

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra teoretické elektrotechniky

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Analýza přenosu elektrické energie na kombinovaných
vedeních

Autor: Ing. Tomáš Nazarčík

Školitel: prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.

Plzeň 2018

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou přenosu elektrické energie na kombinovaných vedeních s linkami různých napěťových hladin. V první části je zkoumáno rozložení elektromagnetického pole včetně diskuze faktorů, které mají na jeho rozložení vliv. V další části je popsán model vedení pro numerické řešení přechodných dějů v časové oblasti, který umožňuje respektovat vzájemné indukční a kapacitní vazby mezi vodiči. Popis vytvořeného modelu vede na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic, jež je řešena v Matlabu. Na tomto modelu vedení jsou provedeny výpočty vybraných provozních stavů a přechodných dějů, které se mohou typicky objevit během provozu kombinovaného vedení. Na základě získaných výsledků byla provedena diskuze vzájemného ovlivňování mezi jednotlivými linkami.

Klíčová slova

Kombinované vedení, elektromagnetické pole, dvojbranový model vedení, obyčejné diferenciální rovnice, přechodné děje

Abstract

This thesis deals with an analysis of the electric power transmission on the combined transmission lines with circuits of different voltages. In the first part the electromagnetic field distribution is analysed including the discussion of the factors, that have the influence on results. In the next part there is described a model of the transmission line for the numerical solution of the transients. It allows respecting the mutual inductive and capacitive couplings between the conductors. The description of created model leads to a system of ordinary differential equations which have been solved in Matlab. On this model the calculations of the chosen operation states and transients those can occur during the operation on the combined transmission line are carried out. Based on the obtained results the discussion of the mutual influence between the particular circuits is performed.

Keywords

Combined transmission line, electromagnetic field, two-port model, ordinary differential equations, transients

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě dizertační práci, zpracovanou na závěr doktorského studia oboru Elektroenergetika na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele 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 dizertační práce, je legální.

V Plzni dne 31. 8. 2018

Tomáš Nazarčík

.....

podpis

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat mojí školitelce prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za trpělivost, cenné rady, připomínky a postřehy, které vznikly během společných konzultací, a velice mi pomohly během zpracování této dizertační práce.

Další dík patří mým kolegům z Katedry teoretické elektrotechniky, kteří mi po dobu mého doktorského studia byli nápomocni v řešení odborných problémů a pedagogických záležitostí.

Dále bych chtěl poděkovat mým kamarádům, kolegům a spolužákům z elektroenergetiky Ing. Václavu Mužíkovi a Ing. Vladimíru Vajnarovi. Díky vzájemné výpomoci bylo překonávání překážek spojených s doktorským studiem výrazně jednodušší.

Na závěr musím velmi poděkovat mé rodině a mým blízkým, kteří mě po celou dobu studia na Fakultě elektrotechnické po všech směrech plně podporovali a věřili mi.

Obsah

1.	Úvod	1
1.1.	Motivace	1
1.2.	Stav současné problematiky.....	1
1.3.	Cíle dizertační práce	5
2.	Technické řešení kombinovaných vedení.....	6
2.1.	Linky PS umístěné nad linkami DS	6
2.2.	Linky PS umístěny vedle linek DS	7
3.	Analýza elektromagnetického pole	8
3.1.	Rozložení magnetického pole	8
3.2.	Rozložení elektrického pole.....	9
3.3.	Ilustrativní příklady výpočtů rozložení elektrického a magnetického pole pod vedením	11
3.3.1.	Vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení pole u stožáru Donau.....	12
3.3.2.	Vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení pole u stožáru Dvojité soudek	14
3.3.3.	Zhodnocení variantních výpočtů rozložení elektrického a magnetického pole pod vedením	16
3.4.	Rozbor elektrického a magnetického pole v oblasti mezi vodiči	16
3.4.1.	Magnetické pole v prostoru vypnutých vodičů 110 kV vybuzečné vodiči 400 kV	16
3.4.2.	Rozdělení elektrických nábojů na jednotlivé vodiče 110 kV	19
4.	Model vedení	22
4.1.	Pasivní parametry	22
4.1.1.	Indukčnost	22
4.1.2.	Kapacita	24
4.1.3.	Odpor a svod.....	25
4.2.	Základní element vedení respektující induktivní a kapacitní vazby.....	26
4.3.	Jednoduchý model vedení.....	27
4.3.1.	Obvodový model vedení.....	27
4.3.2.	Matematický model	28
4.4.	Model vedení složený z kaskády dvojbranů	31
4.4.1.	Matematický model	32
4.4.2.	Numerické řešení matematického modelu	35

5.	Ilustrativní příklady výpočtů na modelovém vedení	37
5.1.	Základní posouzení vlivu induktivních a kapacitních vazeb	38
5.2.	Spínání linek během provozu.....	41
5.2.1.	Zapínání/vypínání linek ZVN, linky VVN v provozu.....	41
5.2.2.	Zapínání/vypínání linek VVN, linky ZVN v provozu.....	43
5.2.3.	Zapínání linek ZVN ze stavu naprázdno, linky VVN v provozu	44
5.3.	Zkratové poruchy	46
5.3.1.	Základní analýza vlivu zkratu na ostatní vodiče	47
5.3.2.	Rozbor první části zkratu spojené s tlumenými oscilacemi	49
5.3.3.	Rozbor části ustáleného zkratu	51
5.4.	Cyklus jednofázového opětovného zapnutí (1f OZ).....	54
5.4.1.	Cyklus jednofázového OZ na ZVN	54
5.4.2.	Cyklus jednofázového OZ na VVN.....	56
5.5.	Indukované proudy do vypnutých linek	58
5.5.1.	Variantní výpočty pro standardní provoz linek ZVN, linky VVN vypnuté ..	58
5.5.2.	Variantní výpočty pro standardní provoz linek VVN, linky ZVN vypnuté ..	59
5.5.3.	Zkratová porucha na ZVN, linky VVN vypnuté	60
5.5.4.	Zkratová porucha na VVN, linky ZVN vypnuté	63
6.	Simulace v programu Dynast	66
6.1.	Jednofázová zkratová porucha	66
6.2.	Porovnání vlastností modelu pro numerické řešení v Matlabu a simulačního modelu v Dynastu.....	72
	Závěr	73
	Použitá literatura.....	75
	Příloha A – Seznam autorových publikovaných prací	78
	Příloha B – Vybrané stožáry kombinovaných vedení	81

Seznam obrázků

Obr. 1 Linky PS umístěny nad linkami DS	6
Obr. 2 Linky PS umístěny vedle linek DS.....	7
Obr. 3 Rozložení intenzity magnetického pole do složek [23].....	9
Obr. 4 Konstrukční uspořádání stožáru Donau.....	11
Obr. 5 Konstrukční uspořádání stožáru Dvojitý soudek.....	11
Obr. 6 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Donau pro symetrickou konfiguraci	12
Obr. 7 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Donau pro symetrickou konfiguraci.....	12
Obr. 8 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Donau pro asymetrickou konfiguraci.....	13
Obr. 9 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Donau pro asymetrickou konfiguraci.....	13
Obr. 10 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Dvojitý soudek pro symetrickou konfiguraci	14
Obr. 11 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Dvojitý soudek pro symetrickou konfiguraci.....	14
Obr. 12 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Dvojitý soudek pro asymetrickou konfiguraci.....	15
Obr. 13 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Dvojitý soudek pro asymetrickou konfiguraci	15
Obr. 14 Magnetické pole u Dvojitého soudku vybuzené vodiči 400 kV s asymetrickým uspořádáním fází.....	17
Obr. 15 Magnetické pole u Dvojitého soudku vybuzené vodiči 400 kV se symetrickým uspořádáním fází.....	17
Obr. 16 Magnetické pole u stožáru Donau vybuzené vodiči 400 kV s asymetrickým uspořádáním fází.....	18
Obr. 17 Magnetické pole u stožáru Donau vybuzené vodiči 400 kV se symetrickým uspořádáním fází.....	18
Obr. 18 Zobrazení indukovaných nábojů od paralelních linek do fáze-c 1. VVN linky pro asymetrické uspořádání fází	21
Obr. 19 Zobrazení indukovaných nábojů od paralelních linek do fáze-c 1. VVN linky pro symetrické uspořádání fází	21

Obr. 20	Induktivní vazby v rámci jednoho obvodu se zemnicím lanem	22
Obr. 21	Kapacitní vazby v rámci jednoho obvodu se zemnicím lanem	24
Obr. 22	Základní gama element k -tého dvojbranu i -tého fázového vodiče.....	26
Obr. 23	Obvodové schéma jednoduchého modelu vedení	27
Obr. 24	Jordanův řez a redundantní větve	30
Obr. 25	Zapojení zemní kapacity	31
Obr. 26	Část dvojbranového schéma modelu vedení	32
Obr. 27	Zobrazení vlastních čísel v komplexní rovině.....	35
Obr. 28	Respektování impedance sítě v modelu vedení.....	37
Obr. 29	Indukování napětí a proudů do vypnutých linek VVN	38
Obr. 30	Označení linek a konfigurace fázových vodičů.....	40
Obr. 31	Spínací diagram linek ZVN a VVN	41
Obr. 32	Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během ZVN spínání	41
Obr. 33	Fázové proudy 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání	42
Obr. 34	Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání.....	42
Obr. 35	Spínací diagram linek ZVN a VVN	43
Obr. 36	Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během VVN spínání	43
Obr. 37	Fázové proudy 1. linky ZVN prvního dvojbranu během VVN spínání	43
Obr. 38	Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během VVN spínání.....	44
Obr. 39	Spínací diagram linek VVN a ZVN	44
Obr. 40	Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno	45
Obr. 41	Fázové proudy 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno	45
Obr. 42	Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno.....	45
Obr. 43	Zkrat dělicí vedení na dva úseky	46
Obr. 44	Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN.....	47
Obr. 45	Fázové proudy 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN.....	48
Obr. 46	Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN.....	48
Obr. 47	Fázová napětí 1. VVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN	49
Obr. 48	Detailní pohled na oscilace fázových proudů 1. VVN linky v prvním dvojbranu	49
Obr. 49	Detailní pohled na oscilace fázových napětí 1. VVN linky v prvním dvojbranu..	50
Obr. 50	Detailní zobrazení vlastních čísel v komplexní rovině.....	51
Obr. 51	Průběhy napětí fáze-a 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN.....	51

Obr. 52	Průběhy napětí fáze-b 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN.....	52
Obr. 53	Průběhy napětí fáze-c 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN.....	52
Obr. 54	Profily napětí podél vedení během 1f zkratu na ZVN.....	53
Obr. 55	Sekvence přechodných dějů pro cyklus jednofázového OZ na ZVN.....	54
Obr. 56	Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN	54
Obr. 57	Fázové proudy 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN	55
Obr. 58	Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN	55
Obr. 59	Sekvence přechodných dějů pro cyklus jednofázového OZ na VVN	56
Obr. 60	Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN.....	56
Obr. 61	Fázové proudy 2. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN.....	56
Obr. 62	Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN.....	57
Obr. 63	Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na ZVN	60
Obr. 64	Indukované proudy ve vodičích vypnuté 1. VVN linky během zkratu na ZVN...	60
Obr. 65	Indukované proudy ve vodičích vypnuté 2. VVN linky během zkratu na ZVN...	61
Obr. 66	Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN	63
Obr. 67	Indukované proudy ve vodičích 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN.....	63
Obr. 68	Indukované proudy ve vodičích 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN.....	64
Obr. 69	Nerovnoměrné dělení dvojbranů podle polohy zkratu na vedení.....	67
Obr. 70	Model vedení pro simulaci v Dynastu.....	67
Obr. 71	Fázové proudy 1. ZVN linky ze simulačního modelu v Dynastu	68
Obr. 72	Fázové proudy 1. ZVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu.....	68
Obr. 73	Fázové proudy 2. ZVN linky ze simulačního modelu v Dynastu	69
Obr. 74	Fázové proudy 2. ZVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu.....	69
Obr. 75	Fázové proudy 1. VVN linky ze simulačního modelu v Dynastu.....	70

Obr. 76 Fázové proudy 1. VVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu.....	70
Obr. 77 Fázová napětí 1. VVN linky ze simulačního modelu v Dynastu	71
Obr. 78 Fázová napětí 1. VVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu.....	71

Seznam tabulek

Tab. 1 Symetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole.....	12
Tab. 2 Asymetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole.....	13
Tab. 3 Symetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole.....	14
Tab. 4 Asymetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole.....	15
Tab. 5 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro symetrickou konfiguraci fází na stožáru Donau.....	19
Tab. 6 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro asymetrickou konfiguraci fází na stožáru Donau.....	19
Tab. 7 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro symetrickou konfiguraci fází na stožáru Dvojitý soudek.....	20
Tab. 8 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro asymetrickou konfiguraci fází na stožáru Dvojitý soudek.....	20
Tab. 9 Vybrané řešiče ODR v software MATLAB.....	36
Tab. 10 Uvažované konfigurace fází pro stožár Donau.....	39
Tab. 11 Velikosti indukovaných napětí a proudů ve vodičích VVN do prvního dvojbranu pro symetrickou konfiguraci fází na ZVN.....	39
Tab. 12 Velikosti indukovaných napětí a proudů ve vodičích VVN do prvního dvojbranu pro asymetrickou konfiguraci fází na ZVN.....	39
Tab. 13 Velikosti ustálených amplitud napětí podél vedení během zkratu.....	53
Tab. 14 Amplitudy ustálených indukovaných proudů v obou vypnutých VVN linkách ...	58
Tab. 15 Amplitudy ustálených indukovaných proudů v obou vypnutých ZVN linkách ...	59
Tab. 16 Ustálené amplitudy indukovaných proudů do vodičů vypnutých VVN linek během 1f zkratů na ZVN.....	61
Tab. 17 Velikosti vzájemných indukčností uvedených v “mH“ mezi vodiči 1. ZVN linky a vodiči obou vypnutých linek VVN.....	62
Tab. 18 Ustálené amplitudy indukovaných proudů do vodičů vypnutých ZVN linek během 1f zkratů na VVN.....	64
Tab. 19 Velikosti vzájemných indukčností uvedených v “mH“ mezi vodiči 1. VVN linky a vodiči obou vypnutých linek ZVN.....	65

Seznam použitých symbolů a zkratek

\bar{I}_i	fázor proudu i -tého vodiče	(A)
\bar{U}_i	fázor napětí i -tého vodiče	(V)
y	souřadnice y v kartézském souřadném systému	(m)
x	souřadnice x v kartézském souřadném systému	(m)
r_i	vzdálenost od i -tého vodiče	(m)
r_i'	vzdálenost od obrazu i -tého vodiče	(m)
\bar{H}	fázor intenzity magnetického pole	(A/m)
H	velikost intenzity magnetického pole	(A/m)
μ	permeabilita prostředí	(H/m)
B	magnetická indukce	(μ T)
q	submatice elektrických nábojů	(C)
u_i	okamžitá hodnota napětí i -tého vodiče	(V)
\bar{Q}_i	fázor elektrického náboje i -tého vodiče	(C)
ε	permitivita prostředí	(F/m)
ℓ	délka vodiče	(km)
\bar{E}	fázor intenzity elektrického pole	(kV/m)
E	velikost intenzity elektrického pole	(kV/m)
t	čas	(s)
u_L	indukované napětí induktivními vazbami	(V)
\mathbf{L}_i	matice induktivních vazeb v rámci i -tého obvodu	(H/km)
\mathbf{L}_{ij}	matice induktivních vazeb mezi i -tým a j -tým obvodem	(H/km)
L_i	vlastní indukčnost i -tého vodiče	(H/km)
L_{ij}	vzájemná indukčnost mezi i -tým a j -tým vodičem	(H/km)
R_g	odpor fiktivního zemního vodiče	(Ω /km)
L_g	indukčnost fiktivního zemního vodiče	(mH/km)
f	frekvence	(Hz)
h	střední výška vodičů nad zemí	(m)
γ	vodivost země	(S/m)
δ	matice potenciálových koeficientů	(V/C)
\mathbf{B}	matice kapacitních koeficientů	(F/km)
β_{ij}	koeficient elektrostatické indukce vodiče i na vodič j	(F/km)
C_{ij}	vzájemná kapacita mezi vodiči i a j	(F/km)
C_{i0}	kapacita vodiče i vůči zemi	(F/km)

R_{ss}	stejnoseměrný odpor vodiče	(Ω/km)
α	teplotní součinitel odporu	(K^{-1})
ΔT	rozdíl teplot	(K)
G	svod	(S/km)
ω	úhlová frekvence	(rad/s)
m	celkový počet fázových vodičů	(-)
n	celkový počet zemnicích lan	(-)
N	počet dvojbranů v kaskádě	(-)
M	počet řešených rovnic	(-)
\mathbf{x}	sloupcový vektor stavových proměnných	(-)
\mathbf{f}	sloupcový vektor zdrojů	(-)
\mathbf{A}_1	matice koeficientů členů s derivacemi	(-)
\mathbf{A}_2	matice koeficientů členů bez derivací	(-)
\mathbf{A}	stavová matice	(-)
$\boldsymbol{\lambda}$	vektor vlastních čísel	(-)
\mathbf{J}	jednotková matice	(-)
α_i	imaginární část i -tého vlastního čísla	(-)
β_i	reálná část i -tého vlastního čísla	(-)
τ_i	časová konstanta	(s)
I_k''	rázový zkratový proud	(A)
X_{in}	vnitřní reaktance sítě	(Ω)
ρ	korelační koeficient	(-)
ZVN	zvláště vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
PS	přenosová soustava	
DS	distribuční soustava	
FT	Fourierova transformace	
LT	Laplaceova transformace	
ODR	obyčejné diferenciální rovnice	
OZ	opětovné zapnutí	
KZ	Kirchhoffův zákon	

1. Úvod

1.1. Motivace

Hlavním úkolem energetického systému je spolehlivě zásobovat elektrickou energií dané místo v požadovaném čase a množství. Vývoj energetiky v posledním desetiletí a s ním spojené masivní nasazení obnovitelných zdrojů energie klade zvýšené nároky pro provozovatele přenosových a distribučních soustav na údržbu a další rozvoj energetických sítí. Ten je spojen i s výstavbou nových linek vedení. V současné době je výstavba nových tras pro vedení zvláště vysokého napětí (ZVN) a velmi vysokého napětí (VVN) značně problematická z mnoha důvodů (výkup pozemků, posouzení vlivu na životní prostředí, změna územních plánů). Možným řešením tak může být rekonstrukce stávajících vedení a jejich přestavba na kombinovaná vedení, kdy na jednom stožáru je umístěno několik linek často o různých napěťových hladinách. Během provozu dochází ke vzájemnému ovlivňování těchto obvodů, což s sebou přináší řadu problémů, které je potřeba podrobně analyzovat.

1.2. Stav současné problematiky

Stavba vícenásobných vedení s linkami stejných napěťových hladin umístěných na jednom stožáru se u nás i ve světě stala běžnou záležitostí. Analýzou vzájemného ovlivňování mezi vodiči jednotlivých linek se již zabývala řada autorů využívající k tomu různé přístupy k této problematice. Pro analýzu přechodných dějů na vícenásobném vedení závisí typ vytvořeného modelu vedení na charakteru sledovaných přechodných dějů. Pro pomalé přechodné děje (zkratové poruchy, standardní spínání linek), u nichž je možné zanedbat samotné šíření přechodného děje prostorem podél vedení, je dostačující použít model se soustředěnými parametry. Vedení bývá zpravidla nahrazeno modelem tvořeného dvojbrany a jeho popis vede na systém obyčejných diferenciálních rovnic závislých na čase. Analýza rychlých přechodných dějů (např. úder blesku a následné šíření napěťových vln, nestandardní případy spínání) vyžaduje model vedení s rozprostřenými parametry, jenž je možné popsat telegrafními rovnicemi [1], což je systém parciálních diferenciálních rovnic závislých na čase a jedné prostorové dimenzi. V praxi je řešení telegrafních rovnic možné provést buď v časové oblasti použitím vybrané numerické metody nebo ve frekvenční oblasti využitím Fourierovy či Laplaceovy transformace.

Vyšetřování vzájemného vlivu mezi vodiči vícenásobného vedení stejné napěťové hladiny během pomalých přechodných dějů se zabýval např. G. Wilson a kol. v práci [2],

kde jsou modelovány spínací přechodné děje na netransponovaném vedení s respektováním zemnicích lan a země. Dále pak A. Al-Fuhaid a M. Saied analyzují v publikaci [3] přechodné děje spojené se zkratovými poruchami s ohledem na vzájemné vazby mezi vodiči. Algoritmus vychází z rozdělení vedení na dva úseky. První zahrnuje část mezi zdrojem a poruchou, druhý pak mezi poruchou a zátěží. Proudové a napěťové poměry podél vedení jsou určeny pomocí Blondellových konstant definovaných hyperbolickými funkcemi, což přibližuje řešení časoprostorovému modelu vedení. K analýze pomalých přechodných dějů na vícenásobném vedení se v dnešní době hojně využívají v praxi simulační programy. Mezi ně patří např. EMTP-ATP, PSCAD, Matlab – Simulink, Dynast a další. Většina z profesionálních programů nabízí uživateli specializované knihovny, které obsahují již vytvořené různé modely vedení a jiné prvky energetických sítí (vypínače, transformátory, svodiče přepětí apod.). Problémem může být, že není vždy dostupná kompletní vnitřní struktura těchto vytvořených modelů.

Řada autorů se věnovala analýze rychlých přechodných dějů na vícenásobném vedení. První skupinu tvoří autoři, kteří použili k řešení telegrafních rovnic metodu konečných diferencí v časové oblasti (tzv. FDTD metoda). Výhodou tohoto postupu je, že získané výsledky (např. proudové a napěťové poměry) jsou časoprostorová rozložení sledovaných veličin. Úskalím této metody může být optimalizace časového resp. prostorového kroku s ohledem na stabilitu výpočtu, která je motivovaná zkrácením doby výpočtu. Jedná se např. o publikace [4], [5], [6], [7], a [8]. A. Orlandi a P. Clayton v [4] popisují indukované napětí do ostatních vodičů způsobené pulzem s využitím diskretizace pro stavové proměnné. F. Rachidi a kol. v práci [5] zkoumají vliv frekvenční závislosti země získané aproximací a reprezentované impedanční maticí na průběhy indukovaných napětí od blesku. L. Tiebing a kol. v [6] využívají k určení parametrů vedení měření impedančním analyzárem ze stavů naprázdno a nakrátko. Výpočetní model vedení je porovnávám s modelem v softwaru EMTP-ATP na příkladu šíření definovaného napěťového pulzu. Z. Mazloom a kol. v práci [7] popisují algoritmus umožňující respektovat vybraná zařízení podél trasy vedení (transformátory, svodiče přepětí, vypínače apod.), využívající metodu uzlových napětí. C. Kaloudas a G. Papagiannis v článku [8] porovnávají výsledky výpočtů odezvy na napěťový pulz na modelech vedení s konstantními a frekvenčně závislými parametry. Vazby mezi vodiči jsou reprezentovány pomocí matic. Představený algoritmus umožňuje analyzovat napěťové profily podél vedení. Řešení telegrafních rovnic v časové oblasti zvolili také J. Xia a kol. v [9], kde zkoumají vliv šířícího se napěťového pulsu na vedení na ostatní vodiče. Algoritmus

vychází z prostorové diskretizace rozdělením vedení na dané úseky. Vlastní a vzájemné parametry vedení jsou definovány pomocí matic. R. Araneo a S. Celozzi v článku [10] se zabývají řešením telegrafních rovnic v časové oblasti metodou konečných prvků (tzv. FETD metoda).

Druhou větší skupinu tvoří autoři, kteří využili k řešení telegrafních rovnic frekvenční reprezentaci veličin většinou pomocí Fourierovy transformace (FT). Mezi hlavní výhody tohoto postupu patří snadné zohlednění frekvenční závislosti parametrů vedení. Problematická může být zpětná transformace do časové oblasti, která je spojená s možným výskytem numerických oscilací. Jedná se např. o publikace [11], [12], [13] a [14]. B. Gustavsen v [11] analyzuje vliv induktivních a kapacitních vazeb mezi vodiči pomocí transformační matice. Tento autor dále v publikaci [12] společně s A. Semlyenem popisují použití skalárních a vektorových přenosových funkcí. Použití Fourierovy transformace pro analýzu spínacích přechodných dějů je též popsána v [13] od L. Wedepohla a kolektivu. X. Liu a kol. popisují v publikaci [14] možnost respektování nelineární zátěže. Je zde provedena diskuze stability výpočtu pomocí analýzy pólů přenosové funkce.

Kombinovaná vedení s vodiči o různých napět'ových hladinách, jsou velmi speciálním případem vícenásobných vedení. Jejich stavba nebyla dosud zcela obvyklá, nicméně provozovatelé německé a čínské přenosové sítě byli s ohledem na obtíže spojené se stavbou nových tras pro vedení nuceni kombinovaná vedení v relativně v hojnější míře již postavit. V České republice je výskyt kombinovaného vedení s přenosovými a distribučními linkami na jednom stožáru spíše raritou. V jižních Čechách (na vedení V474 mezi rozvodnami Kočín a Dasný) je provozu 11 km souběh 1x 400 kV + 1x110 kV na stožáru Donau. Nicméně problematika hledání koridorů pro nová vedení v ČR dospěla v určitých případech do stavu, kdy se v současnosti připravuje stavba kombinovaného vedení přenosové a distribuční sítě ve variantě 2x400 kV + 2x110 kV. Konkrétně se jedná o určité úseky mezi rozvodnami Chodov a Čechy střed, dále pak o vyvedení výkonu z plánované rozvodny Praha sever a v neposlední řadě úsek vedení na Moravě mezi vesnicemi Opatovice a Konice [15].

Odborná literatura věnující se problémům spojených s kombinovanými vedeními není nijak rozsáhlá. Jedná se např. o publikace [16], [17], [18], [20] a [21]. H. Stegeman, H. Lugschitz a kolektiv se v práci [16] zabývají designem nových stožárů s cílem minimalizování jejich vlivu na okolí. Je zde řešena možná redukce elektromagnetického

pole, inovativní přístup v údržbě a také estetický dopad nových stožárů na ráz krajiny. Vyšetřením elektromagnetického pole v okolí kombinovaného vedení se zabývá publikace [17] od G. Fenga a kolektivu a publikace [18] od W. Liua a kolektivu. V obou případech je elektrické a magnetické pole zkoumáno v rovině kolmé k vodičům (2D úloha). Řešení tohoto problému je provedeno simulací v profesionálním programu jako okrajová úloha pro skalární elektrický potenciál a vektorový magnetický potenciál. V publikaci [17] je zkoumán vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení pole. V publikaci [18] je zkoumán vliv konfigurace fází a průhybu fázových vodičů na rozložení elektrického a magnetického pole. Postup vyšetření elektromagnetického pole pomocí simulace však s sebou nese určité nevýhody. Problémem je volba hranice vyšetřované oblasti, která má vliv na získané výsledky. Tímto problémem jsem se zabýval v [19]. Simulace elektromagnetického pole řeší pouze stacionární pole a nedovolí tak sledovat změnu v čase. D. Westermann a A. Novitskiy se ve své práci [20] zaměřují na nesymetrii fázových proudů vznikající jako následek vzájemného ovlivňování obvodů na společném stožáru. V této publikaci je na modelu vedení složeného z dvojbranů respektován vliv vzájemných induktivních a kapacitních vazeb mezi vodiči pomocí napěťového a proudového zdroje. Výpočty jsou ovšem omezeny pouze na ustálený stav, přechodné děje nejsou v této práci řešeny. Výsledky výpočtů nesymetrií jsou konfrontovány s měřeními na kombinovaných vedeních německé přenosové soustavy. Vlivem nesymetrie fázových proudů na chod ochran se zabýval B. Li a kol. v publikaci [21]. V této práci je také provedena optimalizace konfigurací fázových vodičů s cílem minimalizace proudové nesymetrie. Touto problematikou jsem se zabýval v [22].

Je velmi důležité říct, že jsou-li na jednom stožáru umístěny linky stejné napěťové hladiny, je pak přenášený výkon jednotlivých linek souměřitelný a vzájemné ovlivňování mezi linkami je do určité míry možné kompenzovat vhodným rozmístěním fázových vodičů a jejich transpozicí. U kombinovaných vedení nesoucí linky PS a DS na jednom stožáru, je situace oproti klasickým vícenásobným vedením odlišná. Rozdíl mezi přenášenou elektrickou energií linek PS a DS se může výrazně lišit a tím se problémy, které se u standardního vícenásobného vedení nezdají být zásadní, mohou jevit u kombinovaného vedení jako důležité. Jak je patrné z rozboru publikací uvedených v této kapitole, tak tato problematika nebyla dosud významně analyzována a zkoumána. Z tohoto důvodu je tato dizertační práce zaměřena zejména na analýzu pomalých přechodných dějů. Za tímto účelem byl vytvořen model kombinovaného vedení se soustředěnými parametry, který umožňuje respektovat vzájemné ovlivňování mezi vodiči jednotlivých linek. Pro

určité přiblížení se vlastnostem modelu s rozprostřenými parametry je vytvořený model vedení sestavený z kaskádního zapojení dvojbranů, což v omezené míře umožňuje zohlednit změnu veličin v prostoru (podél vedení). Rychlé přechodné děje na kombinovaném vedení nejsou v této práci řešeny. Algoritmy řešící telegrafní rovnice rychlých přechodných dějů na modelu s rozprostřenými parametry jsou dobře použitelné pro sledování dějů trvajících řádově ns až stovky μ s. Využití těchto modelů s příslušnými řešícími algoritmy pro analýzu pomalých přechodných dějů, jejichž trvání se pohybuje v řádu desítek ms (např. zkratová porucha), se jeví jako značně komplikované.

1.3. Cíle dizertační práce

V první části svého doktorského studia jsem se zabýval analýzou vzájemného ovlivňování mezi linkami během standardního provozu za ustáleného stavu. Působení vzájemných vazeb mezi vodiči má za následek vznik proudové a napěťové nesymetrie jednotlivých linek. Pro řešení dizertační práce jsem si vytyčil několik cílů, které jsou shrnuty v následujících bodech:

- posouzení vlastností různých konstrukčních uspořádání kombinovaných stožárů
- provedení analýzy elektrického a magnetického v okolí kombinovaného vedení s cílem nalezení optimální konfigurace fází
- vytvoření obecného modelu kombinovaného vedení obvodem se soustředěnými parametry v časové oblasti
- posouzení vlivu vzájemných induktivních a kapacitních vazeb mezi vodiči
- provedení výpočtů poruchových a jiných přechodných dějů (vypínání/zapínání linky, zkratová porucha, cyklus opětovného zapnutí apod.)
- provedení diskuze vzájemného ovlivňování linek na základě získaných výsledků

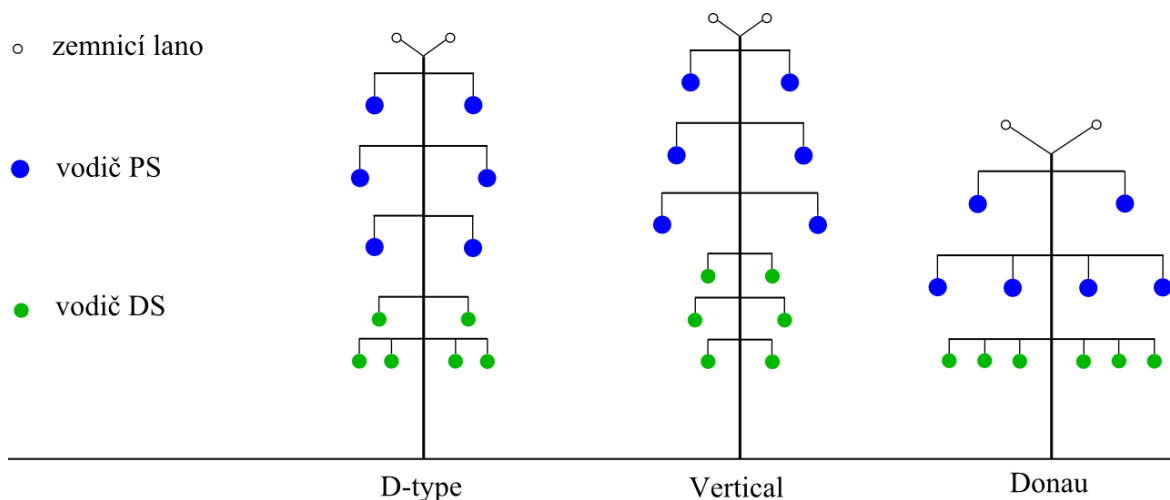
Tato dizertační práce je rozdělena na 6 hlavních kapitol. V druhé kapitole jsou popsána možná konstrukční uspořádání kombinovaných vedení včetně vzájemného porovnání jejich vlastností. Třetí kapitola je zaměřena na analýzu elektromagnetického pole. Je zde zkoumán vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení výsledného elektromagnetického pole. Ve čtvrté kapitole je představen vytvořený dvojbranový model vedení včetně matematického popisu. V páté kapitole jsou prezentovány výsledky výpočtů na modelovém vedení pro vybrané přechodné děje, které se mohou standardně objevit během provozu kombinovaného vedení. V šesté kapitole jsou uvedeny výsledky simulací a ty jsou porovnávány s výpočty na modelovém vedení.

2. Technické řešení kombinovaných vedení

Při návrhu stožárové konstrukce je třeba vzít v úvahu několik faktorů. Z celkového pohledu elektroenergetického systému je přenosová soustava (PS) brána jako nadřazená či prioritní. Umístění linek přenosové a distribuční soustavy (DS) na společný stožár by mělo být provedeno takovým způsobem, aby mechanická porucha distribuční linky (pád vodiče) nezpůsobila poškození přenosové linky. S ohledem na častější údržbu distribučních linek je vhodné rozmístit vodiče takovým způsobem, aby byly tyto vodiče snáze přístupné. Vyhovět těmto požadavkům je v principu možné dvěma způsoby.

2.1. Linky PS umístěné nad linkami DS

Vodiče přenosových linek jsou umístěny nad vodiči distribučních linek, které jsou tak dobře přístupné. Z konstrukčního pohledu je nevýhodou tohoto uspořádání výška stožáru, která může přesáhnout 80 m. Možná konstrukční uspořádání popsaná v [23] jsou uvedena na Obr. 1. Modře jsou naznačeny fázové vodiče přenosové soustavy, zeleně fázové vodiče distribuční soustavy a bíle pak zemnicí lana.

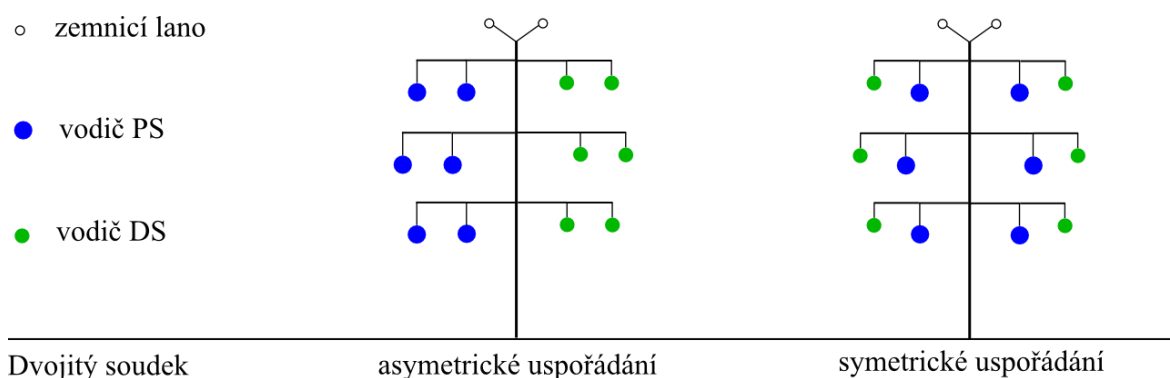


Obr. 1 Linky PS umístěny nad linkami DS

Jak je patrné z Obr. 1, stožárová konstrukce Donau umožňuje oproti stožárům D-type a Vertical určitým způsobem redukovat nežádoucí výšku stožáru. U kombinovaného stožáru Donau jsou vodiče distribučních linek v horizontální rovině, nad nimi jsou pak do trojúhelníka rozmístěné vodiče přenosových linek. Nevýhodou tohoto uspořádání je širší ochranné pásmo vedení.

2.2. Linky PS umístěny vedle linek DS

Toto uspořádání linek umožňuje snížit celkovou výšku stožáru a s ohledem na požadavky popsané v úvodu této kapitoly připadají v úvahu dvě varianty provedení. První je asymetrická varianta, kdy na jedné straně stožáru jsou přenosové linky a na druhé straně pak distribuční linky. Výhodou tohoto uspořádání je dobrý přístup k linkám obou napěťových hladin při provádění údržby. Nevýhodou je rozdílná hmotnost izolátorů a fázových vodičů přenosových a distribučních linek, která vede na mechanické namáhání dřívku a ostatních konstrukčních částí stožáru. Druhou možností je pak symetrická varianta, u které je vhodné umístit přenosové linky blíže osy stožáru, distribuční linky pak na vnějšek. U tohoto uspořádání je možné očekávat užší ochranné pásmo vedení. Nevýhodou je zhoršený přístup k přenosovým linkám. Na následujícím obrázku je znázorněna jak asymetrická, tak i symetrická varianta pro stožárovou konstrukci Dvojitý soudek [23]. Barevné označení vodičů je totožné jako u předchozího obrázku.



Obr. 2 Linky PS umístěny vedle linek DS

V provozu jsou již také kombinovaná vedení se stožáry nesoucí 6 linek. Příkladem může být stožárová konstrukce Soudek 4x400 kV a 2x110 kV blíže popsaná v příloze B. Toto konstrukční řešení šestinásobného vedení je však značně komplikované.

3. Analýza elektromagnetického pole

Analýza elektromagnetického pole v okolí vícenásobných vedení byla již v minulosti prováděna a je na ní možné aplikovat odvozené vztahy uvedené např. v [24],[25]. Ty pro analýzu elektrického a magnetického pole za účelem posouzení dodržení hygienických norem řeší pouze 2D pole v místě největšího průhybu vodičů. Tento postup předpokládá dlouhé rovnoběžné vodiče a harmonický ustálený stav. Pak je možné vyšetřovat elektrické a magnetické pole v rovině kolmé k vodičům. Tyto algoritmy určují výsledné elektrické a magnetické pole v libovolném bodě roviny pomocí superpozice polí od jednotlivých vodičů při použití fázorové reprezentace budících veličin. U kombinovaných vedení je situace oproti klasickým vícenásobným vedením odlišná v tom, že budící veličiny elektrického pole (elektrický náboj vodiče závisící na jeho pozici a napětí) i magnetického pole (proud daného vodiče), se mohou u vodičů linek PS a DS značně lišit. Tím je proces kompenzace vzájemného vlivu vodičů jednotlivých linek (umožněný jejich fázovým posuvem) za cílem redukování výsledných hodnot elektrického a magnetického pole významnější a proto je tato problematika zařazena také do této práce. Algoritmus použitý pro vyšetření elektrického pole navíc využívá metodiku, která je aplikovaná v kapitolách 4.1.2 a 4.2. v procesu určování kapacit vodičů a vzájemných kapacit mezi vodiči.

3.1. Rozložení magnetického pole

V rovině x a y kolmé k vodičům je možné vyjádřit složky fázoru intenzity magnetického pole vybuzené proudem i -tého vodiče na pozici $[x_i, y_i]$ v libovolném bodě P této roviny se souřadnicemi $[x_p, y_p]$ pomocí vztahů (1) a (2)

$$\bar{H}_{xi}(P) = \frac{\bar{I}_i}{2\pi} \frac{y_i - y_p}{r_i^2} \quad (1)$$

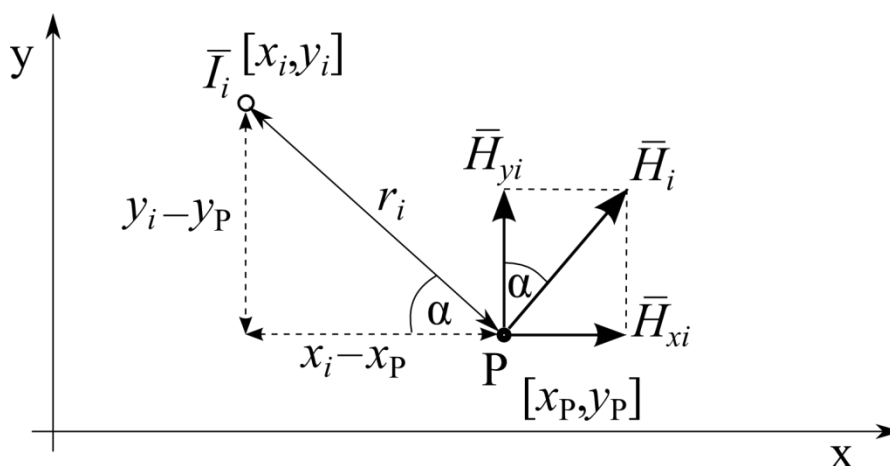
$$\bar{H}_{yi}(P) = \frac{\bar{I}_i}{2\pi} \frac{x_i - x_p}{r_i^2} \quad (2)$$

kde: \bar{I}_i ... fázor proudu i -tého vodiče (A)

r_i ... vzdálenost mezi i -tým vodičem a bodem P (m)

x_i, y_i ... x-ová, y-ová souřadnice i -tého vodiče v prostoru (m)

x_p, y_p ... x-ová, y-ová souřadnice bodu P v prostoru (m)



Obr. 3 Rozložení intenzity magnetického pole do složek [23]

Intenzita magnetického pole v bodě P v soustavě s m fázovými vodiči a n zemnicími lany je pak dána superpozicí účinků všech fázových vodičů, která se provádí po složkách x a y

$$\bar{H}_x(P) = \sum_{i=1}^{m+n} \bar{H}_{xi}(P) \quad (3)$$

$$\bar{H}_y(P) = \sum_{i=1}^{m+n} \bar{H}_{yi}(P) \quad (4)$$

Výsledná velikost intenzity magnetického pole v bodě P je pak dána

$$H_P = \sqrt{|\bar{H}_x(P)|^2 + |\bar{H}_y(P)|^2} \quad (5)$$

Pro posouzení hygienických limitů je nutné znát hodnotu magnetické indukce, jež se získá vynásobením vypočtené hodnoty intenzity magnetického pole permeabilitou prostředí μ (H/m)

$$B = \mu H \quad (6)$$

3.2. Rozložení elektrického pole

Pro analýzu elektrického pole je zapotřebí znát náboje na jednotlivých vodičích. Známá jsou však napětí jednotlivých vodičů. Vztah mezi napětími vodičů a náboji je dán kapacitní vazbami mezi vodiči a mezi vodičem a zemí, které lze vypočítat pomocí metody parciálních kapacit, jež je založena metodě zrcadlení [24]. Pro dané geometrické uspořádání vodičů lze vytvořit matici potenciálových koeficientů δ a její inverzí matici kapacitních koeficientů \mathbf{B} . Vztah mezi náboji, maticí kapacitních koeficientů a fázovými

napětími vodičů vůči zemi je možné vyjádřit maticově $\mathbf{Q} = \mathbf{BU}$. Pro lepší přehlednost je vhodné rozdělit sloupcovou matici nábojů \mathbf{Q} na submatice \mathbf{q}_1 , \mathbf{q}_2 a \mathbf{q}_0 naznačené v (7)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} & \mathbf{B}_{10} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} & \mathbf{B}_{20} \\ \mathbf{B}_{01} & \mathbf{B}_{02} & \mathbf{B}_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Submatice \mathbf{q}_1 obsahuje náboje \bar{Q}_i fázových vodičů vyšší napěťové hladiny, submatice \mathbf{q}_2 náboje \bar{Q}_i vodičů nižší napěťové hladiny a submatice \mathbf{q}_0 pak náboje \bar{Q}_i na zemnicích lanech. Sloupcovou matici fázových napětí vůči zemi \mathbf{U} je také vhodné rozdělit na \mathbf{u}_1 a \mathbf{u}_2 pro vyšší a nižší napěťovou hladinu. Napětí zemních lan bylo uvažováno nulové. Matice kapacitních koeficientů \mathbf{B} je rozdělena na submatice \mathbf{B}_{ii} a \mathbf{B}_{ij} , které respektují vlastní kapacity a kapacitní vazby vodičů vyšší napěťové hladiny, nižší napěťové hladiny a zemních lan. Složky x a y fázoru intenzity elektrického pole v libovolném bodě prostoru P závisí na fázoru náboje \bar{Q}_i i -tého vodiče a je možné je popsat následujícími vztahy [25]

$$\bar{E}_{xi}(P) = \frac{\bar{Q}_i}{2\pi\epsilon\ell} (x_i - x_P) \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_i'^2} \right) \quad (8)$$

$$\bar{E}_{yi}(P) = \frac{\bar{Q}_i}{2\pi\epsilon\ell} \left(\frac{y_i - y_P}{r_i^2} + \frac{y_i + y_P}{r_i'^2} \right) \quad (9)$$

kde: ϵ ... permitivita prostředí (F/m)

ℓ ... délka vodiče (m)

r_i' ... vzdálenost mezi obrazem i -tého vodiče a bodem P (m)

Intenzita elektrického pole v bodě P je dána superpozicí, která se opět provádí po složkách

$$\bar{E}_x(P) = \sum_{i=1}^{m+n} \bar{E}_{xi}(P) \quad (10)$$

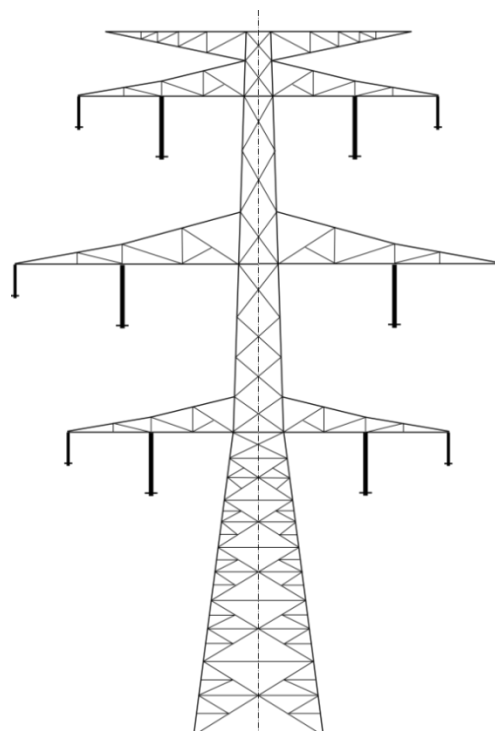
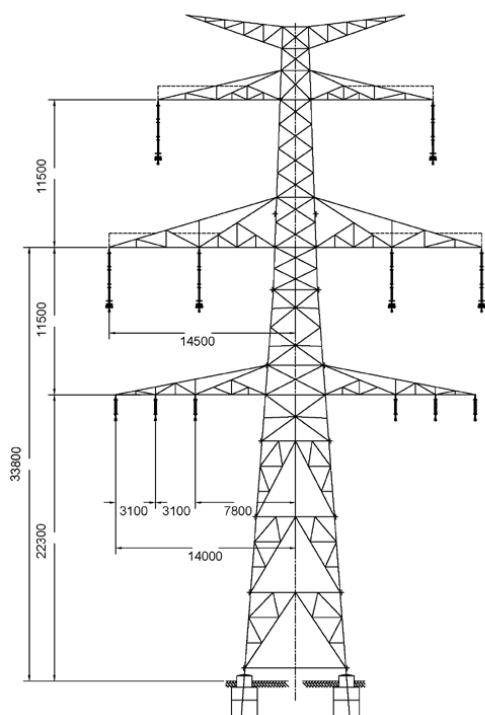
$$\bar{E}_y(P) = \sum_{i=1}^{m+n} \bar{E}_{yi}(P) \quad (11)$$

Velikost intenzity elektrického pole v bodě je možné určit analogicky jako v (5)

$$E_P = \sqrt{|\bar{E}_x(P)|^2 + |\bar{E}_y(P)|^2} \quad (12)$$

3.3. Ilustrativní příklady výpočtů rozložení elektrického a magnetického pole pod vedením

Uvedený algoritmus výpočtu rozložení elektrického a magnetického pole lze použít pro libovolný typ kombinovaného stožáru. Z možných variant byly pro výpočet uvažovány dva stožáry – Donau a Dvojitý soudek. Jejich konstrukční uspořádání je uvedeno na Obr. 4 a 5.



Obr. 4 Konstrukční uspořádání stožáru Donau

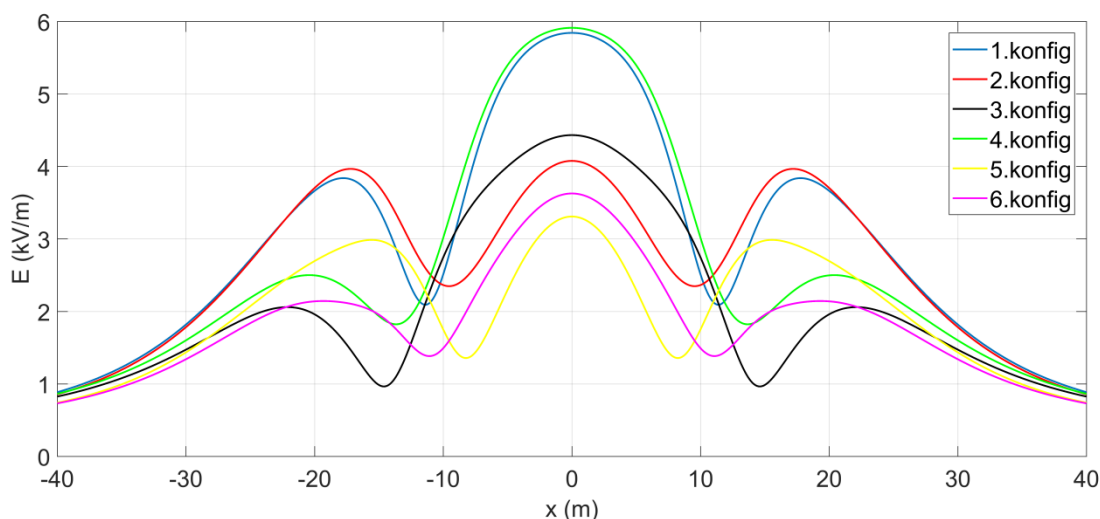
Obr. 5 Konstrukční uspořádání stožáru Dvojitý soudek

Oba stožáry nesou dvě přenosové linky o napětí 400 kV a dvě distribuční linky o napětí 110 kV, přičemž rozmístění odpovídá Obr. 1 a Obr. 2 – symetrická varianta. Rozložení intenzity elektrického a magnetického v rovině kolmé k vodičům je provedeno ve výšce 1,8 m nad zemí (hodnota definována normou) do vzdálenosti 40 m od osy stožáru po obou stranách. Výpočty byly provedeny pro maximální průhyb vodičů, kdy je výška spodního vodiče 8 m nad zemí. Pak je možné proud zemnicími lany (vznikající jako důsledek nesymetrií) pro výpočet magnetického pole zanedbat, protože s ohledem na jejich velikost a vzdálenost zemnicích lan od vyšetřované oblasti se uplatní jen minimálně. Pro oba typy stožárů je uvažována efektivní hodnota proudu pro fázové vodiče na 400 kV rovna 1000 A, pro fázové vodiče na 110 kV pak 300 A. U obou stožárů jsou výpočty provedeny pro jednu symetrickou a jednu asymetrickou konfiguraci fází na lince 400 kV následně skombinovanou se 6 různými variantami uspořádání vodičů linek 110 kV.

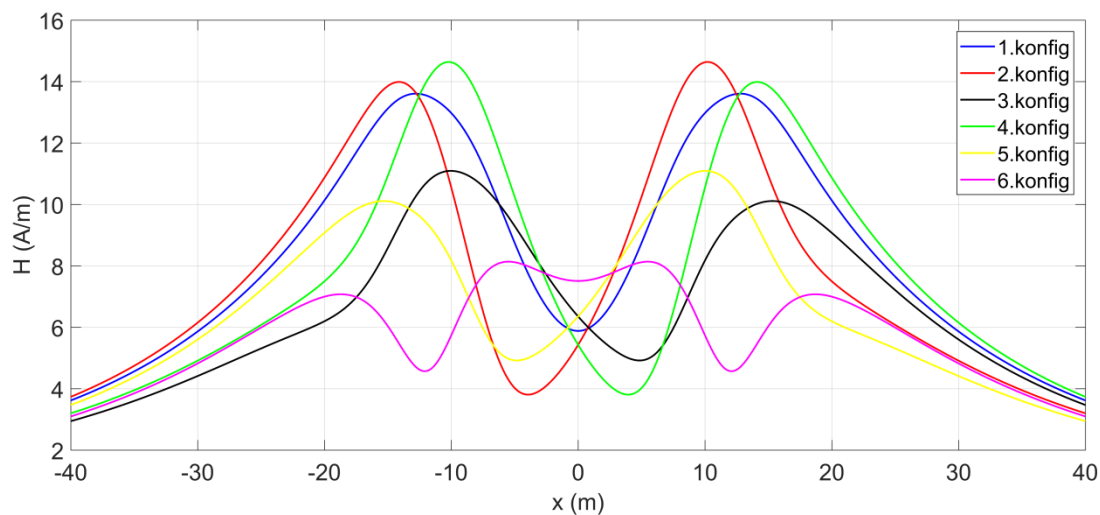
3.3.1. Vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení pole u stožáru Donau

Tab. 1 Symetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole

Symetrická konfigurace fází 400 kV		B B A C C A		
Symetrická konfigurace fází 110 kV		E_{\max} (kV/m)	H_{\max} (A/m)	B_{\max} (μ T)
1.	abc cba	5,844	16,5356	20,779
2.	acb bca	4,0783	14,4775	18,193
3.	bca acb	4,4338	12,9716	16,301
4.	bac cab	5,9135	17,2996	21,739
5.	cab bac	3,3106	9,7563	12,26
6.	cba abc	3,6287	7,5123	9,4403



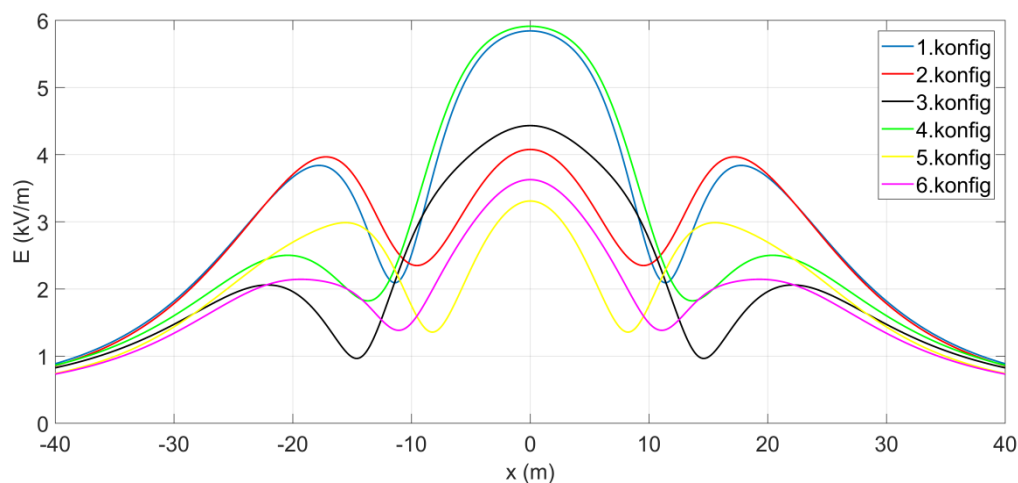
Obr. 6 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Donau pro symetrickou konfiguraci



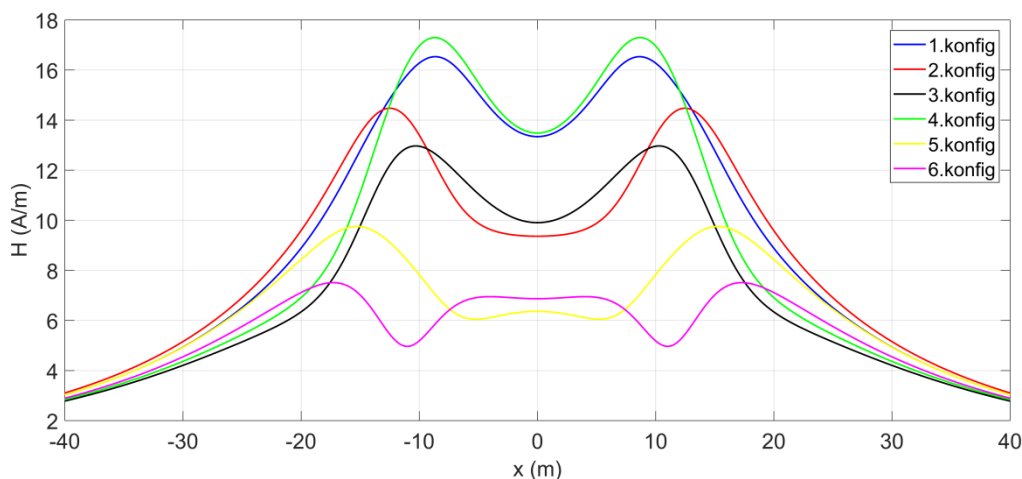
Obr. 7 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Donau pro symetrickou konfiguraci

Tab. 2 Asymetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole

Asymetrická konfigurace fází 400 kV		<table style="border: none; margin: 0 auto;"> <tr> <td style="border: none;">B</td> <td style="border: none;">B</td> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none;"></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">A</td> <td style="border: none;">C</td> <td style="border: none;">A</td> <td style="border: none;">C</td> </tr> </table>			B	B			A	C	A	C
B	B											
A	C	A	C									
Asymetrická konfigurace fází 110 kV		E_{\max} (kV/m)	H_{\max} (A/m)	B_{\max} (μ T)								
1.	abc abc	4,1161	13,6112	17,104								
2.	acb acb	4,2164	14,6428	18,401								
3.	bca bca	3,2561	11,097	13,945								
4.	bac bac	4,2164	14,6428	18,401								
5.	cab cab	3,2561	11,097	13,945								
6.	cba cba	3,0176	8,1408	10,23								



Obr. 8 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Donau pro asymetrickou konfiguraci



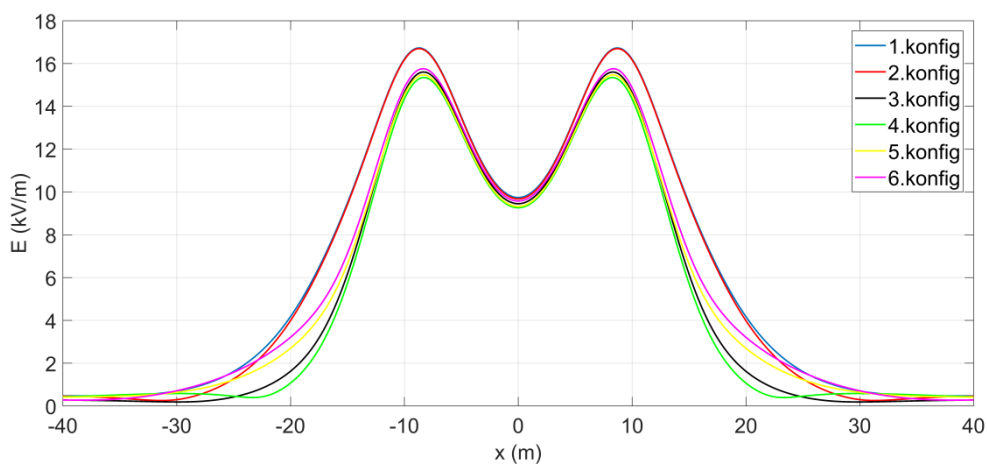
Obr. 9 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Donau pro asymetrickou konfiguraci

Provedené výpočty ukázaly, že volbou vhodné konfigurace fázových vodičů lze dosáhnout redukce elektrického a zejména magnetického pole. U elektrického pole je možné snížit maximální hodnotu přibližně o 40 %, u magnetického až o 57 %.

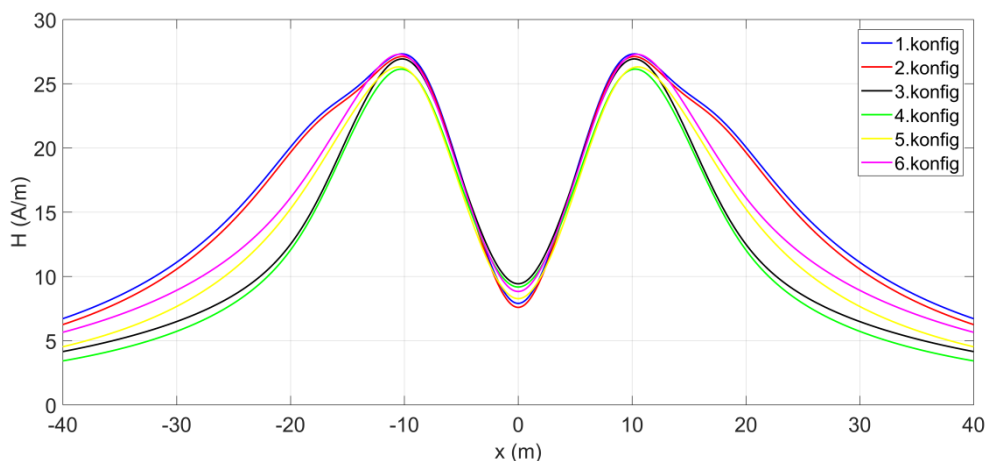
3.3.2. Vliv konfigurace fázových vodičů na rozložení pole u stožáru Dvojitý soudek

Tab. 3 Symetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole

Symetrická konfigurace fází 400 kV + 110 kV		E_{\max} (kV/m)	H_{\max} (A/m)	B_{\max} (μ T)
1.	c C C c b B B b a A A a	16,732	27,328	34,341
2.	b C C b c B B c a A A a	16,700	27,122	34,083
3.	b C C b a B B a c A A c	15,607	26,937	33,85
4.	a C C a b B B b c A A c	15,349	26,146	32,856
5.	a C C a c B B c b A A b	15,471	26,315	33,068
6.	c C C c a B B a b A A b	15,761	27,295	34,3



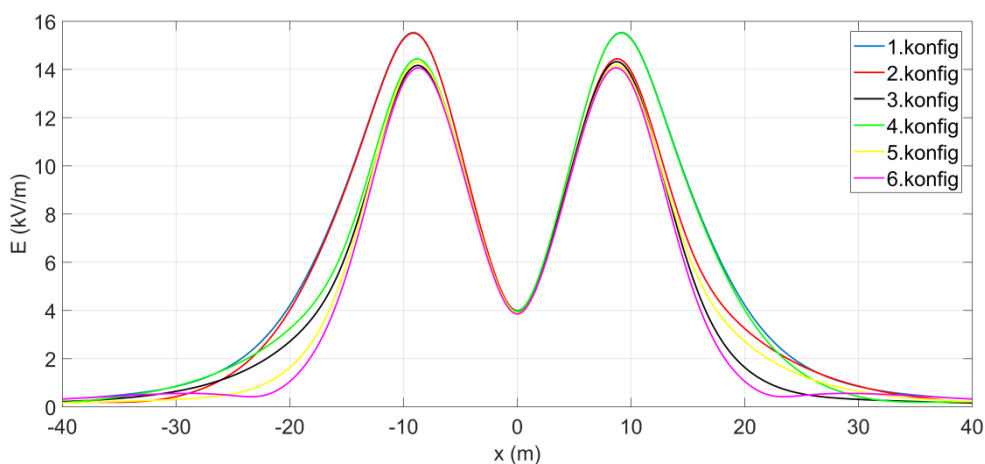
Obr. 10 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Dvojitý soudek pro symetrickou konfiguraci



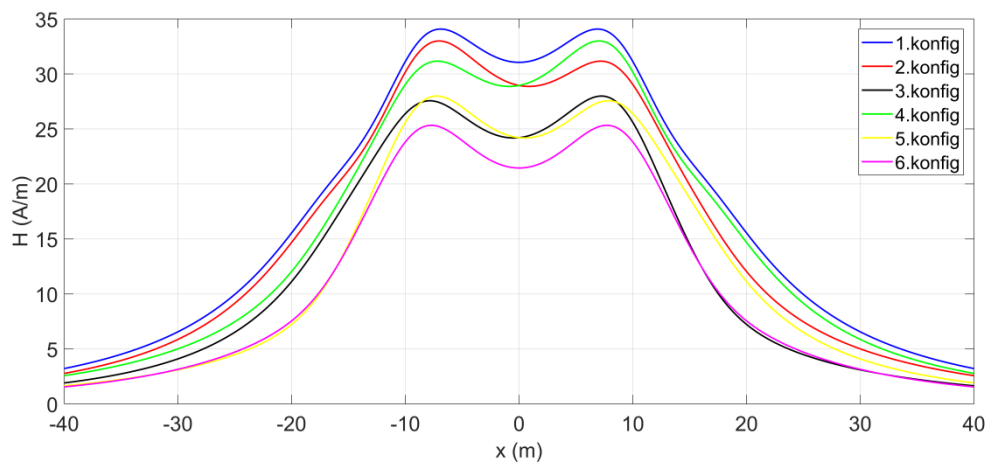
Obr. 11 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Dvojitý soudek pro symetrickou konfiguraci

Tab. 4 Asymetrické konfigurace fází a maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole

Asymetrická konfigurace fází 400 kV + 110 kV		E_{\max} (kV/m)	H_{\max} (A/m)	B_{\max} (μ T)
1.	c C A a b B B b a A C c	15,533	34,085	42,833
2.	b C A a c B B c a A C b	15,512	33,003	41,473
3.	a C A b c B B c b A C a	14,324	27,995	35,18
4.	c C A b a B B a b A C c	15,512	33,003	41,473
5.	b C A c a B B a c A C b	14,324	27,995	35,18
6.	a C A c b B B b c A C a	14,073	25,333	31,834



Obr. 12 Rozložení intenzity elektrického pole u stožáru Dvojitý soudek pro asymetrickou konfiguraci



Obr. 13 Rozložení intenzity magnetického pole u stožáru Dvojitý soudek pro asymetrickou konfiguraci

U stožáru Dvojitý soudek nemá změna konfigurace fází výrazný vliv na maximální hodnoty veličin elektrického a magnetického pole.

3.3.3. Zhodnocení variantních výpočtů rozložení elektrického a magnetického pole pod vedením

Na základě provedených variantních výpočtů v kapitolách 3.3.1. a 3.3.2. je možné učinit následující závěry:

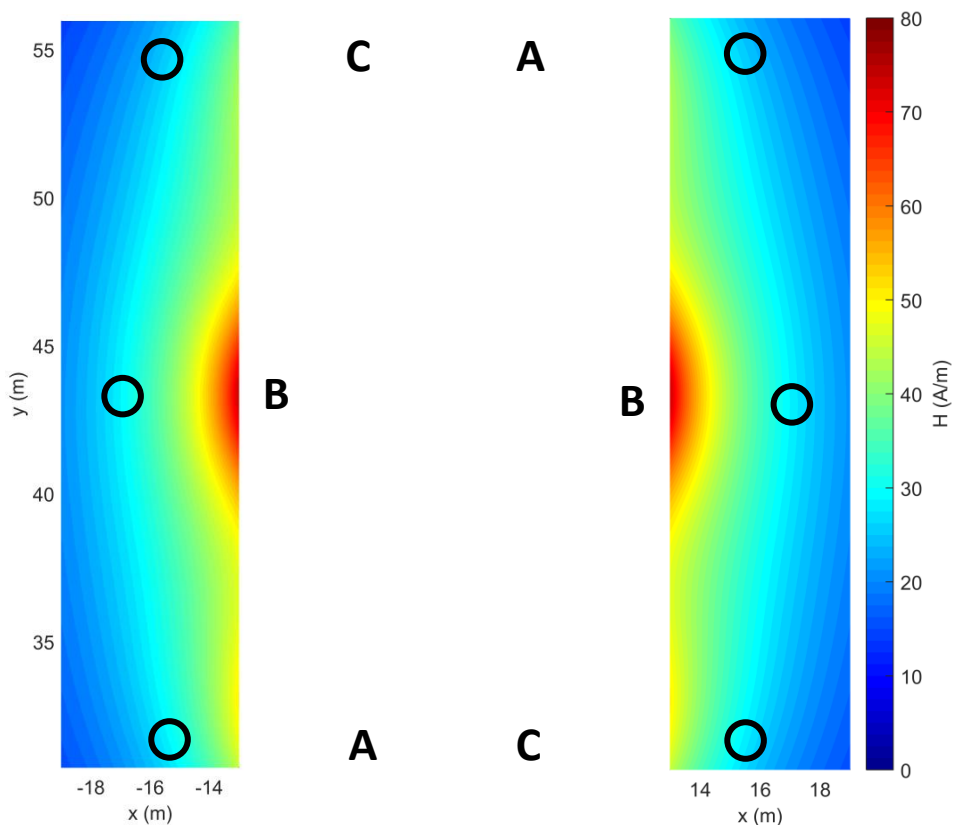
- Typová konstrukce a konfigurace fázových vodičů na stožáru má významný vliv na rozložení elektrického a magnetického pole pod vedením.
- U stožáru Donau je elektrické i magnetické pole rozprostřeno v širším pásmu oproti Dvojitému soudku, u něhož je pole koncentrováno do oblasti blíže osy stožáru.
- Pro symetrická i asymetrická uspořádání fází dosahuje stožár Donau nižších hodnot a jeví se jako výhodnější.
- Nejméně příznivě se jeví ty symetrické konfigurace fází, které mají u osy stožáry stejné fáze jak na 400 kV tak na 110 kV.
- Pro asymetrická rozmístění fázových vodičů je vhodné rozmístění fázových vodičů, které eliminuje umístění stejné fáze u vzájemně blízkých vodičů 400 kV a 110 kV.

3.4. Rozbor elektrického a magnetického pole v oblasti mezi vodiči

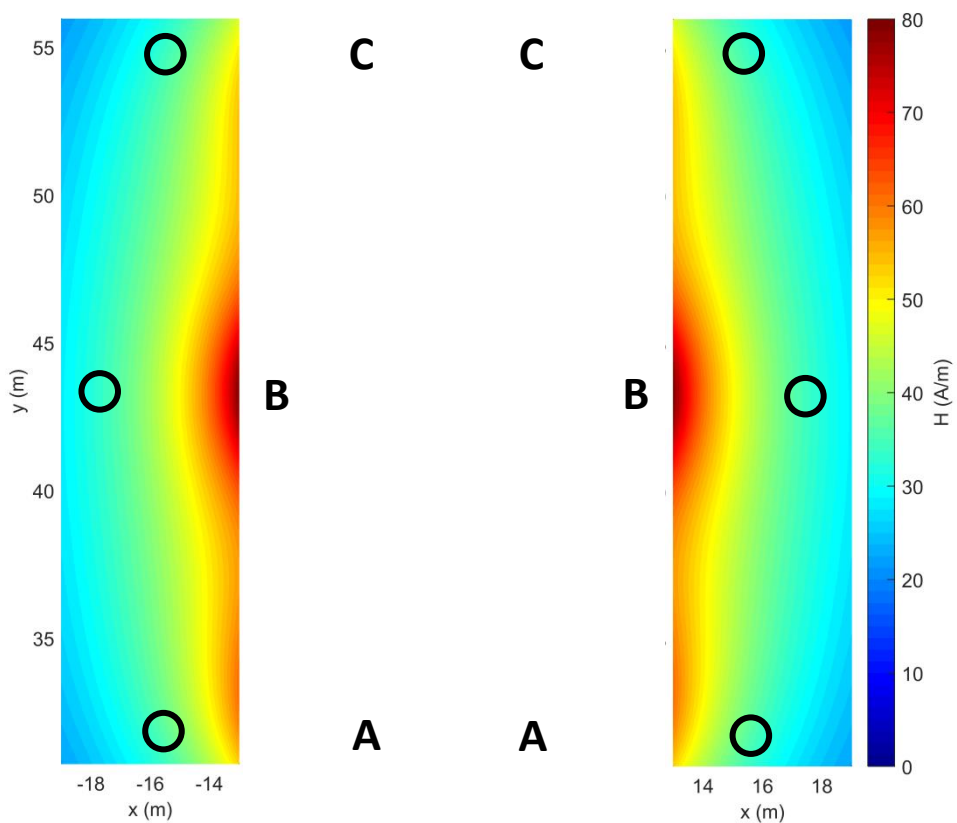
Umístění linek PS a DS na jednom stožáru má za následek, že pole vybuzené jednotlivými linkami se vzájemně ovlivňují. Typ stožárové konstrukce a volba umístění vodičů jednotlivých linek může toto ovlivňování do jisté míry omezit.

3.4.1. Magnetické pole v prostoru vypnutých vodičů 110 kV vybuzené vodiči 400 kV

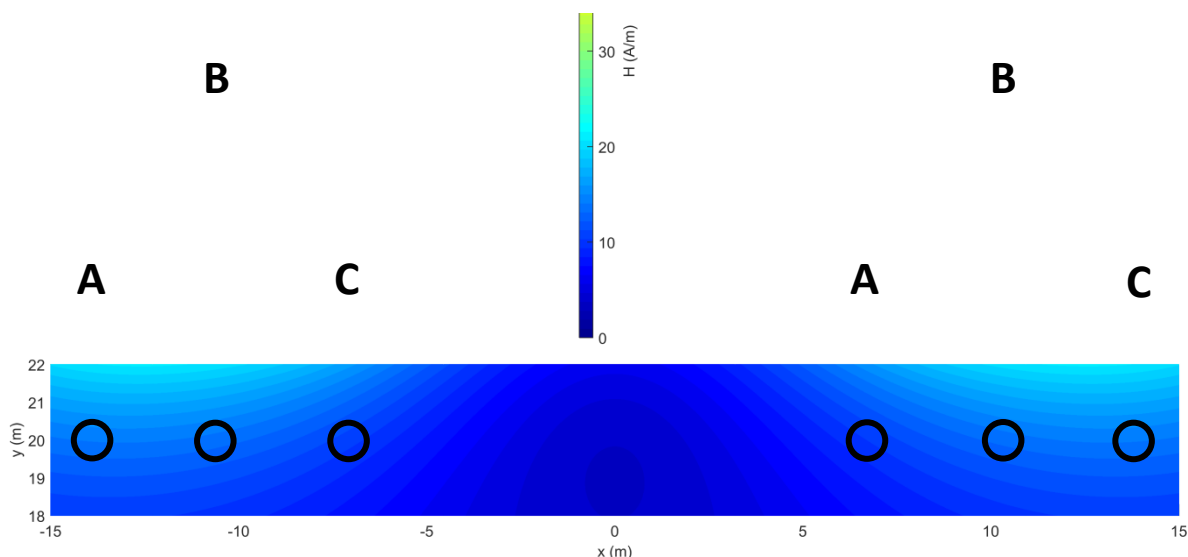
Pro stožárové konstrukce Donau a Dvojitý soudek bude nejprve analyzováno magnetické pole vybuzené linkami 400 kV v prostoru vodičů 110 kV, které jsou vypnuté. Výpočty jsou provedeny pro symetrickou a asymetrickou konfiguraci fází vodičů 400 kV – viz. Tab. 1 až Tab. 4. Zatížení linek 400 kV je stejné jako v případě výpočtů v kap. 3.3.1 a 3.3.2., kdy efektivní hodnota proudu odpovídá 1000 A.



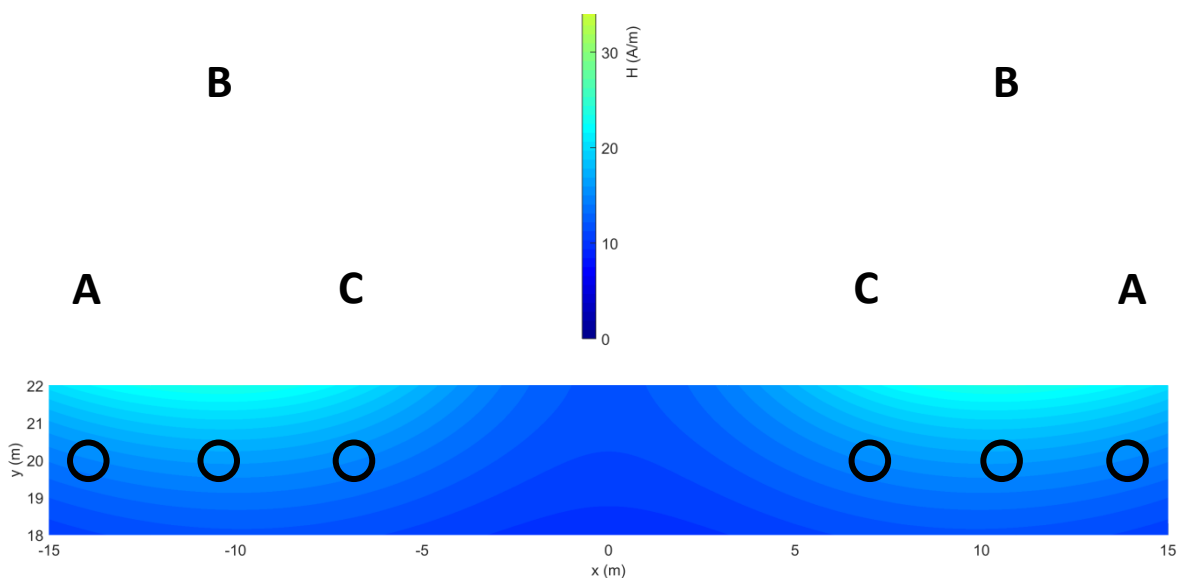
Obr. 14 Magnetické pole u Dvojitého soudku vybuzené vodiči 400 kV s asymetrickým uspořádáním fází



Obr. 15 Magnetické pole u Dvojitého soudku vybuzené vodiči 400 kV se symetrickým uspořádáním fází



Obr. 16 Magnetické pole u stožáru Donau vybuzené vodiči 400 kV s asymetrickým uspořádáním fází



Obr. 17 Magnetické pole u stožáru Donau vybuzené vodiči 400 kV se symetrickým uspořádáním fází

Provedené výpočty rozložení magnetického pole v prostoru vodičů 110 kV ukázaly, že dosažené hodnoty intenzity magnetického pole u stožáru Dvojitý soudek jsou vyšší než pro stožár Donau. To platí jak pro symetrické, tak pro asymetrické rozmístění fází 400 kV. U stožárové konstrukce Dvojitý soudek se může pole vybuzené vodiči 400 kV účinně kompenzovat u osy stožáru mezi těmito vodiči. V oblasti vodičů 110 kV linek umístěných vně vodičů 400 kV je tato kompenzace již minimální a proto intenzita magnetického pole dosahuje vyšších hodnot. U stožáru Donau je rozmístění vodičů 400 kV provedeno tím způsobem, že umožňuje kompenzaci magnetického pole v prostoru vodičů 110 kV. Záleží zejména na konfiguraci fází spodních vodičů u osy stožáru.

3.4.2. Rozdělení elektrických nábojů na jednotlivé vodiče 110 kV

Náboje na jednotlivých vodičích je možné určit z rovnice (7), ze které vyplývá, že kapacitními vazbami s ostatními vodiči je indukovan náboj. Geometrickou nesymetrií těchto vazeb a rozdílnou hodnotou napětí linek PS a DS může být náboj zejména na vodičích 110 kV nerovnoměrně rozložen. Pro 1. symetrickou konfiguraci fází z Tab. 1 a pro 6. asymetrickou konfiguraci z Tab. 2 u stožáru Donau a pro 1. symetrickou konfiguraci z Tab. 3 a pro 6. asymetrickou konfiguraci z Tab. 4 u stožáru Dvojitý soudek je provedena analýza rozložení nábojů na jednotlivé vodiče 110 kV. Dále je zkoumán indukovaný náboj od jednotlivých systémů. Veličina Q_{ZVN_1} označuje velikost indukovaného náboje od vodičů 1. ZVN linky, Q_{ZVN_2} pak velikost indukovaného náboje od vodičů 2. ZVN linky. Veličina Q_{VVN_1} označuje velikost náboje indukovaného od vodičů 1. linky, Q_{VVN_2} pak velikost indukovaného náboje od vodičů 2. linky VVN. Pro uvažované konfigurace fází jsou tyto indukované náboje vztažené na 1 km délky zaznamenány v Tab. 5 až Tab. 8.

Tab. 5 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro symetrickou konfiguraci fází na stožáru Donau

	1. linka 110 kV			2. linka 110 kV		
	a ₁	b ₁	c ₁	c ₂	b ₂	a ₂
Q	6,23.10 ⁻⁴	1,15.10 ⁻³	5,39.10 ⁻⁴	5,39.10 ⁻⁴	1,15.10 ⁻³	6,23.10 ⁻⁴
Q _{ZVN_1}	1,18.10 ⁻⁴	3,88.10 ⁻⁴	1,25.10 ⁻⁴	2,03.10 ⁻⁵	6,20.10 ⁻⁵	4,58.10 ⁻⁵
Q _{ZVN_2}	4,58.10 ⁻⁵	6,20.10 ⁻⁵	2,03.10 ⁻⁵	1,25.10 ⁻⁴	3,88.10 ⁻⁴	1,18.10 ⁻⁴
¹⁾ Q _{VVN1} , ²⁾ Q _{VVN2}	²⁾ 2,62.10 ⁻⁵	²⁾ 3,07.10 ⁻⁵	²⁾ 3,64.10 ⁻⁵	¹⁾ 3,64.10 ⁻⁵	¹⁾ 3,07.10 ⁻⁵	¹⁾ 2,62.10 ⁻⁵

Tab. 6 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro asymetrickou konfiguraci fází na stožáru Donau

	1. linka 110 kV			2. linka 110 kV		
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	c ₂
Q	9,09.10 ⁻⁴	1,15.10 ⁻³	8,09.10 ⁻⁴	8,09.10 ⁻⁴	1,15.10 ⁻³	9,09.10 ⁻⁴
Q _{ZVN_1}	3,5.10 ⁻⁴	3,88.10 ⁻⁴	3,12.10 ⁻⁴	2,03.10 ⁻⁵	6,19.10 ⁻⁵	4,58.10 ⁻⁵
Q _{ZVN_2}	4,58.10 ⁻⁵	6,19.10 ⁻⁵	2,03.10 ⁻⁵	3,12.10 ⁻⁴	3,88.10 ⁻⁴	3,5.10 ⁻⁴
¹⁾ Q _{VVN1} , ²⁾ Q _{VVN2}	²⁾ 1,35.10 ⁻⁵	²⁾ 3,07.10 ⁻⁵	²⁾ 6,38.10 ⁻⁵	¹⁾ 6,38.10 ⁻⁵	¹⁾ 3,07.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,35.10 ⁻⁵

Tab. 7 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro symetrickou konfiguraci fází na stožáru Dvojitý soudek

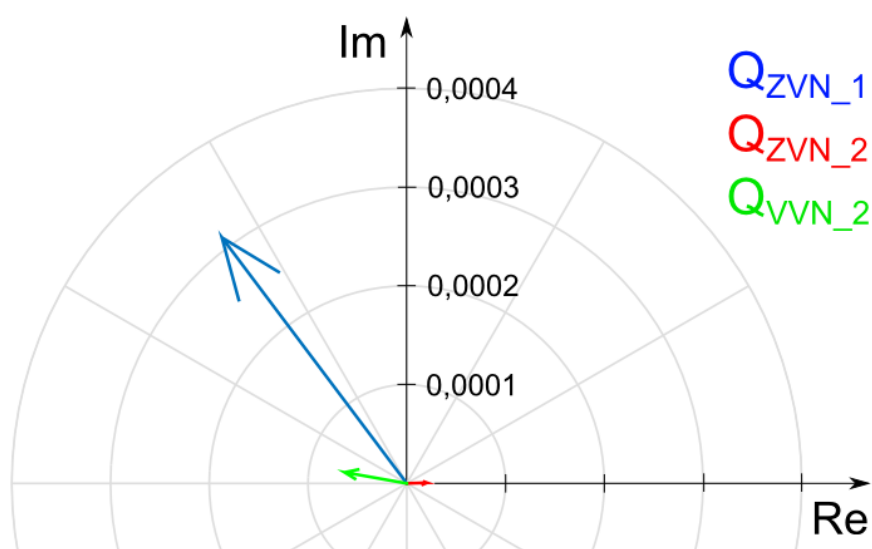
	1. linka 110 kV			2. linka 110 kV		
	a ₁	b ₁	c ₁	c ₂	b ₂	a ₂
Q	2,98.10 ⁻⁴	3,79.10 ⁻⁴	3,34.10 ⁻⁴	3,34.10 ⁻⁴	3,79.10 ⁻⁴	2,98.10 ⁻⁴
Q _{ZVN_1}	2,53.10 ⁻⁴	7,83.10 ⁻⁵	2,27.10 ⁻⁴	1,96.10 ⁻⁵	4,96.10 ⁻⁵	1,48.10 ⁻⁵
Q _{ZVN_2}	1,48.10 ⁻⁵	4,96.10 ⁻⁵	1,96.10 ⁻⁵	2,27.10 ⁻⁴	7,83.10 ⁻⁵	2,53.10 ⁻⁴
¹⁾ Q _{VVN1} , ²⁾ Q _{VVN2}	²⁾ 1,30.10 ⁻⁵	²⁾ 1,60.10 ⁻⁵	²⁾ 1,46.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,46.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,60.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,30.10 ⁻⁵

Tab. 8 Rozdělení nábojů na vodičích 110 kV a indukované náboje od paralelních systémů pro asymetrickou konfiguraci fází na stožáru Dvojitý soudek

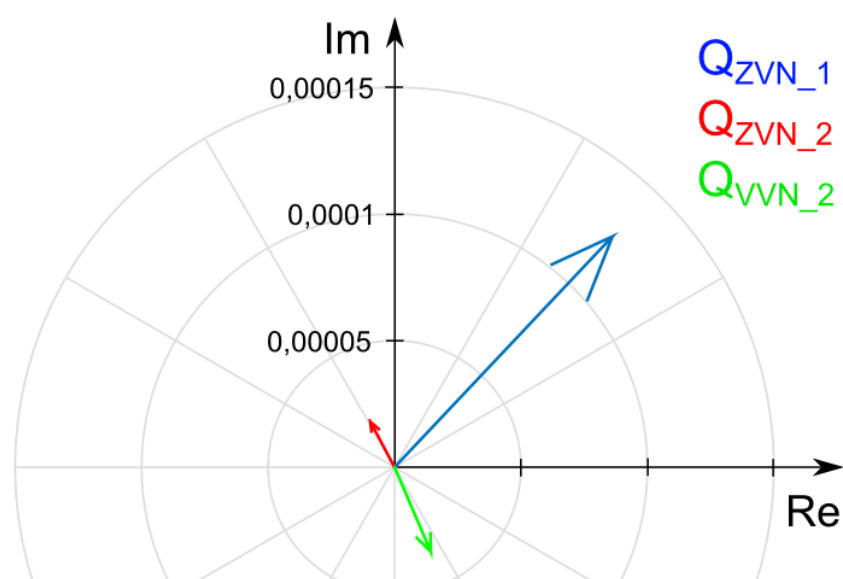
	1. linka 110 kV			2. linka 110 kV		
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	c ₂
Q	1,08.10 ⁻³	3,80.10 ⁻³	1,05.10 ⁻³	1,05.10 ⁻³	3,80.10 ⁻³	1,08.10 ⁻³
Q _{ZVN_1}	7,24.10 ⁻⁴	7,83.10 ⁻⁵	6,75.10 ⁻⁴	1,96.10 ⁻⁵	4,96.10 ⁻⁵	1,48.10 ⁻⁵
Q _{ZVN_2}	1,48.10 ⁻⁵	4,96.10 ⁻⁵	1,96.10 ⁻⁵	6,75.10 ⁻⁴	7,83.10 ⁻⁵	7,24.10 ⁻⁴
¹⁾ Q _{VVN1} , ²⁾ Q _{VVN2}	²⁾ 1,89.10 ⁻⁵	²⁾ 1,60.10 ⁻⁵	²⁾ 2,40.10 ⁻⁵	¹⁾ 2,40.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,60.10 ⁻⁵	¹⁾ 1,89.10 ⁻⁵

Na základě získaných výsledků velikostí indukovaných nábojů je možné učinit několik závěrů. U stožáru Donau je velikost náboje indukovaná do vodičů dané VVN linky od vodičů bližší ZVN linky významně vyšší, než od druhé paralelní VVN linky. To je dáno výraznějším rozdílem ve velikosti napětí vodičů ZVN a VVN, neboť velikosti kapacitních vazeb jsou s ohledem na podobné vzdálenosti k vodičům bližší ZVN linky a k vodičům paralelní VVN linky souměřitelné. U stožáru Dvojitý soudek je poměr velikostí indukovaných nábojů do vodičů dané VVN linky od vodičů bližší ZVN linky oproti vodičům paralelní VVN linky ještě výraznější, což je ale způsobeno geometrickým uspořádáním linek na stožáru. Linky VVN jsou na stožáru umístěny vně linek ZVN a tak je vzájemná vzdálenost mezi vodiči obou VVN linek výrazně větší a to má za následek, že kapacitní vazby jsou nižší. Dále je možné pozorovat rozdíl mezi velikostmi indukovaných nábojů pro symetrické a asymetrické rozmístění fází. V případě symetrického uspořádání fází, kdy je daný vodič linky VVN umístěn nejbližšímu vodiči linky ZVN stejné fáze, je

velikost indukovaného náboje od vodičů linky ZVN nižší. To je způsobeno tím, že rozdíl napětí mezi vodičem VVN a ZVN stejné fáze je nižší a tak i indukovaný náboj, ačkoliv se jedná o nejsilnější kapacitní vazbu mezi vodiči ZVN a VVN. Náboj na jednotlivých vodičích je však ovlivněn nejen velikostí indukovaného náboje od vodičů paralelních linek, ale také fázovým posuvem. Indukovaný náboj je možné zobrazit v komplexní rovině viz. Obr. 18 a Obr. 19, kde jsou zaznamenány indukované náboje do vodiče první VVN linky ve fázi-c u stožárové konstrukce Donau pro asymetrické a pro symetrické rozmístění fází. Z důvodu rozdílných velikostí indukovaných nábojů pro obě varianty a pro lepší přehlednost zobrazovaných veličin je zvoleno rozdílné měřítko reálné a imaginární osy.



Obr. 18 Zobrazení indukovaných nábojů od paralelních linek do fáze-c 1. VVN linky pro asymetrické uspořádání fází



Obr. 19 Zobrazení indukovaných nábojů od paralelních linek do fáze-c 1. VVN linky pro symetrické uspořádání fází

4. Model vedení

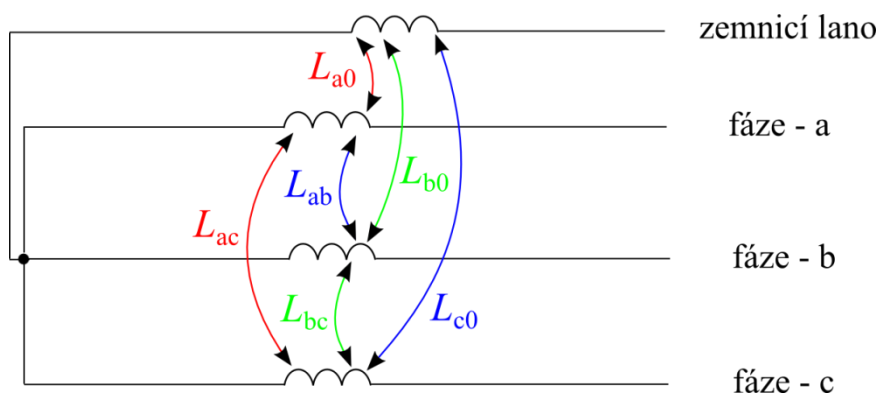
Na kombinovaném vedení dochází během provozu ke vzájemnému ovlivňování mezi vodiči jednotlivých linek, které je způsobeno vzájemnými induktivními a kapacitními vazbami. Ty se uplatňují jak během standardního provozu, tak zejména během přechodných dějů (spínání linek, zkratové poruchy a jejich vypínání apod.). Pro posouzení vzájemného ovlivňování mezi vodiči vlivem induktivních a kapacitních vazeb během přechodných dějů byl vytvořen model vedení s aktivními zdroji napětí a proudu.

4.1. Pasivní parametry

U přenosových vedení jsou důsledky geometrické nesymetrie způsobené induktivními a kapacitními vazbami zpravidla kompenzovány transpozicí vodičů. U kombinovaného vedení obsahujícího alespoň čtyři linky je konstrukční řešení transpozičního stožáru značně komplikované a obtížně realizovatelné, proto je v následující kapitole vyšetřováno netransponované vedení, kde je vliv induktivních a kapacitních vazeb mezi jednotlivými vodiči nejvýraznější. Vyjdeme z běžně užívaného modelu vedení tvořeného dvojbranem s prvky R , L , C a G . V následujících podkapitolách je stručně popsán způsob výpočtu těchto parametrů.

4.1.1. Indukčnost

Indukčnosti ve vícevodičové soustavě jsou dány vlastní indukčností vodičů (je dána součtem vnitřní a vnější indukčnosti) a vzájemnými indukčnostmi mezi vodiči všech paralelních soustav. Naznačení těchto vazeb v rámci jednoho obvodu společně se zemnicím lanem je uvedeno na Obr. 20.



Obr. 20 Induktivní vazby v rámci jednoho obvodu se zemnicím lanem

V případě, že je fázový vodič konstruován jako svazkový, jsou vzájemné induktivní vazby mezi fázemi uvažovány vůči tomuto svazku jako celku. Krok svazkových vodičů je

oproti vzdálenosti mezi fázemi výrazně nižší. Souhrnně se induktivní vazby vyjadřují pomocí matic indukčností. Uvažujeme-li čtyřnásobné vedení se dvěma linkami ZVN a dvěma linkami VVN, pak je možné označit první obvod 400 kV indexem 1, druhý obvod 400 kV indexem 2, první obvod 110 kV indexem 3, druhý obvod 110 kV indexem 4 a systém zemnicích lan indexem 0. Indukované napětí v důsledku induktivních vazeb v rámci prvního 400 kV obvodu lze pak zapsat maticově

$$\begin{bmatrix} u_{La1} \\ u_{Lb1} \\ u_{Lc1} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{12} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{13} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a3} \\ i_{b3} \\ i_{c3} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{14} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a4} \\ i_{b4} \\ i_{c4} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{10} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{01} \\ i_{02} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Matic \mathbf{L}_1 , \mathbf{L}_{12} , \mathbf{L}_{13} , \mathbf{L}_{14} , \mathbf{L}_{10} vyjadřují induktivní vazby spojené se systémem 1. Matice \mathbf{L}_1 respektuje vazby v rámci systému 1, matice \mathbf{L}_{12} , \mathbf{L}_{13} , \mathbf{L}_{14} , \mathbf{L}_{10} respektují induktivní účinky mezi systémy 1 a 2, 1 a 3, 1 a 4, 1 a 0. Matematicky lze všechny induktivní vazby vyjádřit následovně

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a1b1} & L_{a1c1} \\ L_{a1b1} & L_{b1} & L_{b1c1} \\ L_{a1c1} & L_{b1c1} & L_{c1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} L_{a1a2} & L_{a1b2} & L_{a1c2} \\ L_{b1a2} & L_{b1b2} & L_{b1c2} \\ L_{c1a2} & L_{c1b2} & L_{c1c2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{13} = \begin{bmatrix} L_{a1a3} & L_{a1b3} & L_{a1c3} \\ L_{b1a3} & L_{b1b3} & L_{b1c3} \\ L_{c1a3} & L_{c1b3} & L_{c1c3} \end{bmatrix} \quad (15a), (15b)$$

$$\mathbf{L}_{14} = \begin{bmatrix} L_{a1a4} & L_{a1b4} & L_{a1c4} \\ L_{b1a4} & L_{b1b4} & L_{b1c4} \\ L_{c1a4} & L_{c1b4} & L_{c1c4} \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{10} = \begin{bmatrix} L_{a101} & L_{a102} \\ L_{b101} & L_{b102} \\ L_{c101} & L_{c102} \end{bmatrix} \quad (15c), (15d)$$

Prvky matic indukčností závisí na geometrickém uspořádání vodičů v soustavě a lze je určit pomocí algoritmu uvedeného v [26]. Vliv zemní cesty je respektován fiktivním vodičem podle Rūdenbergovy teorie pomocí prvků

$$R_g = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \quad (\Omega/\text{km}) \quad L_g = 0,2 \ln \frac{562,9}{h \sqrt{f \gamma}} \quad (\text{mH}/\text{km}) \quad (16), (17)$$

kde: f ... frekvence (Hz)

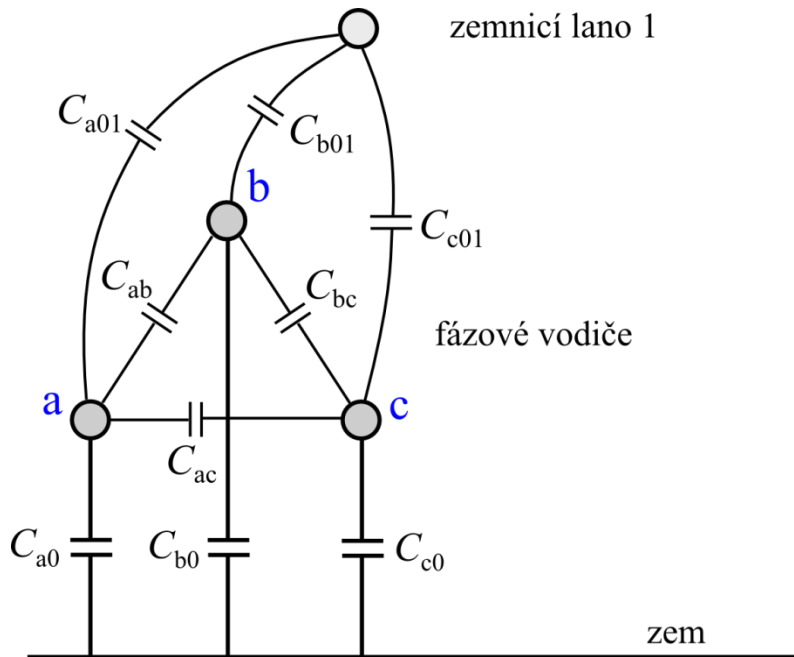
h ... střední výška vodičů nad zemí (m)

γ ... vodivost země (S/m)

Určení vodivosti země je možné pomocí měření, tento parametr se však podél vedení obvykle mění. Pro výpočty však bude vodivost země uvažována jako konstantní.

4.1.2. Kapacita

Výpočet kapacity odpovídá postupu uvedenému v [24]. Ve vícevodičové soustavě umístěné nad zemí (vodivý poloprostor) se uplatňují kapacitní vazby mezi jednotlivými vodiči a mezi vodiči a zemí. Následkem těchto vazeb dochází v závislosti na průběhu a velikosti napětí vodičů vůči zemi i napětí mezi vodiči (včetně vodičů paralelních systémů) k indukování kapacitních proudů.



Obr. 21 Kapacitní vazby v rámci jednoho obvodu se zemnicím lanem

Kapacitní vazby je možné definovat pomocí metody parciálních kapacit, která vychází z metody zrcadlení. Pokud vyjdeme z rovnice (7) a pro ilustraci uvažujeme vazby jednoho obvodu dle Obr. 21, lze vztah mezi nábojem fáze-a a potenciály jednotlivých vodičů zapsat následujícím způsobem

$$Q_a = \beta_{aa}\varphi_a + \beta_{ab}\varphi_b + \beta_{ac}\varphi_c + \beta_{a01}\varphi_{01} \quad (18)$$

Kapacitní koeficienty β se získávají inverzí matice potenciálových koeficientů [24]. Za předpokladu, že potenciál jednotlivých vodičů je roven fázovému napětí vůči zemi ($\varphi_i = \bar{U}_i$), lze náboj na prvním vodiči vyjádřit pomocí kapacit a napětí jednotlivých vodičů

$$\bar{Q}_a = C_{a0}\bar{U}_a + C_{ab}(\bar{U}_a - \bar{U}_b) + C_{ac}(\bar{U}_a - \bar{U}_c) + C_{a01}(\bar{U}_a - \bar{U}_{01}) \quad (19)$$

Označíme-li obecně kapacitní vazbu mezi i -tým a j -tým vodičem jako C_{ij} a fázor napětí i -tého resp. j -tého vodiče jako \bar{U}_i resp. \bar{U}_j , lze se znalostí kapacitních koeficientů β_{ij} porovnáním rovnic (18) a (19) získat známý vztah pro kapacitu i -tým a j -tým vodičem

$$C_{ij} = -\beta_{ij} \quad (20)$$

Podobně lze získat i vztah pro kapacitu i -tého vodiče vůči zemi

$$C_{i0} = \sum_{j=1}^{m+n} \beta_{ij} \quad (21)$$

U svazkových vodičů je uvažován pro výpočet vlastního potenciálového koeficientu a následně kapacitního ekvivalentní poloměr svazku. Vzájemné kapacitní vazby mezi fázemi uvažovány vůči tomuto svazku jako celku.

4.1.3. Odpor a svod

Odpor fázových vodičů je dán použitým materiálem, konstrukcí a provedením vodičů. Výsledná hodnota odporu je však ovlivněna více vlivy, kdy se uplatňuje provozní teplota vodiče, průhyb, kroucení a skinefekt. Pro potřeby výpočetního modelu je ovšem uvažován pouze vliv provozní teploty odpovídající 40°C. Ostatní korigující koeficienty nejsou ve výpočtu uvažovány. Na hladině ZVN (400 kV) je předpokládán trojsvazek, na hladině VVN (110 kV) pak jednoduchý vodič. Odpor jednotlivých fázových vodičů je možné určit pomocí vztahů (22),(23)

$$R_{400} = \frac{R_{SS}(1 + \alpha\Delta T)}{3} \quad (22)$$

$$R_{110} = R_{SS}(1 + \alpha\Delta T) \quad (23)$$

kde: R_{SS} ... hodnota stejnosměrného odporu jednoduchého vodiče pro teplotu 20 °C
(Ω/km)

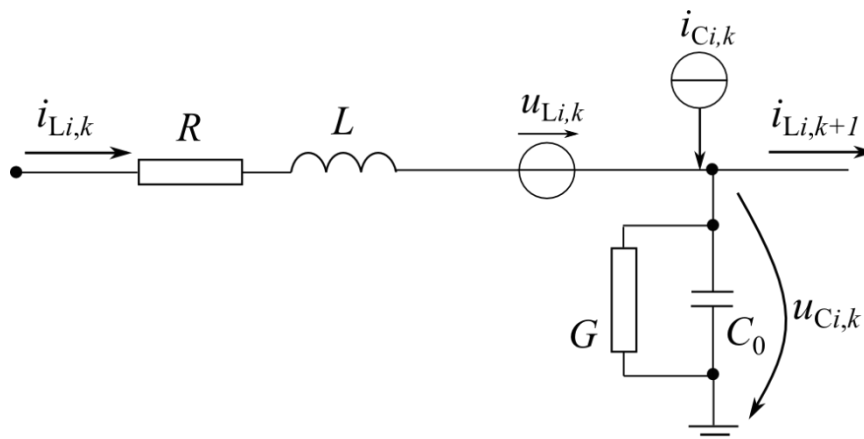
α ... lineární teplotní součinitel odporu (K^{-1})

ΔT ... rozdíl teplot (K)

Svod reprezentuje činné ztráty v příčném směru a zahrnuje jak svodové proudy na izolátorech, tak i koronu. Neexistuje však korektní empirický vzorec, který by určoval velikost svodu. Z tohoto důvodu je velikost svodu určena výpočtem z měření na vedení naprázdno z hodnot nabíjecího proudu a činných ztrát.

4.2. Základní element vedení respektující induktivní a kapacitní vazby

S ohledem na předpokládaný charakter zkoumaných jevů, byl uvažován model se soustředěnými parametry. Jednotlivé fázové vodiče vedení jsou modelovány jako kaskáda gama článků obsahující jednotlivé pasivní parametry R , L , C_0 a G definované v kap. 4.1.1. - 4.1.3. Vliv induktivních a kapacitních vazeb mezi jednotlivými vodiči je respektován pomocí napěťového respektive proudového zdroje – viz. Obr. 22.



Obr. 22 Základní gama element k -tého dvojbranu i -tého fázového vodiče

Indukované napětí vlivem induktivních vazeb k -tého dvojbranu i -tého vodiče je možné vyjádřit jako

$$u_{Li,k} = \sum_{j=1, j \neq i}^{m+n} L_{ij} \frac{di_{Lj,k}}{dt} \quad (24)$$

kde: L_{ij} ... vzájemná indukčnost mezi i -tým a j -tým vodičem (H)

$i_{Lj,k}$... proud j -tého vodiče v k -tém dvojbranu (A)

n ... počet zemnicích lan (-)

m ... počet fázových vodičů (-)

Indukovaný proud vlivem kapacitních vazeb lze určit pomocí vztahu

$$i_{Ci,k} = \sum_{j=1, j \neq i}^{m+n} C_{ij} \left(\frac{du_{Cj,k}}{dt} - \frac{du_{Ci,k}}{dt} \right) \quad (25)$$

kde: C_{ij} ... vzájemná kapacita mezi i -tým and j -tým vodičem (F)

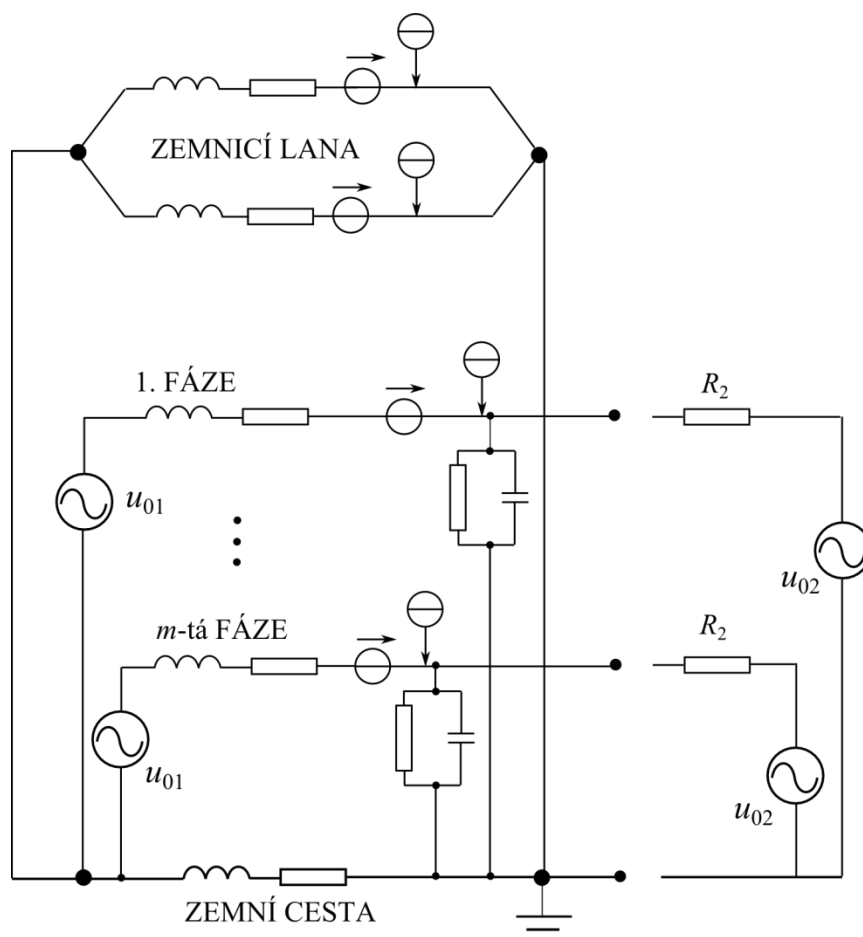
$u_{Cj,k}$, $u_{Ci,k}$ = napětí v k -tém dvojbranu j -tého a i -tého vodiče (V)

4.3. Jednoduchý model vedení

Pro získání prvotní a základní informace o vzájemném ovlivňování mezi vodiči jednotlivých linek zprostředkovaného induktivními a kapacitními vazbami je vhodné použít jednoduchý model vedení, který je tvořen pouze jedním gama článkem.

4.3.1. Obvodový model vedení

Uvažujeme-li systém m fázových vodičů, obvodové schéma je tvořeno m jednoduchými gama články dle Obr. 22. Články n zemnicích lan jsou přímo spojeny s uzlem zemnicí cesty (parametry C_0 a G nebyly uvažovány), který brán jako referenční. Zemní cesta byla uvažována podle Rūdenberga (16),(17). Část obvodového schématu je naznačena na Obr. 23.



Obr. 23 Obvodové schéma jednoduchého modelu vedení

Výstupní svorky respektují stav linky pomocí změny parametrů R_2 a u_{02} , jejich změnou lze modelovat následující stavy, které je možné pro jednotlivé linky kombinovat.

- Vedení provozované naprázdno (nezatížené) ... $R_2 \rightarrow \infty$.
- Vedení napájené z obou stran ... $u_{02} \neq 0$ a $R_2 \neq \infty$.

- Vedení zakončené odporovou zátěží ... $u_{02} = 0$ a $R_2 \neq 0$.
- Zkrat na konci vedení ... $u_{02} = 0$ a $R_2 = 0$.

4.3.2. Matematický model

K formulaci rovnic je použita metoda stavové proměnné, neznámé veličiny jsou proudy všech indukčností a napětí na všech kapacitách. Pro systém s m fázovými vodiči a n zemnicími lany je počet neznámých dán $M^{(1)} = (2m + n + 1)$, pro které je třeba formulovat $M^{(1)}$ diferenciálních rovnic prvního řádu pomocí přímé aplikace Kirchhoffových zákonů. Přímou aplikací 2. Kirchhoffova zákona na nezávislé smyčky je možné pomocí stavových proměnných formulovat rovnice (26) a (27).

- Smyčka i -tý fázový vodič – zem

$$R_i i_{Li} + L_i \frac{di_{Li}}{dt} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} L_{ij} \frac{di_{Lj}}{dt} + u_{Ci} - \left(R_g i_{Lg} + L_g \frac{di_{Lg}}{dt} \right) - u_{01i} = 0 \quad (26)$$

- Smyčka i -té zemnicí lano – zem

$$R_0 i_{L0i} + L_{0i} \frac{di_{L0i}}{dt} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} L_{0ij} \frac{di_{Lj}}{dt} - \left(R_g i_{Lg} + L_g \frac{di_{Lg}}{dt} \right) = 0 \quad (27)$$

Přímou aplikací 1. Kirchhoffova zákona na nezávislé uzly pomocí stavových proměnných je možné získat rovnice (28) a (29).

- Uzel hvězdy zdrojů na počátku vedení

$$i_{Lg} + \sum_{i=1}^n i_{L0i} + \sum_{i=1}^m i_{Li} = 0 \quad (28)$$

- Uzel i -tého fázového vodiče pro odporovou zátěž R_2

$$i_{Li} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} C_{ij} \left(\frac{du_{Cj}}{dt} - \frac{du_{Ci}}{dt} \right) = G_i u_{Ci} + C_{i0} \frac{du_{Ci}}{dt} + \frac{1}{R_2} u_{Ci} \quad (29)$$

Pro vedení napájené z obou stran dojde k malé modifikaci rovnice (29)

$$i_{Li} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} C_{ij} \left(\frac{du_{Cj}}{dt} - \frac{du_{Ci}}{dt} \right) = G_i u_{Ci} + C_{i0} \frac{du_{Ci}}{dt} + \frac{1}{R_2} (u_{Ci} - u_{02i}) \quad (30)$$

Formulované rovnice se dále upraví tak, že na jednu stranu jsou separovány členy s derivacemi, na druhou pak členy bez derivací a zbylé členy. Získanou soustavu diferenciálních rovnic (ODR) je možné zapsat v následující maticové podobě (31)

$$\mathbf{A}_1^{(1)} \frac{d}{dt} \mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{A}_2^{(1)} \mathbf{x}^{(1)} + \mathbf{f} \quad (31)$$

kde: $\mathbf{x}^{(1)}(M^{(1)}, 1) \dots$ sloupcový vektor stavových proměnných

$\mathbf{f}(M^{(1)}, 1) \dots$ sloupcový vektor zdrojů

$\mathbf{A}_1^{(1)}(M^{(1)}, M^{(1)}) \dots$ čtvercová matice koeficientů členů s derivacemi

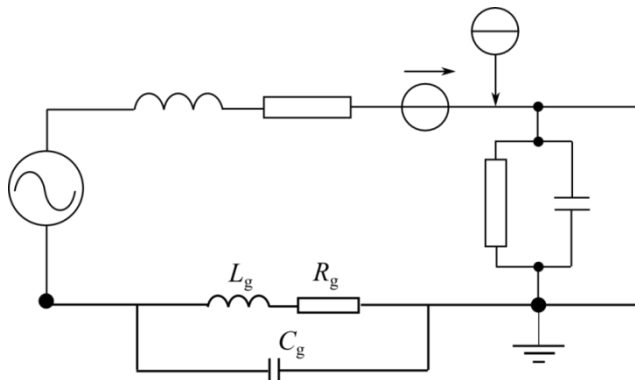
$\mathbf{A}_2^{(1)}(M^{(1)}, M^{(1)}) \dots$ čtvercová matice koeficientů členů bez derivací

Vektor $\mathbf{x}^{(1)}$ obsahuje po řadě proudy všemi indukčností a napětí na všech kapacitách, což lze zapsat $\mathbf{x}^{(1)} = \{\mathbf{i}_L^{(1)}, \mathbf{u}_C^{(1)}\}$. Pro ilustraci je uvedeno řazení veličin ve vektoru $\mathbf{x}^{(1)}$ pro čtyřnásobné vedení (s 12 dvanácti fázovými vodiči) a se dvěma zemnicími lany.

$$\mathbf{x}^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_L^{(1)} \\ \mathbf{u}_C^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ \vdots \\ i_{L12} \\ i_{L01} \\ i_{L02} \\ i_{Lg} \\ u_{C1} \\ \vdots \\ u_{C12} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Zvolené pořadí stavových veličin ve vektoru $\mathbf{x}^{(1)}$ umožňuje, že prvky matice $\mathbf{A}_1^{(1)}$ mají pevně danou opakující se strukturu. Matice $\mathbf{A}_1^{(1)}$ je diagonálně dominantní a její postup plnění je naznačen v (33). Jak už bylo podrobně popsáno v kapitole 4.1.1., na hlavní diagonále jsou prvky $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \mathbf{L}_3, \mathbf{L}_4$ a \mathbf{L}_0 , což jsou matice popisující indukční vazby v rámci daného systému (indexy 1 a 2 pro ZVN, 3 a 4 pro VVN, 0 pro zemnicí lana). Mimo hlavní diagonálu jsou pak matice popisující indukční vazby mezi jednotlivými systémy. Podobně jako v kapitole 4.1.1 lze definovat matice $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3$ a \mathbf{C}_4 na hlavní diagonále, které popisují kapacitní vazby v rámci daného systému. Mimo hlavní diagonálu jsou definovány matice popisující kapacitní vazby mezi jednotlivými systémy.

Tento problém lze vyřešit přidáním kapacity velmi malé hodnoty (~ 1 pF) paralelně vůči zemnímu vodiči. Pokud se zvolí tato kapacita dostatečně malá, má pak jen zanedbatelný vliv na výsledky.



Obr. 25 Zapojení zemní kapacity

Přidáním zemní kapacity dojde k úpravě rovnice (28) na tvar

$$i_{Lg} + \sum_{i=1}^n i_{L_{oi}} + \sum_{i=1}^m i_{Li} + C_g \frac{du_{Cg}}{dt} = 0 \quad (35)$$

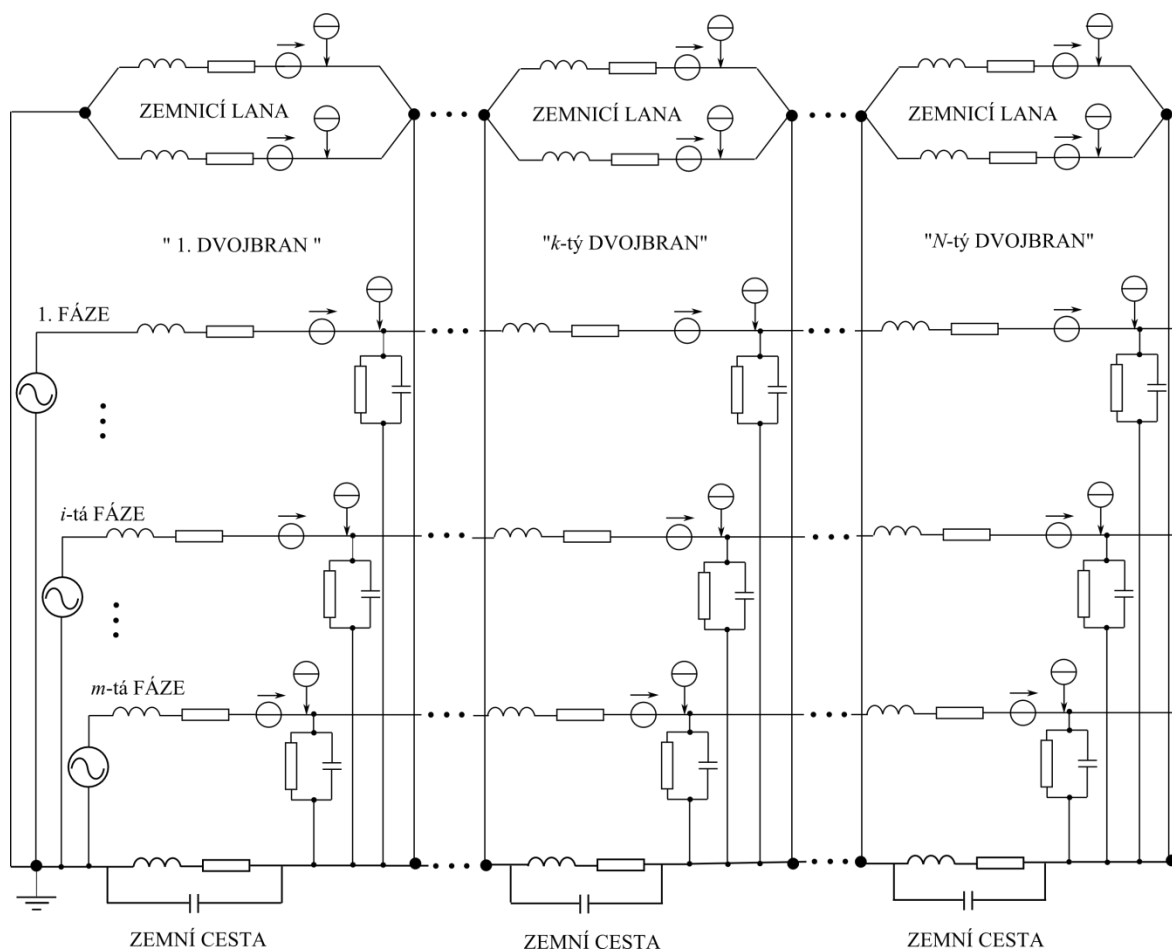
Pro novou stavovou proměnnou se formuluje rovnice pro smyčku

$$R_g i_{Lg} + L_g \frac{di_{Lg}}{dt} - u_{Cg} = 0 \quad (36)$$

Přidáním zemní kapacity se navýší počet řešených stavových proměnných a tím i rozměru vektoru stavových proměnných a matice $\mathbf{A}_1^{(1)}$, když $M^{(1)} = (2m + n + 2)$.

4.4. Model vedení složený z kaskády dvojbranů

Pro detailnější analýzu vzájemného ovlivňování vodičů paralelních linek a pro složitější přechodné děje je zapotřebí uvažovat podrobnější model vedení. Vydeme z jednoduchého modelu vedení, avšak jednotlivé vodiče jsou reprezentovány pomocí kaskády více gama článků. Tento přístup umožňuje modelovat poruchy na různých místech linky a připouští možnost respektování změny parametrů podél vedení (různé dispozice okolního terénu apod.). Na Obr. 26 je znázorněna část dvojbranového schématu, kde jsou jednotlivé vodiče modelovány pomocí kaskády N gama článků. Referenční uzel je v tomto případě uvažován uzel hvězdy zdrojů na počátku vedení.



Obr. 26 Část dvojbranového schéma modelu vedení

4.4.1. Matematický model

Formulace rovnic je analogická k rovnicím (26) - (30) použitých pro popis jednoduchého modelu. Pro k -tý dvojbran kaskády je možné přímou aplikací 2. Kirchhoffova zákona na nezávislé smyčky pomocí stavových proměnných obecně formulovat rovnice (37) a (38).

- Smyčka i -tý fázový vodič – zem v k -tém dvojbranu kaskády

$$R_i i_{Li,k} + L_i \frac{di_{Li,k}}{dt} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} L_{ij} \frac{di_{Lj,k}}{dt} + u_{Ci,k} - u_{Cg,k} - u_{Ci,k-1} = 0 \quad (37)$$

Pokud se jedná o první dvojbran kaskády, člen $u_{Ci,k-1}$ je nahrazen příslušným zdrojem napětí.

- Smyčka pro i -té zemnicí lano – zem v k -tém dvojbranu kaskády

$$R_0 i_{L0i,k} + L_{0i} \frac{di_{L0i,k}}{dt} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} L_{0ij} \frac{di_{Lj,k}}{dt} - u_{Cg,k} = 0 \quad (38)$$

Přímou aplikací 1. Kirchhoffova zákona na nezávislé uzly pomocí stavových proměnných je možné získat rovnice (39) a (40).

- Uzel mezi k -tým a $(k+1)$ -tým dvojbranem i -tého fázového vodiče

$$i_{Li,k} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} C_{ij} \left(\frac{du_{Cj,k}}{dt} - \frac{du_{Ci,k}}{dt} \right) = G_i u_{Ci,k} + C_{i0} \frac{du_{Ci,k}}{dt} + i_{Li,k+1} \quad (39)$$

- Rovnice pro uzel přizemnění v k -tém dvojbranu kaskády

$$i_{Lg,k} + \sum_{i=1}^n i_{L0i,k} + \sum_{j=1}^m C_{j0} \frac{du_{Cj,k}}{dt} + \sum_{j=1}^m G_j u_{Cj,k} + C_g \frac{du_{Cg,k}}{dt} - \left(i_{Lg,k+1} + \sum_{i=1}^n i_{L0i,k+1} + C_g \frac{du_{Cg,k+1}}{dt} \right) = 0 \quad (40)$$

Získanou soustavu obyčejných diferenciálních rovnic (ODR) je opět možné zapsat v následující maticové podobě (41)

$$\mathbf{A}_1 \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (41)$$

kde: $\mathbf{x} (M,1)$... sloupcový vektor stavových proměnných

$\mathbf{f} (M,1)$... sloupcový vektor zdrojů

$\mathbf{A}_1 (M,M)$... matice koeficientů členů s derivacemi

$\mathbf{A}_2 (M,M)$... matice koeficientů členů bez derivací

Pro numerické řešení rovnice (41) je nutné ji upravit do kanonického tvaru (42). Ten lze přepsat ještě přepsat do tvaru (43), kde matice \mathbf{A} odpovídá součinu matic $\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{A}_2$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A}_1^{-1} (\mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{f}) = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{f} \quad (42), (43)$$

Rozměr vektoru \mathbf{x} a řád matic \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 a \mathbf{A} lineárně narůstá se zvyšujícím se počtem dvojbranů v kaskádě, protože platí

$$M = N \cdot M^{(1)} = N(2m + n + 2) \quad (44)$$

4.4.2. Numerické řešení matematického modelu

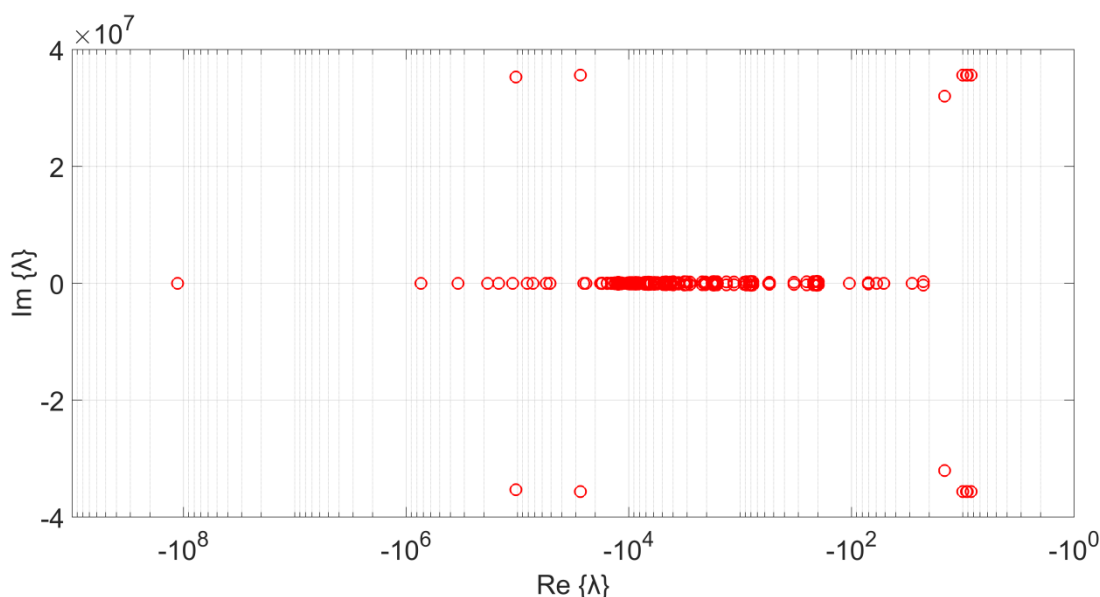
Popsaná soustava ODR v maticovém zápisu podle (43) je řešena numericky v programu MATLAB. Elementy v maticích \mathbf{A}_1 a \mathbf{A}_2 jsou řádově nesouměřitelné a tyto matice jsou tak špatně podmíněné, což může vést k nestabilitě numerického procesu. Kontrolu stability numerického řešení je možné ověřit pomocí vlastních čísel λ matice \mathbf{A} , které lze vypočítat z rovnice (49)

$$\det(\lambda \mathbf{J} - \mathbf{A}) = 0 \quad (49)$$

V rovnici (49) \mathbf{J} je jednotková matice, vlastní čísla je možno zapsat jako

$$\lambda = \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_M \} \quad (50)$$

Aby byl systém stabilní, musí vlastní čísla ležet v záporné polorovině. Na Obr. 27 jsou naznačena vlastní čísla v komplexní rovině.



Obr. 27 Zobrazení vlastních čísel v komplexní rovině

Pro výpočet jsou uvažovány nulové počáteční podmínky. Numerické řešení soustavy ODR poskytuje na definovaném intervalu časovou závislost všech stavových proměnných. Na základě analytického řešení je i -tá stavová proměnná dána součtem exponenciálních funkcí, v jejichž argumentech se vyskytují vlastní čísla matice \mathbf{A}

$$x_i(t) = C_{i1}e^{\lambda_1 t} + C_{i2}e^{\lambda_2 t} + \dots + C_{ik}e^{\lambda_k t} + \dots + C_{iM}e^{\lambda_M t} \quad (51)$$

kde: $C_{i1}, C_{i2}, C_{ik}, C_{iM} \dots$ integrační konstanty

Dalším rozbořením vlastních čísel λ_i lze získat užitečné informace o chování modelu vedení. Obecně jsou jednotlivé kořeny komplexní čísla, která tvoří dvojice komplexně sdružených čísel a je možné je zapsat do složkového tvaru jako

$$\lambda_i = \beta_i + j\alpha_i \quad (52)$$

kde $\beta = \text{Re}\{\lambda\}$ a $\alpha = \text{Im}\{\lambda\}$. Jak je dobře známo, celý systém ODR je stabilní, pokud reálné části všech vlastních čísel jsou záporné. Z reálné části komplexního čísla lze určit časovou konstantu τ , která určuje také tlumení

$$\tau_i = -\frac{1}{\beta_i} \quad (53)$$

U komplexně sdružených kořenů jejich imaginární část určuje frekvenci vznikajících oscilací podle (54)

$$f_i = \frac{\alpha_i}{2\pi} \quad (54)$$

Software MATLAB nabízí řadu metod pro řešení soustav ODR, vybrané jsou uvedeny se základními vlastnostmi v Tab. 9.

Tab. 9 Vybrané řešiče ODR v software MATLAB

Řešič	Typ problému	Přesnost
ode45	Stiff	střední
ode23		nízká
ode15		nízká - vysoká
ode23s	Non-stiff	nízká
ode23t		nízká

Pro výpočet byl zvolen řešič ode45, který odpovídá numerické metodě Runge-Kutta 4. řádu.

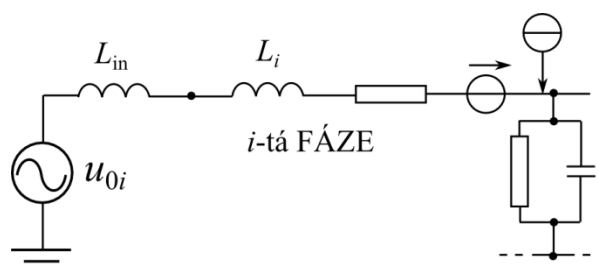
5. Ilustrativní příklady výpočtů na modelovém vedení

Výpočetní program podle popsaného algoritmu modelového vedení je vytvořen tak, aby byl maximálně flexibilní. Jako základní vstupní parametry vyžaduje počet linek společně s geometrickým uspořádáním všech vodičů, z nichž nejprve počítá pasivní parametry včetně vzájemných induktivních a kapacitních vazeb mezi vodiči. Dále je potřeba určit délku vedení a v závislosti na typu zkoumaného přechodného děje ještě další parametry jako zatížení zapnutých linek, místo poruchy na vedení apod. Změnou parametrů vedení včetně napájecích zdrojů je pak možné modelovat různé přechodné děje a zvláštní provozní podmínky na kombinovaném vedení:

- indukované proudy do vypnutých linek
- spínání linek během provozu
- zkratové poruchy a jejich vypínání včetně cyklu OZ

Výpočty na modelovém vedení jsou prováděny za několika zjednodušujících předpokladů. Pro spínání linek během provozních i poruchových stavů je uvažován ideální vypínač, u kterého je vliv oblouku zanedbán. Původní model vedení uvažoval ideální zdroj napětí připojený na jeho počátku, testovací výpočty pro zkratové poruchy však odhalily, že pokud zkrat vznikne blízko začátku vedení, dosahovaly hodnoty zkratových proudů nereálně vysokých hodnot. Z tohoto důvodu byl model vedení upraven a ideální zdroj napětí nahrazen zdrojem s vnitřní impedancí. Velikost této vnitřní impedance byla odvozena od hodnoty zkratového proudu I''_k odpovídající velikosti zkratového výkonu v daném místě soustavy. S ohledem na charakter impedance sítě na hladinách ZVN a VVN byla vnitřní impedance napěťového zdroje uvažována zcela induktivního charakteru. Pro síťovou frekvenci byla následně vypočtena hodnota indukčnosti, která byla zařazena do prvního dvojbranů kaskády k napěťovému zdroji.

$$I''_k = \frac{U}{\sqrt{3}X_{in}} \rightarrow L_{in} = \frac{U}{\sqrt{3}\omega I''_k} \quad (55)$$

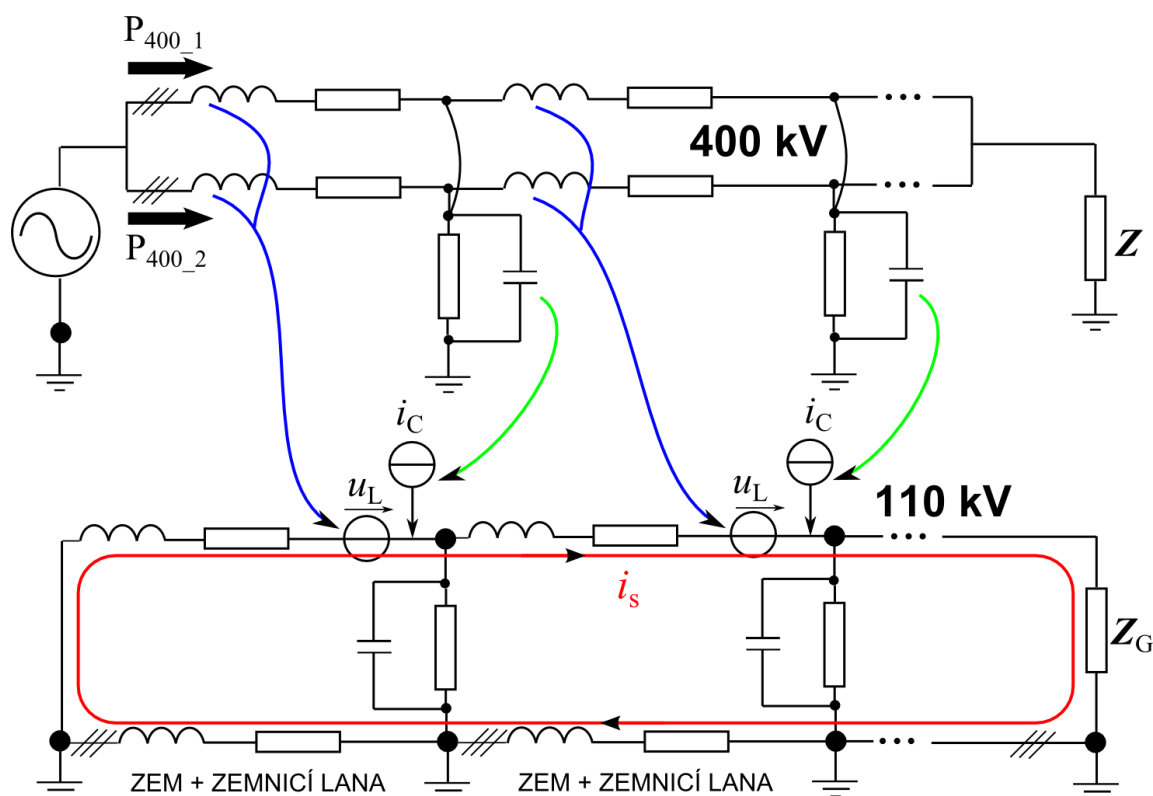


Obr. 28 Respektování impedance sítě v modelu vedení

Pro výpočty je uvažováno zcela netransponované vedení o délce 20 km s konstantními parametry podél celé linky. Pokud jsou linky VVN v provozu, předpokládá se, že přenášejí výkon přibližně 40 MW. U linek ZVN se předpokládá přenos výkonu odpovídající 800 MW. Počet dvojbranů v kaskádě modelového vedení zásadně ovlivňuje dobu výpočtu a tak je podle charakteru sledovaných veličin volen jejich optimální počet pro daný výpočet, který byl určen z výsledků testovacích výpočtů.

5.1. Základní posouzení vlivu induktivních a kapacitních vazeb

Pro základní posouzení vlivu induktivních a kapacitních vazeb mezi linkami ZVN a VVN je uvažován ustálený stav zapnutých ZVN linek a dlouhodobě vypnuté linky VVN. Do vypnutých linek VVN (na začátku a na konci uzemněných) se indukuje napětí a proud o frekvenci 50 Hz – viz. Obr. 29. V důsledku nízké impedance červeně označené smyčky začne vypnutými vodiči linek VVN protékat proud i_s .



Obr. 29 Indukování napětí a proudů do vypnutých linek VVN

Výpočty jsou provedeny pro symetrické a asymetrické uspořádání fázových vodičů ZVN u stožáru Donau – viz. Tab. 10. Vypnuté vodiče linek VVN jsou označeny čísly 1 až 6. Pro výpočet je uvažován model vedení tvořený 4 dvojbranými. Amplitudy naindukovaných napětí a proudů v prvním dvojbranu tak odpovídají 5 km délky vedení

a jsou pro jednotlivé vodiče vypnutých linek VVN znázorněny v Tab. 11 a Tab. 12. Tyto hodnoty odpovídají pouze působení vazeb všech vodičů linek ZVN na jednotlivé vodiče linek VVN.

Tab. 10 Uvažované konfigurace fází pro stožár Donau

	Symetrická konfigurace	Asymetrická konfigurace
Donau	$\begin{matrix} B & B \\ A & C & C & A \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} B & B \\ A & C & A & C \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}$

Tab. 11 Velikosti indukovaných napětí a proudů ve vodičích VVN do prvního dvojbranu pro symetrickou konfiguraci fází na ZVN

Vodič VVN	1	2	3	4	5	6
$ u_{Lind} $ (V)	503,8	553,1	602,6	603,2	553,9	504,9
$ i_{Cind} $ (A)	0,37	0,31	0,47	0,47	0,32	0,38

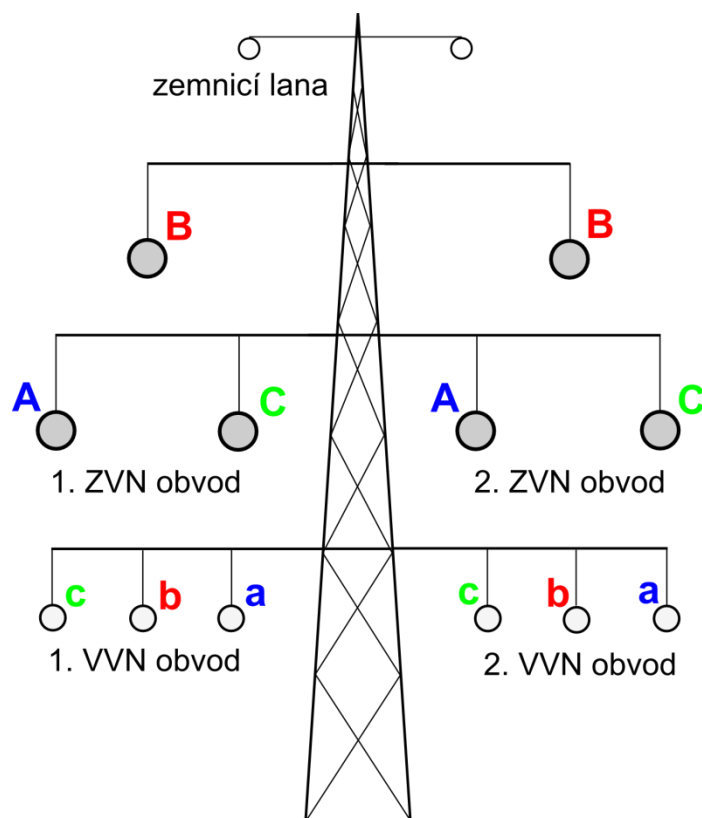
Tab. 12 Velikosti indukovaných napětí a proudů ve vodičích VVN do prvního dvojbranu pro asymetrickou konfiguraci fází na ZVN

Vodič VVN	1	2	3	4	5	6
$ u_{Lind} $ (V)	531,6	533,6	530,5	532,9	535,8	534
$ i_{Cind} $ (A)	0,41	0,33	0,38	0,37	0,32	0,40

S ohledem na velikost impedance fázových vodičů VVN v podélném směru ($|Z| \approx 0,4 \Omega/\text{km}$) a nízkou hodnotu impedance zemnění, zapříčiní indukované napětí induktivními vazbami průchod proudu, jehož hodnota značně převyšuje hodnotu kapacitního proudu indukovaného kapacitními vazbami. Velikost proudu i_s , který protéká vypnutými vodiči (viz. Obr. 29) se pohybuje od 75 do 95 A (hlubší analýze indukovaných proudů do vypnutých linek se věnuje kap. 5.5.). Výsledky v Tab. 11 a Tab. 12 tak ukazují, že za ustáleného stavu linek ZVN a daným zatížením, je vliv induktivních vazeb dominantní oproti vlivu kapacitních vazeb. Další zvýraznění účinku induktivních vazeb oproti těm kapacitním je možné očekávat v případě zkratových poruch. Naopak vyšší význam kapacitních vazeb lze předpokládat v případě přechodných dějů, u kterých bude docházet

rychlým změnám napětí, a zároveň změny proudového zatížení budou malé. Typicky se může jednat o spínání málo zatížených linek.

V případě symetrického uspořádání fází ZVN jsou indukovaná napětí do vodičů 3 a 4 (u osy stožáru) výrazně vyšší oproti ostatním vodičům VVN. To je ve shodě s výpočty rozložení elektrického a magnetického pole, kdy v případě umístění vodičů stejné fáze blízko sobě docházelo ke zdatelnému zesílení hodnot intenzity elektrického a magnetického pole. S přihlédnutím k výsledkům výpočtů elektromagnetického pole v kap. 3.3.1 a 3.3.2 a na základě analýzy vzájemných induktivních a kapacitních vazeb byl zvolen stožár Donau s asymetrickou konfigurací fázových vodičů, který vykazuje výrazně příznivější rozložení jak elektrického tak i magnetického pole. Na Obr. 30 je popsán i systém značení jednotlivých linek a pro snazší orientaci v následujících podkapitolách je v časových závislostech napětí a proudů dodržováno barevné označení jednotlivých fází.



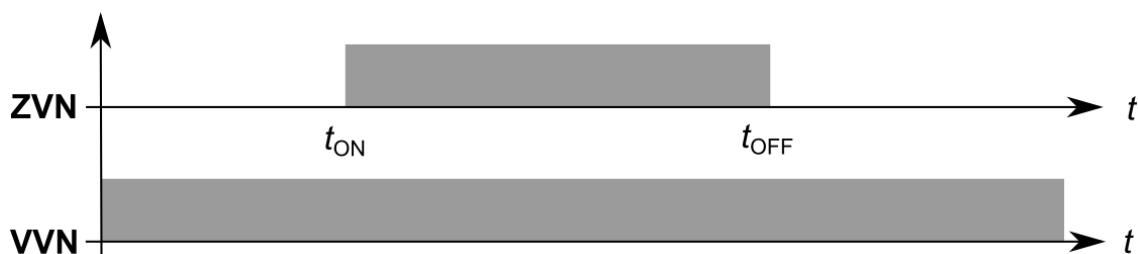
Obr. 30 Označení linek a konfigurace fázových vodičů

5.2. Spínání linek během provozu

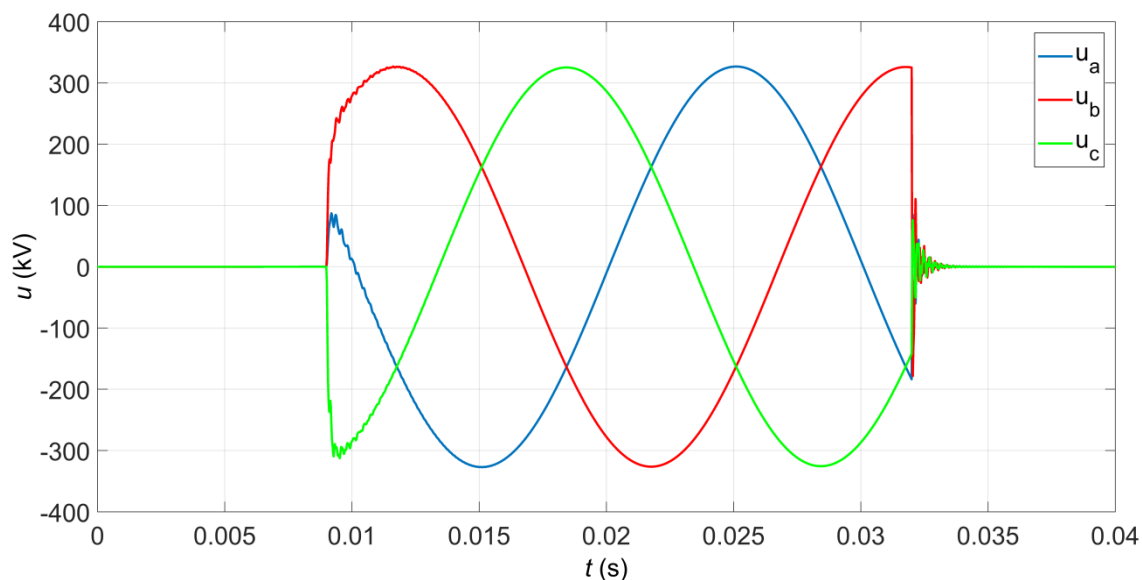
V této kapitole je zkoumán vliv spínání linek na linky zbývající, které jsou po celou dobu sledovaného časového intervalu v provozu. V čase t_{ON} dochází ke spínání linek obou linek na dané napěťové hladině, v čase t_{OFF} pak k jejich vypnutí. Pro spínání linek je uvažován model vedení se 4 kaskádně zapojenými dvojbrany.

5.2.1. Zapínání/vypínání linek ZVN, linky VVN v provozu

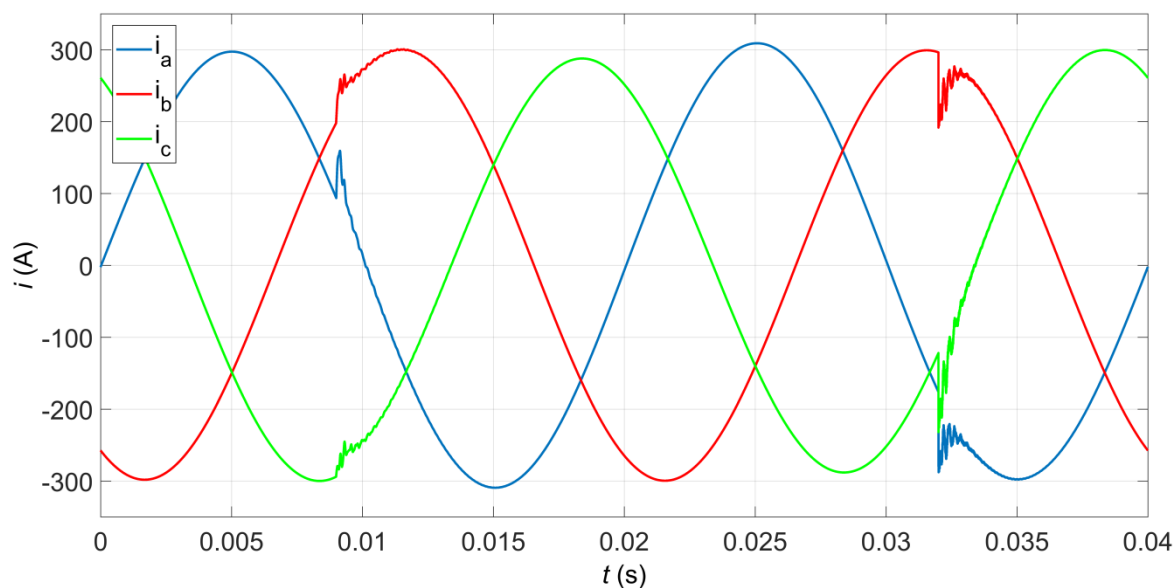
Provoz a spínání jednotlivých linek se řídí dle spínacího diagramu na Obr. 31. Čas sepnutí t_{ON} linek ZVN odpovídá času 0,009 s. V tomto čase jsou linky ZVN se zátěží zapnuty vypínačem umístěným začátku linky. Čas vypnutí t_{OFF} linek ZVN pak odpovídá času 0,032 s.



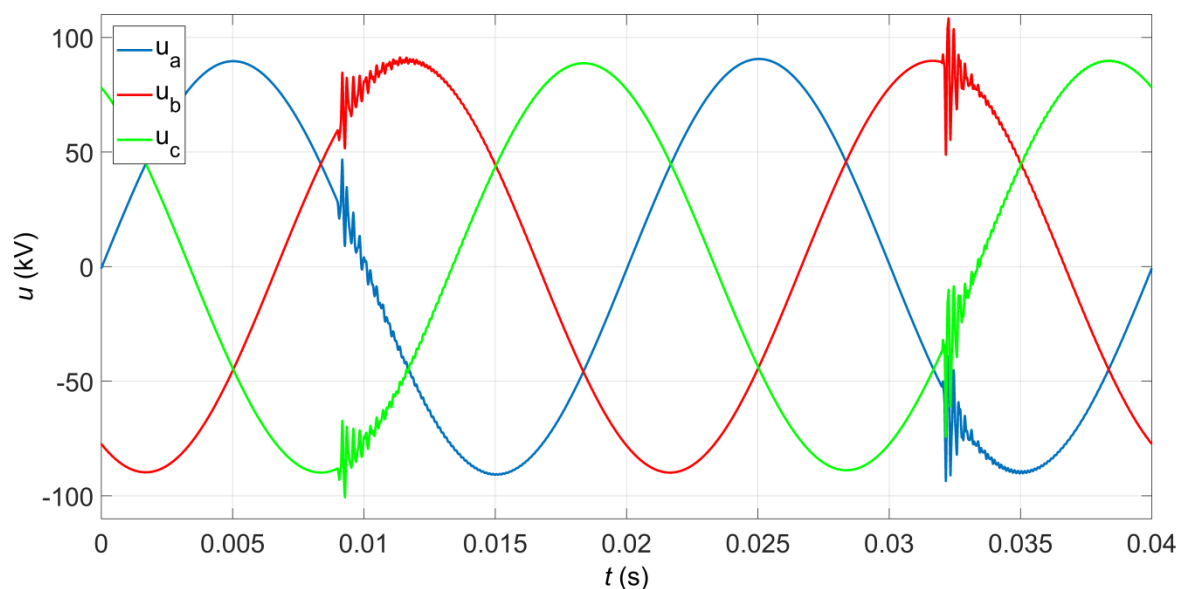
Obr. 31 Spínací diagram linek ZVN a VVN



Obr. 32 Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během ZVN spínání



Obr. 33 Fázové proudy 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání

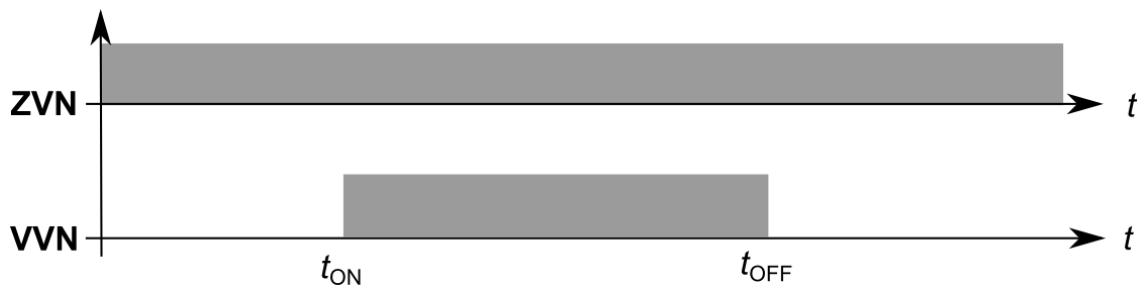


Obr. 34 Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání

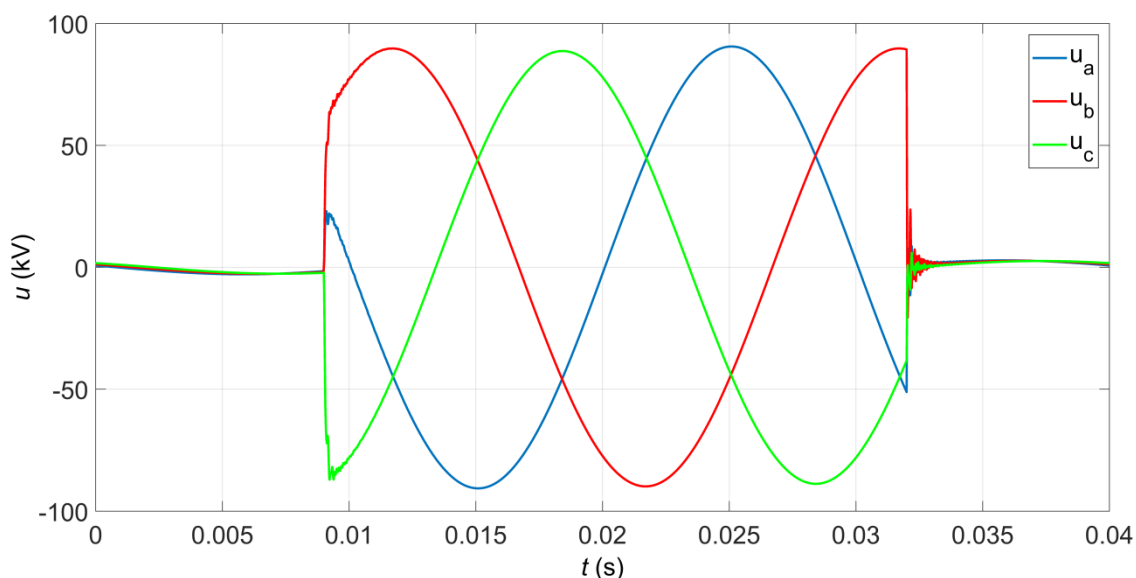
Spínání linek ZVN má za následek vznik tlumených oscilačních špiček ve fázových proudech a napětích linek VVN. Nejvýrazněji se tyto špičky projevují na napětí linek VVN během vypínání linek ZVN, kdy první špička dosahuje 0,43 p.u. hodnoty fázového napětí. Variantní výpočty provedené v [27] ukázaly, že velikost těchto špiček není výrazně ovlivněna časy spínání t_{ON} a t_{OFF} . Napěťové špičky vznikají v důsledku induktivních vazeb od vodičů ZVN a superponují se na původní průběh napětí vodičů linek VVN. Podobným způsobem vznikají proudové špičky, které jsou zapříčiněny kapacitními vazbami vodičů VVN na vodiče ZVN.

5.2.2. Zapínání/vypínání linek VVN, linky ZVN v provozu

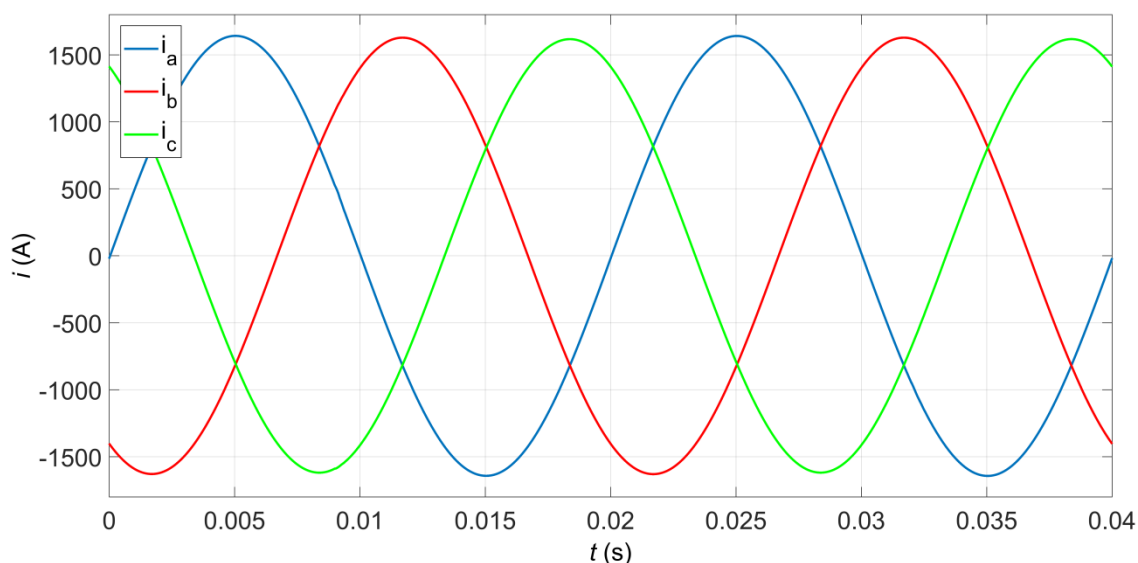
Provoz a spínání jednotlivých linek se řídí dle spínacího diagramu na Obr. 35. Čas sepnutí t_{ON} linek VVN odpovídá času 0,009 s. V tomto čase jsou linky VVN se zátěží zapnuty vypínačem umístěným na začátku linky. Čas vypnutí t_{OFF} linek VVN pak odpovídá času 0,032 s.



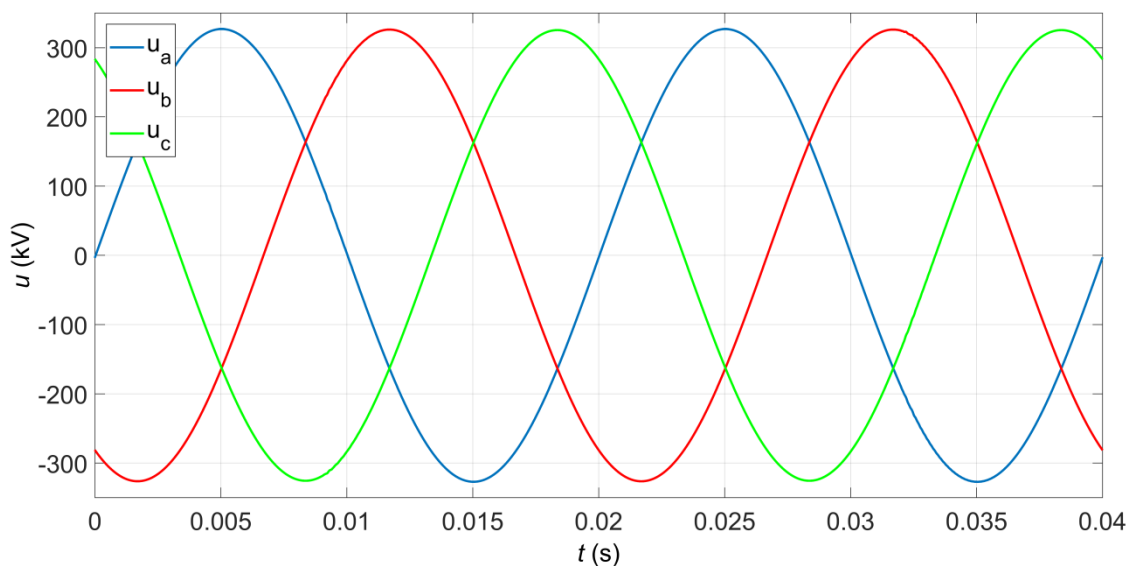
Obr. 35 Spínací diagram linek ZVN a VVN



Obr. 36 Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během VVN spínání



Obr. 37 Fázové proudy 1. linky ZVN prvního dvojbranu během VVN spínání

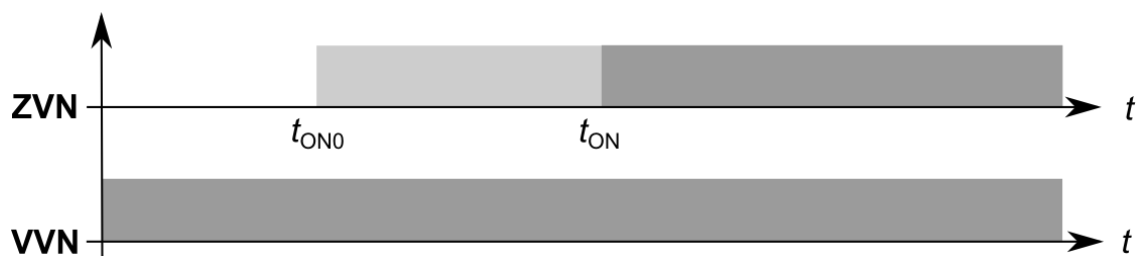


Obr. 38 Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během VVN spínání

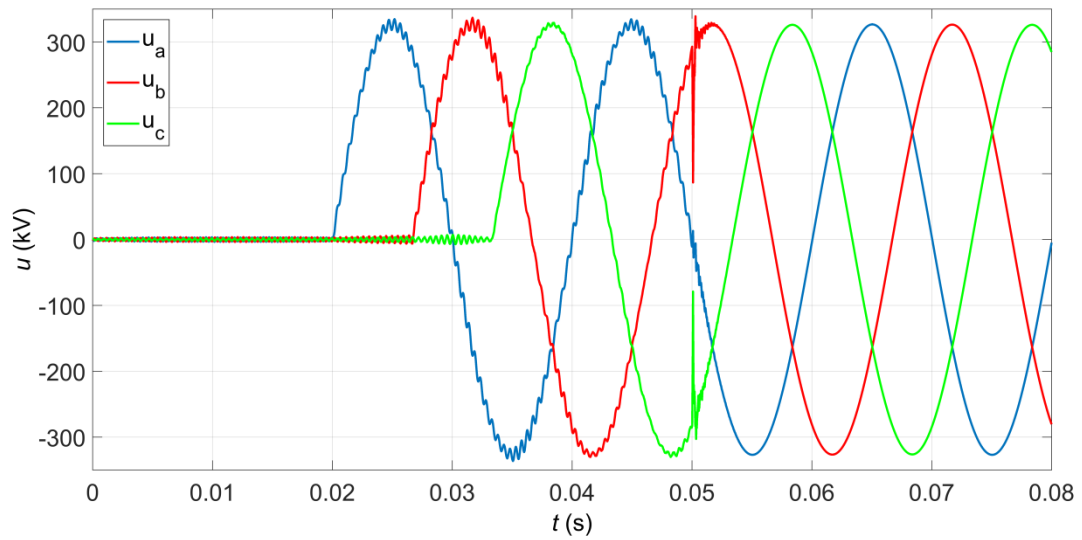
Zapínání ani vypínání linek VVN nemá výrazný vliv na proudové a napěťové poměry linek ZVN. Podle předpokladů je ovlivňování mezi jednotlivými linkami během jejich spínání výraznější ve směru od ZVN k VVN, než opačným směrem.

5.2.3. Zapínání linek ZVN ze stavu naprázdno, linky VVN v provozu

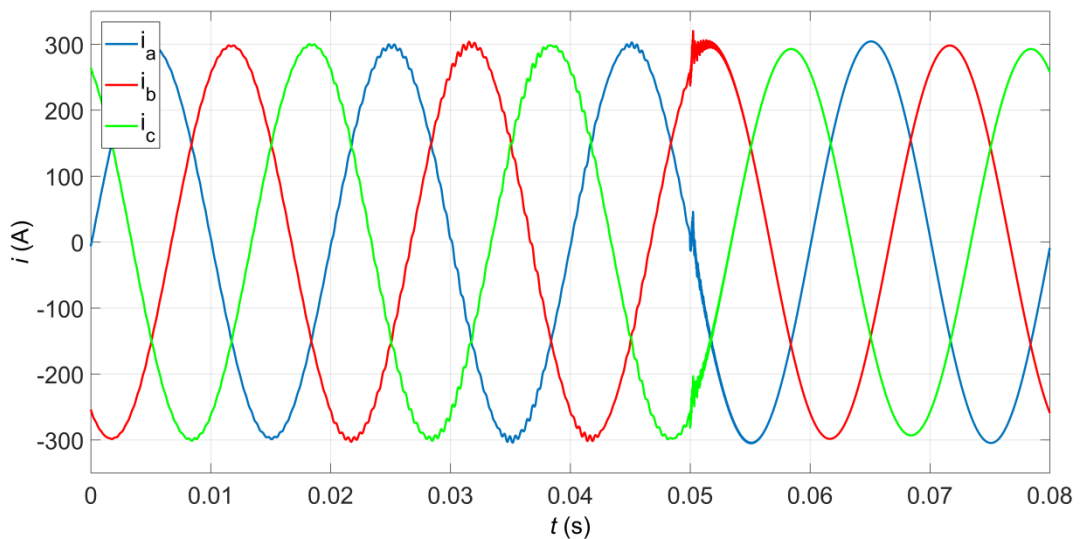
V tomto případě je uvažováno, že před samotným spínáním linky do zátěže je linka v chodu naprázdno. Časový okamžik t_{ON0} naznačuje spínání nezátížených linek, které je prováděno postupně po jednotlivých fázích. Po určité době provozu naprázdno jsou linky v čase $t_{ON} = 0,05$ s vypínači umístěnými na konci linek připojeny k zátěži.



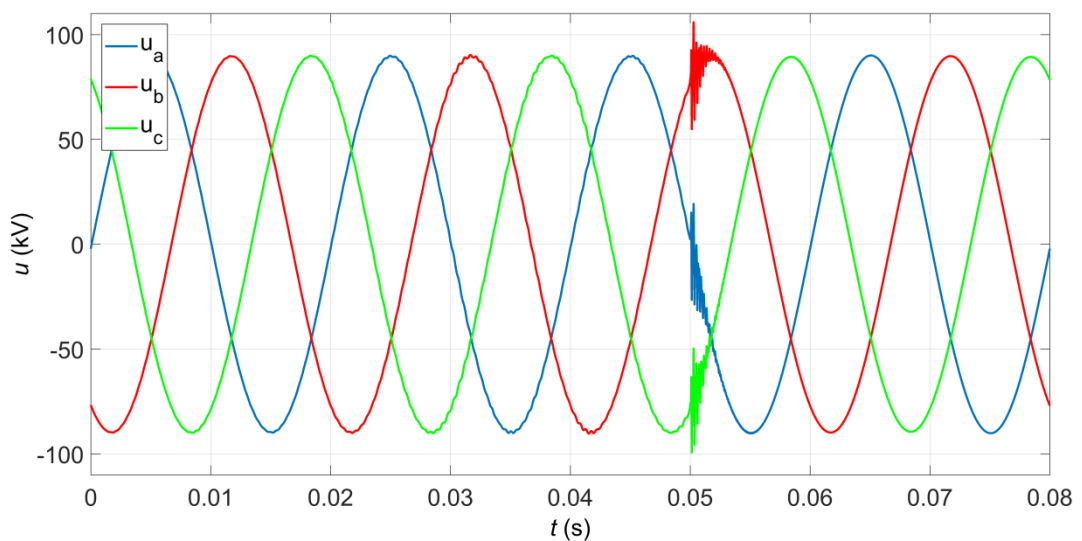
Obr. 39 Spínací diagram linek VVN a ZVN



Obr. 40 Fázová napětí 1. linky ZVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno



Obr. 41 Fázové proudy 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno

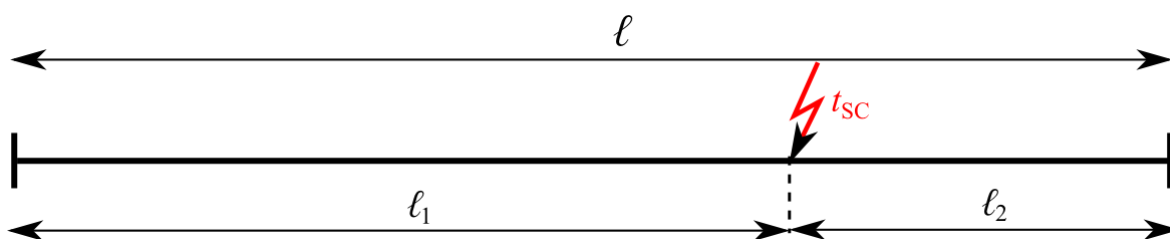


Obr. 42 Fázová napětí 1. linky VVN prvního dvojbranu během ZVN spínání ze stavu naprázdno

Postupné zapínání ZVN linek naprázdno se projevuje jen mírným zvlněním sinusového průběhu proudu VVN linek. Zapnutí linek ZVN naprázdno do zátěže je pak doprovázeno zejména napět'ovými oscilačními špičkami, které u ve fázi-b 1. VVN linky dosahují 0,18 p.u. jmenovitého napětí.

5.3. Zkratové poruchy

V této podkapitole je analyzován jednofázový zkrat, protože u sítí ZVN a VVN se ze všech zkratových poruch vyskytuje nejčastěji. Respektování jednofázového zkratu je v modelovém vedení provedeno zvýšením vodivosti v příčné větvi v daném gama článku dané fáze v závislosti na poloze zkratu. Vznik zkratu na definovaném časovém intervalu je dán časem t_{SC} . U jednostranně napájeného vedení zkrat rozděluje vedení na 2 části. První část je úsek ℓ_1 mezi začátkem (zdrojem) a zkratem, druhá část je úsek ℓ_2 mezi zkratem a zátěží.



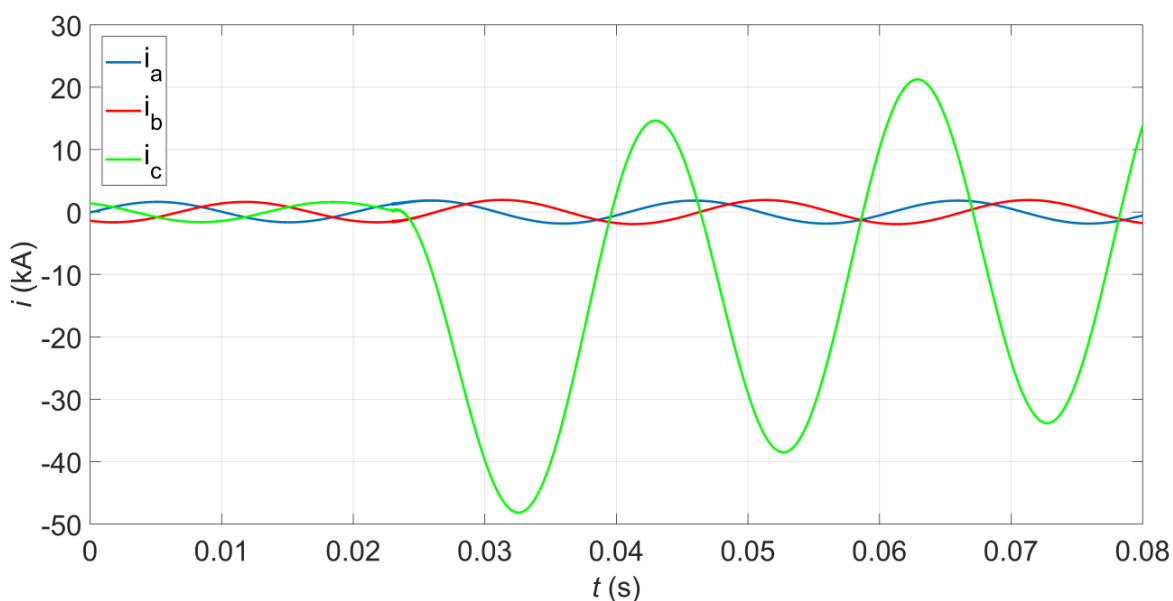
Obr. 43 Zkrat dělící vedení na dva úseky

Jak je dobře známo, jednofázový zkrat je doprovázen výrazným navýšením velikosti fázového proudu poruchové fáze. To se projeví zejména zvýrazněním indukovaného napětí vlivem induktivních vazeb mezi vodičem s poruchou a ostatními vodiči. Pro základní výpočet je uvažován vznik zkratu na 14 km délky vedení (14-tý km z 20 km) ve fázi-C 1. linky ZVN. Doba vzniku zkratu odpovídá času $t_{SC} = 0,023$ s a odpor zkratu $0,5 \Omega$. Tvorba modelu vedení a volba počtu dvojbranů v kaskádě je závislá na požadavcích kladených na očekávané výsledky. Touto problematikou jsem se podrobně zabýval v [28]. Na základě získaných výsledků vyšlo najevo, že pro určení dosahovaných hodnot zkratového proudu a pro základní analýzu vlivu zkratu na ostatní vodiče je postačující vytvořit zjednodušený model vedení, který je tvořen pouze dvěma dvojbrany v kaskádě. Velikosti parametrů R , L , C_0 a G v prvním a druhém dvojbranu jsou závislé na poloze zkratu, která je definována délkami ℓ_1 a ℓ_2 .

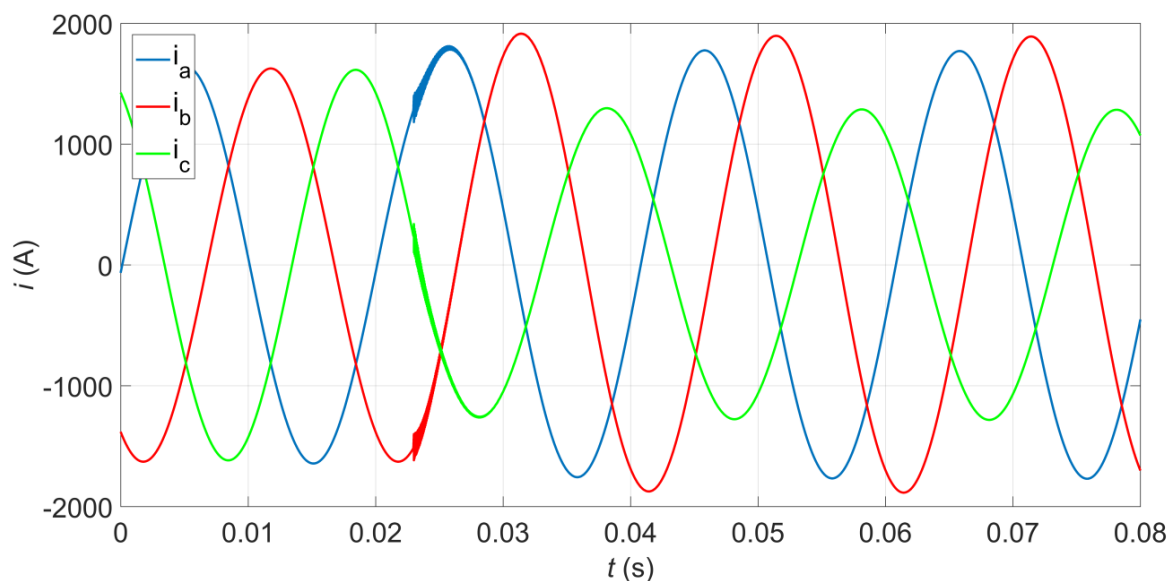
Pro komplexnější analýzu vlivu zkratu na ostatní vodiče, která umožní sledovat napěťové a proudové poměry podél vedení, je nutné uvažovat model vedení tvořený kaskádou více dvojbranů. Pro výpočet je uvažováno rovnoměrné dělení dvojbranů podél linky, konkrétně zapojení 10 dvojbranů v kaskádě (jeden dvojbran na dva kilometry délky vedení). Prvnímu úseku vedení o délce $\ell_1 = 14$ km dle Obr. 43 odpovídá 7 dvojbranů, druhému úseku vedení o délce $\ell_2 = 6$ km odpovídají 3 dvojbrany. Zkrat definovaný v kap. 5.3. je modelován změnou svodu v sedmém dvojbranu fáze-C 1. ZVN linky, což respektuje polohu zkratu na 14. km.

5.3.1. Základní analýza vlivu zkratu na ostatní vodiče

Následující grafy popisují průběhy proudů a napětí prvního dvojbranu vedení u vybraných linek. Tyto průběhy v zásadě odpovídají hodnotám, které mohou být naměřeny přístrojovými transformátory proudů a napětí, jež jsou umístěny na vývodu dané linky v rozvodnách.

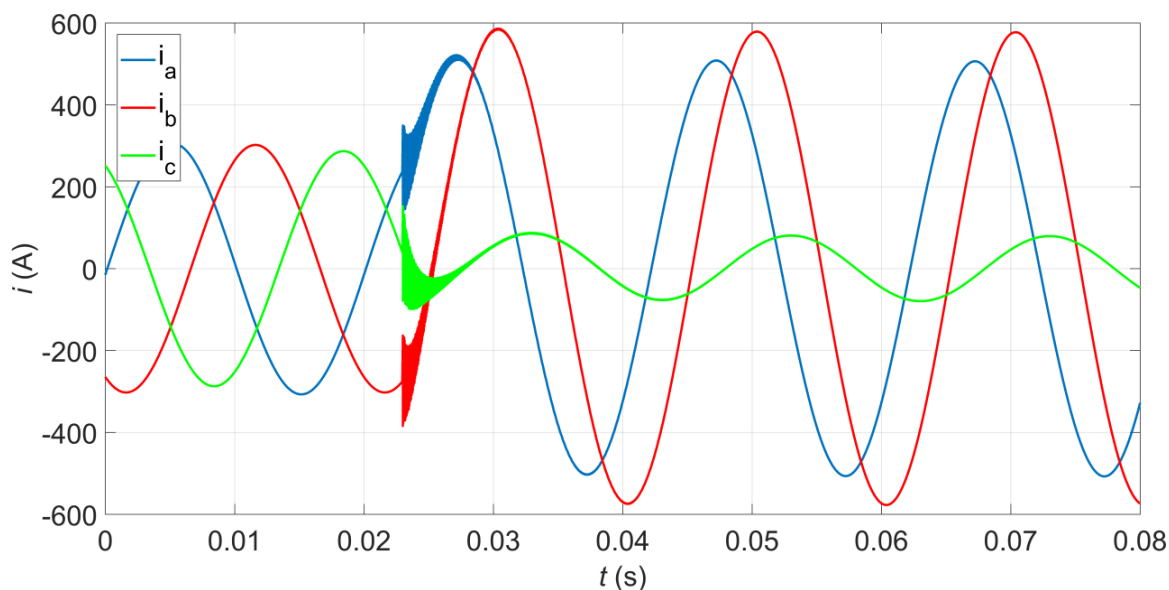


Obr. 44 Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN

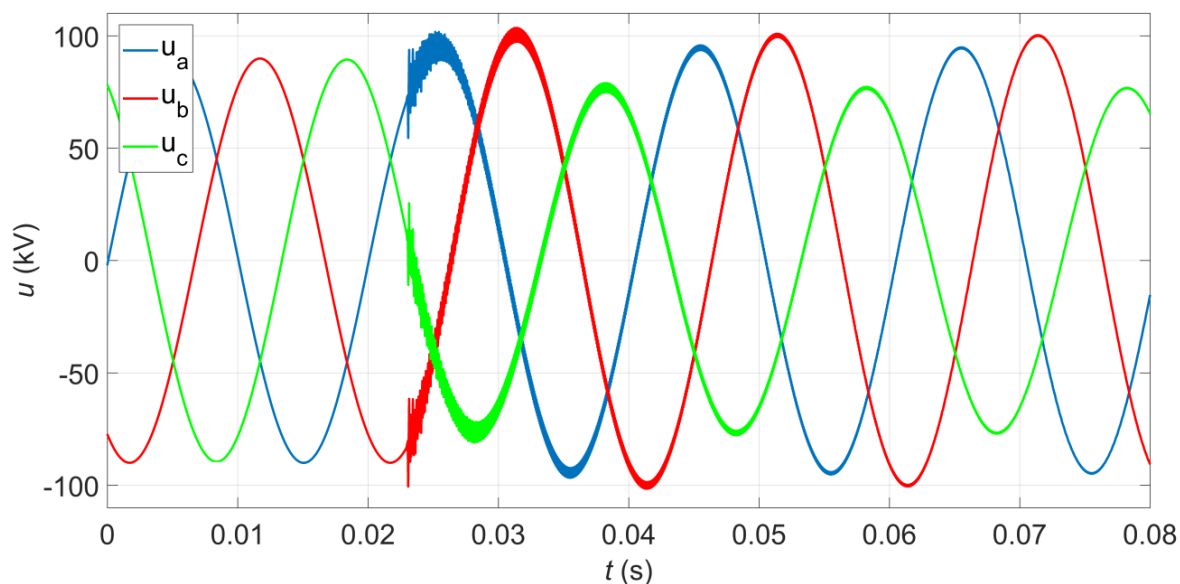


Obr. 45 Fázové proudy 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN

Z Obr. 44 a Obr. 45 je patrné, že průběh zkratu ve fázi-C první ZVN linky je spojen proudovou nesymetrií ve 2. ZVN lince. Velikost amplitudy proudu ve fázích-A, B se zvyšuje, ve fázi-C se naopak snižuje. Výraznější pokles amplitudy fázového proudu a celková nesymetrie se projevuje ve fázi-c u 1. linky VVN. Tento fakt lze vysvětlit tím, že zkratový proud ve fázi-C má zejména induktivní charakter a indukované napětí do vodičů stejné fáze je v protifázi s původním napětím zdroje.



Obr. 46 Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN

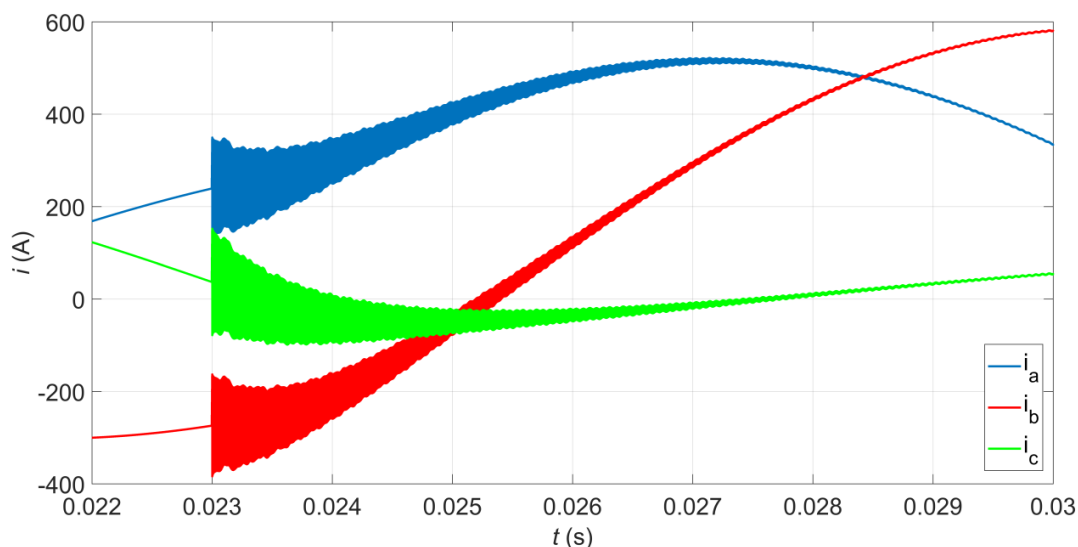


Obr. 47 Fázová napětí 1. VVN linky v prvním dvojbranu během 1f zkratu na ZVN

Z průběhů na Obr. 47 je patrné, že nesymetrie fázových napětí 1. VVN linky v prvním dvojbranu není tak výrazná jako nesymetrie proudová. Podrobnější analýzou všech průběhů lze dospět k závěru, že vzniklý přechodný děj má dvě části. První část je spojena se vznikem tlumených oscilací (tzv. transientní část). Po utlumení těchto oscilací začíná druhá část, kdy průběhy napětí a proudů mají již ustálený harmonický charakter se síťovou frekvencí.

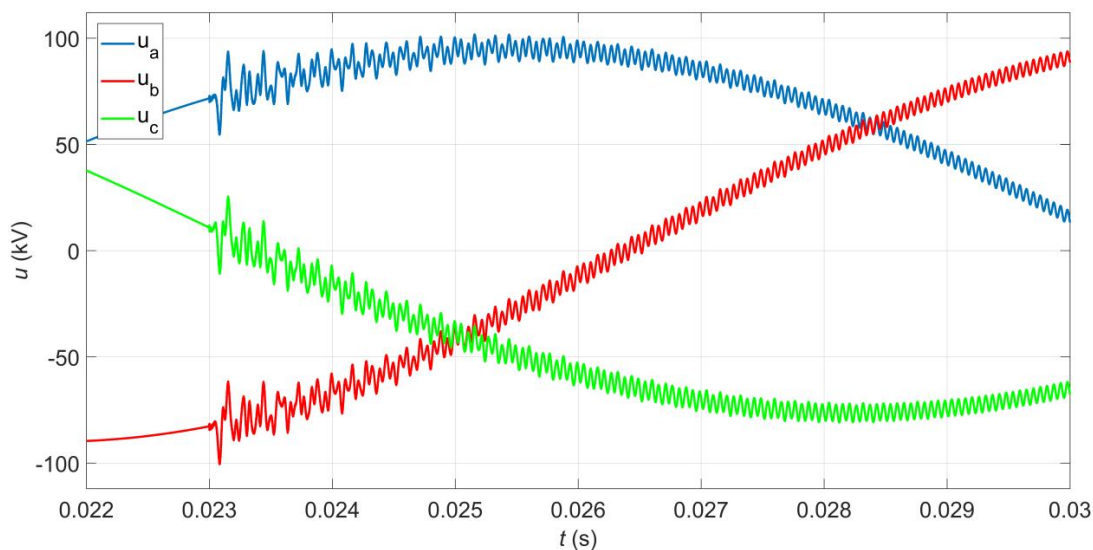
5.3.2. Rozbor první části zkratu spojené s tlumenými oscilacemi

Průběh všech stavových veličin je dán součtem exponenciálních funkcí podle (51) a na základě analytického řešení je možné provést rozbor získaných výsledků. Vliv jednotlivých vlastních čísel na průběh daného proudu či napětí závisí na velikosti integračních konstant. Zpravidla je možné nalézt dvojici komplexně sdružených vlastních



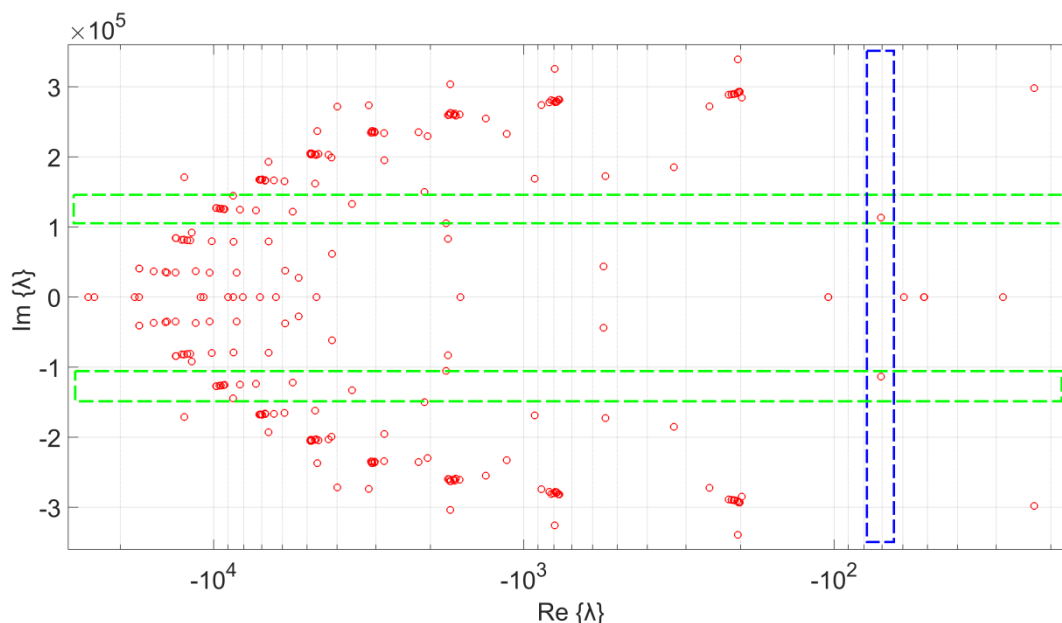
Obr. 48 Detailní pohled na oscilace fázových proudů 1. VVN linky v prvním dvojbranu

čísel, které mají dominantní vliv na vznikající oscilace. Frekvence oscilací je dána hodnotou imaginární části této dvojice komplexně sdružených vlastních čísel, tlumení těchto oscilací je určeno časovou konstantou odpovídající jejich reálné části – viz. (53) a (54). Útlum oscilací se předpokládá za dobu 5τ a určuje délku trvání transientního intervalu. Na Obr. 48 je uveden detail transientního intervalu pro fázové proudy 1. VVN linky, na Obr. 49. je pak uvedena část transientního intervalu fázových napětí 1. VVN linky.



Obr. 49 Detailní pohled na oscilace fázových napětí 1. VVN linky v prvním dvojbranu

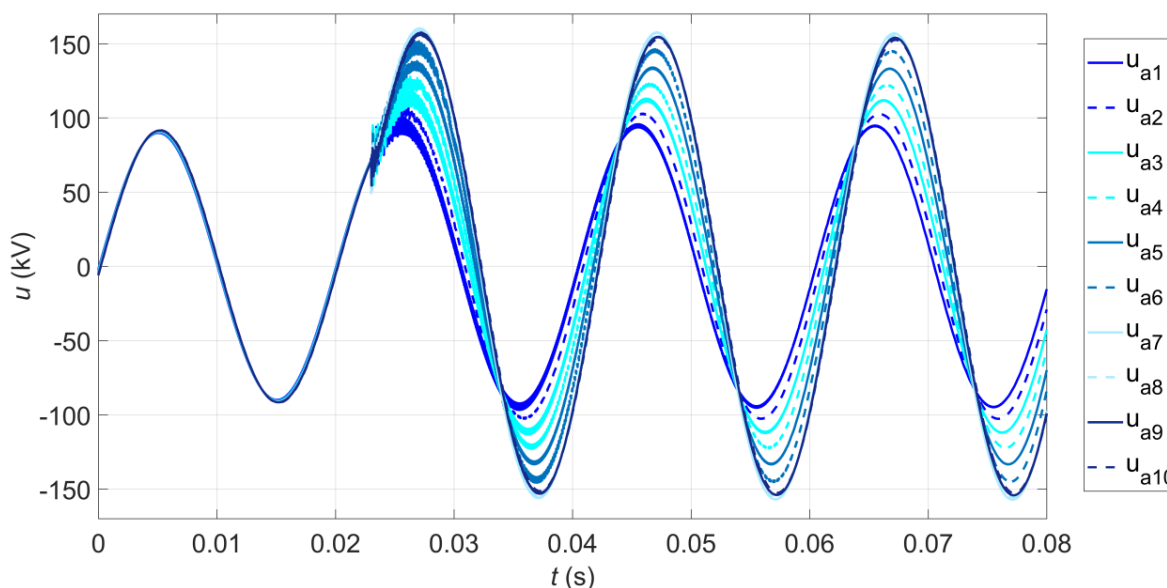
Transientní složka spojená s rychlými oscilacemi na Obr. 48 se utlumí za $5\tau \sim 10$ ms, přičemž frekvence zastoupených kmitů přesahuje 500 kHz. Na detailu fázových napětí na Obr. 49 jsou viditelné zejména signifikantní oscilace o frekvenci odpovídající $f \sim 18$ kHz. Doba tlumení je však výrazně delší a činí $5\tau \sim 60$ ms. Zobrazením vlastních čísel do komplexní roviny na Obr. 50 a jejich analýzou, je možné určit dvojice komplexně sdružených vlastních čísel (či jejich skupiny), které odpovídají parametrům dominantních oscilací. Frekvenci oscilací patrných na průbězích napětí odpovídá imaginární část $\alpha \sim \pm 1,13 \cdot 10^5$ která je na Obr. 50 naznačena dvěma zelenými pásy. Z doby útlumu a z ní určené časové konstanty činí reálná část dvojice komplexně sdružených vlastních čísel přibližně $\beta \sim -75$, čemuž odpovídá pás určený modrým obdélníkem. Jejich průnikem je možné nalézt dvojice komplexně sdružených čísel zodpovědných za dominantní oscilace daného průběhu. Dále je patrné, že většina kořenů má výrazně nižší reálnou část, čemuž odpovídá i kratší doba tlumení a proto se tolik neprojevívá.



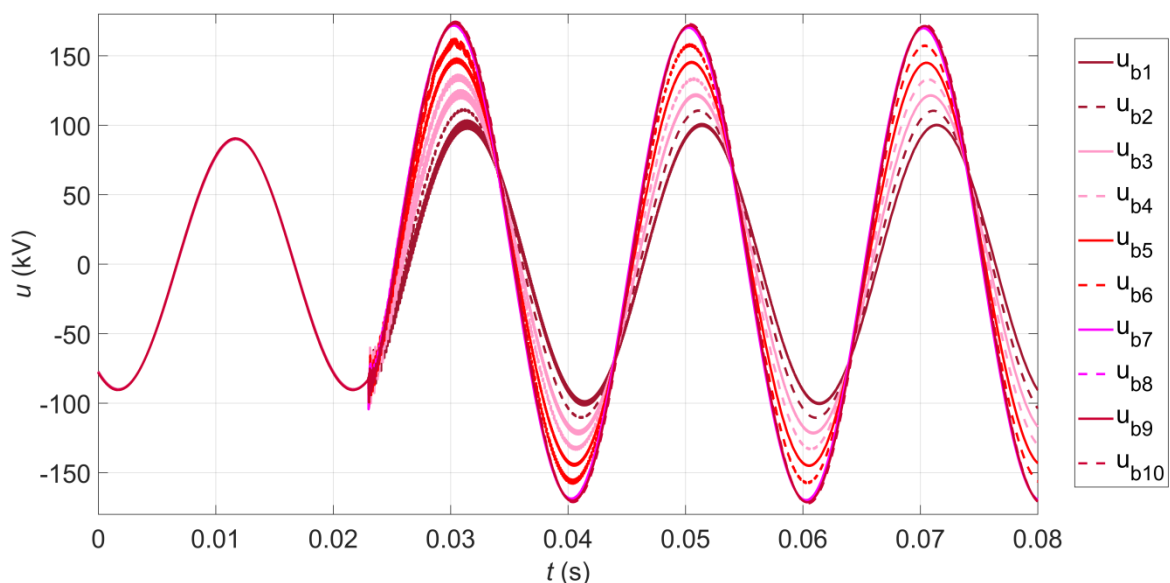
Obr. 50 Detailní zobrazení vlastních čísel v komplexní rovině

5.3.3. Rozbor části ustáleného zkratu

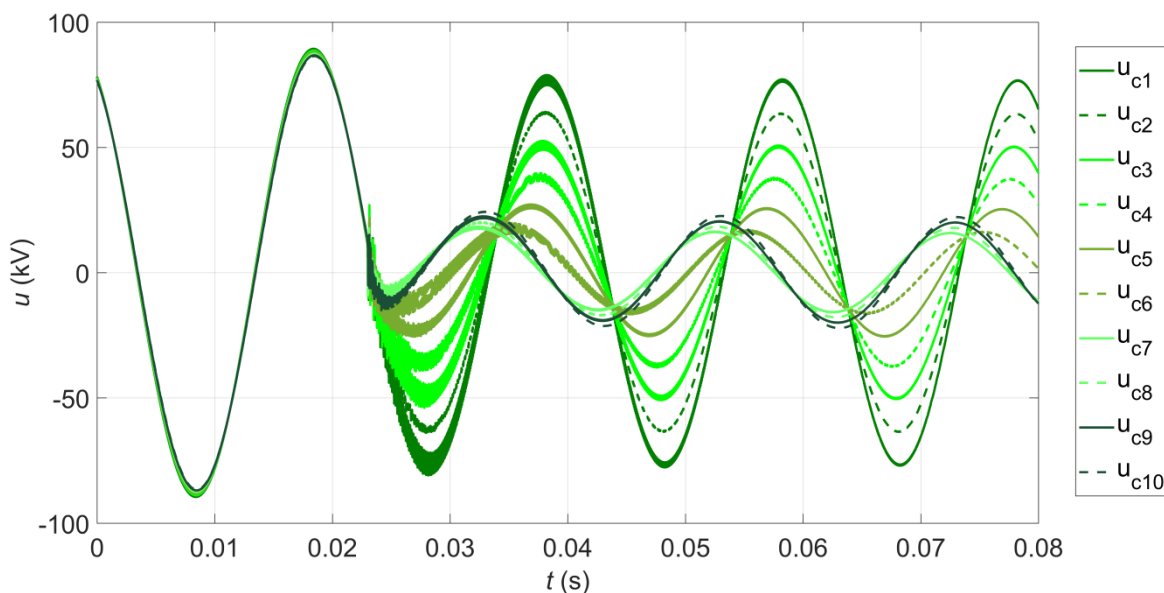
Po utlumení oscilací vyskytujících se v první části se průběhy napětí a proudů ustálí a mají sinusový průběh. Doba, za kterou se oscilace utlumí a skončí tak transientní interval, se může pro různé veličiny lišit. To je patrné i na Obr. 48 a Obr. 49, kdy u fázových proudů 1. VVN linek končí transientní interval po 10 ms, u fázových napětí 1. VVN linky po 60 ms. Velkou předností modelu vedení tvořeného kaskádou dvojbranů je možnost analýzy proudových a zejména napěťových poměrů podél celého vedení. Průběhy napětí všech fází 1. VVN linky podél celé linky (napětí na všech 10 dvojbranech) jsou znázorněny na Obr. 51, 52 a 53.



Obr. 51 Průběhy napětí fáze-a 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN



Obr. 52 Průběhy napětí fáze-b 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN

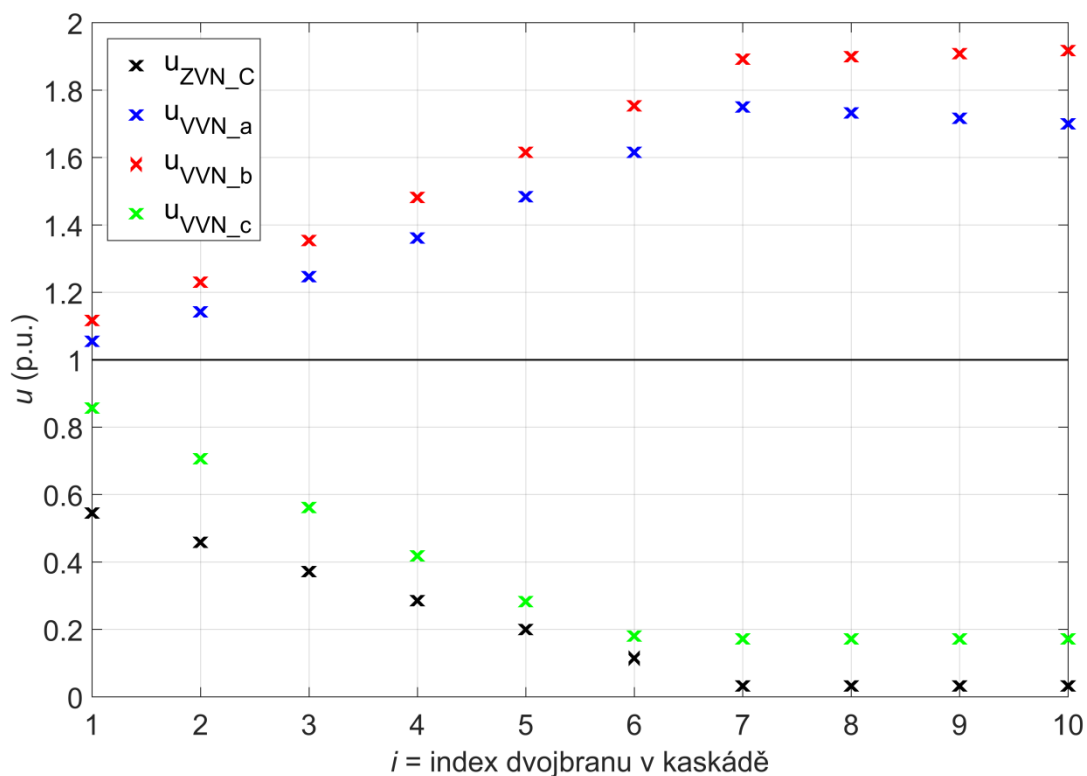


Obr. 53 Průběhy napětí fáze-c 1. VVN linky podél vedení během 1f zkratu na ZVN

Z průběhů napětí podél vedení je patrné, že amplitudy ve fázích-a, b směrem k místu zkratu narůstají. Naopak u fáze-c je vidět pokles amplitudy směrem k místu zkratu. Ve všech fázích dochází vlivem indukovaného napětí od vodiče se zkratem k postupné změně fázového posuvu. Velikosti amplitud napětí všech fází podél vedení včetně poruchové fáze-C 1. ZVN linky jsou znázorněny v Tab. 13. Poměrné hodnoty těchto napětí jsou následně využity pro graf napěťového profilu podél vedení, který je naznačen na Obr. 54.

Tab. 13 Velikosti ustálených amplitud napětí podél vedení během zkratu

u_{Ci} [kV]	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$	$i = 8$	$i = 9$	$i = 10$
Poruchová fáze-C	178,3	150	121,6	93,32	65,31	37,76	16,88	14,85	12,92	11,21
Fáze-a 1.VVN linky	94,77	102,6	112	122,3	133,3	145,1	157,2	155,6	154,2	152,7
Fáze-b 1.VVN linky	100,3	110,5	121,6	133,1	145,1	157,5	169,9	170,6	171,4	172,2
Fáze-c 1.VVN linky	76,86	63,47	50,36	37,53	25,46	16,36	15,95	17,97	20,11	22,28



Obr. 54 Profily napětí podél vedení během 1f zkratu na ZVN

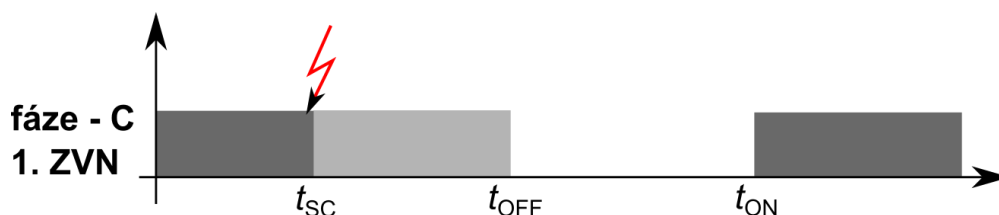
Model vedení sestavený z kaskády dvojbranů principálně umožňuje analyzovat i případy vícenásobných poruch, které vznikají v různých částech linky v různý čas. Této problematice jsem se detailně věnoval v [28]. Získané výsledky dále ukázaly, že proudy fázových vodičů se podél vedení příliš neliší, což je dáno impedančními poměry v podélném a příčném směru daného fázového vodiče. Zvyšování počtu dvojbranů v kaskádě nepřináší očekávané zpřesnění výsledků a získání doplňujících informací, je však spojené s prodloužením doby výpočtu.

5.4. Cyklus jednofázového opětovného zapnutí (1f OZ)

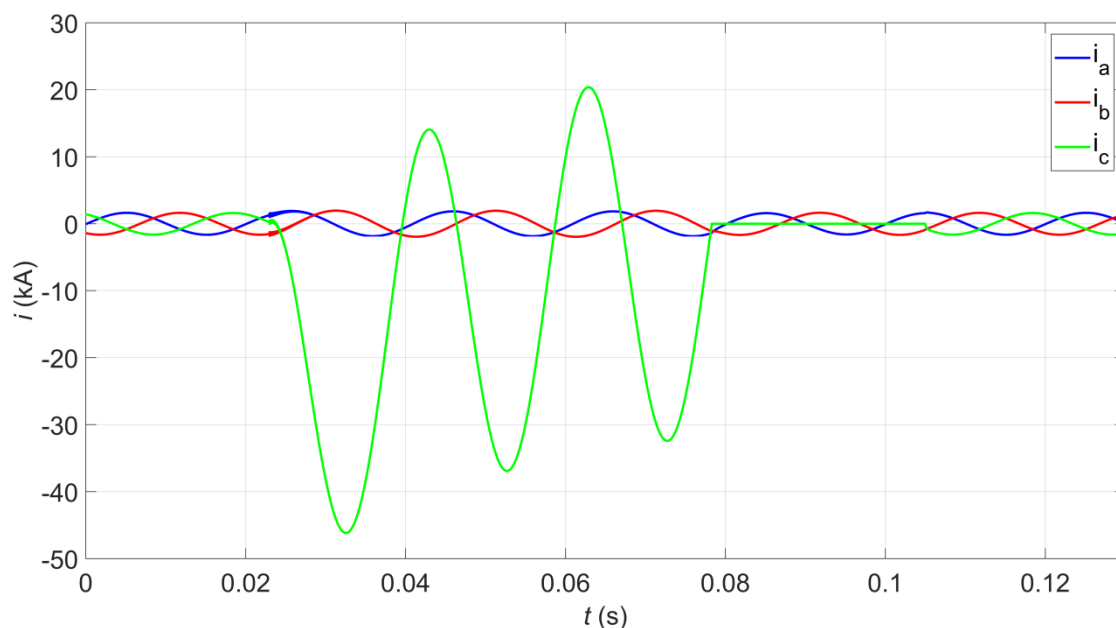
Jak je obecně známo, jednofázové zkratové poruchy v sítích ZVN a VVN bývají zpravidla dočasného charakteru a tak systém ochran řeší zkrat vzniklý v čase t_{SC} jeho vypnutím v čase t_{OFF} . Po beznapěťové době je poruchová fáze v čase t_{ON} opět zapnuta. Pomine-li do té doby porucha (např. hoření přeskokového oblouku na zem či na konstrukce stožáru), je linka ve standardním chodu. V opačném případě je poruchová fáze vypnuta trvale. Pro modelování cyklu jednofázového OZ je využita kombinace postupů z kapitol 5.2 a 5.3, které se věnují spínání linek a zkratovým poruchám. Jelikož jsou v této kapitole zkoumány proudové poměry linek PS a DS v prvním dvojbranu a uvažovaný časový interval přesahuje 100 ms, je s ohledem na dobu výpočtu pro výpočet použit model vedení se 4 dvojbrany v kaskádě.

5.4.1. Cyklus jednofázového OZ na ZVN

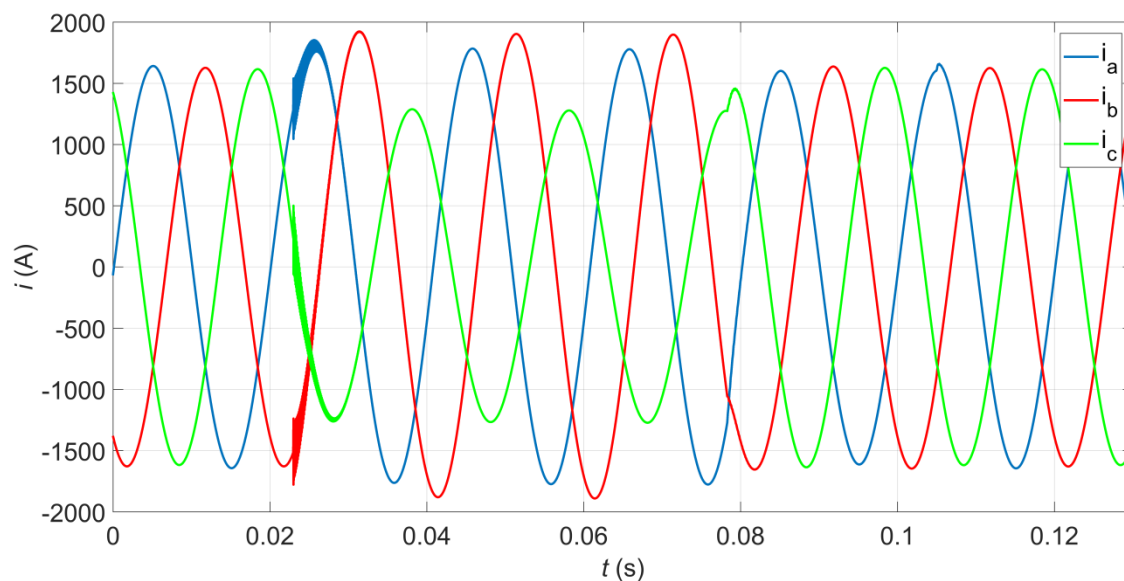
Pro výpočet je uvažován zkrat vznikající v čase t_{SC} na 15 km fáze-C 1. ZVN linky a jeho odpor odpovídá $0,5 \Omega$. Sekvence přechodných dějů je naznačena na Obr. 55, přičemž $t_{SC} = 0,022$ s, $t_{OFF} = 0,078$ s, $t_{ON} = 0,105$ s.



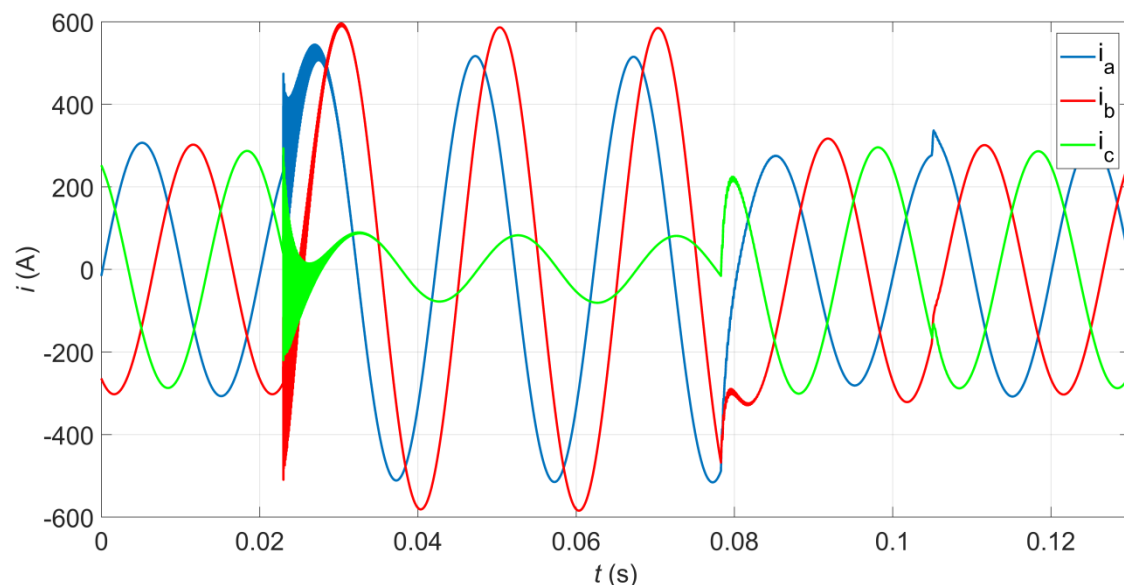
Obr. 55 Sekvence přechodných dějů pro cyklus jednofázového OZ na ZVN



Obr. 56 Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN



Obr. 57 Fázové proudy 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN

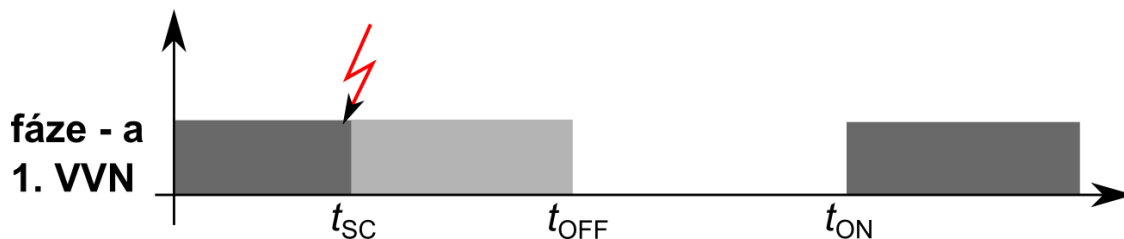


Obr. 58 Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na ZVN

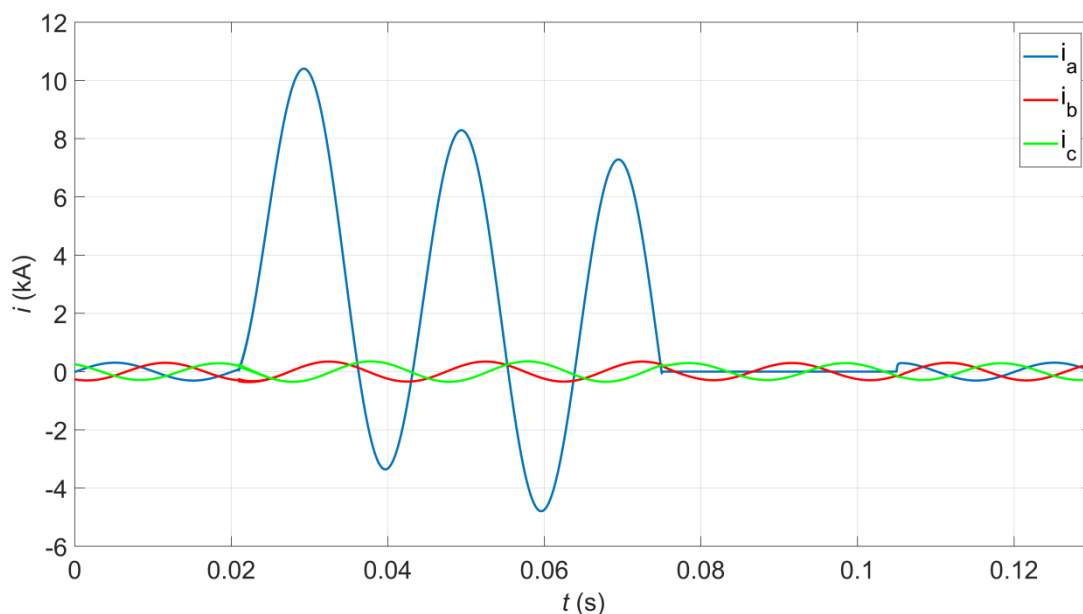
Dle očekávání cyklus jednofázového OZ na ZVN má větší dopad na proudové poměry linky VVN. Vypínání zkratového proudu se projevuje výraznou změnou průběhů proudů doprovázené oscilacemi, jejichž velikost závisí na průběhu vypínání zkratu. V optimálním případě, kdy je zkratový proud vypínán v blízkosti proudové nuly, jsou tyto oscilace nevýrazné. V opačném případě mohou dosahovat podobných hodnot jako v případě oscilací spojených se vznikem zkratu. Dále je možné pozorovat proudové špičky při zapínání poruchové fáze zpět pod napětí v čase t_{ON} , které jsou u VVN linek výraznější než u linek ZVN.

5.4.2. Cyklus jednofázového OZ na VVN

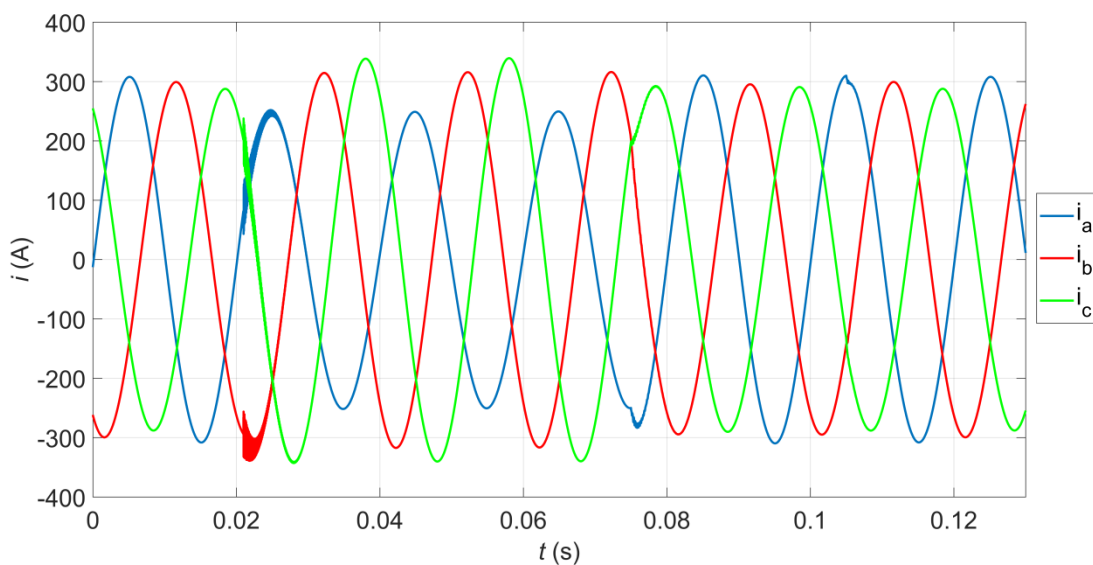
Pro výpočet je uvažován zkrat vznikající v čase t_{SC} na 15 km fáze-a 1. VVN linky a jeho odpor odpovídá $0,5 \Omega$. Sekvence přechodných dějů je naznačena na Obr. 59, přičemž $t_{SC} = 0,021$ s, $t_{OFF} = 0,075$ s, $t_{ON} = 0,105$ s.



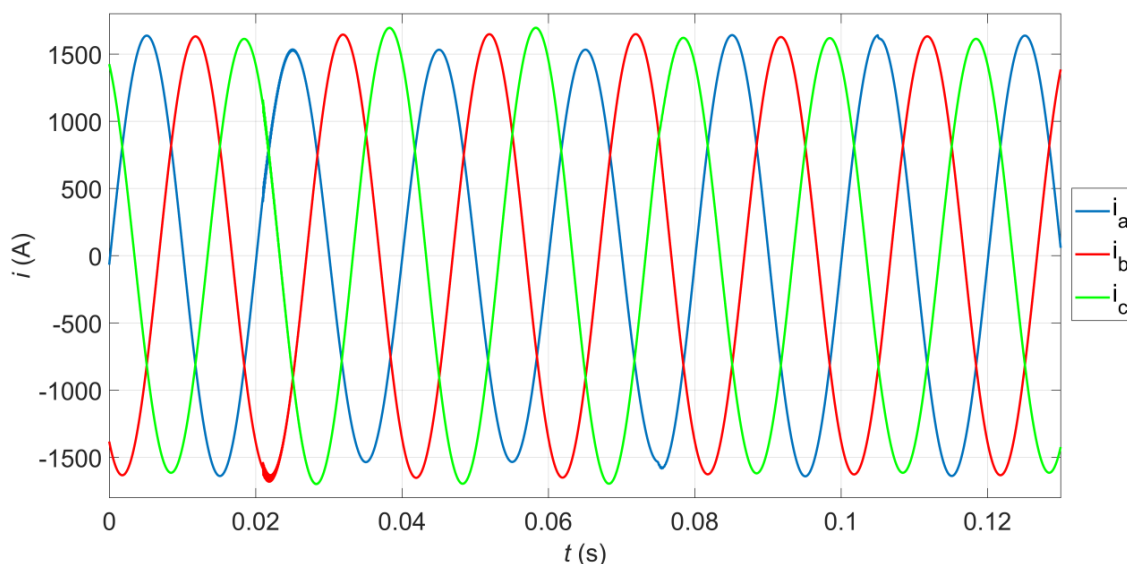
Obr. 59 Sekvence přechodných dějů pro cyklus jednofázového OZ na VVN



Obr. 60 Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN



Obr. 61 Fázové proudy 2. VVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN



Obr. 62 Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během jednofázového cyklu OZ na VVN

Průběhy fázových proudů jednotlivých linek ukazují, že průběh zkratu na VVN a jeho vypínání dle předpokladu ovlivňuje významněji druhou linku VVN než linky ZVN. Fázové proudy na ZVN vykazují nepatrnou nesymetrii během trvání zkratu a dále je možné pozorovat nevýrazné oscilace spojené se vznikem zkratu. Odolnost linek ZVN proti vlivu zkratu na VVN je možno vysvětlit tím, že velikost indukovaného napětí od zkratu na VVN je vůči nominální hodnotě napětí vodičů linek ZVN nižší, než v případě zkratu na ZVN a jeho vlivu na vodiče linek VVN.

Dále je třeba poznamenat, že v praxi jsou skutečné časy vypnutí t_{OFF} a zejména t_{ON} odlišné od časů použitých v kap. 5.4.1 a 5.4.2. Hlavně beznapěťová doba trvá výrazně déle než byla v uvažována v prezentovaných výpočtech. Důvodem zkrácení toho intervalu bylo motivováno zkrácením doby výpočtu a lepší interpretací výsledků na celkově kratším výpočetním intervalu.

5.5. Indukované proudy do vypnutých linek

Lze předpokládat, že během provozu nastanou situace, kdy linky ZVN resp. VVN budou vypnuté (např. z důvodu údržby). Jak už bylo stručně popsáno v kap. 5.1., vlivem induktivních vazeb se od zapnutých linek do těch vypnutých indukuje napětí, vlivem kapacitních pak proud. Jelikož se vypnuté vedení na jeho začátku a konci uzemňuje, je zde vytvořena „smyčka dokrátka“ viz. Obr. 29. To má za následek, že vodiči vypnutých linek začne protékat proud, který se uzavírá přes zemnicí lana a zem. Pro všechny výpočty bude uvažována hodnota impedance zemnění Z_G vypnutých linek rovna 1Ω a 4 dvojbrany v kaskádním zapojení. V kap. 5.5.1. a 5.5.2. jsou prezentovány variantní výpočty indukovaných proudů v závislosti na přenášeném výkonu zapnutých linek. V kap. 5.5.3 a 5.5.4 jsou analyzovány indukované proudy do vypnutých linek během 1f zkratu, jehož vznik je uvažován na lince, která je v provozu.

5.5.1. Variantní výpočty pro standardní provoz linek ZVN, linky VVN vypnuté

Pro výpočty je uvažován ustálený stav zapnutých ZVN linek. Indukované proudy ve vypnutých VVN linkách jsou vyhodnocovány pro různé velikosti přenášeného výkonu na hladině ZVN. V Tab. 14. jsou pak uvedeny amplitudy ustálených indukovaných proudů jednotlivých vodičů včetně zemnicích lan.

Tab. 14 Amplitudy ustálených indukovaných proudů v obou vypnutých VVN linkách

P_{400} (MW)	I_{c3} (A)	I_{b3} (A)	I_{a3} (A)	I_{c4} (A)	I_{b4} (A)	I_{a4} (A)	I_{o1} (A)	I_{o2} (A)
2x200	19,96	19,08	21,95	23,39	20,09	20,51	51,61	52,64
2x400	39,63	37,99	43,55	46,59	40,15	40,92	102,7	104,6
2x600	59,29	56,9	65,13	69,81	60,26	61,4	153,7	156,4
2x800	78,94	75,78	86,68	93,06	80,41	81,91	204,3	208
2x1000	98,57	94,59	108,2	116,3	100,5	102,4	254,9	259,3
2x1200	118,1	113,4	129,7	139,5	120,7	123	305,2	310,3
2x1400	137,6	132,1	151	162,7	140,9	143,6	355,3	360,9

Na základě získaných výsledků z provedených variantních výpočtů je možné učinit několik závěrů. Velikost indukovaných proudů do vodičů vypnutých linek VVN, zemnicích lan a země narůstá se zvyšujícím se přenášeným výkonem na ZVN lineárně. Vztaheno k hodnotě fázového proudu na hladině ZVN odpovídající danému přenášenému výkonu, pohybují se velikosti indukovaných proudů ve vodičích vypnutých linek VVN

přibližně rozmezí 6,5 % – 8 %. U zemnicích lan činí velikost indukovaných proudů 17,7 % – 18 % hodnoty fázového proudu ZVN. Poměry indukovaných proudů jsou ovlivněny pozicí vodičů vůči vodičům zapnutých ZVN linek, což má vliv na velikost vzájemných induktivních a kapacitních vazeb. Pozice jednotlivých vodičů dále ukazuje na možnost případného vykompenzování účinků induktivních a kapacitních vazeb vlivem fázového posunu zapnutých ZVN linek, která se projeví u vodiče, jehož vazby na všechny fázové vodiče mají podobnou velikost. Tento jev se v negativním smyslu projevuje zejména u zemnicích lan, jejichž induktivní a kapacitní vazba na vodiče fáze-B obou ZVN linek (umístěné na vrcholu trojúhelníka – viz. Obr 30) je výrazně větší než vazby na fáze-A a fáze-C.

5.5.2. Variantní výpočty pro standardní provoz linek VVN, linky ZVN vypnuté

Podobně jak v kap. 5.5.1. je také uvažován ustálený stav zapnutých VVN linek a vliv jejich zatížení na velikost indukovaných proudů do vodičů vypnutých ZVN linek a zemnicích lan. Výsledky výpočtů jsou prezentovány v Tab. 15.

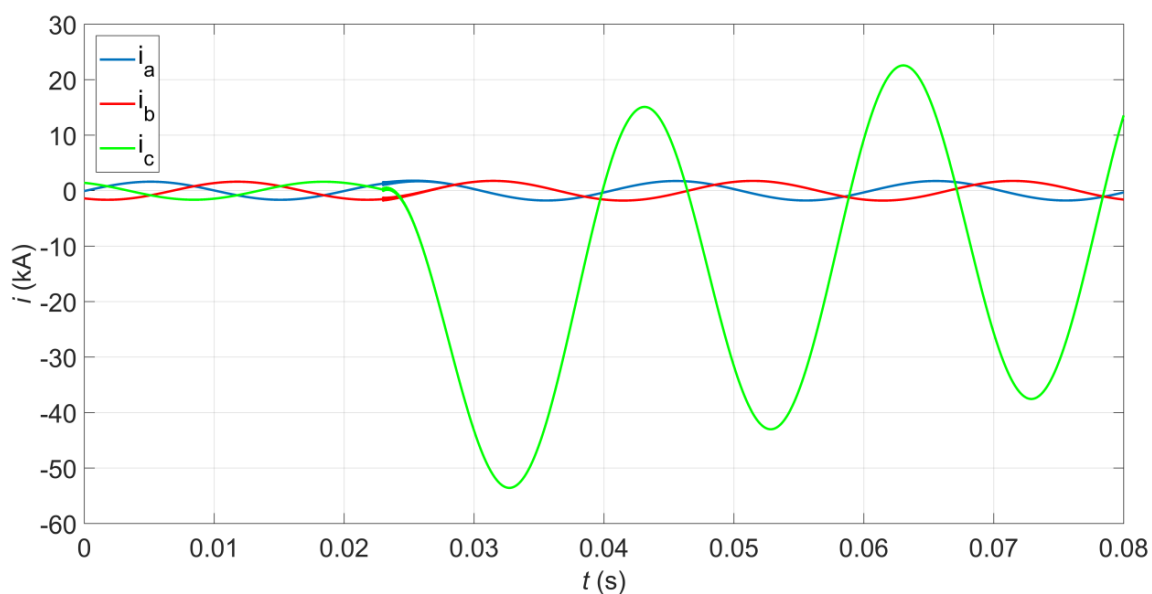
Tab. 15 Amplitudy ustálených indukovaných proudů v obou vypnutých ZVN linkách

P_{110} (MW)	I_{A1} (A)	I_{B1} (A)	I_{C1} (A)	I_{A2} (A)	I_{B2} (A)	I_{C2} (A)	I_{01} (A)	I_{02} (A)
2x30	10,01	2,5	0,41	0,94	2,33	9,76	1,36	1,11
2x50	16,68	4,21	0,6	1,65	3,74	15,95	2,28	1,83
2x70	23,38	5,95	0,7	2,4	5,15	22,11	3,24	2,51
2x90	30,11	7,73	0,75	3,22	6,49	28,13	4,24	3,15
2x110	36,83	9,53	0,8	4,10	7,77	34,01	5,28	3,76

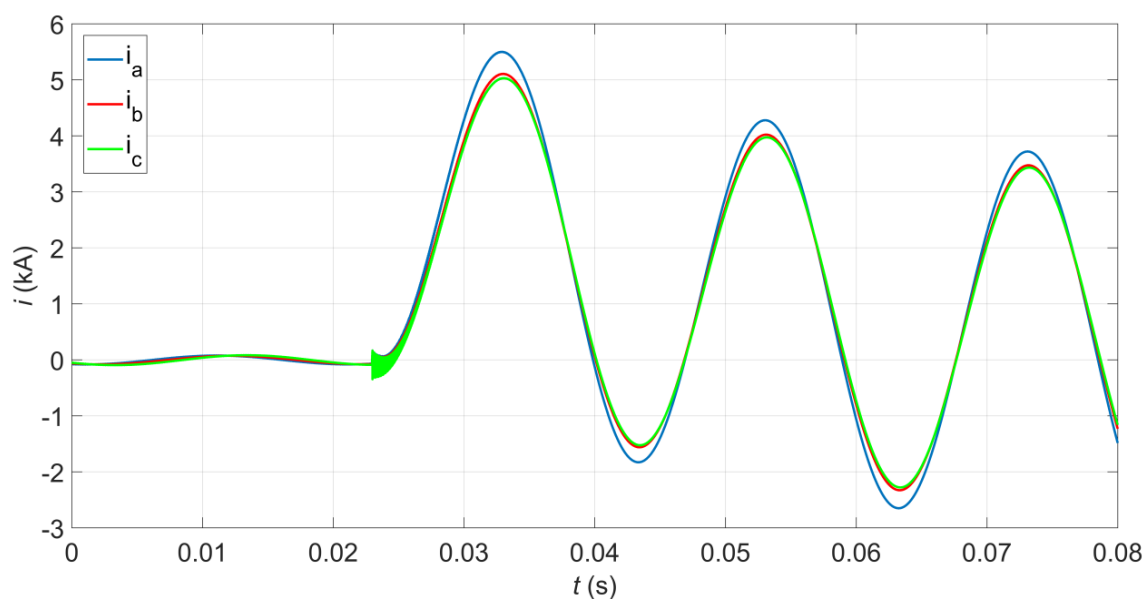
Podobně jako v případě výsledků v kap. 5.5.1, závisí velikost indukovaných proudů do vodičů vypnutých linek ZVN téměř lineárně na přenášeném výkonu linek VVN. Amplitudy indukovaných proudů ovšem dosahují výrazně nižších hodnot, což je způsobeno nižším proudovým rozsahem fázových vodičů linek VVN. Nejvyšší hodnotu indukovaného proudu ve vypnutých linkách ZVN je možné pozorovat u spodních vodičů umístěných dále od osy stožáru. To je dáno nerovnoměrností induktivních a kapacitních vazeb na fázové vodiče linek VVN.

5.5.3. Zkratová porucha na ZVN, linky VVN vypnuté

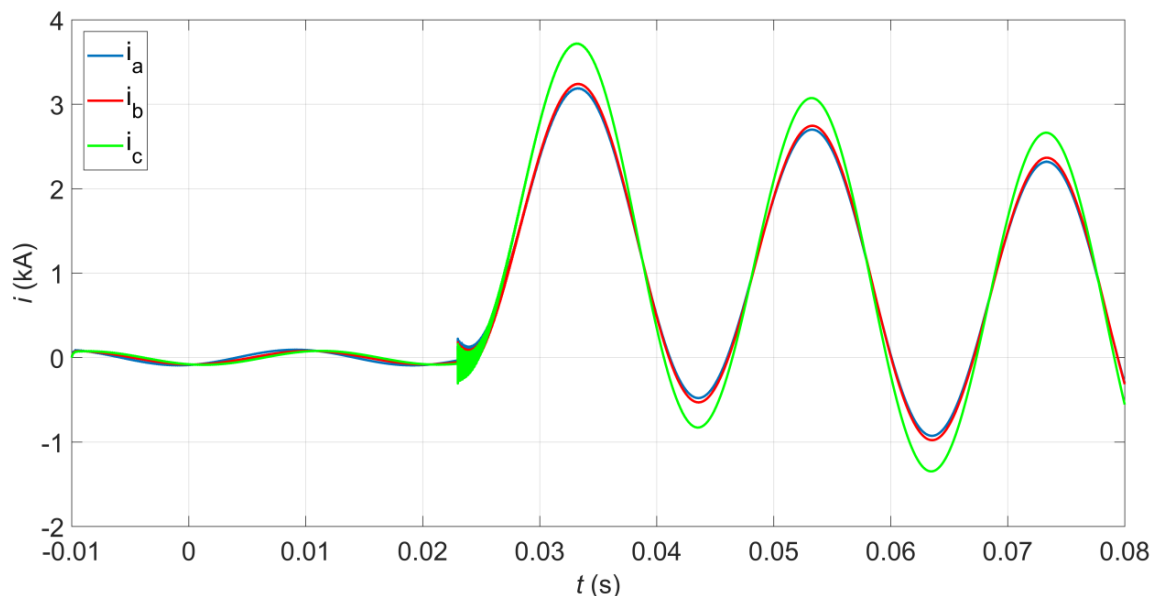
S ohledem na konfiguraci jednotlivých vodičů ZVN a tím i rozdílnou vzdálenost od vodičů VVN lze předpokládat i rozdílné výsledné indukované proudy ve vodičích VVN během jednofázových zkratů na ZVN. S ohledem na výrazný nárůst proudu zkratového vodiče je možné očekávat, že na velikost indukovaných proudů bude mít dominantní vliv induktivní vazba mezi vodičem se zkratem a jednotlivými vodiči vypnutých VVN linek. Tento předpoklad bude ověřován v této podkapitole. Nejprve jsou na Obr. 64 až 66 prezentovány časové závislosti fázových a indukovaných proudů pro případ jednofázového zkratu ve fázi-C 1. linky ZVN. Doba vzniku zkratu odpovídá 0,023 s a odpor zkratu je definován jako 0,5 Ω .



Obr. 63 Fázové proudy 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na ZVN



Obr. 64 Indukované proudy ve vodičích vypnuté 1. VVN linky během zkratu na ZVN



Obr. 65 Indukované proudy ve vodičích vypnuté 2. VVN linky během zkratu na ZVN

Průběhy indukovaných proudů ve vodičích vypnutých VVN linek na Obr. 64 a Obr. 65 ukazují, že vznik a trvání zkratu na ZVN má za následek výrazné zvýšení hodnot indukovaných proudů oproti standardnímu provozu linek ZVN. Za definovaných podmínek v kap. 5.5.1. a 5.5.2. je tento nárůst takřka desetinásobný. Po odeznění transientní složky mají indukované proudy ustálený harmonický charakter. V Tab. 16 jsou shrnuty amplitudy již ustálených indukovaných proudů i pro případ vzniku zkratu ve fázi-A a fázi-B 1. ZVN linky.

Tab. 16 Ustálené amplitudy indukovaných proudů do vodičů vypnutých VVN linek během 1f zkratů na ZVN

Poruchová fáze 1. ZVN linky	I_{c3} (kA)	I_{b3} (kA)	I_{a3} (kA)	I_{c4} (kA)	I_{b4} (kA)	I_{a4} (kA)
fáze-A	2,83	3,13	2,83	1,45	1,20	1,28
fáze-B	2,28	2,02	2,17	1,71	1,42	1,47
fáze-C	3,04	3,04	3,47	2,10	1,72	1,75

Hodnoty amplitud indukovaných proudů uvedených v Tab. 16 zohledňují všechny induktivní a kapacitní vazby mezi vodiči v systému. Na vodiče vypnutých linek tak působí vazby od vodiče se zkratem, dále vazby od zbývajících vodičů zapnutých ZVN linek a nakonec i vazby mezi samotnými vodiči vypnutých linek VVN. Dominanci vlivu dílčí induktivní vazby mezi vodičem se zkratem a jednotlivými vodiči vypnutých linek je možné otestovat pomocí korelace. S ohledem na konfiguraci fázových vodičů dle Obr. 30 je

možno vyjádřit vzájemné induktivní vazby mezi vodiči 1. ZVN linky a vodiči obou vypnutých linek VVN z matic indukčností (15c) a (15d). Tyto vzájemné indukčnosti lze vyčíslit a jejich hodnoty pro jeden dvojbran (vztažené na 5 km délky) jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17 Velikosti vzájemných indukčností uvedených v “mH“ mezi vodiči 1. ZVN linky a vodiči obou vypnutých linek VVN

1. ZVN linka	c_3	b_3	a_3	c_4	b_4	a_4
fáze-A	3,645	3,561	3,396	2,594	2,478	2,373
fáze-B	2,764	2,778	2,767	2,464	2,386	2,308
fáze-C	3,408	3,569	3,645	2,907	2,758	2,626

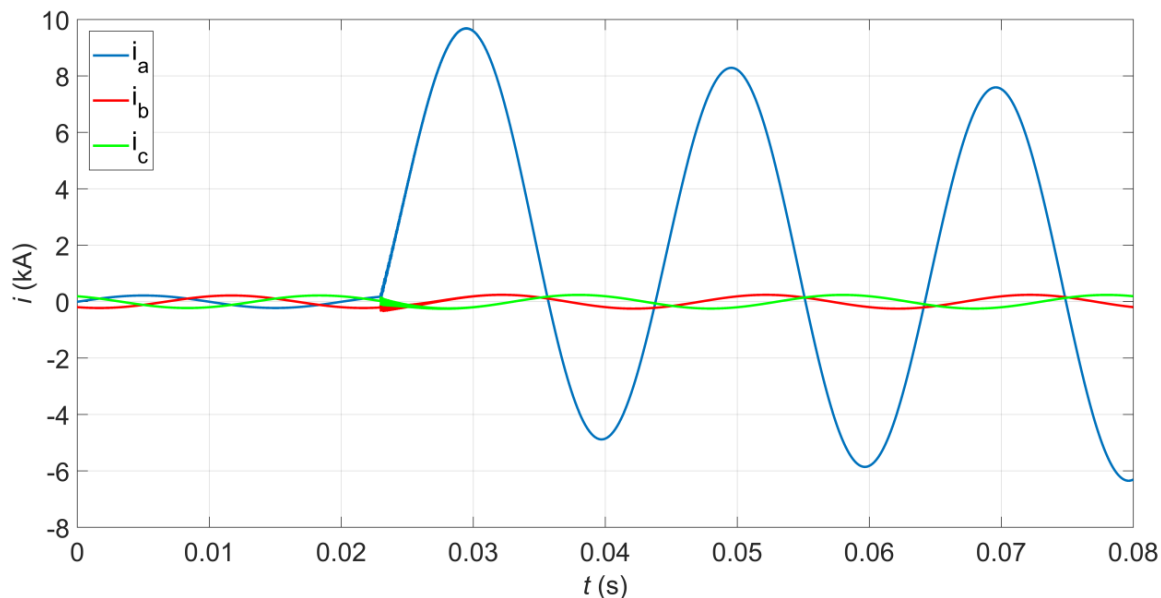
Hodnoty uvedené v Tab. 16 je možno považovat za matici \mathbf{I}_k , stejně tak hodnoty uvedené v Tab. 17 jako matici $\mathbf{L}_{13,14}$. Pokud se provede výpočet korelačních koeficientů mezi těmito maticemi podle Pearsona [29], je možné určit, do jaké míry závisí velikost indukovaného proudu ve vodičích vypnutých linek pouze na velikosti induktivní vazby ke zkratovému vodiči.

$$\rho(\mathbf{I}_k, \mathbf{L}_{13,14}) = \begin{bmatrix} 1 & 0,95 \\ 0,95 & 1 \end{bmatrix} \quad (56)$$

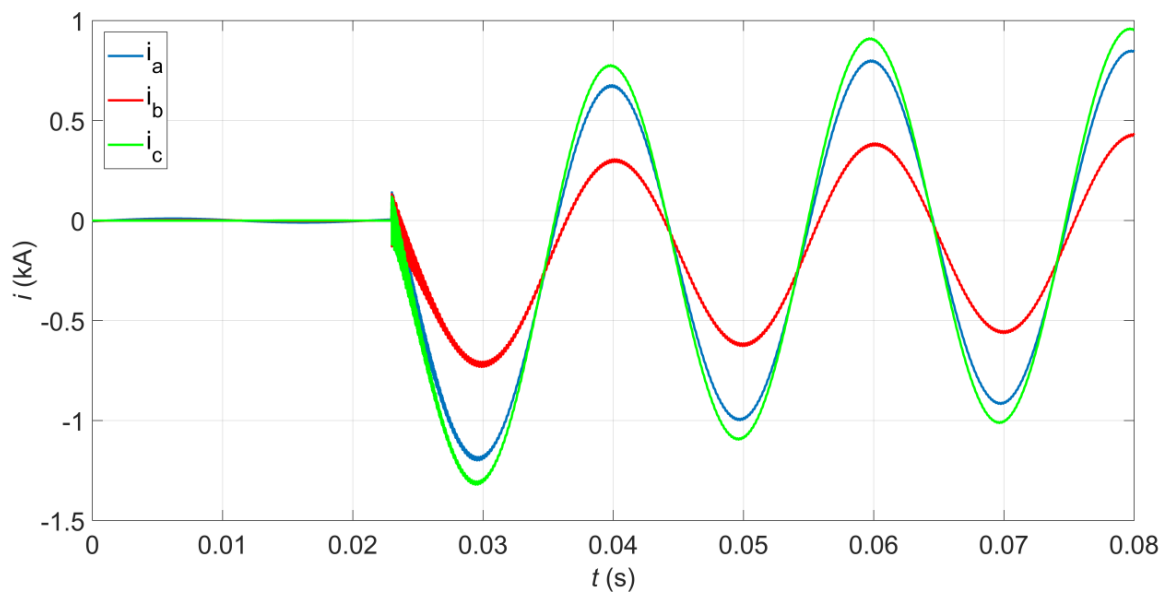
Korelační koeficienty podle Pearsona mohou nabývat hodnot na intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Míru korelace mezi prvky matic \mathbf{I}_k a $\mathbf{L}_{13,14}$ určují elementy mimo hlavní diagonálu [29]. Pokud tyto koeficienty nabývají hodnot blízkých 1, pak je míra korelace mezi prvky těchto matic významná. Tím se potvrzuje předpoklad, že existuje významná souvislost mezi velikostmi indukovaných proudů a velikostmi induktivních vazeb ke zkratovému vodiči.

5.5.4. Zkratová porucha na VVN, linky ZVN vypnuté

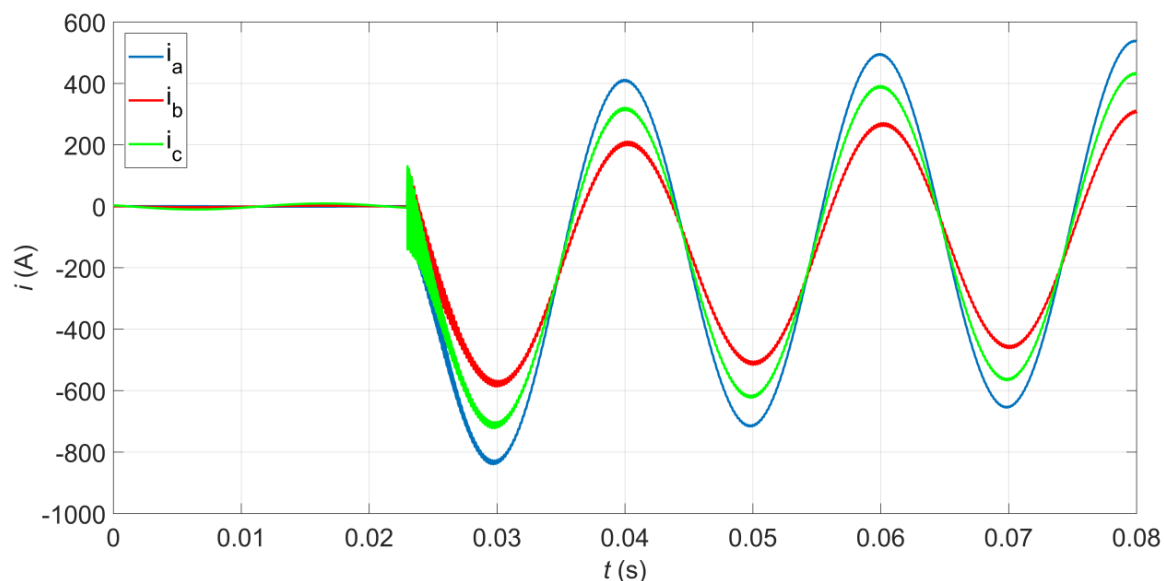
Podobně jako v případě výpočtů v kap. 5.5.3., je zkoumána souvislost mezi velikostí naindukovaných proudů ve vypnutých vodičích ZVN a fází linky VVN, na které vznikl jednofázový zkrat. Parametry zkratu jsou totožné s kap. 5.5.3, tedy vznik zkratu v čase 0,023 s a odpor zkratu 0,5 Ω . Pro ilustraci jsou nejprve ukázány časové závislosti fázových a indukovaných proudů během zkratu fáze-a 1. linky VVN.



Obr. 66 Fázové proudy 1. VVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN



Obr. 67 Indukované proudy ve vodičích 1. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN



Obr. 68 Indukované proudy ve vodičích 2. ZVN linky v prvním dvojbranu během zkratu na VVN

Získané průběhy indukovaných proudů opět ukazují významný nárůst jejich velikosti oproti standardnímu provozu linek VVN. Oproti výsledkům v kap. 5.5.3. je ovšem možné spatřit významnější rozdíly v amplitudách indukovaných proudů jednotlivých fázových vodičů vypnutých linek ZVN. Amplitudy ustálených indukovaných proudů ve vodičích vypnutých linek ZVN pro případ jednofázového zkratu ve všech fázích 1. VVN linky jsou uvedeny v Tab. 18. Výpočet těchto indukovaných proudů respektuje všechny indukční a kapacitní vazby mezi všemi vodiči v systému.

Tab. 18 Ustálené amplitudy indukovaných proudů do vodičů vypnutých ZVN linek během 1f zkratů na VVN

Poruchová fáze 1. VVN linky	I_{A1} (A)	I_{B1} (A)	I_{C1} (A)	I_{A2} (A)	I_{B2} (A)	I_{C2} (A)
fáze-a	875	517	970	619	422	529
fáze-b	1004	492	933	512	334	421
fáze-c	1059	531	856	502	371	452

Velikost indukovaného proudu do fáze-B 1. ZVN linky je výrazně nižší než ve fázi-A a fázi-C 1. ZVN linky. Za předpokladu dominantního vlivu dílčí indukční vazby od vodiče vypnuté linky ke zkratovému vodiči je tento fakt možné vysvětlit větším rozptylem vzdáleností jednotlivých vodičů 1. ZVN linky od poruchových fází 1. VVN linky, což definuje výraznější rozdíly ve velikosti indukčních vazeb k tomuto poruchovému vodiči. Vodiče fází-B obou vypnutých linek ZVN jsou umístěny na vrcholu

trojúhelníka (viz. Obr. 30) nejdále od vodiče s poruchou. Ověření tohoto předpokladu je možné podobně jako v kap. 5.5.3 pomocí testu korelace. Vzájemné indukčnosti mezi vodiči vypnutých ZVN linek a jednotlivými vodiči 1. VVN linky jsou naznačeny v Tab. 19.

Tab. 19 Velikosti vzájemných indukčností uvedených v “mH” mezi vodiči 1. VVN linky a vodiči obou vypnutých linek ZVN

1. VVN linka	A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂
fáze-a	3,396	2,767	3,647	2,907	2,464	2,594
fáze-b	3,561	2,778	3,569	2,758	2,386	2,478
fáze-c	3,645	2,764	3,408	2,626	2,308	2,373

Hodnoty uvedené v Tab. 18 odpovídají prvkům matice \mathbf{I}_k , hodnoty v Tab. 19 pak matici $\mathbf{L}_{31,32}$. Korelační koeficienty těchto matic odpovídají (57).

$$\rho(\mathbf{I}_k, \mathbf{L}_{31,32}) = \begin{bmatrix} 1 & 0,98 \\ 0,98 & 1 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Ukazuje se, že v případě jednofázových zkratů na VVN je vliv induktivní vazby mezi vodičem vypnuté linky ZVN a vodičem se zkratem ještě více dominantní. Vliv induktivních od zbývajících vodičů VVN se ukazuje jako výrazně nižší a s ohledem na větší vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči vypnutých linek ZVN jsou i jejich vzájemné vazby nižší.

6. Simulace v programu Dynast

Pro tvorbu modelu kombinovaného vedení jsem měl k dispozici licence následujících simulačních programů:

- MATLAB Simulink
- Dynast
- EMTP-ATP
- Modellica

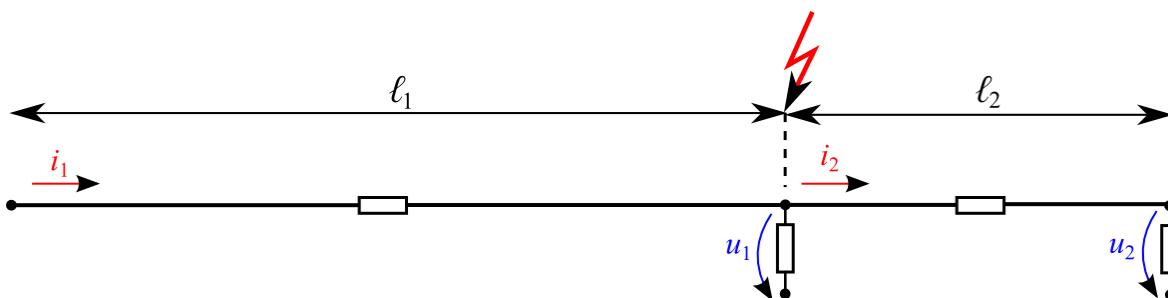
Použití připravených modelů přenosových vedení v knihovných simulačních programů pro složitý systém kombinovaného vedení se čtyřmi linkami se ukazuje jako problematické. Komplikací je zejména zohlednění induktivních vazeb mezi všemi vodiči, jejíž proveditelnost a náročnost se v různých programech výrazně liší. Jako optimální se ukázal program Dynast, v němž byl vytvořen simulační model vedení použitý pro verifikaci modelu vedení pro numerické řešení v Matlabu. Při tvorbě simulačního modelu jsem však narazil na jistá omezení, která jsou popsána dále v této kapitole. Simulační program Dynast využívá k řešení diferenciálních rovnic implicitní vícekrokovou integrační metodu charakterizovanou lineárním polynomiálním vzorcem [30].

6.1. Jednofázová zkratová porucha

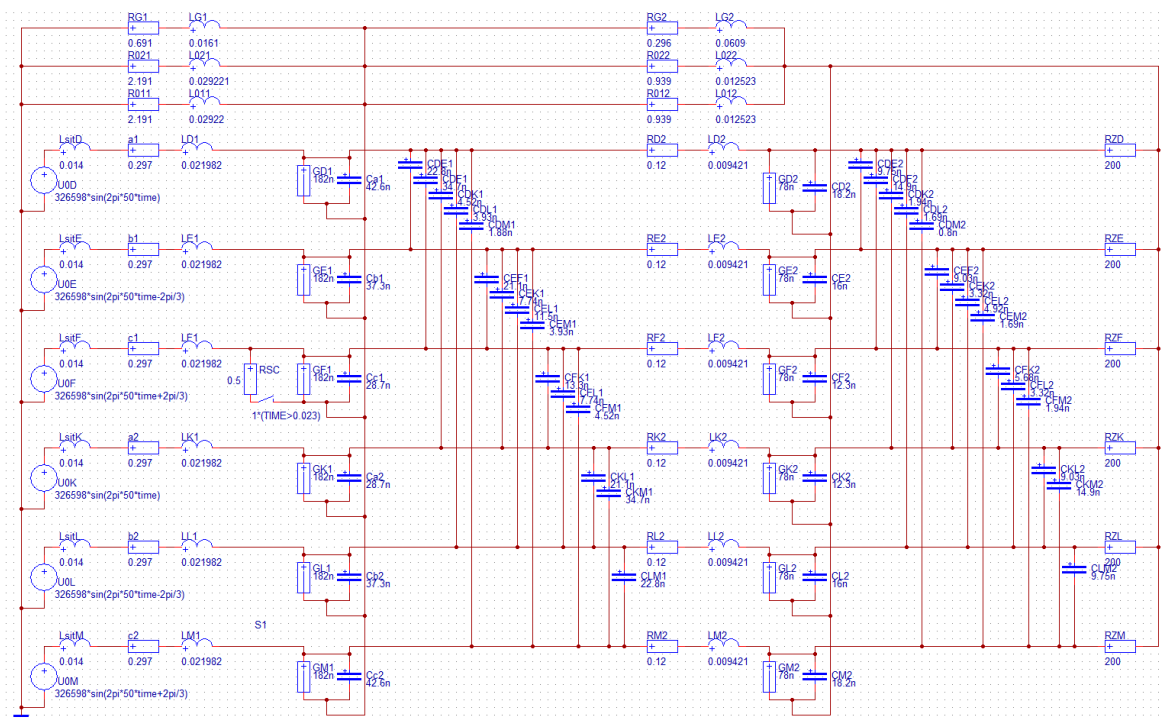
V programu Dynast je simulován případ jednofázového zkratu, který vznikl na hladině 400 kV. Parametry zkratu jsou totožné s uvažovanými parametry v kap. 5.3. aby bylo možné získané výsledky porovnat. Pro simulaci je tedy uvažováno zcela netransponované kombinované vedení 2x400 kV + 2x110 kV o délce 20 km a stožárové konstrukce Donau s asymetrickým uspořádáním vodičů – viz. Obr. 30. Vznik zkratu je uvažován na 14 km délky vedení fáze-C 1. ZVN linky a to v čase 0,023 s. Odpor zkratu pak odpovídá 0,5 Ω .

Model vedení pro simulaci v Dynastu sestavený z kaskádního zapojení dvojbranů se ukázal jako nestabilní a jeho výsledky divergovaly. Kombinované vedení je složitý vzájemně se ovlivňující se systém. Z výpočetního hlediska může být problematickým faktem nesouměřitelnost velikostí parametrů vzájemných indukčností a kapacit. Z výše uvedených důvodů je pro verifikaci modelu pro numerické řešení v Matlabu uvažován zjednodušený model vedení [28]. Ten je tvořen pouze dvěma dvojbrany v kaskádě a pouze dvěma linkami. Velikosti parametrů R , L , C_0 a G v prvním a druhém dvojbranu jsou

závislé na poloze zkratu, která je definována délkami l_1 a l_2 – viz. Obr. 69. Pro respektování vlivu zkratu na průběhy napětí a proudů 2. linky ZVN a 1. linky VVN je tak zapotřebí vytvořit dva dílčí simulační modely, které respektují vzájemné indukční a kapacitní vazby mezi vodiči daných linek. Schéma vytvořeného simulačního modelu vedení pro 1. a 2. linku 400 kV je na Obr. 70. Druhý simulační model pro 1. linku 400 kV a 1. linku 110 kV je vytvořen analogicky, rozdílné jsou jen velikosti pasivních parametrů a indukčních respektive kapacitních vazeb.



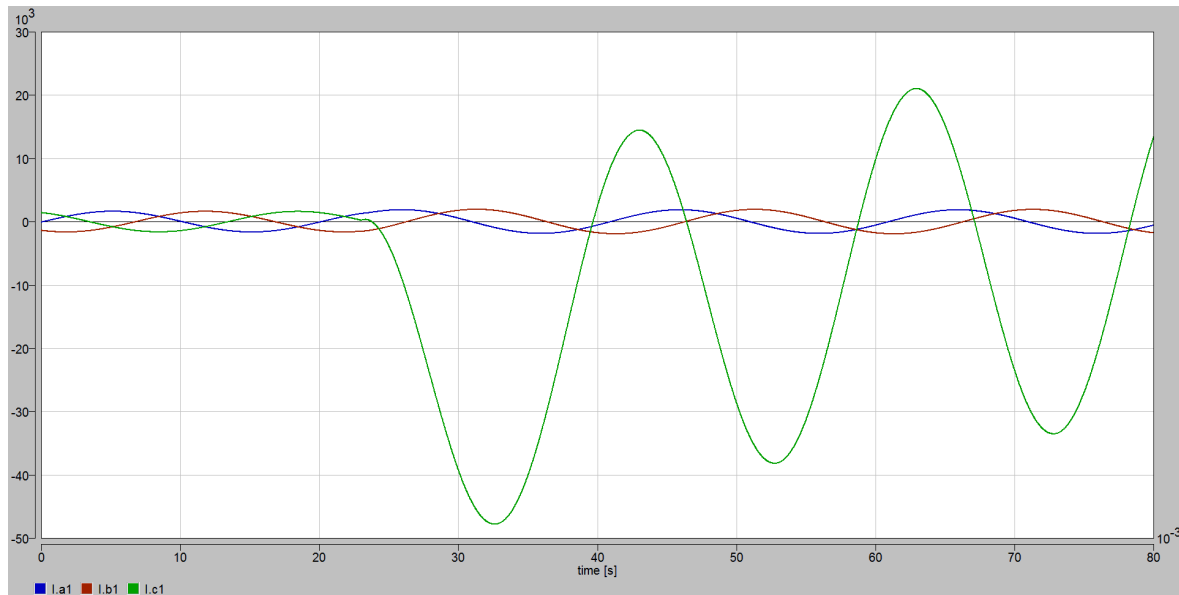
Obr. 69 Nerovnoměrné dělení dvojbranů podle polohy zkratu na vedení



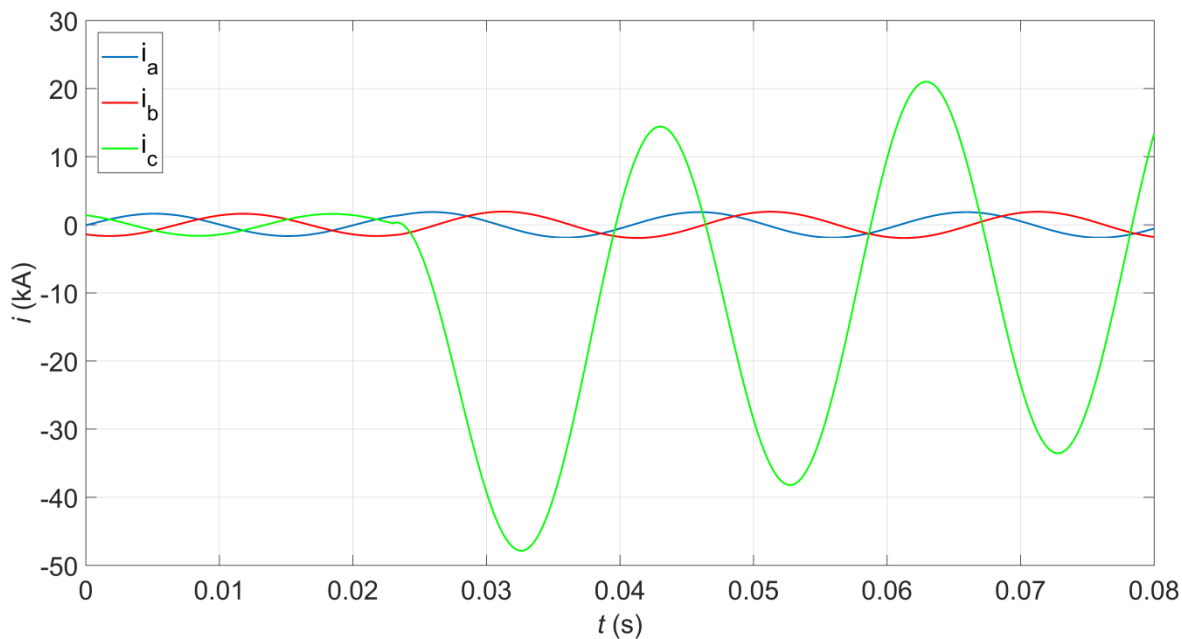
Obr. 70 Model vedení pro simulaci v Dynastu

Na Obr. 70 jsou patrné kapacitní vazby mezi jednotlivými fázovými vodiči. Induktivní vazby jsou definovány pomocí dialogového okna, kdy je nutné zadat velikost vzájemné indukčnosti a mezi jakými indukčnostmi tato vazba působí, což je patrné v kódu zdrojového souboru formátu .prb. Na následujících obrázcích jsou prezentovány vybrané průběhy napětí a proudů z prvního dvojbranu, které byly získány z obou simulačních

modelů v Dynastu. Ty jsou porovnávány s průběhy získanými z upraveného modelu vedení pro numerické řešení v Matlabu, který byl rovněž zjednodušen na dva dvojbrany v kaskádě.

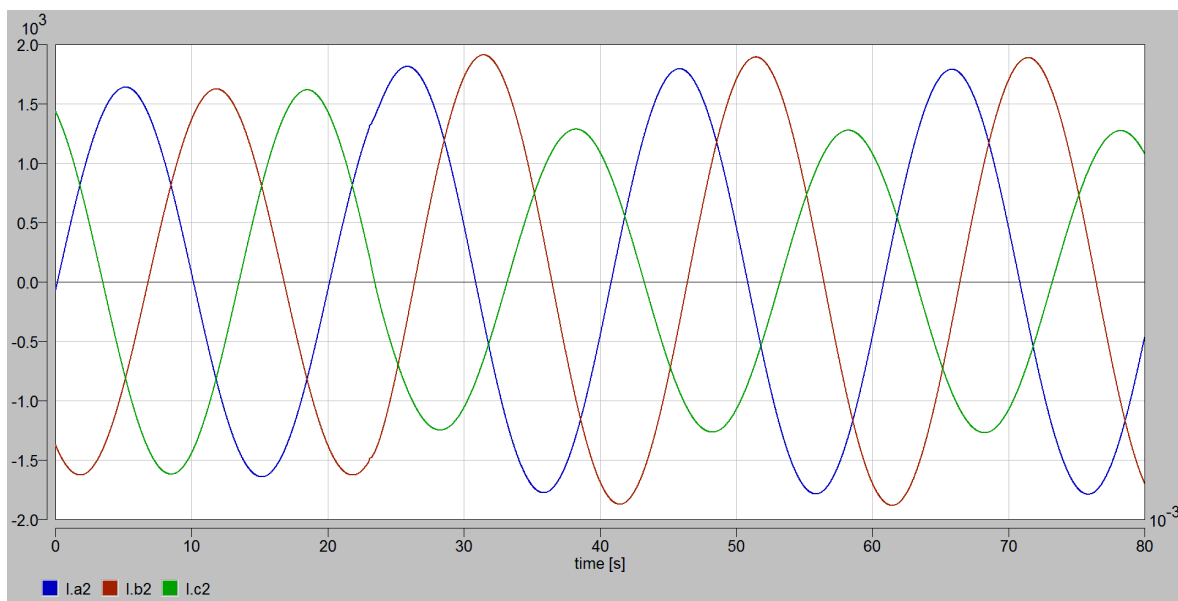


Obr. 71 Fázové proudy 1. ZVN linky ze simulačního modelu v Dynastu

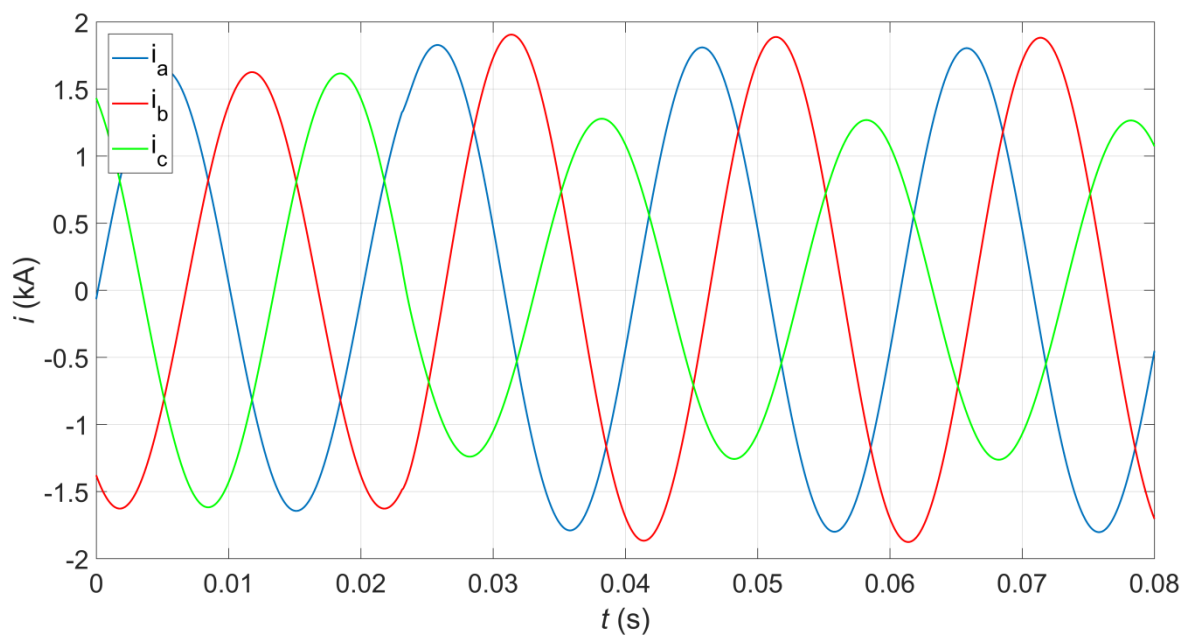


Obr. 72 Fázové proudy 1. ZVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu

První porovnání modelu vedení pro numerické řešení v Matlabu a simulačního modelu v Dynastu ukazuje dobrou shodu v získaných výsledcích, což je možné pozorovat na velikosti první amplitudy a rovněž na celkovém průběhu zkratového proudu.

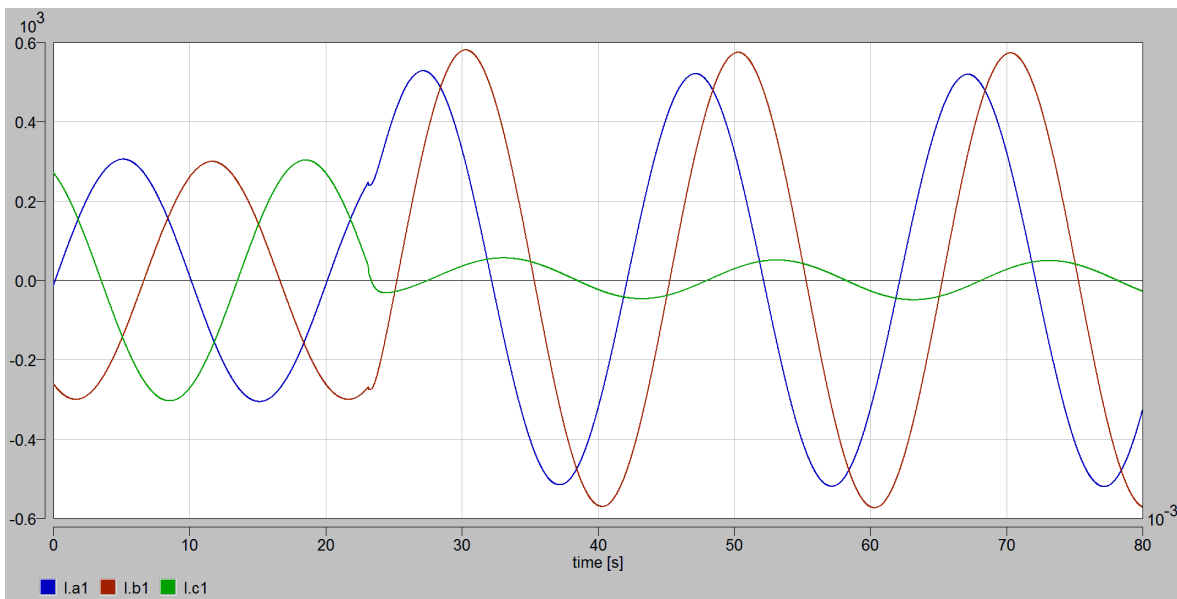


Obr. 73 Fázové proudy 2. ZVN linky ze simulačního modelu v Dynastu

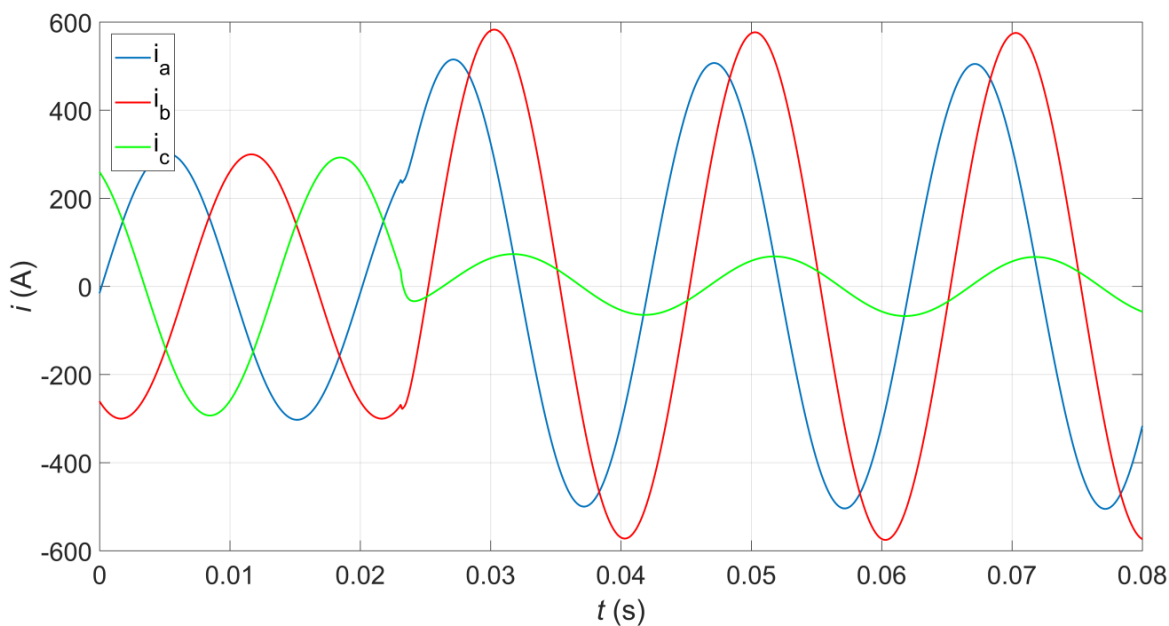


Obr. 74 Fázové proudy 2. ZVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu

Získané fázové proudy 2. ZVN linky ze simulačního modelu odpovídají výsledkům z modelu vedení pro numerické řešení v Matlabu. Průběh jednofázového zkratu je opět spojen s nesymetrií fázových proudů, která je dobře patrná u těchto průběhů. Dle předpokladu je tato nesymetrie ještě výraznější na průbězích fázových proudů 1. VVN linky – viz. Obr. 75 a Obr. 76.

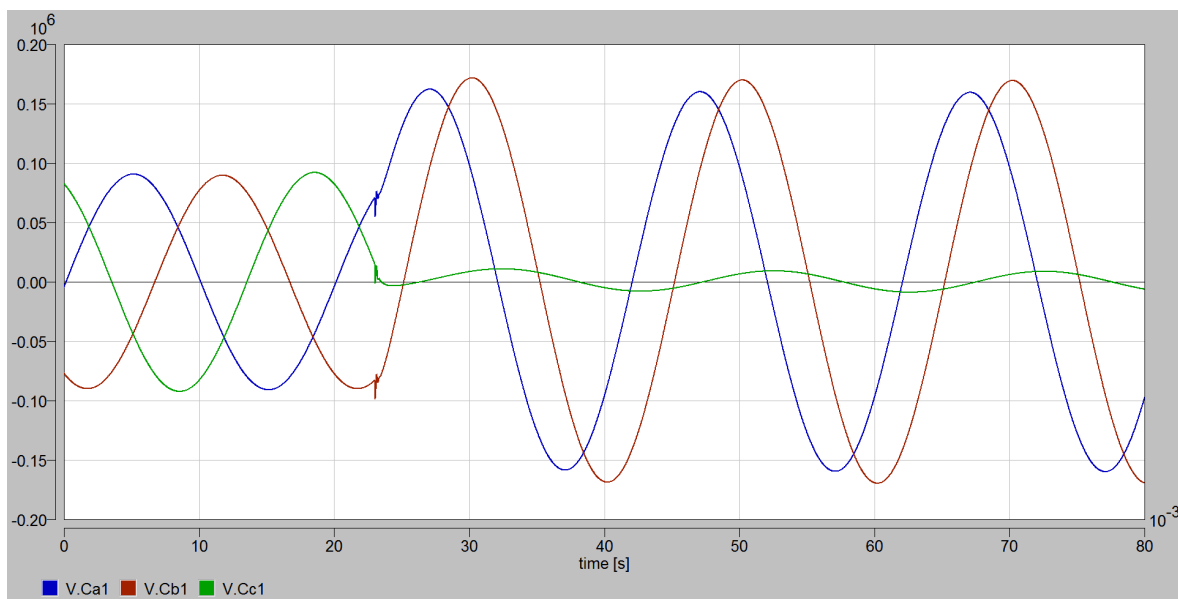


Obr. 75 Fázové proudy 1. VVN linky ze simulačního modelu v Dynastu

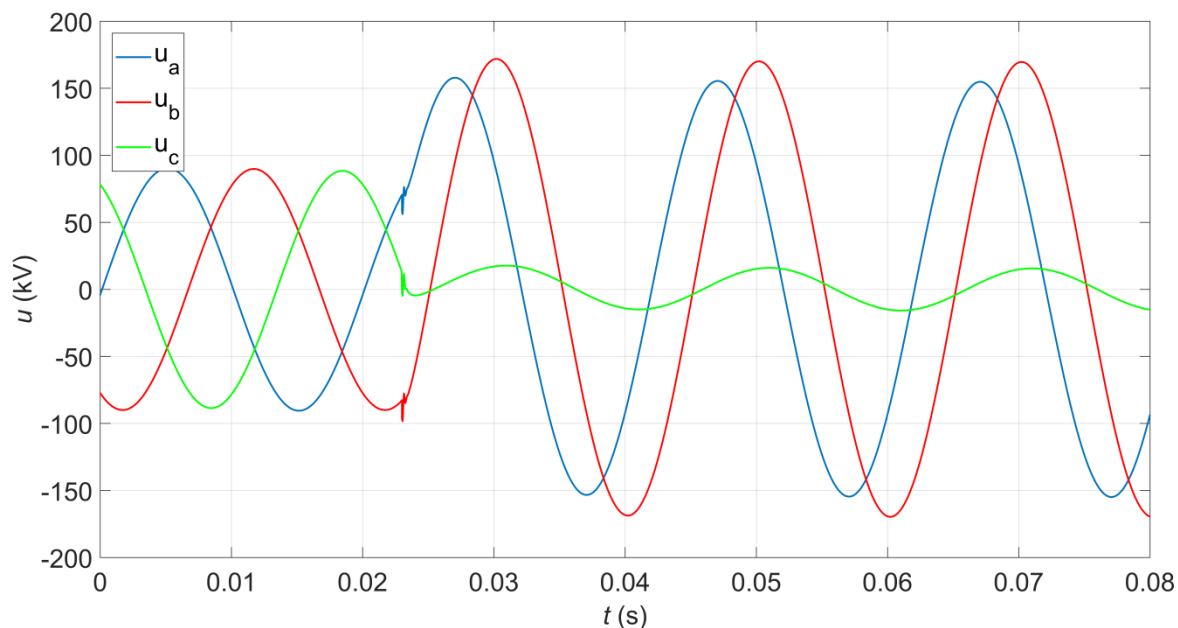


Obr. 76 Fázové proudy 1. VVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu

Oba průběhy ukazují, že vznik zkratu je spojen s vyvinutím pouze nepatrných překmitů. Po jejich odeznění se fázové proudy 1. linky VVN ustálí na hodnotách, kdy se projevuje výrazná proudová nesymetrie. Dále jsou na Obr. 77 a Obr. 78 prezentovány průběhy fázových napětí 1. VVN linky.



Obr. 77 Fázová napětí 1. VVN linky ze simulačního modelu v Dynastu



Obr. 78 Fázová napětí 1. VVN linky ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu

Na průbězích fázových napětí 1. VVN linky získaných jak ze simulačního modelu v Dynastu, tak i z modelu pro numerické řešení v Matlabu, jsou patrné nevýrazné oscilace s krátkou dobou tlumení. Následná nesymetrie fázových napětí je výrazně vyšší oproti výsledkům získaných z kompletního modelu pro numerické řešení v Matlabu využívající kaskádu dvojbranů. To je dáno tím, že u zjednodušeného modelu vedení se uplatní indukční účinky od poruchové fáze podél celého úseku vedení od jeho počátku až k místu zkratu. Použití zjednodušeného modelu tak neumožňuje analyzovat napěťové poměry podél vedení.

Na základě porovnání všech získaných výsledků ze zjednodušeného modelu pro numerické řešení v Matlabu a simulačního modelu v Dynastu vyšlo najevo, že je dosažena uspokojivá shoda. Model vedení pro numerické řešení byl tak úspěšně verifikován a lze ho použít pro podrobnější analýzu zkoumaných přechodných dějů.

6.2. Porovnání vlastností modelu pro numerické řešení v Matlabu a simulačního modelu v Dynastu

Z pohledu časové náročnosti je tvorba modelu v simulačním programu pro analýzu jednoho případu zkratu výrazně nižší. Dalším benefitem simulace v Dynastu je skutečnost, že během sestavování schématu není po uživateli vyžadována znalost matematického popisu, který zahrnuje formulaci rovnic dle 1. a 2. KZ společně s následnou úpravou a řešením soustavy diferenciálních rovnic. Problém může nastat v případě, že simulační model diverguje. Uživatel má pak jen omezenou míru zjistit příčinu nestability modelu. Negativem použití simulačního programu Dynast je fakt, že neumožňuje maticové operace a tak je nutné parametry vedení počítat mimo něj.

Vytvoření algoritmu pro model pro numerické řešení v Matlabu trvalo sice výrazně delší dobu, přináší ale větší flexibilitu. Změnou vstupních parametrů je možné jednoduše respektovat požadovaný typ přechodného děje a zvolit počet dvojbranů v kaskádě. Další výhodou modelu vedení pro numerické řešení v Matlabu je možnost kontroly jeho stability, což je provedeno pomocí vlastních čísel, která s případnou citlivostní analýzou umožňuje odhalit původ divergence. Další předností tohoto modelu je možnost výpočtu parametrů vedení včetně vzájemných vazeb (a jejich případnou změnu) přímo v rámci výpočetního algoritmu v Matlabu.

Zohledněním všech výše uvedených faktorů a porovnáním získaných výsledků je možné konstatovat, že použití zjednodušeného simulačního modelu vedení v Dynastu lze doporučit pro získání základní informace vzájemného ovlivňování u jednoho vybraného konkrétního případu. Pro hlubší a podrobnější analýzu vzájemného ovlivňování jednotlivých linek a pro provádění variantních výpočtů se jako výhodnější jeví model vedení pro numerické řešení v Matlabu s využitím kaskádního zapojením více dvojbranů.

Závěr

V této dizertační práci jsou analyzovány vybrané problémy spojené s provozem kombinovaných vedení s linkami různých napěťových hladin, konkrétně kombinace linek PS o napětí 400 kV a linek DS o napětí 110 kV. Nejprve je v práci provedena analýza elektromagnetického pole pro různé typy uspořádání kombinovaných stožárů. Získané výsledky výpočtů ukázaly, že typ stožárové konstrukce a vzájemná pozice linek PS a DS určuje úroveň dosahovaných hodnot intenzity elektrického a magnetického pole v celém prostoru pod vedením. Optimalizace konfigurace fází už jen dokáže redukovat maximální hodnoty obou veličin. Z tohoto pohledu se jeví jako výhodnější stožár Donau, jehož linky PS jsou umístěny nad linkami DS.

Ve své dizertaci jsem se zaměřil na analýzu vzájemného ovlivňování mezi jednotlivými linkami během pomalých přechodných dějů. Z tohoto důvodu jsem vytvořil model vedení, který se skládá z kaskády vzájemně svázaných dvojbranů, jehož popis vede na soustavu ODR. Mým cílem bylo vytvořit maximálně flexibilní model a tak pomocí změny jeho parametrů je možné vyšetřit různé poruchové a nestandardní provozní stavy. Variabilita výpočetního algoritmu je ještě podpořena tím, že prvky výpočetních matic soustavy ODR jsou plněny automaticky podle počtu dvojbranů v kaskádě. Použití většího počtu dvojbranů v kaskádě totiž umožňuje detailně analyzovat proudové a zejména napěťové poměry podél vedení.

Vzájemné ovlivňování mezi linkami během sledovaných přechodných dějů se může projevat různými způsoby. Spínání linek má za následek indukovaní napěťových a proudových špiček v provozovaných linkách, které jsou výraznější v průbězích distribučních linek během spínání linek PS. Vyšetřování jednofázových zkratových poruch ukázalo, že vznik zkratu a jeho následné vypínání je v průbězích napětí a proudů zbývajících fází doprovázeno oscilacemi o různé amplitudě, frekvenci a době tlumení. Z výsledků také vyplynulo, že po odeznění přechodné složky zkratového proudu a vzniklých oscilací vykazují fázové proudy paralelních linek nesymetrii, která je u distribučních linek výraznější. Dále bylo zjištěno, že velikost nesymetrie fázových napětí není podél vedení stejná, ale závisí na poloze sledovaného místa. Dochází jak ke změně amplitudy, tak i fázového posuvu napětí jednotlivých fázových vodičů paralelních linek. Směrem od počátku vedení k místu zkratu se tato napěťová nesymetrie prohlubuje. Výpočty indukovaných proudů do vypnutých linek ukázaly, že za standardního provozu

odpovídají amplitudy indukovaných proudů zatížení zapnutých linek. V případě jednofázových zkratů dochází k významnému nárůstu indukovaných proudů ve vypnutých linkách, jejichž amplituda je zejména dána vzdáleností od vodiče se zkratem. Z globálního pohledu tak vyšlo najevo, že vzájemné ovlivňování během sledovaných přechodných dějů je výraznější ve směru od linek PS k linkám DS.

Vytvořený model vedení pro numerické řešení v Matlabu byl konfrontován se simulačním modelem v Dynastu. Na zjednodušeném modelu sestávajícího se ze dvou dvojbranů byly porovnávány získané výsledky pro případ jednofázového zkratu. Z průběhů fázových proudů a napětí vyšlo najevo, že výsledky z obou modelů dosahují dobré shody. Na základě porovnání vlastností obou modelů lze konstatovat, že použití zjednodušeného simulačního modelu vedení je možné doporučit pro získání základní informace vzájemného ovlivňování u jednoho vybraného konkrétního případu.

Vlastní přínos své dizertační práce vidím ve vytvoření funkčního modelu vedení, který umožňuje řešit řadu problémů, jež mohou vznikat za provozu kombinovaného vedení. Jejich analýza zaměřená na vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými linkami je důležitá pro zajištění spolehlivého chodu jak linek PS, tak zejména linek DS.

Pro další analýzu vzájemného ovlivňování linek kombinovaného vedení se nabízí zkoumat rychlé přechodné děje (údery blesku, speciální případy spínání apod.), kdy doba trvání náběžných hran je v řádu jednotek mikrosekund. Pro tyto jevy je však nutné použít model vedení s rozprostřenými parametry poskytující časoprostorové rozložení proudových a napěťových poměrů.

Použitá literatura

- [1] MAYER, D.: *Úvod do teorie elektrických obvodů*, SNTL ALFA, Praha 1981
- [2] WILSON, G. L., CHALLEN, R. F. BOSACK, D.J.: *Transmission Line Models for Switching Studies: Design Criteria I. Effects of Non-transposition*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-93, Issue: 1, Jan. 1974)
- [3] AL-FUHAID, A. S., SAIED, M. M.: *A method for the calculation of fault transients in transmission lines*, IEEE transaction on Power Delivery, vol. 3, 1988
- [4] ORLANDI, A., CLAYTON, P.: *FDTD Analysis of Lossy, Multiconductor Transmission Lines Terminated in Arbitrary Loads*, IEEE transaction on electromagnetic compability, vol. 38, 1996
- [5] RACHIDI, F., NUCCI C.A., IANOZ, M.: *Transient Analysis of Multiconductor Lines Above a Lossy Ground*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 14, 1999
- [6] TIEBING,L. a kol.: *Research on Experiments and the FDTD Method of Multi-conductor Transmission Lines for Transient Analysis*, International symposium on Electromagnetic compatibility EMC 2004
- [7] MAZLOOM, Z., THEETHAYI, N., THOTTAPPILLIL, R.: *Method to Include Lumped Devices in Multi-conductor Transmission Line System Models*, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES GM 2009, Calgary 2009
- [8] KALOUDAS, C.G., PAPAGIANNIS, G.K.: *FDTD Analysis using Constant Parameter Modeling for the Calculation of Transient Responses and Voltage Profiles on Multiconductor Overhead Transmission Lines*, 49th International Universities Power Engineering Conference UPEC, 2014
- [9] XIA, J., YIN, J., ZHOU, H., FAN, L., ZHA, J.: *Sensitivity Analysis for the Transient Response of Nonuniform Coupled Transmission Lines*, 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FKSD), 2015
- [10] ARANEO, R., CELOZZI, S.: *Direct time-domain analysis of transmission lines above a lossy ground*, IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, vol. 148, 2001
- [11] GUSTAVSEN, B.: *Modal Domain-Based Modeling of Parallel Transmission Lines With Emphasis on Accurate Representation of Mutual Coupling Effects*, IEEE Transaction on Power Delivery, 2012
- [12] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A.: *Simulation of transmission line transients using vector fitting and modal decomposition*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 13, 1998

- [13] WEDEPOHL, L.M., MOHAMED, S. E. T.: *Multiconductor transmission lines. Theory of natural modes and Fourier integral applied to transient analysis*, Proceedings of the IEE, vol. 116, 1969
- [14] LIU, X., TI, CH., LIANG, G.: *Wide-band modelling and transient analysis of multi-conductor transmission lines system considering the frequency-dependent parameters based on fractional calculus theory*, IET Generation, Transmission & distribution, vol. 10, 2016
- [15] https://ekonomika.idnes.cz/ceps-postavi-obri-stozary-napeti-elektrina-fee-/ekonomika.aspx?c=A170609_2331441_ekonomika_fih. Dostupné online 20. 2. 2018
- [16] STEGELMAN, H., LUGSCHITZ, H. a kolektiv : *New Design Pylons as Solution to Minimize the Impact of New Overhead Lines*, CIGRE Paris Session 2014
- [17] FENG, G., WANG, Y. a ZHANG, B.: *Study on Electromagnetic Environment of Multi/circuit Transmission Lines on Same Tower*, Power System Technology and IEEE Power India Conference, POWERCON 2008
- [18] LIU, W., PAN, M., LIU, K. a XU, G.: *Research on Electromagnetic Character of 500/220 kV Mixed-voltage Quadruple-circuit Transmission Line*, 12th International Conference on Environmental and Electrical Engineering IEEEIC 2013
- [19] NAZARČÍK, T.: *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení*, Západočeská univerzita v Plzni, Bakalářská práce, 2012
- [20] NOVITSKIY, A., WESTERMANN, D.: *Interaction of Multi-Circuit Overhead Transmission Lines of Different Voltages Located on the Same Pylon*, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2012
- [21] LI, B., GUO, F., LI, X., BO, Z.: *Circulating Unbalanced Currents of EHV/UHV Untransposed Double-Circuit Lines and Their Influence on Pilot Protection*, IEEE Transaction on Power Delivery, 2014
- [22] NAZARČÍK, T.: *Analýza provozu kombinovaných vedení*. 2016.
- [23] KONONOV, M.: *Návrh řešení sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy*, Západočeská univerzita v Plzni, Bakalářská práce, 2015
- [24] BENEŠOVÁ, Z., ŠROUBOVÁ, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004
- [25] BENEŠOVÁ, Z., BERAN, M., ŠROUBOVÁ, L.: *Reduction of Electric and Magnetic Field of Double-Circuit Overhead Lines*, AMTEE 2003, Plzeň
- [26] BENEŠOVÁ, Z., MAYER, D.: *Algorithm for computation of inductances of three/phase overhead lines*, AMTEE'03 Plzeň: ZČU v Plzni 2003

- [27] NAZARČÍK, T.: *Modelování spínacích přechodných dějů na přenosovém vedení ZVN/VVN*. In *Elektrotechnika a informatika 2017*. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 187-190. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [28] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Modelling of the transients on the multi-circuit EHV/HV overhead transmission lines*. In *Proceedings of 2017 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-1040-4
- [29] <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html> dostupné online 24. 4. 2018
- [30] MANN, H., ŠEVČENKO, M.: *Snadné počítačové modelování dynamických soustav*, Praha: ČVUT v Praze 2008
- [31] <http://www.gamarak.com/2017/05/23/iran-4/> dostupné online 26. 4. 2018
- [32] <https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/germany-takes-the-lead-in-hvdc> dostupné online 26. 4. 2018

Příloha A – Seznam autorových publikovaných prací

- příspěvky ve sbornících mezinárodních konferencí:

[A1] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Comparison of Joule's losses on transposed and non-transposed transmission line*. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 647-650. ISBN: 978-1-4673-6788-2

[A2] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Analysis of electromagnetic field in a vicinity of multi-circuit overhead lines with different voltage level*. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0476-6

[A3] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Prediction of possible corona occurrence in the vicinity of multi-circuit overhead lines with different voltages*. In Proceedings of the Conference on Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering (AMTEE 2015). Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. VI-4. ISBN: 978-80-261-0527-5

[A4] NAZARČÍK, T., RAWN, B.: *Phase current asymmetry on the double-circuit very high voltage overhead transmission line*. In Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 80-84. ISBN: 978-1-5090-0907-7

[A5] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Phase current asymmetry on the multi-circuit overhead transmission line with different voltage levels*. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2016. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2016. s. 1-5. ISBN: 978-80-89402-85-4

[A6] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Origin of the circulating currents on the quadruple EHV/VHV transmission line during the specific operation*. In Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Piscataway: IEEE, 2017. s. 13-17. ISBN: 978-1-5090-6405-2

[A7] BENEŠOVÁ, Z., NAZARČÍK, T.: *Transient analysis of multi-circuits transmission lines with respect to inductive and capacitive coupling*. In Conference proceedings : 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017). Tucumán: National University of Tucumán, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-987-45745-6-5

[A8] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Modelling of the transients on the multi-circuit EHV/HV overhead transmission lines*. In Proceedings of 2017 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-1040-4

[A9] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z. : *Transient analysis of multi-circuit overhead transmission lines with two voltage levels*. In Proceedings of the 9th International

Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2017). Košice: Technical University of Košice, 2017. s. 596-601. ISBN: 978-80-553-3195-9

[A10] NAZARČÍK, T., MUŽÍK, V. : *Modelling of The Mutual Influence of the Parallel AC/DC Circuits on the Hybrid Power Transmission Line*. In Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Saint Petersburg: IEEE, 2018. s. 737-742. ISBN: 978-1-5386-4339-6

[A11] VAJNAR, V., NAZARČÍK, T.: *Service Operation of UHVDC Systems with Emphasis on Switching Phenomena*. In Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Saint Petersburg: IEEE, 2018. s. 834-839. ISBN: 978-1-5386-4339-6.

[A12] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *The Influence of the Short Circuit on the Parallel Conductors of the Multi-circuit Transmission Line*, In Proceedings of the 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Brno: VSB - Technical University of Ostrava, 2018. s. 208-213. ISBN: 978-1-5386-4612-0

[A13] NAZARČÍK, T., VELEK, J.: *Induced currents in the switched-off conductors from the parallel circuits located on the same pylon*, In Proceedings of the 14th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2018. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. s. 1-5. ISBN: ISBN: 978-80-89402-99-1

• **příspěvky ve sbornících tuzemských konferencí:**

[A14] NAZARČÍK, T.: *Výpočet činných ztrát na transponovaném a netransponovaném vedení*. In Elektrotechnika a informatika 2014. Část 3., Elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 17-20. ISBN: 978-80-261-0368-4

[A15] NAZARČÍK, T.: *Simulations of operating and fault states on the transmission line with different voltage levels*. In Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 239-242. ISBN: 978-80-261-0514-5

[A16] NAZARČÍK, T.: *Vliv velikosti přenášeného výkonu a délky vedení na proudovou nesymetrii netransponovaného kombinovaného vedení 2x400 kV + 2x110 kV*. In Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 181-184. ISBN: 978-80-261-0516-9

[A17] NAZARČÍK, T.: *Modelování spínacích přechodných dějů na přenosovém vedení ZVN/VVN*. In Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 187-190. ISBN: 978-80-261-0712-5

- **články v časopisech s impakt faktorem:**

[A18] NAZARČÍK, T., BENEŠOVÁ, Z.: *Analysis of the transients on the multi-circuit overhead transmission line*. Journal of Electrotechnical Engineering = Elektrotechnický časopis, 2017, roč. 68, č. 6, s. 476-481. ISSN: 1335-3632

- **výzkumné zprávy:**

[A19] NAZARČÍK, T.: *Analýza provozu kombinovaných vedení*. 2016.

[A20] NAZARČÍK, T.: *Výpočet činných ztrát a nesymetrií fázových proudů na přenosovém vedení 400 kV*. 2015.

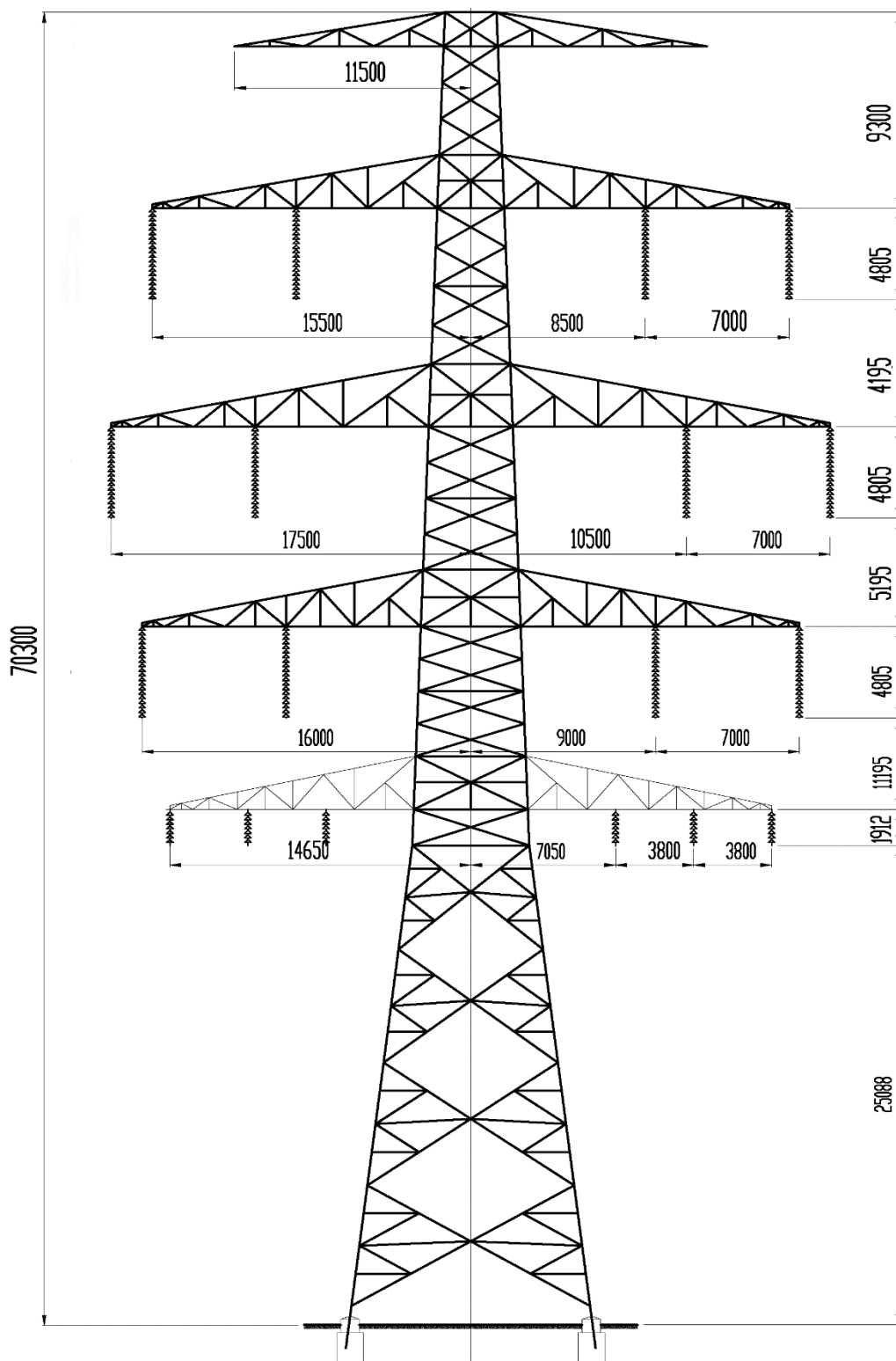
- **tuzemské a zahraniční přednášky:**

[A21] NAZARČÍK, T.: *Analyses of power transmission on multi-circuit overhead transmission lines with different voltages*. National Grid, Electricity National Control Centre Wokingham, Berkshire, United Kingdom, 2015.

[A22] NAZARČÍK, T.: *Přenosová soustava v ČR, distribuční systémy, standardní a nestandardní provozní stavy a jejich klasifikace, možnost řešení kritických situací většího rozsahu*. Praha, 2016.

Příloha B – Vybrané stožáry kombinovaných vedení

- Stožár 4x400 kV + 2x110 kV [23]



- **Stožár 2x230 kV + 2x63 kV [31]**



- **Kombinované stožáry v německé přenosové síti [32]**

