že se jedná o symetrickou soustavu proudů, je u třífázového transponovaného vedení proud zemnicími lany nulový. Za tohoto případu je pak napětí na indukčnostech fázových vodičů jednotkové délky možné vyjádřit pomocí diagonální matice:

$$L_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{R} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

2.5. Kapacita

Výpočet kapacity odpovídá postupu uvedenému v [2]. Více vodičový systém umístěný v prostoru nad zemí je vzájemně svázán kapacitními vazbami. V závislosti na napětí jednotlivých vodičů ovlivňují tyto vazby rozložení elektrického náboje v systému. Dochází tak k indukování proudu mezi vzájemně působícími vodiči. Kapacitní vazby působí nejen mezi samotnými vodiči, ale i mezi vodičem a zemí, jak je naznačeno na obrázku 2.9.



Obr. 2.9 Kapacity vícevodičového systému

Jsou-li známa napětí na jednotlivých vodičích, je možné pomocí potenciálových koeficientů určit náboj na jednotlivých vodičích. Potenciálové koeficienty respektují rozmístění vodičů v prostoru. Potenciálové koeficienty vycházejí z metody zrcadlení daného vodiče nad zemským povrchem. Vztah mezi napětím a nábojem je určen maticově:

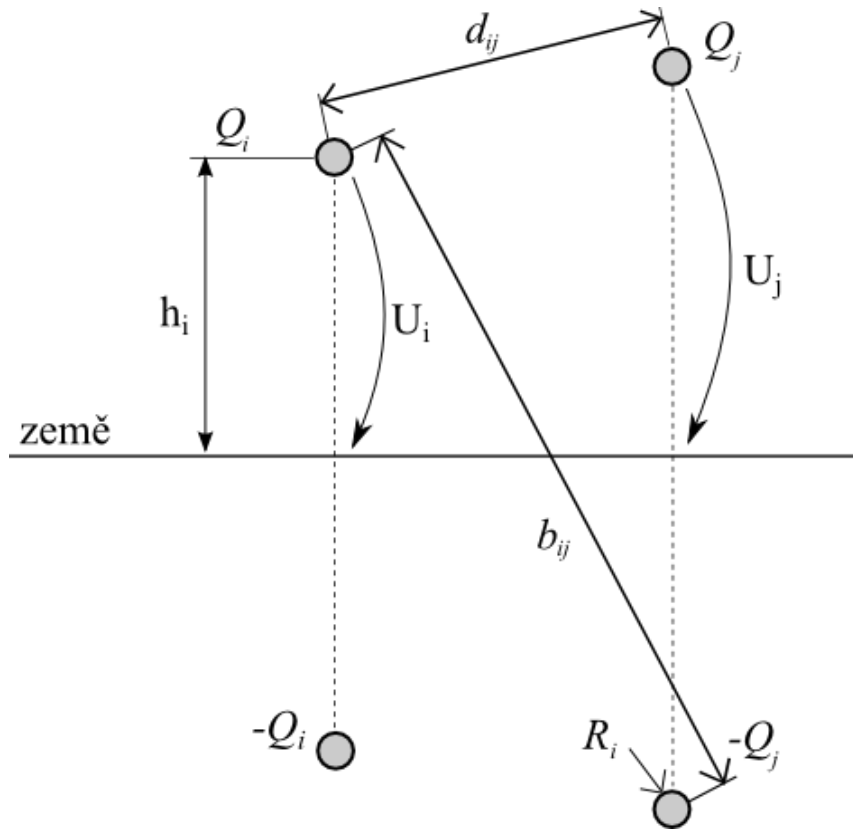
$$\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{q} \quad (59)$$

\mathbf{U} ... vektor napětí vodičů

\mathbf{A} ... matice potenciálových koeficientů

\mathbf{q} ... vektor nábojů na jednotlivých vodičích

Je-li v systému n vodičů, pak rozměr matice potenciálových koeficientů je $A(n,n) = \{\alpha_{ij}\}$



Obr. 2.10 Vyjádření potenciálových koeficientů metodou zrcadlení

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\ell} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\ell} \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}} \quad (60)$$

α_{ii} ... vlastní potenciálový koeficient

α_{ij} ... vzájemný potenciálový koeficient

h_i ... výška i -vodiče nad zemí

b_{ij} ... vzdálenost i -tého vodiče od obrazu j -tého vodiče

d_{ij} ... vzdálenost i -tého vodiče od j -tého vodiče

R_i ... vlastní poloměr vodiče

V případě svazkového vodiče se třemi parciálními vodiči je uvažován ekvivalentní poloměr $R_{ekv} = \sqrt[3]{R_i * d^2}$, kde d označuje krok parciálních vodičů ve svazku.

Řešení rovnice (59) vede na tvar: $\mathbf{q} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{U} = \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (61)$

Matice \mathbf{B} je matice kapacitních koeficientů a je inverzní k matici potenciálových koeficientů.

$$\mathbf{B} = \{\beta_{ij}\} = \mathbf{A}^{-1} \quad (62)$$

Pomocí kapacitních koeficientů je možné definovat kapacitu vodičů vůči zemi a též parciální kapacitu mezi dvěma vodiči. Platí pro ně vztahy:

$$C_{ij} = -\beta_{ij} \quad C_{ii} = \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \quad (63)$$

V elektroenergetice je možné se setkat s pojmem efektivní či provozní kapacita. Tato kapacita je definována mezi vodičem a zemí a zahrnuje vlastní i všechny vzájemné kapacity v systému. Tato kapacita se užívá též pro určení nabíjecího proudu kapacitního charakteru daného vedení.

Pro netransponované vedení je provozní kapacita definována jako:

$$C_{pi} = C_{ii} + C_{ij} + C_{ik} + \frac{C_{ij}C_{ik}}{C_{jk}} \quad (64)$$

$$i = a,b,c \quad j = b,c,a \quad k = c,a,b$$

Pro transponované vedení je provozní kapacita fázového vodiče vůči zemi dána vztahem:

$$C_p = \frac{(C_{pa} + C_{pb} + C_{pc})}{3} \quad (65)$$

2.6. Odpor

Pro přenos elektrické energie se často užívá Alfe lan, kde na ocelovém nosném jádře jsou navinuty hliníkové vodiče. Stejnoseměrný odpor Alfe lana při teplotě 20°C je dán paralelní kombinací železné a hliníkové části lana [4].

$$R_{ss} = \left(\frac{1}{R_{Al}} + \frac{1}{R_{Fe}} \right)^{-1} \quad (66)$$

kde:

$$R_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{S_{Al}} \ell \quad R_{Fe} = \frac{\rho_{Fe}}{S_{Fe}} \ell \quad (67)$$

Stejnoseměrný odpor Alfe lana při 20°C je zpravidla hodnota známá a je udávána výrobcem. Reálná hodnota odporu vodiče je ovlivněna několika dalšími faktory, které respektují korigující koeficienty. Výsledný vztah pro odpor vodiče pak nabývá tvaru:

$$R = R_{ss} k_T k_s k_e k_p \quad (68)$$

- koeficient k_T respektuje změnu rezistivity v důsledku změny teploty

$$k_T = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad (69)$$

α, β ... teplotní součinitele odporu

ϑ ... skutečná teplota vodiče

- koeficient k_s uvažuje nerovnoměrné rozložení proudové hustoty vlivem skinefektu, tento koeficient je odvozen z rozvoje řad Besselových funkcí

parametr m :
$$m = \sqrt{\frac{\mu f 10^3}{2R}} \quad (70)$$

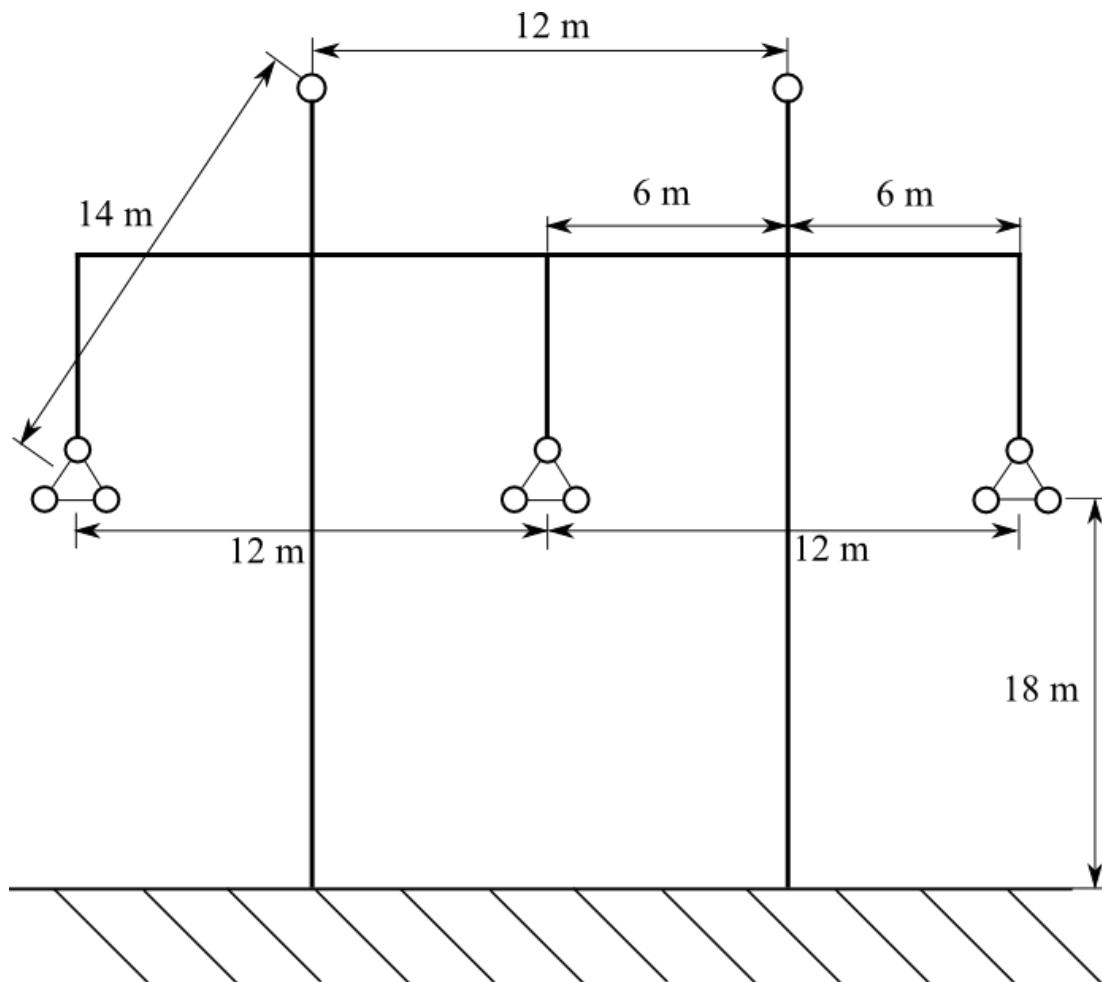
pro $m \leq 1,2$
$$k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad (71)$$

pro $m \geq 1,2$
$$k_s = 0,25 + 0,708m + \frac{0,06625}{m} \quad (72)$$

- koeficient k_e bere v úvahu kroucení vodiče v laně
- koeficient k_p respektuje průhyb lana

3. Modelové vedení

Zvolený model vedení plně respektuje reálné konstrukční a materiálové parametry stožáru. Konkrétně se jedná o stožár Portál na napěťové hladině 400 kV. Konstrukční uspořádání vodičů na stožáru je naznačeno na obrázku 3.1 [10],[11]. Stožár Portál nese 3 fázové vodiče a 2 zemnicí lana. Fázové vodiče jsou tvořeny trojsvazkem 3x450 Alfe 6 s krokem 40 cm, jako zemnicí lana jsou zde použita 1x185 Alfe 3. Délka modelového vedení je 100 km. Na začátku vedení je připojen ideální symetrický třífázový zdroj napětí, kdy jednotlivé fáze jsou posunuty o 120° . Amplituda napěťového zdroje činí $\sqrt{2} \cdot 400/\sqrt{3}$ kV a frekvence harmonického průběhu je 50 Hz.

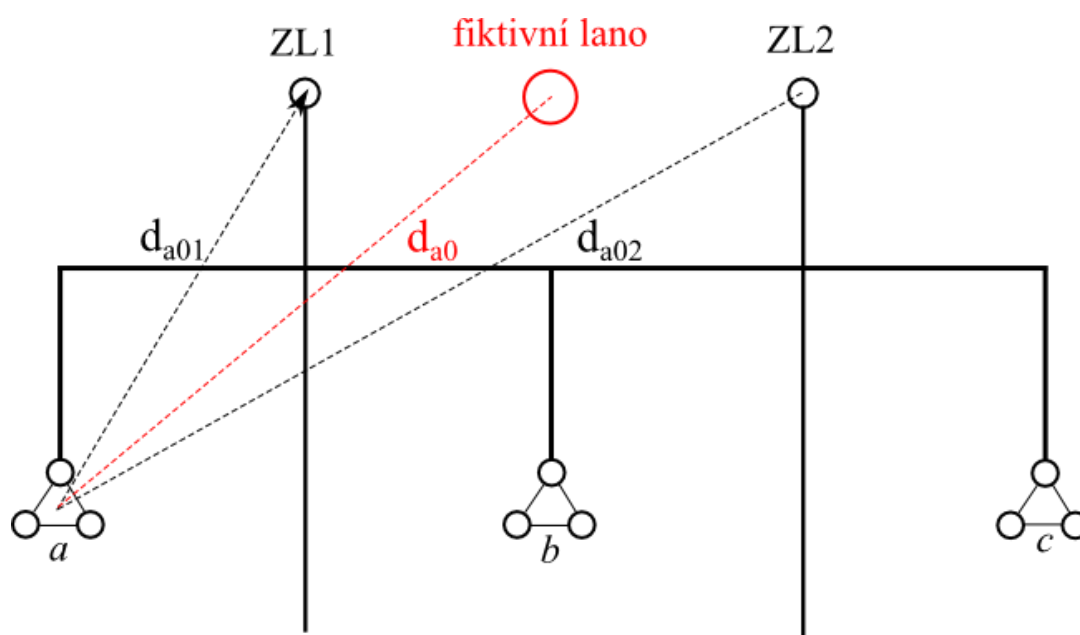


Obr. 3.1 Konstrukční uspořádání stožáru Portál 400 kV

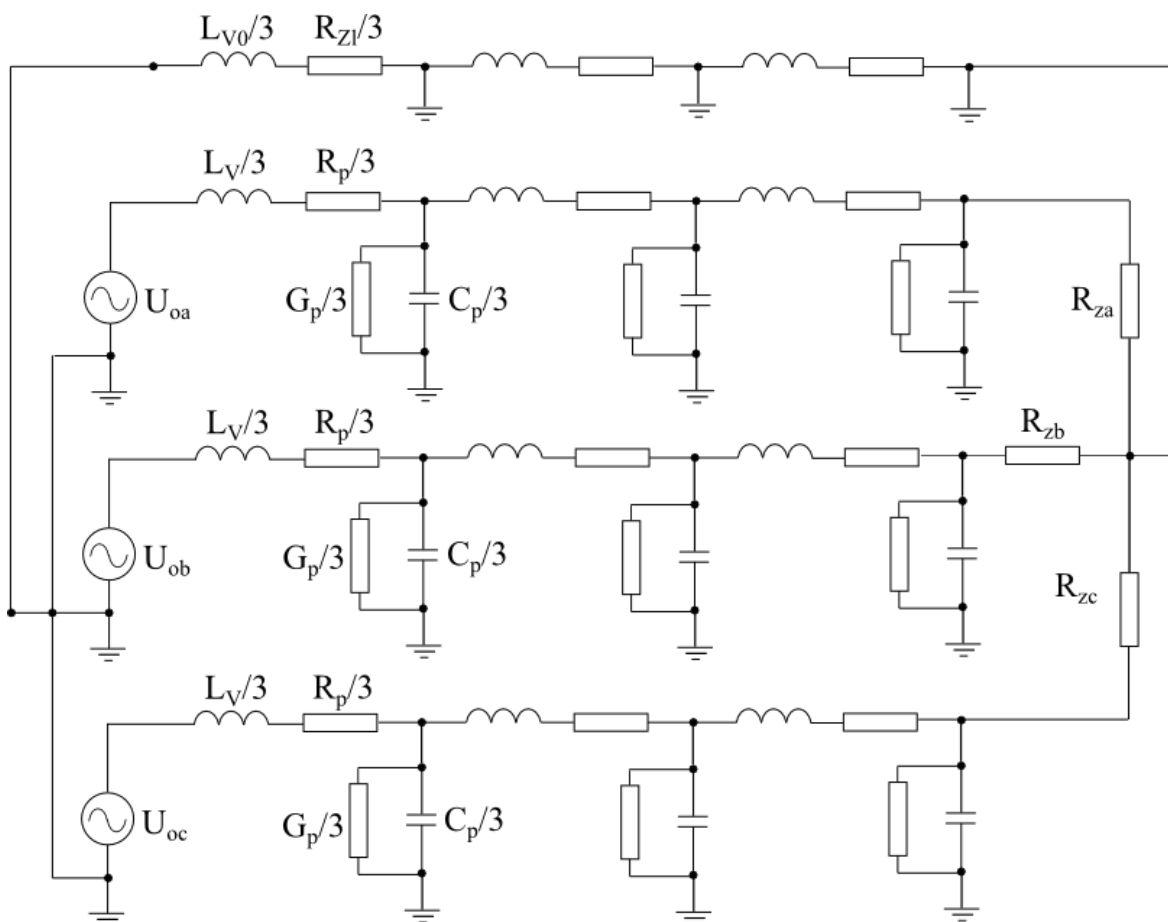
Na straně zátěže je připojen do hvězdy symetrický třífázový spotřebič čistě odporového charakteru. Typový jmenovitý činný výkon přenositelný vedením činí 1108 MW. Pro analytický výpočet i simulaci bude uvažován model se soustředěnými parametry. Pro frekvenci 50 Hz je vlnová délka elektromagnetické vlny při uvažované rychlosti světla $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ rovna 6000 km. Délka modelového vedení splňuje následující podmínku: $\lambda \gg \ell$. Za tohoto předpokladu je možné užít modelu vedení se soustředěnými parametry. Ve všech výpočtech je uvažován ustálený stav systému s konstantními pasivními parametry.

Model pro transponované vedení je tvořen kaskádou tří gama článků, která je pro všechny tři fáze stejná. V modelu pro netransponované vedení jsou uvažovány 3 různé kaskády gama článků, respektující rozdílnost pasivních parametrů v jednotlivých fázích.

Stožár Portál nese dvě zemnicí lana. Ta jsou na každém stožáru vodivě propojena a tvoří tak paralelní dvojici vodičů. Při tvorbě programů pro výpočet činných ztrát a kontrole prvních výsledků bylo zjištěno, že výsledky se téměř neliší od varianty výpočtu s fiktivním zemnicím lanem, viz. příloha A, B. Fiktivní zemnicí lano je umístěno ve střední geometrické vzdálenosti od fázových vodičů. Tím jsou respektovány vzájemné induktivní vazby mezi fázovými vodiči a smyčkou danou oběma zemnicími lany. Pro dodržení faktu neměnnosti činných ztrát v systému má fiktivní zemnicí lano dvojnásobný průřez a protéká jím proud obou původních zemnicích lan.



Obr. 3.2 Fiktivní zemnicí lano a geometrické vzdálenosti



Obr. 3.3 Model transponovaného vedení jako kaskáda gama článků

3.1. Výpočet pasivních parametrů modelového vedení

Odpor a svod modelového vedení jsou uvažovány pro transponované i pro netransponované vedení totožné pro všechny fáze. Velikosti svodu a odporu jednotlivých vodičů vztažené na 1 km délky pocházejí z technické dokumentace poskytnuté společností ČEPS a.s. Odpor svazkových vodičů je počítán pro provozní teplotu 60°C . Ta má na velikost odporu největší vliv. Proto nejsou ostatní korigující koeficienty uvažovány. Teplotní součinitel odporu α odpovídá hodnotě $0,004\text{ K}^{-1}$ (vzhledem k velikosti kvadratický součinitel β zanedbán). Hodnota pasivních prvků je uvedena pro celkovou délku vedení 100 km. Vzhledem k tomu, že vzdálenosti parciálních vodičů ve svazku jedné fáze jsou mnohem menší než mezifázové vzdálenosti mezi dvěma svazkovými vodiči, je vzdálenost mezi fázemi počítána pro vzdálenost středů těchto svazkových vodičů. Výpočet kapacit odpovídá postupu uvedenému v kapitole 2.5. a výpočet matic indukčností v přílohách D a E. Vyčíslení těchto vztahů bylo provedeno v programu Matlab.

- Svod: $G_p = G_\ell = 0,353 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 3,53 \cdot 10^{-5} \text{ S}$ (73)

- Odpor svazkového vodiče:

$$R_p = R_{ss} \ell \frac{k_9}{3} = R_{ss} \ell \frac{(1+\alpha\Delta T)}{3} = 0,06427 \cdot 100 \cdot 1,16 = 2,485 \Omega \quad (74)$$

- Odpor fiktivního zemnicího lana:

$$R_{z1} = R_{ss} \ell = 0,163 \cdot 100 \cdot 0,5 = 8,15 \Omega \quad (75)$$

- Kapacita fázových vodičů (svazků) netransponovaného vedení:

$$\begin{aligned} C_{pa} &= C_{aa} + C_{ab} + C_{ac} + \frac{C_{ab}C_{ac}}{C_{bc}} = \\ &= 7,2 \cdot 10^{-7} + 1,83 \cdot 10^{-7} + 5,53 \cdot 10^{-8} + \frac{1,83 \cdot 10^{-7} \cdot 1,83 \cdot 10^{-7}}{1,83 \cdot 10^{-7}} = 1,013 \text{ mF} \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} C_{pb} &= C_{bb} + C_{bc} + C_{ab} + \frac{C_{bc}C_{ab}}{C_{bc}} = \\ &= 6,04 \cdot 10^{-7} + 1,83 \cdot 10^{-7} + 1,83 \cdot 10^{-7} + \frac{1,83 \cdot 10^{-7} \cdot 1,83 \cdot 10^{-7}}{1,83 \cdot 10^{-7}} = 1,568 \text{ mF} \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} C_{pc} &= C_{cc} + C_{ac} + C_{bc} + \frac{C_{ac}C_{bc}}{C_{ab}} = \\ &= 7,2 \cdot 10^{-7} + 5,53 \cdot 10^{-8} + 1,83 \cdot 10^{-7} + \frac{5,53 \cdot 10^{-8} \cdot 1,83 \cdot 10^{-7}}{1,83 \cdot 10^{-7}} = 1,013 \text{ mF} \end{aligned} \quad (78)$$

- Kapacita svazku fázového vodiče transponovaného vedení:

$$C_p = \frac{C_{pa} + C_{pb} + C_{pc}}{3} = 1,198 \text{ mF} \quad (79)$$

- Matice indukčností pro netransponované vedení:

$$\mathbf{L}_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{a0}}{d_g} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{ab}} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{ac}} & 0 \\ \ln \frac{d_{b0}}{d_{ab}} & \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{b0}}{d_g} & \ln \frac{d_{b0}}{d_{bc}} & 0 \\ \ln \frac{d_{c0}}{d_{ac}} & \ln \frac{d_{c0}}{d_{bc}} & \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{c0}}{d_g} & 0 \\ 0 & \ln \frac{d_{a0}}{d_{b0}} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{c0}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a0}}{R_{of}} \end{bmatrix} \text{H/m} \quad (80a)$$

$$\mathbf{L}_n = \begin{bmatrix} 0,0992 & 0,0075 & -0,0064 & 0 \\ 0,0011 & 0,0928 & 0,0011 & 0 \\ -0,0064 & 0,0075 & 0,0992 & 0 \\ 0 & -0,0031 & 0 & 0,147 \end{bmatrix} \text{H} \quad (80b)$$

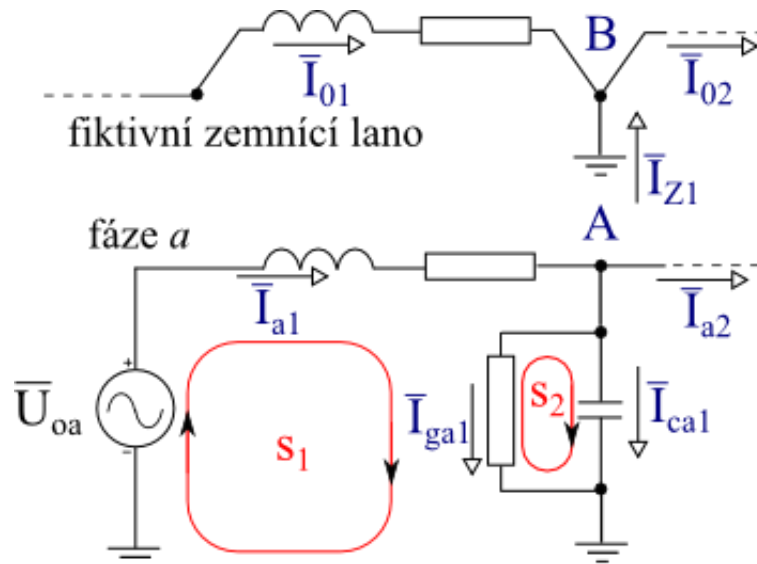
- Matice indukčností pro transponované vedení:

$$\mathbf{L}_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & 0 & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g0}}{R_{of}} \end{bmatrix} \text{H/m} \quad (81a)$$

$$\mathbf{L}_t = \begin{bmatrix} 0,0964 & 0 & 0 & -0,0007 \\ 0 & 0,0964 & 0 & -0,0007 \\ 0 & 0 & 0,0964 & -0,0007 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1546 \end{bmatrix} \text{H} \quad (81b)$$

3.2. Matematický model vedení

Cílem analýzy elektrických obvodů je získat větrové veličiny. Podle schématu uvedeného na obr. 3.3 je v uvažovaném modelovém vedení 33 neznámých větrových proudů, pro jejich určení je třeba formulovat 33 lineárně nezávislých rovnic. Elektrický obvod je tvořen 12 nezávislými uzly a 21 nezávislými smyčkami, což umožňuje sestavit 12 rovnic dle prvního Kirchhoffova zákona (1.KZ) a 21 dle druhého Kirchhoffova zákona (2.KZ). Jelikož je obvod tvořen lineárními prvky a je vyšetřován harmonický ustálený stav, lze aplikovat symbolicko-komplexní metodu. Získáme tak soustavu algebraických rovnic s komplexními koeficienty. Samotné řešení definované soustavy rovnic je provedeno v programu Matlab. Na následujícím schématu a rovnicích je demonstrován postup sestavování rovnic pro jeden dvojbran transponovaného vedení:



Obr. 3.4 Značení proudů a postup sestavování rovnic

$$1. \text{ KZ pro uzel A: } \bar{I}_{a1} = \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{ga1} + \bar{I}_{ca1} \quad (82)$$

$$1. \text{ KZ pro uzel B: } \bar{I}_{01} + \bar{I}_{Z1} = \bar{I}_{02} \quad (83a)$$

Proud \bar{I}_{Z1} je dán součtem proudů z příčných větví všech fází:

$$\bar{I}_{Z1} = \bar{I}_{ga1} + \bar{I}_{ca1} + \bar{I}_{gb1} + \bar{I}_{cb1} + \bar{I}_{gc1} + \bar{I}_{cc1} \quad (83b)$$

$$2. \text{ KZ pro smyčku } s_1: \bar{U}_{0a} = \frac{R_p}{3} \bar{I}_{a1} + j\omega \frac{L_v}{3} \bar{I}_{a1} + j\omega \frac{L_{v0}}{3} \bar{I}_{01} + \frac{3}{G_p} \bar{I}_{ga1} \quad (84)$$

$$2. \text{ KZ pro smyčku } s_2: -j \frac{3}{\omega C_p} \bar{I}_{ca1} = \frac{3}{G_p} \bar{I}_{ga1} \quad (85)$$

4. Činné ztráty modelového vedení

Jouleovy ztráty vznikají při průchodu proudu prvkem s činným charakterem. Dochází přitom okamžitě k disipaci elektrické energie na tepelnou. Velikost Jouleových ztrát je úměrná kvadrátu efektivní hodnoty procházejícího proudu a odporu prvku:

$$\Delta P_j = RI^2 \quad (86)$$

V modelovém vedení se vyskytují tři typy:

- odpor svazkového vodiče fáze v podélném směru
- svod svazkového vodiče fáze v příčném směru
- odpor fiktivního zemnicího lana v podélném směru

Na následujícím postupu je vysvětleno vyčíslení činných ztrát ve fázi *a*. Jelikož je každá fáze modelována kaskádou tří dvojbranů, jsou celkové ztráty na podélném odporu a příčném svodu dány součtem ztrát vzniklých na jednotlivých dvojbranech dané fáze. Indexy proudů 1, 2 a 3 značí jejich polohu – jedná-li se o první, druhý či třetí dvojbran fáze *a*.

$$\blacksquare \text{ podélné odpory: } \Delta P_{jra} = \frac{R_p}{3} (I_{a1}^2 + I_{a2}^2 + I_{a3}^2) \quad (87)$$

$$\blacksquare \text{ příčné svody: } \Delta P_{jga} = \frac{3}{G_p} (I_{ga1}^2 + I_{ga2}^2 + I_{ga3}^2) \quad (88)$$

Stejným způsobem se postupuje u fází *b* a *c*.

Určení činných ztrát v zemnicím laně je obdobné jako u podélného odporu fáze:

$$\Delta P_{jrzi} = \frac{R_{zi}}{3} (I_{01}^2 + I_{02}^2 + I_{03}^2) \quad (89)$$

Celkové činné ztráty modelového vedení jsou dány součtem všech dílčích ztrát:

$$\Delta P_j = \Delta P_{jra} + \Delta P_{jrb} + \Delta P_{jrc} + \Delta P_{jga} + \Delta P_{jgb} + \Delta P_{jgc} + \Delta P_{jrzi} \quad (90)$$

5. Výpočet činných ztrát

Výpočty v této kapitole jsou provedeny s činnou zátěží zapojenou do hvězdy, kdy velikost odporu je rovna 144,34 Ω . V elementárním obvodu (napěťový zdroj + spotřebič) tato hodnota odpovídá přenosu typového činného výkonu 1108 MW. Primárním výstupem řešeného obvodu modelového vedení jsou větvové proudy. Z nich jsou následně počítány činné ztráty dle vztahů v kapitole 4. Ve výsledcích je též naznačeno rozdělení ztrát dle původu vzniku (odpor fáze, svod fáze, odpor zemnicího lana). Důležitým ukazatelem jsou poměrné ztráty definované jako poměr celkových činných ztrát a celkového činného výkonu dodávaného zdrojem. Pro stanovení proudové respektive napěťové nesymetrie na zátěži je použito rozkladu na složkové soustavy dle matice Fortescue. Míra nesymetrie na zátěži je reprezentována činitelem nesymetrie, který je definován tímto způsobem:

$$p = \frac{I^{(2)}}{I^{(1)}} 100 [\%] \quad (91)$$

5.1. Transponované vedení

V této kapitole jsou uvedeny tabulky, v nichž jsou přehledně zpracovány výsledky výpočtů činných ztrát na transponovaném vedení. Mimo symetrický stav jsou výpočty uvedeny též pro nesymetrii zdroje či zátěže, pro jejíž hodnocení slouží činitel nesymetrie.

Tab. 5.1 Symetrický zdroj i zátěž

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1551,4 \text{ A}$ $I_b = 1551,4 \text{ A}$ $I_c = 1551,4 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,032 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3966 MW
činné ztráty v zemnicím laně	$1,4466 \cdot 10^{-15} \text{ W}$
celkové činné ztráty	23,43 MW
celkový činný výkon zdroje	1065,6 MW
poměrné ztráty	2,1987 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1551,4 \text{ A}$ $I^{(2)} = 2,0632 \cdot 10^{-9} \text{ A}$ $I^{(0)} = 2,8215 \cdot 10^{-9} \text{ A}$
činitel nesymetrie	$1,3299 \cdot 10^{-10} \%$

Tab. 5.2 Nesymetrie zdroje – amplituda fáze a o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1522,7 \text{ A}$ $I_b = 1553,6 \text{ A}$ $I_c = 1546,8 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,794 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3254 MW
činné ztráty v zemnicím laně	2047,1 W
celkové činné ztráty	23,121 MW
celkový činný výkon zdroje	1051,5 MW
poměrné ztráty	2,1989 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1541,018 \text{ A}$ $I^{(2)} = 10,3424 \text{ A}$ $I^{(0)} = 8,8769 \text{ A}$
činitel nesymetrie	0,67114 %

Tab. 5.3 Nesymetrie zdroje – amplituda fáze a o 5% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1479,7 \text{ A}$ $I_b = 1556,9 \text{ A}$ $I_c = 1540 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,445 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,2211 MW
činné ztráty v zemnicím laně	12,794 kW
celkové činné ztráty	22,679 MW
celkový činný výkon zdroje	1030,9 MW
poměrné ztráty	2,2 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1525,505 \text{ A}$ $I^{(2)} = 25,856 \text{ A}$ $I^{(0)} = 22,192 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,6949 %

Tab. 5.4 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze *a* o 2% větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1524,4 \text{ A}$ $I_b = 1554 \text{ A}$ $I_c = 1547 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,813 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3998 MW
činné ztráty v zemnicím laně	2139,3 W
celkové činné ztráty	23,215 MW
celkový činný výkon zdroje	1059,3 MW
poměrné ztráty	2,1915 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1541,7837 \text{ A}$ $I^{(2)} = 9,7794 \text{ A}$ $I^{(0)} = 8,0929 \text{ A}$
činitel nesymetrie	0,63429 %

Tab. 5.5 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze *a* o 5 % větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1485,6 \text{ A}$ $I_b = 1557,7 \text{ A}$ $I_c = 1540,8 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,504 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,4043 MW
činné ztráty v zemnicím laně	12,613 kW
celkové činné ztráty	22,921 MW
celkový činný výkon zdroje	1050,3 MW
poměrné ztráty	2,1823 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1528,024 \text{ A}$ $I^{(2)} = 23,826 \text{ A}$ $I^{(0)} = 19,76 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,5593 %

Tab. 5.6 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze *a* o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1579,3 \text{ A}$ $I_b = 1548,7 \text{ A}$ $I_c = 1555,9 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,264 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3934 MW
činné ztráty v zemnicím laně	2318,4 W
celkové činné ztráty	23,659 MW
celkový činný výkon zdroje	1072 MW
poměrné ztráty	2,2069 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1561,2801 \text{ A}$ $I^{(2)} = 10,1317 \text{ A}$ $I^{(0)} = 8,3585 \text{ A}$
činitel nesymetrie	0,64893 %

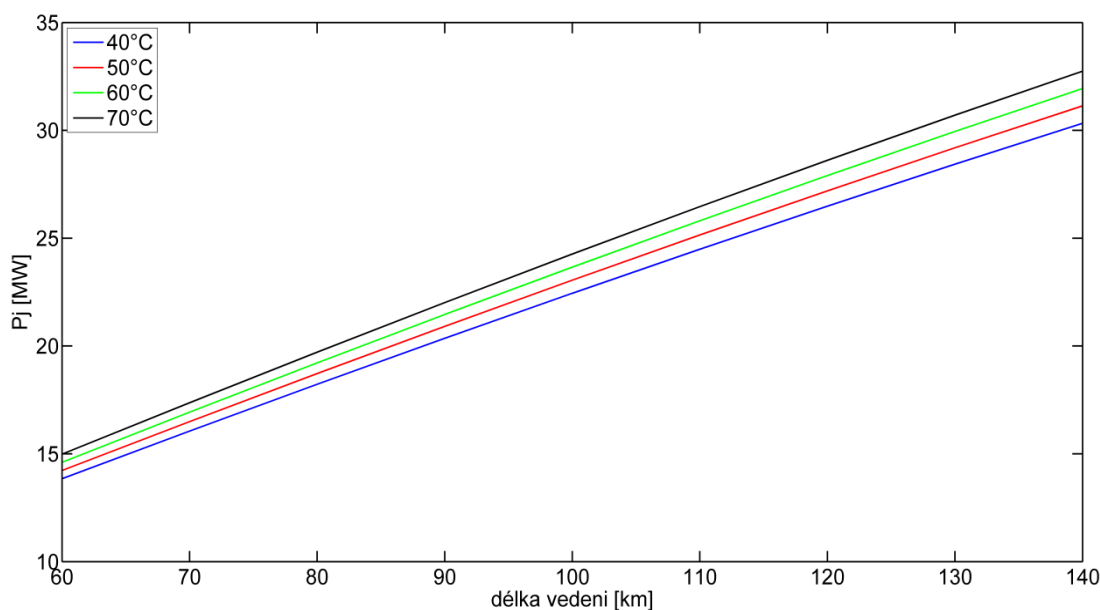
Tab. 5.7 Nesymetrie spotřebiče – velikost odporu fáze *a* o 5% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1623,1 \text{ A}$ $I_b = 1544,5 \text{ A}$ $I_c = 1563 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,635 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3884 MW
činné ztráty v zemnicím laně	15,423 kW
celkové činné ztráty	24,039 MW
celkový činný výkon zdroje	1082,2 MW
poměrné ztráty	2,2213 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1576,841 \text{ A}$ $I^{(2)} = 26,031 \text{ A}$ $I^{(0)} = 21,422 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,6508 %

Z výpočtů pro transponované vedení vyplývají následující závěry:

- Pro případ symetrického zdroje i spotřebiče a přenášeného činného výkonu 1065,6 MW tvoří celkové činné ztráty 23,43 MW, což odpovídá 2,1987 % z celkového přenášeného výkonu. Z celkových činných ztrát vzniká 18,032 MW na odporech a 5,39 MW na svodech fázových vodičů.
- Dle očekávání se proud respektive činné ztráty v zemnicím laně pro případ symetrického zdroje i spotřebiče blíží k nule.
- V případě nesymetrie na straně zdroje či zátěže již není proud zemnicím lanem nulový. S výraznější nesymetrií je proud a s ním spojené činné ztráty v zemnicím laně vyšší.

Uvedené výpočty uvažují provozní teplotu svazkových vodičů 60°C. V následujícím grafu je pro doplnění uvedena závislost velikosti činných ztrát na délce vedení. Jako parametr jednotlivých závislostí je brána právě teplota svazkových vodičů.



Obr. 5.1 Závislost celkových činných ztrát na délce vedení

S narůstající délkou vedení narůstají i celkové činné ztráty. Závislost je takřka lineární, pro větší délky vedení dochází ke zmenšení nárůstu. To je způsobeno tím, že velikost odporu fázových vodičů s rostoucí délkou lineárně narůstá, a současně procházející proud mírně klesá. Velikost fázových proudů určující činné ztráty je dána zejména parametry zátěže, nicméně pro větší délky vedení se projeví i podélná impedance samotného vedení.

5.2. Netransponované vedení

V této kapitole jsou uvedeny tabulky se zpracovanými výsledky výpočtů činných ztrát pro netransponované vedení a to stejným způsobem jako v předchozí kapitole pro transponované vedení. Výpočty pro nižší nesymetrie zdrojů a spotřebičů (+2% a -2%) jsou provedeny třikrát, a to pro každou možnou pozici dané nesymetrie. Tato vložená nesymetrie může pozitivně či negativně ovlivnit přirozenou nesymetrii danou samotnou konstrukcí stožáru vedení. Výsledná nesymetrie tak záleží na tom, v jaké fázi se nachází nesymetrie vložená. Výsledky pro výraznější nesymetrii (+5% a -5%) jsou pak uvedeny jen pro tu variantu, která vykazuje u menší nesymetrie nejvyšší poměrné ztráty.

Tab. 5.8 Symetrický zdroj i spotřebič

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1508,7 \text{ A}$ $I_b = 1557,1 \text{ A}$ $I_c = 1586,4 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,027 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3948 MW
činné ztráty v zemnicím laně	4311,2 W
celkové činné ztráty	23,426 MW
celkový činný výkon zdroje	1065,2 MW
poměrné ztráty	2,1993 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1550,686 \text{ A}$ $I^{(2)} = 30,174 \text{ A}$ $I^{(0)} = 15,446 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,9459 %

Tab. 5.9 Nesymetrie zdroje fáze *a* – amplituda o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1477,7 \text{ A}$ $I_b = 1557 \text{ A}$ $I_c = 1586,1 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,793 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3244 MW
činné ztráty v zemnicím laně	20,458 kW
celkové činné ztráty	23,138 MW
celkový činný výkon zdroje	1051,4 MW
poměrné ztráty	2,2008 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1540,241 \text{ A}$ $I^{(2)} = 39,993 \text{ A}$ $I^{(0)} = 24,821 \text{ A}$
činitel nesymetrie	2,5965 %

Tab. 5.10 Nesymetrie zdroje fáze *b* – amplituda o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1509,1 \text{ A}$ $I_b = 1526 \text{ A}$ $I_c = 1585,9 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,787 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,323 MW
činné ztráty v zemnicím laně	13,186 kW
celkové činné ztráty	23,123 MW
celkový činný výkon zdroje	1051 MW
poměrné ztráty	2,2001 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1540,386 \text{ A}$ $I^{(2)} = 29,375 \text{ A}$ $I^{(0)} = 18,641 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,9071 %

Tab. 5.11 Nesymetrie zdroje fáze *c* – amplituda o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1509,1 \text{ A}$ $I_b = 1557,2 \text{ A}$ $I_c = 1555,4 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,788 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3233 MW
činné ztráty v zemnicím laně	2741,6 W
celkové činné ztráty	23,114 MW
celkový činný výkon zdroje	1051 MW
poměrné ztráty	2,1992 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1540,517 \text{ A}$ $I^{(2)} = 23,526 \text{ A}$ $I^{(0)} = 7,9508 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,5272 %

Tab. 5.12 Nesymetrie zdroje fáze *a* – amplituda o 5% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1431,3 \text{ A}$ $I_b = 1556,9 \text{ A}$ $I_c = 1585,6 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,451 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,2215 MW
činné ztráty v zemnicím laně	74,238 kW
celkové činné ztráty	22,747 MW
celkový činný výkon zdroje	1031,2 MW
poměrné ztráty	2,2059 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1524,573 \text{ A}$ $I^{(2)} = 54,961 \text{ A}$ $I^{(0)} = 39,79 \text{ A}$
činitel nesymetrie	3,605 %

Tab. 5.13 Nesymetrie spotřebiče fáze *a* – velikost odporu o 2% větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1480,8 \text{ A}$ $I_b = 1557 \text{ A}$ $I_c = 1586,2 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,818 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3974 MW
činné ztráty v zemnicím laně	19,711 kW
celkové činné ztráty	23,235 MW
celkový činný výkon zdroje	1059,1 MW
poměrné ztráty	2,1937 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1541,305 \text{ A}$ $I^{(2)} = 38,624 \text{ A}$ $I^{(0)} = 24,578 \text{ A}$
činitel nesymetrie	2,5059 %

Tab. 5.14 Nesymetrie spotřebiče fáze *b* – velikost odporu o 2% větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1509 \text{ A}$ $I_b = 1528,2 \text{ A}$ $I_c = 1585,9 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,804 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3974 MW
činné ztráty v zemnicím laně	10,14 kW
celkové činné ztráty	23,212 MW
celkový činný výkon zdroje	1058,7 MW
poměrné ztráty	2,1924 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1540,978 \text{ A}$ $I^{(2)} = 31,18 \text{ A}$ $I^{(0)} = 16,688 \text{ A}$
činitel nesymetrie	2,0234 %

Tab. 5.15 Nesymetrie spotřebiče fáze *c* – velikost odporu o 2% větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1509,1 \text{ A}$ $I_b = 1557,1 \text{ A}$ $I_c = 1557,1 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,802 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3988 MW
činné ztráty v zemnicím laně	3716 W
celkové činné ztráty	23,201 MW
celkový činný výkon zdroje	1058,8 MW
poměrné ztráty	2,1915 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1541,088 \text{ A}$ $I^{(2)} = 22,057 \text{ A}$ $I^{(0)} = 10,074 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,4312 %

Tab. 5.16 Nesymetrie spotřebiče fáze *a* – velikost odporu o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1537,6 \text{ A}$ $I_b = 1557,2 \text{ A}$ $I_c = 1586,6 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,248 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,392 MW
činné ztráty v zemnicím laně	2467,9 W
celkové činné ztráty	23,643 MW
celkový činný výkon zdroje	1071,4 MW
poměrné ztráty	2,2067 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1560,4114 \text{ A}$ $I^{(2)} = 22,2292 \text{ A}$ $I^{(0)} = 7,048 \text{ A}$
činitel nesymetrie	1,4246 %

Tab. 5.17 Nesymetrie spotřebiče fáze *b* – velikost odporu o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1508,4 \text{ A}$ $I_b = 1587,1 \text{ A}$ $I_c = 1586,9 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,263 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,392 MW
činné ztráty v zemnicím laně	13,373 kW
celkové činné ztráty	23,668 MW
celkový činný výkon zdroje	1071,8 MW
poměrné ztráty	2,2082 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1560,756 \text{ A}$ $I^{(2)} = 32,359 \text{ A}$ $I^{(0)} = 20,029 \text{ A}$
činitel nesymetrie	2,0733 %

Tab. 5.18 Nesymetrie spotřebiče fáze *c* – velikost odporu o 2% menší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1508,3 \text{ A}$ $I_b = 1557,1 \text{ A}$ $I_c = 1616,8 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,265 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3906 MW
činné ztráty v zemnicím laně	20,555 kW
celkové činné ztráty	23,677 MW
celkový činný výkon zdroje	1071,7 MW
poměrné ztráty	2,2092 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1560,636 \text{ A}$ $I^{(2)} = 39,611 \text{ A}$ $I^{(0)} = 24,309 \text{ A}$
činitel nesymetrie	2,5381 %

Tab. 5.19 Nesymetrie spotřebiče fáze *a* – velikost odporu o 5% větší

velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1440,9 \text{ A}$ $I_b = 1556,9 \text{ A}$ $I_c = 1585,8 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	17,524 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,4011 MW
činné ztráty v zemnicím laně	65,064 kW
celkové činné ztráty	22,991 MW
celkový činný výkon zdroje	1050,5 MW
poměrné ztráty	2,1885 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1527,843 \text{ A}$ $I^{(2)} = 51,312 \text{ A}$ $I^{(0)} = 37,966 \text{ A}$
činitel nesymetrie	3,3585 %

Tab. 5.20 Nesymetrie spotřebiče fáze *c* – velikost odporu o 5% menší

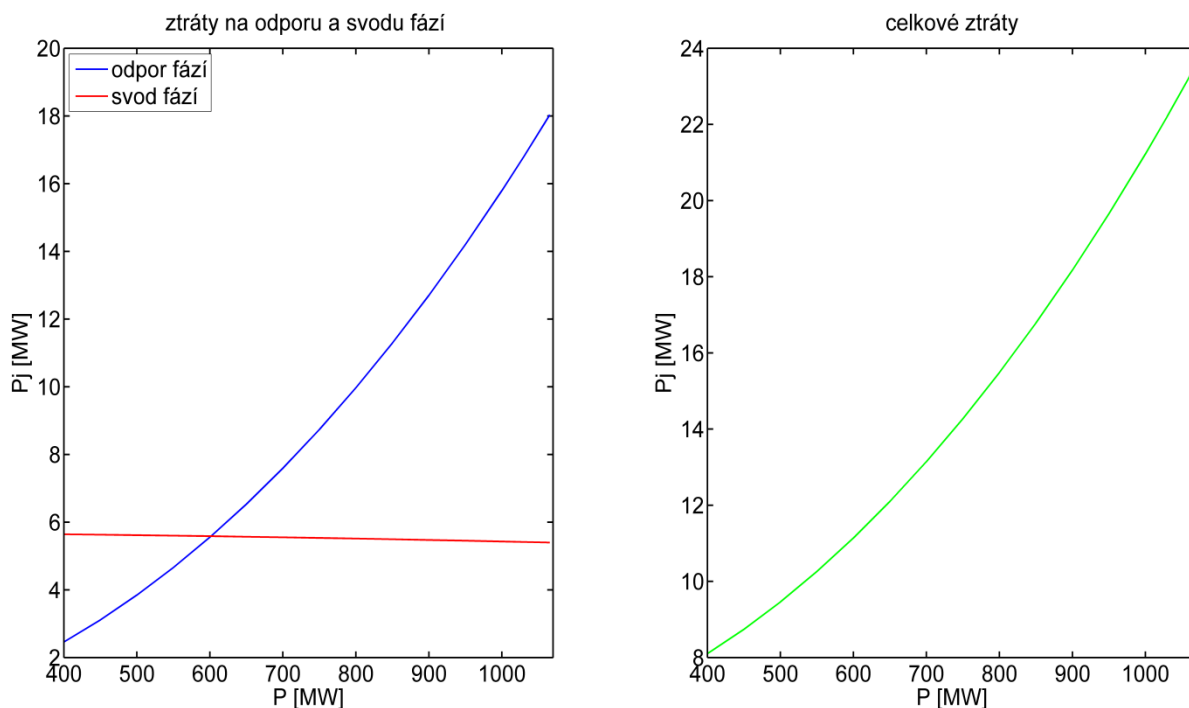
velikost proudů ve fázích zátěže	$I_a = 1507,7 \text{ A}$ $I_b = 1557 \text{ A}$ $I_c = 1664,5 \text{ A}$
činné ztráty na odporech fázových vodičů	18,649 MW
činné ztráty na svodech fázových vodičů	5,3838 MW
činné ztráty v zemnicím laně	78,362 kW
celkové činné ztráty	24,112 MW
celkový činný výkon zdroje	1082 MW
poměrné ztráty	2,2284 %
velikost složek proudů na zátěži	$I^{(1)} = 1576,266 \text{ A}$ $I^{(2)} = 55,28 \text{ A}$ $I^{(0)} = 39,733 \text{ A}$
činitel nesymetrie	3,507 %

Z výsledků uvedených v této kapitole lze formulovat tyto závěry:

- Nesymetrie parametrů daná geometrií stožáru způsobuje proudovou a napěťovou nesymetrii na zátěži.
- Pro stožár Portál jednoduchého vedení o délce 100 km při přenosu výkonu blízkému jmenovitému je velikost činitele nesymetrie 1,9459 %.
- Pokud je nesymetrie zátěže (velikost odporu) ve vhodné fázi, snižuje se celková proudová a napěťová nesymetrie na zátěži. Nesymetrie zátěže určitým způsobem kompenzuje přirozenou nesymetrii vedení danou geometrií stožáru.

5.3. Závislost celkových činných ztrát na přenášeném výkonu

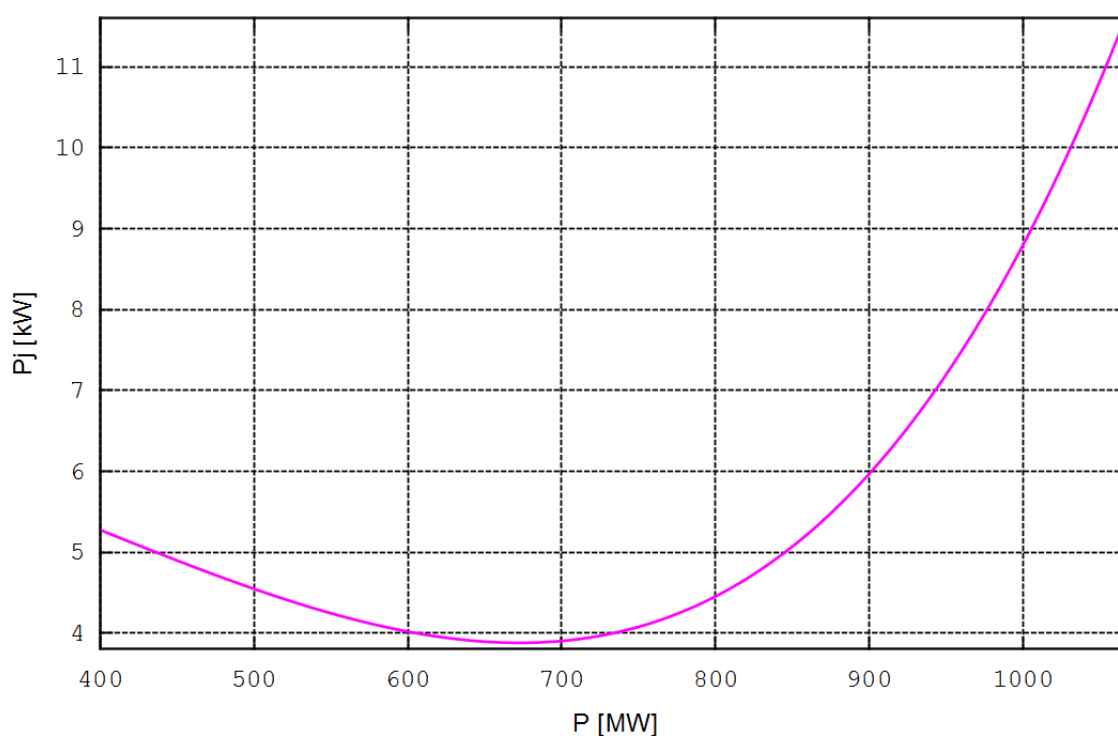
V této kapitole jsou znázorněny výsledky výpočtů celkových činných ztrát v závislosti na přenášeném výkonu. Výpočet je proveden pro základní stav, kdy je symetrický zdroj i zátěž. S narůstajícím přenášeným výkonem rostou i celkové činné ztráty. V měřítku celkových ztrát není patrný rozdíl mezi průběhy činných ztrát na transponovaném a netransponovaném vedení. Z tohoto důvodu je na následujícím grafu znázorněna závislost činných ztrát na přenášeném výkonu jen pro variantu transponovaného vedení:



Obr. 5.2 Závislost činných ztrát transponovaného vedení na přenášeném výkonu

Z grafů je patrné, že nárůst ztrát je způsoben zvýšenými ztrátami na odporu fázových vodičů, kterými protéká vyšší proud. Ztráty na svodech s rostoucím přenášeným výkonem mírně klesají. To je zapříčiněno tím, že zvyšující se proud fázovými vodiči způsobuje větší úbytek napětí.

Na dalším grafu je ukázán průběh navýšení celkových činných ztrát na netransponovaném vedení oproti transponovanému v závislosti na přenášeném výkonu. Oproti absolutní velikosti činných ztrát je rozdíl mezi ztrátami netransponovaného a transponovaného vedení značně nižší a pohybuje se v řádu jednotek kilowatt.



Obr. 5.3 Navýšení celkových činných ztrát netransponovaného vedení oproti transponovanému v závislosti na přenášeném výkonu

Závislost navýšení činných ztrát na netransponovaném vedení oproti transponovanému vykazuje zajímavý průběh. Minimální navýšení celkových činných ztrát se na vedení vyskytuje při přenosu výkonu mezi 600 a 700 MW, kde křivka dosahuje svého minima. Dodatečné výpočty ukázaly, že výsledný tvar křivky navýšení celkových činných ztrát v podstatě odpovídá závislosti velikosti činných ztrát na přenášeném výkonu v zemnicím laně u netransponovaného vedení. V případě symetrického zdroje i zátěže u transponovaného vedení ztráty v zemnicím laně nevznikají. Průběh závislosti činných ztrát na přenášeném výkonu v zemnicím laně lze vysvětlit následujícím způsobem:

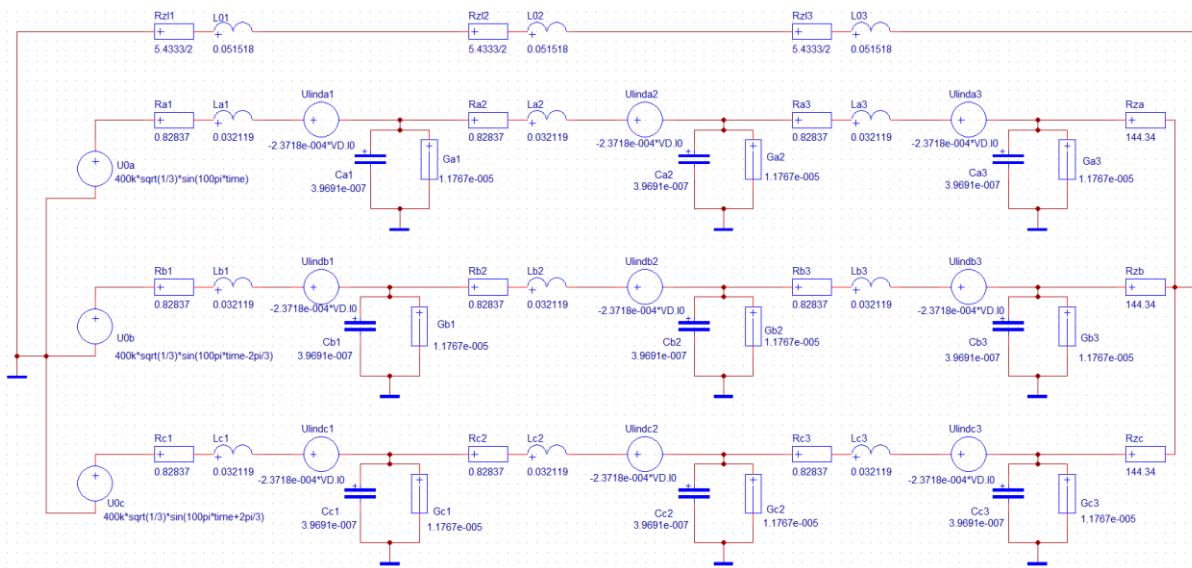
Velikost proudu protékajícího zemnicím lanem a tomu odpovídající činné ztráty jsou ovlivněny více faktory. Kapacitní vazby indukují do zemnicího lana proud, induktivní vazby do něj indukují napětí. Na velikosti proudu se podílí též nesymetrie fázových proudů na zátěži. S ohledem na fázový posuv se tyto příspěvky sčítají vektorově. S vyšším přenášeným výkonem úměrně narůstají i proudy fázových vodičů. Narůstá tak vliv induktivních vazeb a nesymetrie proudů na zátěži. Pro nižší přenášené výkony a tím i proudy se jeví jako významnější kapacitní vazba. Předpokládaná hranice mezi těmito dvěma variantami se pohybuje právě v okolí minima navýšení činných ztrát, které nastává při přenosu výkonu v rozmezí mezi 600 a 700 MW. Pro úplné objasnění tohoto specifického problému a získání přesnějších výsledků by bylo zapotřebí provést ještě další detailnější analýzy.

6. Simulace v programu Dynast

Program Dynast je univerzální simulační program pro analýzu elektrických obvodů. Jednotlivé prvky lze vybrat z databáze určených knihoven nebo je možné je popsat pomocí rovnic. Při určitých řešených problémech se jeví jako vhodné pro popis užit kombinaci schématu a rovnic [6]. Z tohoto důvodu byl jako simulační program zvolen Dynast.

K simulaci elektrotechnických problémů energetického zaměření je možno použít i jiné simulační nástroje (Matlab Simulink, EMTP-ATP a další). Ty pro modelování vedení zpravidla užívají svých knihoven, kde jsou pro uživatele připraveny modely vedení. Jejich vnitřní struktura není obvykle přístupná. Pro simulace na netransponovaném vedení, jehož parametry a mezifázové vazby jsou pro jednotlivé fáze odlišné, je užití těchto modelů problematické.

Cílem simulace bylo získat opět větrové proudy, z nichž je možné určit Jouleovy ztráty na daném prvku. Program Dynast používá pro řešení schématu s prvky metodu uzlových napětí, která jsou při výpočtu řešena jako primární proměnné. Z uzlových napětí se pak počítají sekundární proměnné, které požaduje uživatel (proud prvkem, napětí na prvku...).



Obr. 6.1 Schéma simulační úlohy v programu Dynast

Schéma obvodu řešené úlohy je analogické ke schématu uvedeného v kapitole 3. Odlišností je vyjádření induktivních vazeb mezi zemnicím lanem a fázovými vodiči u obou variant a induktivních vazeb mezi fázemi u netransponovaného vedení pomocí řízených

zdrojů napětí. Tyto zdroje napětí využívají časové derivace daného proudu, která respektuje indukované napětí odpovídající dané induktivní vazbě. Jednotlivé induktivní vazby mezi vodiči pak odpovídají již odvozeným maticím indukčností v kapitole 3.1.

Simulace úlohy je provedena v časové oblasti v časovém intervalu od 0 do 0,2 sekund. Tento čas je dostatečný k odeznění přechodného děje vznikajícího na počátku simulace. Počet kroků byl zvolen na 50 000. Další navýšení již nemělo vliv na změnu výsledků, čímž byla splněna podmínka konvergence.

Velikost fázových proudů je nejvíce ovlivněna vlastní indukčností dané fáze a pak induktivními vazbami s ostatními vodiči. Naopak pasivní parametry příčné větve (kapacita a svod) se při přenosu výkonu blízkého jmenovitému na rozložení proudů tolik neuplatní. Modelové vedení popsané v kapitole 3 uvažuje jako návratovou cestu pro proud vzniklý při nesymetrii pouze zemnicí lano. Proud protékající zemnicím lanem má svůj původ v nesymetrii pasivních parametrů (geometrická nesymetrie) či v nesymetrii na straně zdroje nebo zátěže.

Respektování výše zmíněných předpokladů v simulaci přináší určité problémy. V modelovém vedení je zemnicí lano po částech přizemněno. V těchto bodech tvoří společný uzel se zemí příčných větví všech fází. Při simulaci ovšem není možné tímto způsobem sestavit schéma. Pro program Dynast je zemnění ve schématu bráno jako referenční bod. Při kontrolním výpočtu byl proud přizemněným zemnicím lanem nulový, což při nesymetrii neodpovídá skutečnosti. Z tohoto důvodu byly vytvořeny dvě alternativní varianty simulace. V první variantě jsou příčné prvky dvojbranů fázových vodičů (svod a kapacita) uzemněny, ale nejsou spojeny se zemnicím lanem. Druhá varianta uvažuje propojení příčných větví se zemnicím lanem, nicméně toto lano je uzemněno pouze v jednom bodě a to v uzlu zdrojů.

Proudy získané simulacemi (obě varianty) jsou porovnány s proudy vypočtenými v Matlabu formou tabulky. Pro porovnání jsem zvolil jeden symetrický a jeden nesymetrický stav, které odpovídají výpočtům v předchozí kapitole:

- symetrický zdroj i zátěž
- symetrický zdroj a nesymetrická zátěž – velikost odporu fáze a o 2% menší

6.1. Porovnání výpočtu v Matlabu a simulace v Dynastu transponovaného vedení

Tab. 6.1 Symetrický zdroj i spotřebič

	Matlab	Dynast var.1	Dynast var.2
I_a	1551,4 A	1551,2 A	1551,2 A
I_b	1551,4 A	1551,2 A	1551,2 A
I_c	1551,4 A	1551,2 A	1551,2 A

Tab. 6.2 Symetrický zdroj a nesymetrický spotřebič – odpor fáze a menší o 2 %

	Matlab	Dynast var.1	Dynast var.2
I_a	1579,3 A	1575,1 A	1575 A
I_b	1548,7 A	1555,9 A	1555,9 A
I_c	1555,9 A	1551,9 A	1552 A

6.2. Porovnání výpočtu v Matlabu a simulace v Dynastu netransponovaného vedení

Tab. 6.3 Symetrický zdroj i spotřebič

	Matlab	Dynast var.1	Dynast var.2
I_a	1508,7 A	1515,4 A	1512,2 A
I_b	1557,1 A	1547,8 A	1549,6 A
I_c	1586,4 A	1588,4 A	1589,8 A

Tab. 6.4 Symetrický zdroj a nesymetrický spotřebič – odpor fáze a menší o 2 %

	Matlab	Dynast var.1	Dynast var.2
I_a	1537,4 A	1539,9 A	1535,7 A
I_b	1557,2 A	1552,5 A	1554,3 A
I_c	1586,6 A	1589,3 A	1590,7 A

Výsledky simulací odpovídají výsledkům získaným výpočtem v Matlabu. Maximální relativní odchylka nepřesahuje 0,6 %. Rozdíl mezi výsledky obou variant simulace je ještě menší. U transponovaného vedení je rozdíl mezi výsledky jen nepatrný, u netransponovaného vedení je maximální rozdíl 3,2 A. To potvrzuje původní předpoklad, že velikost příčných pasivních parametrů vedení nemá na rozložení proudů fázových vodičů tak významný vliv, jako jeho vlastní a vzájemné indukčnosti, které jsou prvky podélnými. Nicméně tato skutečnost platí při přenosu výkonu blízkému výkonu jmenovitému.

6.3. Simulace pro málo zatížené vedení

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulace pro málo zatížené vedení, kdy na zátěži je opět připojen do hvězdy symetrický spotřebič. Velikost odporu tentokrát činí 3200Ω což přibližně odpovídá velikosti fázových proudů na zátěži 72 A a přenášenému výkonu 56,3 MW.

U málo zatíženého vedení se předpokládá, že příčný svod bude mít na činné ztráty významnější vliv. Činné ztráty na podélných odporech fázových vodičů nejsou s ohledem na nízkou velikost procházejícího proudu dominantní. Za účelem zpřesnění simulace je počet dvojbranů v kaskádě zvýšen z původních tří na devět. Tento krok vede k určitému přiblížení modelu vedení s dvojbrany k modelu s rozprostřenými parametry. Stejně jako u předchozí simulace je cílem získat velikosti proudů na jednotlivých prvcích. Doba trvání simulace zůstala nezměněná, stejně tak i počet kroků. Podle vztahů uvedených v kapitole 4 jsou pak vypočteny činné ztráty. Poměrné ztráty jsou vztaženy k celkovému činnému výkonu přenášenému po vedení. Výsledky simulace jsou zpracovány do tabulek a jsou opět uvedeny pro dvě varianty simulace, které se odlišují způsobem uzemnění příčných větví jednotlivých dvojbranů.

Tab. 6.5 Činné ztráty na transponovaném vedení – varianta 1

Činné ztráty v zemnicím lanu	0 W
Činné ztráty ve fázových vodičích	66 443,9 W
Činné ztráty na svodech	5 692 561 W
Celkové činné ztráty	5 759 004,9 W
Poměrné ztráty	10,22867 %

Tab. 6.6 Činné ztráty na transponovaném vedení – varianta 2

Činné ztráty v zemnicím lanu	0 W
Činné ztráty ve fázových vodičích	66 447,1 W
Činné ztráty na svodech	5 692 909 W
Celkové činné ztráty	5 759 005,9 W
Poměrné ztráty	10,22923 %

Tab. 6.7 Činné ztráty na netransponovaném vedení – varianta 1

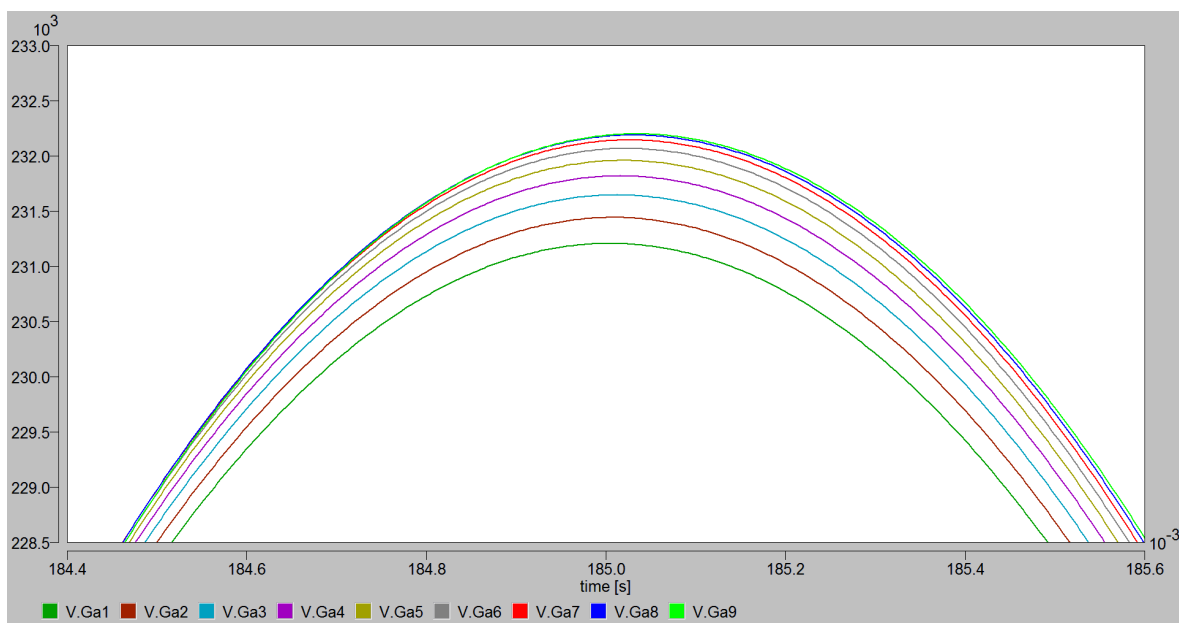
Činné ztráty v zemnicím lanu	0,27 W
Činné ztráty ve fázových vodičích	67 847,9 W
Činné ztráty na svodech	5 692 963 W
Celkové činné ztráty	5 760 811,17 W
Poměrné ztráty	10,22985 %

Tab. 6.8 Činné ztráty na netransponovaném vedení – varianta 2

Činné ztráty v zemnicím lanu	5716,382 W
Činné ztráty ve fázových vodičích	67 915,92 W
Činné ztráty na svodech	5 699 662 W
Celkové činné ztráty	5 773 294,302 W
Poměrné ztráty	10,24873 %

Výsledky simulace ukazují několik faktů. Podle očekávání se zde projevuje snížení ztrát na podélném odporu způsobené výrazně nižším protékajícím proudem. Ztráty způsobené příčnými svody se mírně zvýšily. U netransponovaného vedení je patrný rozdíl výsledků mezi první a druhou variantou a to ve ztrátách v zemnicím laně. Zjednodušený kontrolní výpočet v Matlabu pro 3 dvojbrany v kaskádě potvrdil výsledky druhé varianty simulace. V tomto případě jsou příčné větve jednotlivých dvojbranů v daném místě vodivě spojeny se zemnicím lanem, které je uzemněno v uzlu napěťových zdrojů. Druhá varianta simulace dokáže věrohodněji respektovat nesymetrii příčných prvků, která má u málo zatíženého vedení významný vliv na velikost proudu v jednotlivých segmentech zemnicího lana.

Z výsledků simulace je dále možné vyzorovat, že při takto sníženém zatížení se na vedení vyskytuje Ferrantioho jev. Fázové proudy mají kapacitní charakter, což vede k určitému zvýšení velikosti napětí na konci vedení oproti jeho začátku. Tento jev je ilustrován na následujícím obrázku, kde jsou znázorněny průběhy napětí v jednotlivých částech vedení již v ustáleném stavu. Index 1 značí počátek a index 9 konec vedení.



Obr. 6.2 Velikost napětí v různých místech vedení

7. Ekonomické vyhodnocení celkových činných ztrát

Pro ekonomické porovnání jsem z provedených výpočtů zvolil základní variantu – symetrický zdroj i zátěž. Prvotní výpočet ukázal, že ačkoliv je na straně zátěže připojen symetrický spotřebič odporového charakteru, přenášený činný výkon na transponovaném a netransponovaném vedením není stejný. Na transponovaném je přenášený výkon nepatrně vyšší. Z tohoto důvodu byla pomocí iterací provedena korekce velikosti odporu zátěže takovým způsobem, aby velikost činného výkonu dodávaného ze zdroje byla pro obě varianty modelového vedení stejná. Pro dosažení uspokojivě přesných výsledků jsou hodnoty počítány na vyšší počet desetinných míst.

Tab. 7.1 Porovnání činných ztrát pro symetrický zdroj i zátěž

	Transponované	Netransponované
Celkové činné ztráty	23 428 929,82 W	23 440 479,20 W
Činný výkon ze zdroje	1 065 569 233 W	1 065 569 233 W
Poměrné ztráty	2,198 724 %	2,199 808 %

Zvýšení celkových činných ztrát vlivem netranspozice vedení činí za takto definovaných podmínek 11 549,38 W. Jeden kalendářní rok má 8760 hodin. Za předpokladu konstantního zatížení činí elektrická energie ztracená vlivem netranspozice vedení 101 172,569 kWh za jeden rok.

Porovnání ekonomické efektivity spočívá v určení varianty, jejíž celkové náklady budou při uvažované době životnosti nižší. První variantou jsou zvýšené investiční náklady na stavbu transpozičních stožárů, jejichž konstrukce je oproti klasickým stožárům složitější. Tyto náklady jsou jednorázové a jsou vynaložené na začátku. Druhou variantou jsou náklady na ztracenou elektrickou energii vlivem zvýšení činných ztrát na netransponovaném vedení. Charakter těchto nákladů je dlouhodobý, neboť se projevují po celou dobu životnosti provozovaného vedení [8].

Jelikož se doba životnosti vedení pohybuje v řádu desítek let, je vhodné použít dynamický model respektující vliv faktoru času. Konkrétně budou obě ekonomické varianty porovnávány pomocí metody čisté současné hodnoty (v angličtině NPV - Net Present Value) [9]. Ta počítá s budoucími peněžními toky a zohledňuje jejich hodnotu v čase. Diskontace se uvažuje jako roční.

7.1. Základní porovnání efektivnosti investic

Pro základní výpočet jsou uvažovány následující hodnoty a parametry, které odpovídají reálným hodnotám poskytnutých společnostmi ČEPS a.s.:

- doba životnosti $T_z = 50$ let
- cena elektřiny za 1 MWh = 1100 Kč
- diskontní míra $r = 4$ %

1. Varianta – transponované vedení

Pro uvažovanou transpozici vodičů po třetinách délky je zapotřebí dvou transpozičních stožárů, jejichž poloha je ve třetině a ve dvou třetinách délky vedení. Pro stožárovou konstrukci Portál 400 kV připadají v úvahu různé možnosti provedení transpozičního stožáru formou úplného zákrutu:

- zákrutový Třídřík (fotografie v příloze C)
- zákrutový Portál (fotografie v příloze C)

Uvažované zvýšení investičních nákladů zahrnuje zvýšení nákladů na materiál a dodatečnou práci navíc. Pro jeden zákrutový Třídřík činí zvýšení nákladů přibližně 200 000 Kč. Pro jeden zákrutový Portál činí zvýšení nákladů přibližně 400 000 Kč. Celkové zvýšení investičních nákladů lze vyčíslit na:

$$V_{\text{invT}} = 2 \cdot 200\,000 = 400\,000 \text{ Kč} \quad (92)$$

$$V_{\text{invP}} = 2 \cdot 400\,000 = 800\,000 \text{ Kč} \quad (93)$$

2. Varianta – netransponované vedení

Za předpokladu konstantního zatížení jsou náklady na ztracenou elektrickou energii za jeden kalendářní rok rovny:

$$V_i = 101,172\,569 \cdot 1100 = 136\,066,988 \text{ Kč} \quad (94)$$

Vzorec pro NPV (čistou současnou hodnotu) je dán následující sumou:

$$NPV = \sum_{i=0}^{T_z} \frac{V_i}{(1+r)^i} = \frac{V_0}{(1+r)^0} + \frac{V_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{V_{T_z}}{(1+r)^{T_z}} \quad (95)$$

kde: V_i ... náklady v i -tém roce [Kč]

Zavede-li se označení $q = 1 + r$, pak lze členy předchozí sumy vyjma toho prvního vyjádřit pomocí částečného součtu geometrické řady:

$$\sum_{i=1}^{T_z} V_i q^{-i} = V_i \frac{q^{T_z} - 1}{q^{T_z}(q - 1)} \quad (96)$$

Náklady během doby životnosti jsou uvažovány jako stálé, pak lze výsledný vzorec pro NPV zapsat ve tvaru:

$$NPV = V_0 \left(1 + \frac{q^{T_z} - 1}{q^{T_z}(q - 1)} \right) \quad (97)$$

Dosazením číselných hodnot pak:

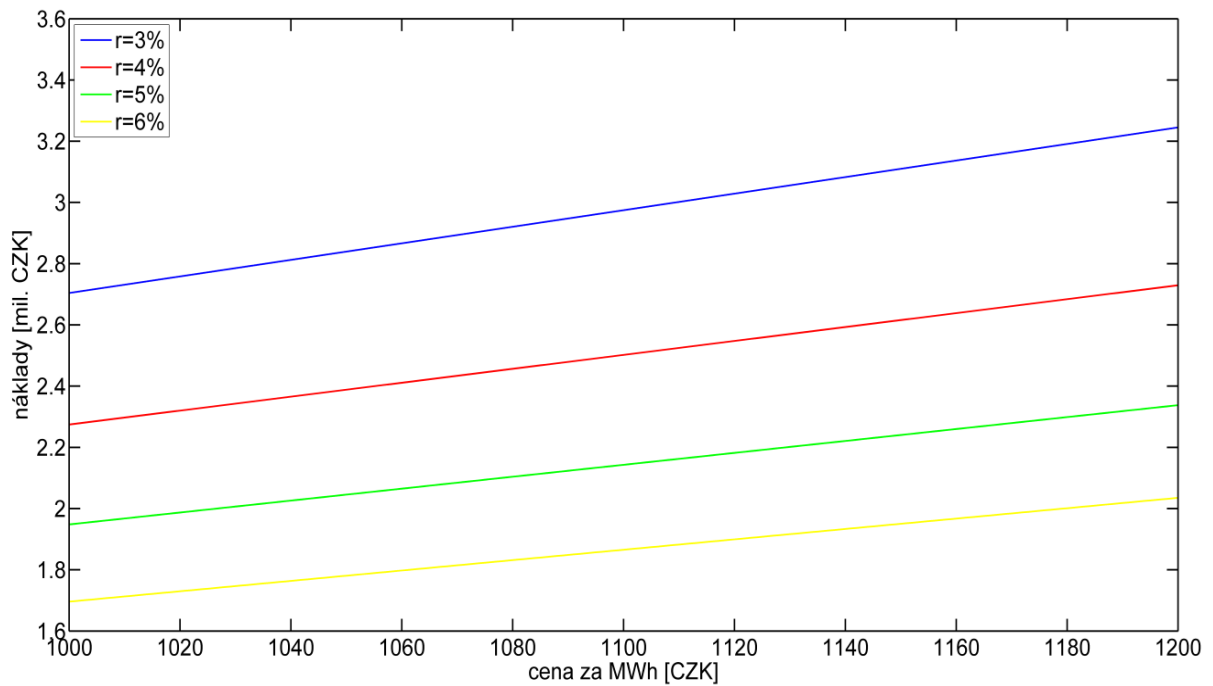
$$NPV = 111289,826 \left(1 + \frac{1,04^{50} - 1}{1,04^{50}(1,04 - 1)} \right) = 2\,502\,038,407 \text{ Kč} \quad (98)$$

Za takto definovaných podmínek se jeví investice do transpozičních stožárů jako výhodnější. Investiční náklady na jejich stavbu činí dle typu provedení transpozice 400 000 či 800 000 Kč. Tyto náklady jsou však nižší než náklady na elektrickou energii nutnou k pokrytí zvýšených činných ztrát, které přesahují 2,5 miliónu Kč. V následující kapitole je zkoumán vliv změny parametrů výpočtu na náklady za elektrickou energii danou zvýšením činných ztrát na netransponovaném vedení.

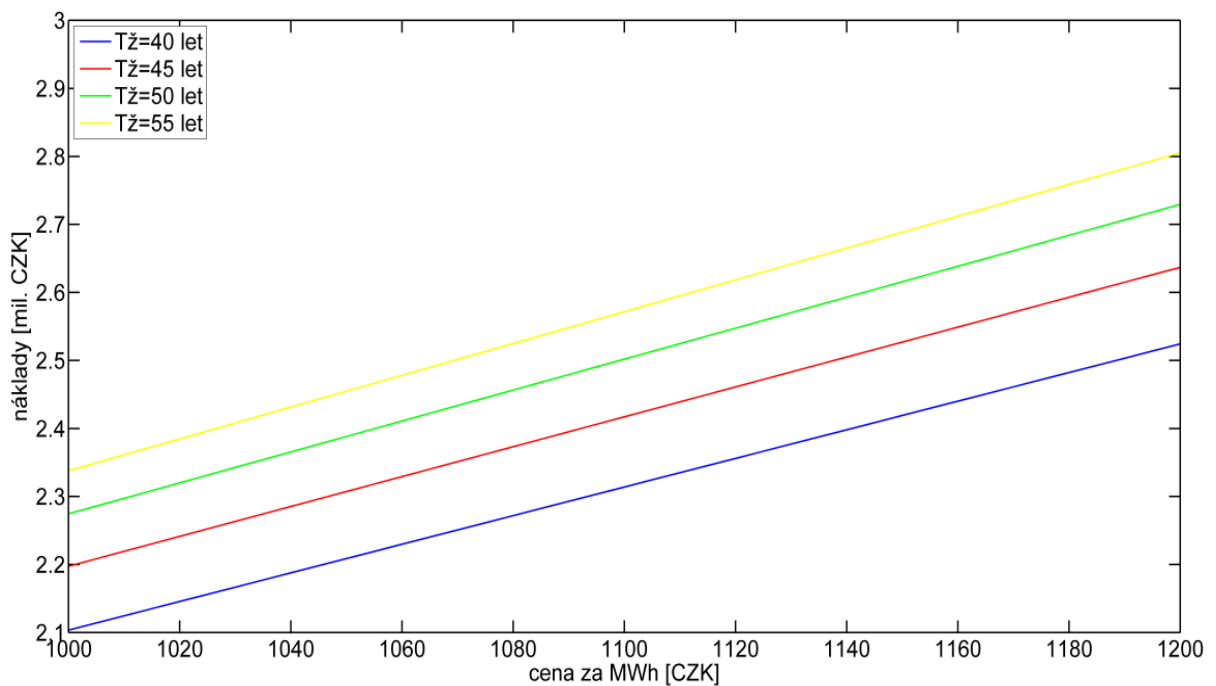
7.2. Variantní výpočty efektivnosti investic

V této kapitole jsou znázorněny výsledky provedených výpočtů nákladů pro netransponované vedení. Pro výpočet je opět užitá metoda NPV. V grafech je ukázána závislost nákladů za elektrickou energii na parametrech, které byly v základním porovnávacím výpočtu konstantní. Konkrétně se jedná o dobu životnosti, cenu elektřiny za

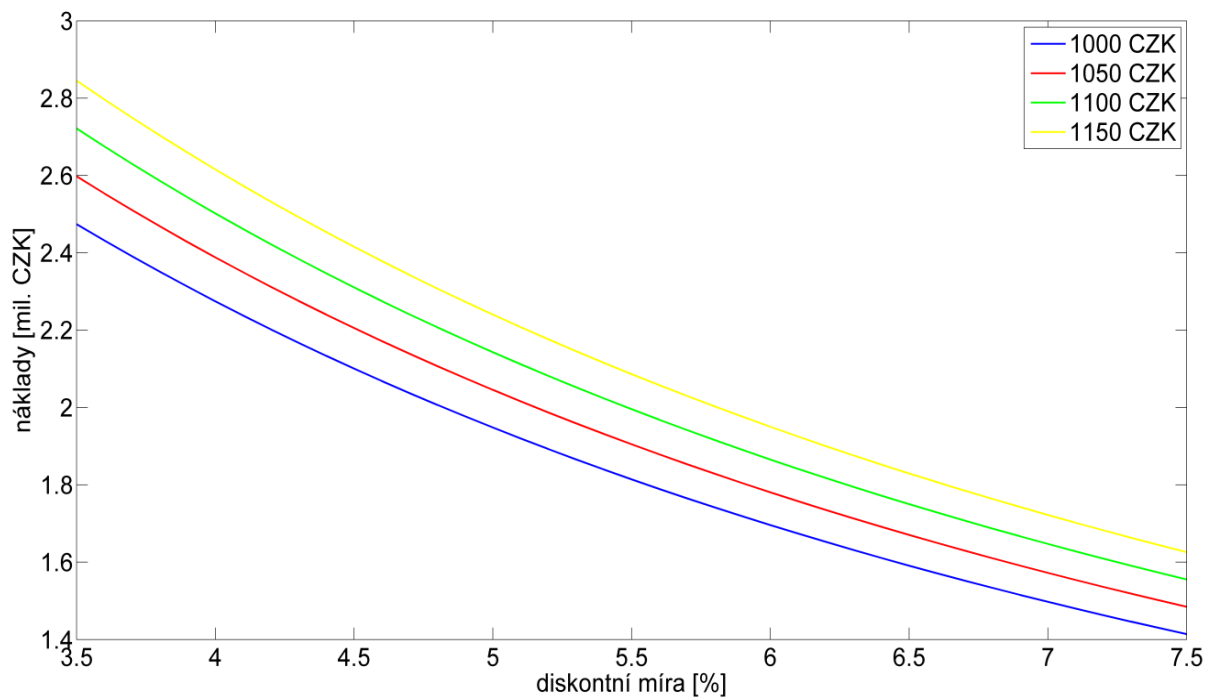
1 MWh a diskontní míru. V daných závislostech nákladů je vždy jedna veličina jako nezávislá proměnná, druhá jako parametr a třetí zůstává konstantní.



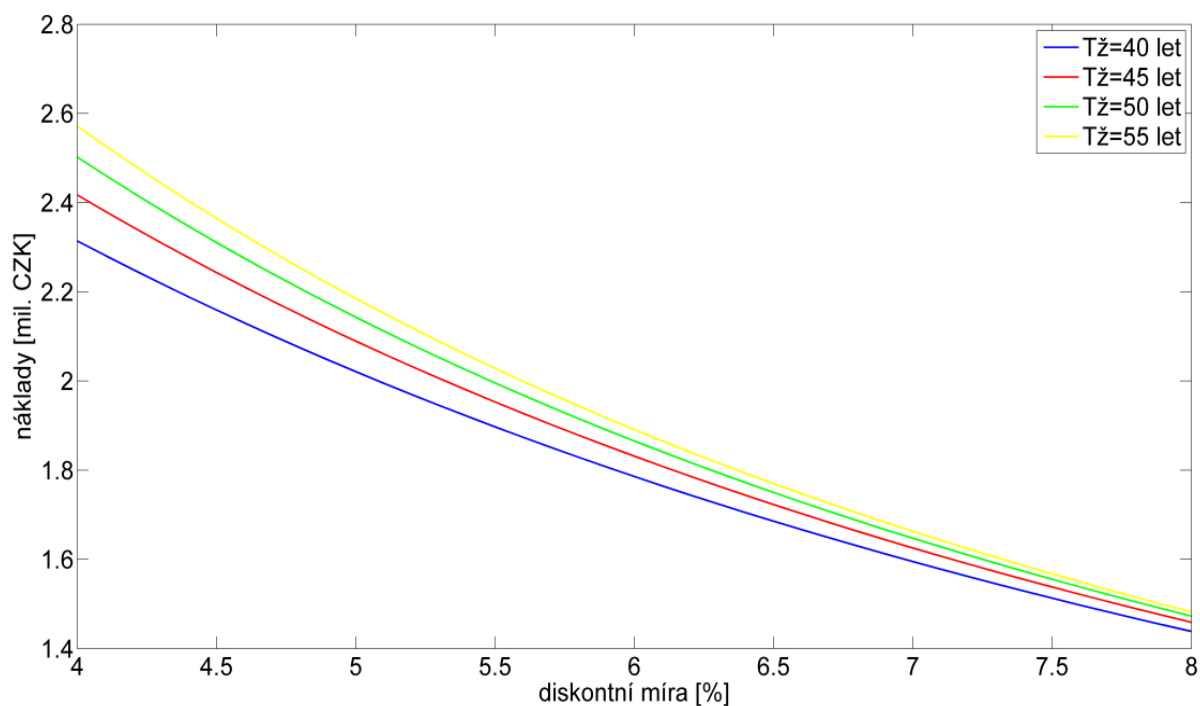
Obr. 7.1 Závislost nákladů na ceně elektřiny – parametr diskontní míra



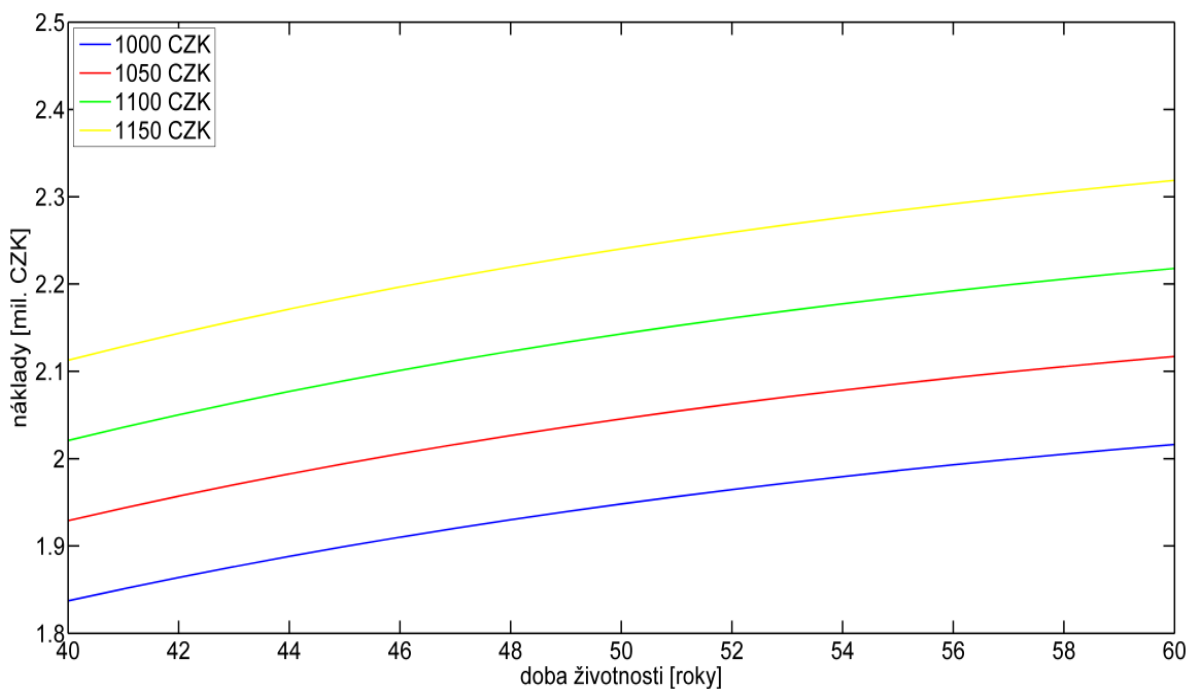
Obr. 7.2 Závislost nákladů na ceně elektřiny – parametr doba životnosti vedení



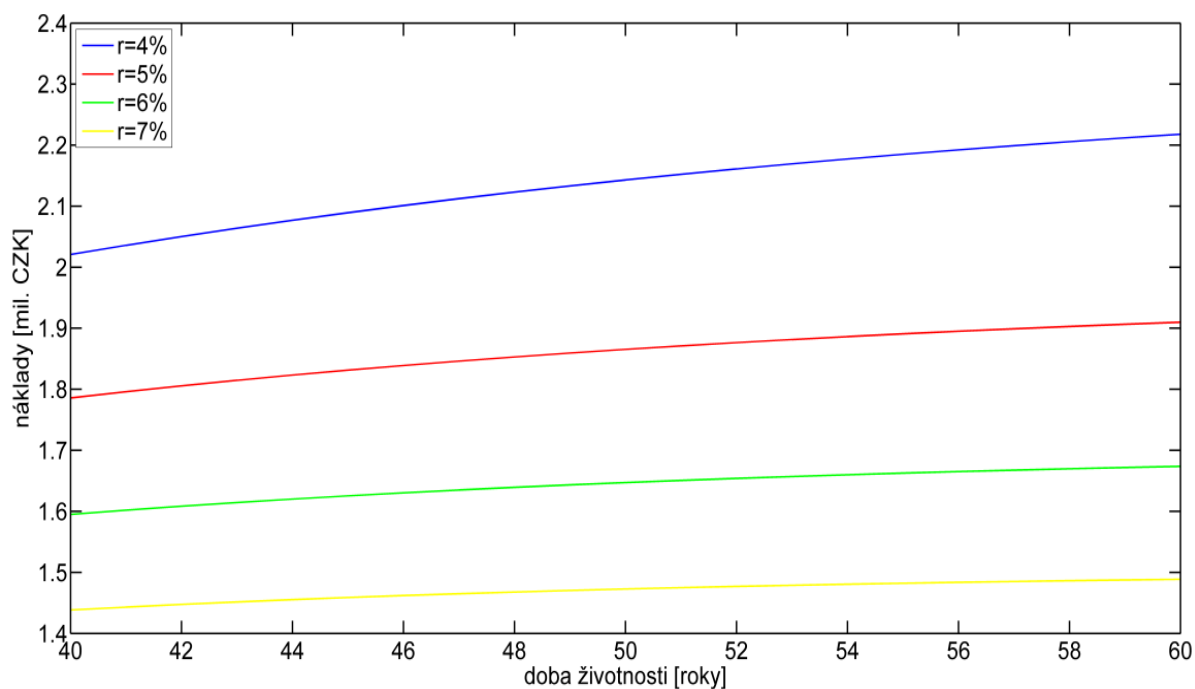
Obr. 7.3 Závislost nákladů na diskontní míře – parametr cena elektřiny



Obr. 7.4 Závislost nákladů na diskontní míře – parametr doba životnosti vedení



Obr. 7.5 Závislost nákladů na době životnosti vedení – parametr cena elektřiny



Obr. 7.6 Závislost nákladů na době životnosti vedení – parametr diskontní míra

Výše uvedené závislosti ukazují, že náklady na elektrickou energii nutnou k pokrytí zvýšených činných ztrát nejvýrazněji ovlivňuje velikost diskontní míry. Cena za 1 MWh elektrické energie má též významný vliv na náklady. Naopak změna doby životnosti na uvažovaném intervalu nemá tak razantní vliv jako předchozí dva parametry.

7.3. Zvýšení nákladů v závislosti na přenášeném výkonu

Zatíženost linek venkovních vedení se v čase mění a to obvykle s trendem cyklických denních, týdenních a ročních změn. Ty lze charakterizovat příslušnými diagramy zatížení. V této kapitole jsou uvedeny náklady na zvýšené činné ztráty netransponovaného vedení pro vybraná zatížení. Jako malé zatížení je uvažován přenos výkonu 200 a 250 MW, který může být typický v letních měsících. Pro střední zatížení jsou výpočty nákladů provedeny pro výkony 600, 700 a 800 MW. Zvýšení činných ztrát pro jednotlivé přenášené výkony odpovídá výpočtům provedeným v kapitole 5.3. Parametry pro posuzování nákladů jsou totožné se základním výpočtem:

- diskontní míra $r = 4\%$
- cena za 1 MWh elektrické energie = 1100 Kč
- doba životnosti $T_z = 50$ let

Dosazením do vztahů (94) a (97) jsou vyčísleny náklady, které jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7.2 Náklady na zvýšené činné ztráty pro různé přenášené výkony

	Přenášený výkon	Náklady
Malé zatížení	200 MW	1 447 440 Kč
	250 MW	1 381 069 Kč
Střední zatížení	600 MW	870 053 Kč
	700 MW	844 889 Kč
	800 MW	964 071 Kč

8. Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval výpočtem činných ztrát na transponovaném a netransponovaném vedení. Výpočet byl proveden pro stožár Portál 400 kV, který se užívá v přenosové soustavě. Pro analýzu činných ztrát jsem vytvořil model vedení, který respektuje reálné konstrukční a materiálové parametry. Venkovní vedení je reprezentováno kaskádou gama článků s pasivními parametry. Určitou nedokonalostí vytvořeného modelu vedení může být zjednodušující předpoklad, který uvažuje jako návratovou cestu proudu vzniklého při nesymetrii pouze zemnicí lano. V kapitole 2.4 je tento postup odůvodněn. Výpočet činných ztrát jsem provedl v programu Matlab a simulačním programu Dynast.

Největší nevýhodu výpočtu činných ztrát pomocí programu Matlabu lze spatřit v časové náročnosti tvorby výpočetního programu. Ta zahrnuje popis modelu Kirchhoffovými zákony, formulaci soustavy rovnic v maticovém tvaru a samotnou tvorbu a optimalizaci chodu výpočetního programu. Samotný výpočet již trvá krátkou dobu a v případě potřeby lze snadno měnit jeho parametry. Z těchto důvodů bych doporučil výpočet pomocí programu Matlab pro případ detailní analýzy a variantních výpočtů.

Simulační program Dynast umožňuje rychle a efektivně řešit poměry na modelovém vedení. Tento postup pak vyžaduje zpracování získaných výsledků pro určení činných ztrát, což se při opakovaně prováděných variantních výpočtech jeví jako problematické. Použití simulačního programu bych proto upřednostnil v případě prvotního výpočtu pro získání základní informace o činných ztrátách, případně pro potvrzení výsledků jiné metody výpočtu. Při sestavování simulačního schématu je zapotřebí věnovat pozornost způsobu uzemnění zemnicího lana a příčných větví pasivních prvků fázových vodičů, který má vliv na velikost proudu protékajícího zemnicím lanem a s ním spojenými činnými ztrátami. Touto problematikou jsem se zabýval v kapitole 6, kde jsem formuloval doporučení.

Výpočty činných ztrát pro transponované a netransponované vedení jsou provedeny nejen pro případ symetrického zdroje i zátěže, ale i pro určité varianty nesymetrie zdroje a zátěže. Podíl jednotlivých prvků na celkových činných ztrátách závisí na velikosti přenášeného výkonu. Výpočty ukazují, že při přenosu nižších výkonů převládají ztráty vzniklé na svodech fázových vodičů. Při přenosu vyšších výkonů jsou pak dominantní ztráty na odporech fázových vodičů. Velikost ztrát v zemnicím laně je úměrná nesymetrii proudů a napětí. Původcem této nesymetrie může být přirozená nesymetrie vedení daná

geometrií stožáru či jakákoliv nesymetrie na straně zdroje i zátěže. Při přenosu výkonu přesahujícího 1000 MW činí činné ztráty přibližně 2,2 % z přenášeného výkonu. Tento poměr je značně ovlivněn délkou vedení, neboť s narůstající délkou vedení narůstají činné ztráty prakticky lineárně. Analýzou výsledků je možné stanovit navýšení celkových činných ztrát na netransponovaném vedení oproti variantě transponovaného vedení. Navýšení ztrát je závislé na přenášeném výkonu a pro případ symetrického zdroje a zátěže se pohybuje v intervalu od 4 kW do 12 kW. Tyto hodnoty se nejeví být oproti hodnotám přenášeného výkonu a celkovým činným ztrátám zásadní, nicméně za jeden kalendářní rok se toto navýšení projeví ztrátami činné energie pohybující se v rozmezí 35 až 105 MWh. V případě nejnepříznivější nekompenzované 5% nesymetrie na zátěži a plného zatížení dosahuje ztracená činná energie za jeden rok 695 MWh.

V závěrečné části diplomové práce je provedeno ekonomické hodnocení efektivnosti investice stavby transpozičních stožárů, která je porovnávána s náklady na elektrickou energii danou zvýšenými činnými ztrátami na netransponovaném vedení metodou NPV. Pro základní porovnání nákladů obou variant jsou uvažovány zjednodušující předpoklady - stálé zatížení a neměnnost parametrů. Za těchto podmínek se jeví investice do transpozičních stožárů jako výhodnější a to i pro případ nižších přenášených výkonů. Náklady na elektrickou energii nutnou ke krytí zvýšených činných ztrát u netransponovaného totiž převyšují náklady na stavbu transpozičních stožárů, které činí pro typ stožáru zákrutový Třídřík 400 tisíc Kč a pro zákrutový Portál 800 tisíc Kč. Parametry ovlivňující náklady na elektrickou energii se mohou v čase měnit. Z tohoto důvodu je v kapitole 7.2 provedena též citlivostní analýza nákladů na změnu těchto parametrů. Výsledky ukazují, že na náklady spojené se zvýšením činných ztrát na netransponovaném vedení mají zejména vliv velikost diskontní míry a cena za 1 MWh elektrické energie.

Použitá literatura

- [1] Benešová, Z., Mayer, D.: *Algorithm for computation of inductances of three/phase overhead lines*, AMTEE'03 Plzeň: ZČU v Plzni 2003
- [2] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004
- [3] Gross, E.T.B., Weston, A.H.: *Transposition of High-Voltage Overhead Lines and Elimination of Electrostatic Unbalance to Ground*, American Institute of Electrical Engineers vol.70 1951
- [4] Hejtmánková, P., Mertlová, J., Kocmich, T.: *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*, Plzeň: ZČU v Plzni 2004
- [5] Holley, H., Coleman, D., Shipley, R.B.: *Untransposed EHV Line Computation*, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol.83 1964
- [6] Mann, H., Ševčenko, M.: *Snadné počítačové modelování dynamických soustav*, Praha: ČVUT v Praze 2008
- [7] Máslo, K. a kolektiv: *Řízení a stabilita elektrizační soustavy – část popis ES*, Praha: Asociace Energetických Manažerů 2013
- [8] Mooney, J.B.: *Economic Analysis and Justification for Transmission Line Transposition*, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES New Orleans 2010
- [9] Synek, M. a kolektiv: *Manažerská ekonomika*, Praha: Grada publishing a.s. 2007
- [10] *Provozní dokumentace vedení*, ČEPS a.s. – technická část
- [11] *Výstavba přenosové soustavy*. URL: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Vystavba_vedeni_2012_web.pdf> dostupné 4.3.2014

Příloha A

Porovnávací výpočet pro varianty se dvěma zemnicími lany a s jedním fiktivním zemnicím lanem u transponovaného vedení pro symetrický zdroj i spotřebič

	2 zemnicí lana	1 fiktivní zemnicí lano
I_a	1550,3 A	1551,4 A
I_b	1550,3 A	1551,4 A
I_c	1550,3 A	1551,4 A

Příloha B

Porovnávací výpočet pro varianty se dvěma zemnicími lany a s jedním fiktivním zemnicím lanem u netransponovaného vedení pro symetrický zdroj i spotřebič

	2 zemnicí lana	1 fiktivní zemnicí lano
I_a	1508,7 A	1507,7 A
I_b	1557,1 A	1556,1 A
I_c	1586,4 A	1585,1 A

Příloha C

Fotografie typů transpozičních stožárů Portál 400 kV [10]

- Zákrutový Portál

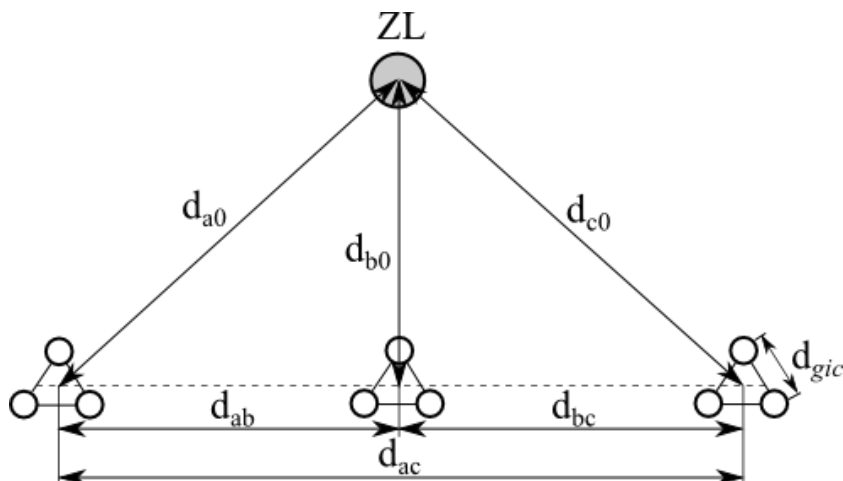


- Zákrutový Třídřík



Příloha D

Podrobné odvození matice indukčností u trojfázového vedení s jedním zemnicím lanem pro případ transponovaného vedení [1].



Pro další postup uvažujme konfiguraci vodičů naznačenou výše na obrázku. Vzdálenosti parciálních vodičů v jednotlivých svazcích jsou stejné. V porovnání s mezifázovými vzdálenostmi jsou zanedbatelné. Z tohoto důvodu jsou vzdálenosti mezi svazkovými vodiči uvažovány ke geometrickému středu svazkového vodiče. Vzdálenost parciálních vodičů se uplatní při určování vlastní indukčnosti fázového vodiče. Zde se oproti poloměru jednoduchého vodiče uvažuje střední geometrická vzdálenost všech vodičů ve fázi d_g , viz. rovnice (26a, 34). V tomto postupu vratný proud teče pouze zemnicími lany, nikoliv zemí.

Napětí indukované na indukčnosti na fázi a je opět možné vyjádřit pomocí vlastní a vzájemných indukčností:

$$u_a = L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{a0} \frac{di_0}{dt} \quad (\text{D. 1})$$

kde vlastní a vzájemné indukčnosti jsou vyjádřeny jako:

$$L_{aa} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_0}{d_g} \right) \quad (\text{D. 2})$$

$$L_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ab}} \quad L_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{ac}} \quad L_{a0} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{d_{a0}} \quad (\text{D. 3})$$

Je-li splněna podmínka vyvážené soustavy proudů:

$$i_a + i_b + i_c + i_0 = 0 \quad (\text{D. 4})$$

pak je možné eliminovat v předcházejících rovnicích proud i_0 . Napětí na jednotlivých indukčnostech všech fázových vodičů i zemnicích lan je poté určeno:

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a0}}{d_g} \right) + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{a0}}{d_{ab}} + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{a0}}{d_{ac}} \right] \quad (\text{D. 5a})$$

$$u_b = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{b0}}{d_{ab}} + \frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{b0}}{d_g} \right) + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{b0}}{d_{bc}} \right] \quad (\text{D. 5b})$$

$$u_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \ln \frac{d_{c0}}{d_{ac}} + \frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{c0}}{d_{bc}} + \frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{c0}}{d_g} \right) \right] \quad (\text{D. 5c})$$

$$u_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \ln \frac{d_{a0}}{d_{b0}} + \frac{di_c}{dt} \ln \frac{d_{a0}}{d_{c0}} + \frac{di_0}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a0}}{R_0} \right) \right] \quad (\text{D. 5d})$$

Napětí na jednotlivých indukčnostech je možné vyjádřit maticově:

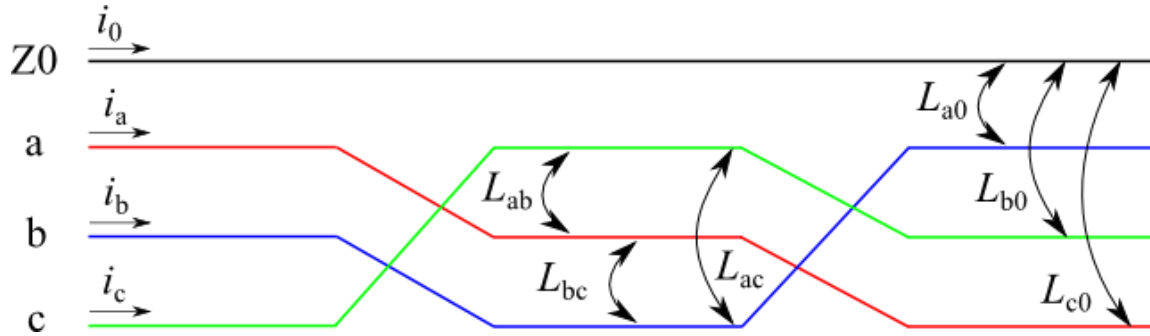
$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_0 \end{bmatrix} = \mathbf{L}_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 6})$$

$$\mathbf{L}_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{a0}}{d_g} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{ab}} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{ac}} & 0 \\ \ln \frac{d_{b0}}{d_{ab}} & \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{b0}}{d_g} & \ln \frac{d_{b0}}{d_{bc}} & 0 \\ \ln \frac{d_{c0}}{d_{ac}} & \ln \frac{d_{c0}}{d_{bc}} & \frac{1}{12} + \ln \frac{d_{c0}}{d_g} & 0 \\ 0 & \ln \frac{d_{a0}}{d_{b0}} & \ln \frac{d_{a0}}{d_{c0}} & \frac{1}{4} + \ln \frac{d_{a0}}{R_{of}} \end{bmatrix} \quad (\text{D. 7})$$

Příloha E

Podrobné odvození matice indukčností u trojfázového vedení s jedním zemnicím lanem pro případ netransponovaného vedení [1].

Pro následující postup uvažujme totožnou konfiguraci vodičů jako v příloze D. Vykřížení vodičů během transpozice a induktivní vazby jsou naznačeny na následujícím obrázku:



Pro určení napětí na indukčnosti ve fázi a jsou použity vztahy pro vlastní a vzájemné indukčnosti (D.2), (D.3). Napětí na indukčnosti fáze a je určeno vztahem:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \frac{1}{3} \left(3L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{a0} \frac{di_0}{dt} + L_{ab} \frac{di_c}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} + L_{b0} \frac{di_0}{dt} + L_{ac} \frac{di_b}{dt} \right. \\
 &\quad \left. + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + L_{c0} \frac{di_0}{dt} \right) = \\
 &= \frac{1}{3} \left[3L_{aa} \frac{di_a}{dt} + (L_{ab} + L_{bc} + L_{ac}) \frac{di_b}{dt} + (L_{ab} + L_{bc} + L_{ac}) \frac{di_c}{dt} \right. \\
 &\quad \left. + (L_{a0} + L_{b0} + L_{c0}) \frac{di_0}{dt} \right] \quad (E.1)
 \end{aligned}$$

Eliminací proudů i_b a i_c vede rovnice na tvar:

$$u_a = \frac{1}{3} \left[\frac{di_a}{dt} (3L_{aa} - L_{ab} - L_{bc} - L_{ac}) + \frac{di_0}{dt} (L_{a0} + L_{b0} + L_{c0} - L_{ab} - L_{bc} - L_{ac}) \right] \quad (E.2)$$

Po dosazení vztahů pro vlastní a vzájemné indukčnosti a úpravě:

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{d_g} \right) + \frac{di_0}{dt} \ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{a0}d_{b0}d_{c0}}} \right] \quad (\text{E. 3})$$

Pro lepší přehlednost je vhodné zavést střední geometrické vzdálenosti:

$$D_{gf} = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}} \quad \text{střední geometrická vzdálenost mezi fázovými vodiči}$$

$$D_{g0} = \sqrt[3]{d_{a0}d_{b0}d_{c0}} \quad \text{střední geometrická vzdálenost fázových vodičů od zemního lana}$$

$$u_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_a}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} \right) + \frac{di_0}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \right] \quad (\text{E. 4})$$

Analogickým způsobem lze odvodit vztah pro napětí ve fázi *b* a *c*

$$u_b = \frac{1}{3} \left(3L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{ab} \frac{di_a}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + L_{b0} \frac{di_0}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{bc} \frac{di_a}{dt} + L_{c0} \frac{di_0}{dt} + L_{c02} \frac{di_{02}}{dt} \right. \\ \left. + L_{ab} \frac{di_c}{dt} + L_{ac} \frac{di_a}{dt} + L_{a0} \frac{di_0}{dt} \right) \quad (\text{E. 5})$$

Eliminací proudů i_a a i_c pro fázi *b*:

$$u_b = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_b}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} \right) + \frac{di_0}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \right] \quad (\text{E. 6})$$

Eliminací proudů i_a a i_b pro fázi *c*:

$$u_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{di_c}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} \right) + \frac{di_0}{dt} \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \right] \quad (\text{E. 7})$$

Při odvození napětí na indukčnosti zemního lana se postupuje stejným postupem jako u fázových vodičů, jen v rovnicích dochází k eliminaci všech fázových proudů.

$$u_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{di_0}{dt} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g0}}{R_0} \right) \quad (\text{E. 8})$$

Vztahy mezi napětími na indukčnostech jednotlivých vodičů a proudy je opět možné vyjádřit maticově:

Matice indukčností nabývá tvaru:

$$\mathbf{L}_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & 0 & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & 0 & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} + \ln \frac{D_{gf}}{d_g} & \ln \frac{D_{gf}}{D_{g0}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{g0}}{R_{of}} \end{bmatrix} \quad (\text{E. 9})$$