



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Provoz venkovního vedení se zemnicím lanem

Autor práce: Aleš Vozka

Vedoucí práce: Ing. Vladislav Sítař

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš VOZKA**
Osobní číslo: **E09B0094P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Provoz venkovního vedení se zemnicím lanem**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište používané typy distribučních venkovních vedení z konstrukčního a provozního hlediska.
2. Uveďte důvody použití zemnicích lan.
3. Pro jednoduché vedení se zemnicím lanem odvoďte pasivní parametry vodičů.
4. Vytvořte model vybraného venkovního vedení se zemnicím lanem v programu Dynast.
5. Proveďte analýzu chování zvoleného vedení v ustálených a přechodných stavech pro symetrickou a nesymetrickou zátěž.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Mann, H., Ševčenko, M.: Snadné počítačové modelování dynamických soustav. ČVUT, Praha 2008
2. Hodinka, M. a kol.: Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL, Praha 1989
3. Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL, Praha 1980

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Sítař

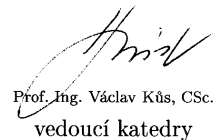
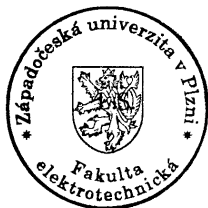
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**



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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou provozu venkovního vedení s jedním zemnicím lanem a popisuje jeho vliv na pasivní a aktivní parametry vedení.

V teoretické části práce je popsána elektrizační soustava České republiky, její přenosová a zejména pak distribuční část, kde jsou uvedeny různé typy elektrických sítí z hlediska konstrukce a způsobu provozu uzlu transformátoru a také obecné požadavky na elektrické sítě distribuční soustavy. Dále jsou popsány základní typy zemnicích lan a praktické důvody jejich použití.

Praktická část práce se zabývá detailním odvozením a výpočtem elektrických pasivních parametrů jednoduchého venkovního vedení vn s uvažováním jednoho zemnicího lana. S využitím vypočtených parametrů vedení je pak sestaven model vedení v programu Dynast a provedena analýza chování systému v různých provozních stavech a s různým zatížením.

Klíčová slova

distribuční soustava, venkovní vedení, zemnicí lano, pasivní parametry, Dynast

Abstract

Vozka, Aleš. *Operation of Overhead Line with the Ground Wire [Provoz venkovního vedení se zemnicím lanem]*. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Vladislav Sítař

This thesis deals with the issues of the operation of the overhead power line with the ground wire and describes its effects on the passive and the active parameters of the overhead power line.

In the theoretical part, there is described an electric system of the Czech Republic – its transmission and distribution part. In this part, the various types of the electrical networks and also the main requirements to the electrical networks of the distribution system are mentioned. There are also mentioned the main types of the ground wires and the practical reasons of their uses.

The practical part of this thesis deals with the detail derivation of the passive parameters of the simple overhead power line with a ground wire. The model of the overhead power line in the Dynast is assembled with the application of the early counted passive parameters. Then it is performed the analysis of the system in the various operating states.

Keywords

distribution system, overhead power line, ground wire, passive parameters, Dynast

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7. června 2012

Aleš Vozka

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
1 Úvod	1
2 Distribuční venkovní vedení z konstrukčního a provozního hlediska	2
2.1 Elektrizační soustava	2
2.1.1 Přenosová soustava	2
2.1.2 Distribuční soustava	3
2.2 Elektrická vedení v distribuční soustavě	4
2.2.1 Venkovní vedení	4
2.2.1.1 Vedení 22 kV s izolovanými vodiči typu PAS	6
2.2.2 Kabelová vedení	7
2.3 Elektrické sítě v distribuční soustavě	7
2.3.1 Požadavky na elektrické sítě v distribuční soustavě	7
2.3.1.1 Kvalita elektrické energie	7
2.3.1.2 Spolehlivost dodávky	7
2.3.1.3 Přehlednost a jednoduchost	8
2.3.1.4 Ekonomický návrh a provoz sítě	8
2.3.2 Základní druhy sítí z hlediska propojení a provozu	8
2.3.2.1 Zauzlené (uzavřené) elektrické sítě	9
2.3.2.2 Nezauzlené (otevřené) elektrické sítě	10
2.3.3 Elektrické sítě z hlediska způsobu provozu uzlu	11
2.3.3.1 Síť s účinně (přímo) uzemněným uzlem	11
2.3.3.2 Síť izolovaným uzlem	12
2.3.3.3 Síť s neúčinně (nepřímo) uzemněným uzlem	13
3 Zemnicí lano a důvody jeho použití	15
3.1 Důvody použití zemnicího lana	16
3.1.1 Ochrana vedení před přímým úderem blesku	16

3.1.2	Zmenšení přepětí vzniklého elektrostatickou indukcí	16
3.1.3	Zmenšení krokového napětí a proudu jdoucího do země	16
3.1.4	Přenos informace optickými vlákny	17
4	Odvození pasivních parametrů venkovních vedení	18
4.1	Činný odpor	18
4.2	Indukčnost	20
4.2.1	Indukčnost vodiče jednofázové smyčky	20
4.2.2	Indukčnost trojfázového vedení bez zemnicího lana	22
4.2.3	Indukčnost trojfázového vedení se zemnicím lanem	23
4.3	Svod	26
4.4	Kapacita	27
4.4.1	Kapacita trojfázového vedení bez zemnicího lana	29
4.4.2	Kapacita trojfázového vedení se zemnicím lanem	30
5	Model venkovního vedení v programu Dynast	33
5.1	Parametry vedení	33
6	Analýza provozních stavů venkovních vedení	34
6.1	Vedení v ustáleném stavu se symetrickou zátěží	34
6.2	Vedení v ustáleném stavu s nesymetrickou zátěží	35
6.3	Vedení v přechodném stavu	38
6.3.1	Jednofázové zemní spojení	38
6.3.2	Vícefázové zemní spojení	38
7	Závěr	39
	Reference, použitá literatura	41
	Přílohy	43
A	Elektrické sítě distribuční soustavy	43
B	Model a parametry vedení	45
B.1	Model (diagram) vedení	45
B.2	Pasivní parametry vyšetřovaného vedení	47
C	Analýza vedení	48
C.1	Vedení se symetrickou zátěží	48
C.2	Vedení s nesymetrickou zátěží	49
C.3	Jednofázové zemní spojení	50
C.4	Vícefázové zemní spojení	51
C.5	Mezifázové zkratky	53

Seznam obrázků

2.1	Schématické znázornění různých druhů stožárů vn.	4
2.2	Hliníkový vodič typu ACCR s kompozitním jádrem. [Převzato z [1]]	5
2.3	3D model izolovaného vodiče SAX-W systému PAS.	6
2.4	Schéma elektrické sítě okružního typu.	9
2.5	Schéma elektrické sítě mřížového typu.	9
2.6	Schéma elektrické sítě paprskového typu.	10
2.7	Schéma elektrické sítě průběžného typu.	10
2.8	Síť s účinné (přímo) uzemněným uzlem.	11
2.9	Síť s izolovaným uzlem.	12
2.10	Síť s neúčinně (nepřímo) uzemněným uzlem.	13
3.1	Ochranný úhel zemnicího lana.	16
3.2	Různé druhy optických zemnicích lan (OPGW) dodávaných firmou AFL. [Převzato z [2]]	17
4.1	Vzdálenosti mezi vodiči.	29
5.1	Model (diagram) venkovního vedení s nepřímo uzemněným uzlem.	33
6.1	Průběh napětí na zvolené (pevné) nesymetrické zátěži.	35
6.2	Průběhy veličin na nesymetrické zátěži v závislosti na změně zatížení třetí fáze.	36
6.3	Průběhy veličin na nesymetrické zátěži v závislosti na změně účinníku $\cos\varphi$ třetí fáze.	37
6.4	Průběhy napětí na vedení při jednofázovém zemním spojení. V čase $t \geq 0,2$ s jsou velikosti napětí: $U_1 = 0,26$ kV, $U_2 = 30,83$ kV, $U_3 = 30,61$ kV.	38
A.1	Schéma distribuční a přenosové soustavy České republiky.	44
B.1	Model jedné části trojfázového vedení.	45
C.1	Průběhy napětí na vedení se symetrickou zátěží a zemnicím lanem.	48
C.2	Průběhy napětí na vedení s nesymetrickou zátěží a zemnicím lanem.	49
C.3	Průběh napětí a proud na tlumivce v bezporuchovém a poruchovém stavu.	50

C.4	Průběhy napětí na vedení při bez odporovém vícefázovém zemním spojení.	51
C.5	Průběhy napětí na zátěži při bez odporovém vícefázovém zemním spojení.	52
C.6	Průběhy napětí na zátěži při bez odporovém mezifázovém zkratu.	53

Seznam tabulek

2.1	Charakteristika napěťových úrovní používaných v elektrizační soustavě České republiky (normalizovaná stupnice sdružených napětí).	2
2.2	Vybrané elektrické parametry izolovaných vodičů SAX-W systému PAS. [Převzato z [5]]	6
3.1	Konstrukce a vlastnosti lan AlFe 6 dle ČSN 02 4210.	15
4.1	Efektivní poloměr vodičů (bez uvážení povrchového jevu)	22
4.2	Minimální izolační odpor R_i venkovního vedení za vlhkého počasí	27
6.1	Srovnání amplitud fázových napětí při symetrickém zatížení.	34
6.2	Srovnání amplitud fázových napětí při nesymetrickém zatížení.	35
B.1	Základní parametry všech částí venkovního vedení.	46
B.2	Činný stejnosměrný a střídavý odpor fázových vodičů a svod.	47
B.3	Vlastní a vzájemné indukčnosti vyšetřovaného trojfázového vedení.	47
B.4	Vlastní a vzájemné kapacity vyšetřovaného trojfázového vedení.	47

Seznam symbolů a zkratek

R	Činný odpor $[\Omega]$.
L	Indukčnost $[H]$.
G	Svod $[\mu S]$.
C	Kapacita $[F]$.
X	Indukční reaktance $[\Omega]$.
B	Kapacitní susceptance $[S]$.
Z_N	Impedance uzemněné uzlu $[\Omega]$.
I_p	Poruchový proud $[A]$.
U_p	Napětí v místě poruchy $[V]$.
R_p	Odpor zemní poruchy $[\Omega]$.
U_N	Napětí mezi uzlem soustavy a zemí $[V]$.
U_f	Fázové napětí $[V]$.
U_s	Sdružené napětí $[V]$.
I_{kap}	Kapacitní proud poruchy $[A]$.
I_L	Indukční proud $[A]$.
C_k	Kapacita vodiče proti zemi $[F]$.
\bar{Z}	Podélná impedance $[\Omega]$.
\bar{Y}	Příčná admitance $[S]$.
S	Průřez vodiče $[mm^2]$.
S	Zdánlivý výkon $[VA]$.
D_n	Průměr lana v poloze n-tého vodiče $[mm]$.
H	Intenzita magnetického pole $[Am^{-1}]$.
B	Magnetická indukce $[T]$.
W	Energie magnetického pole $[J]$.
V	Potenciál $[V]$.
ΔP	Ztráty na vedení $[W]$.
Q	Náboj $[C]$.
f	Frekvence $[Hz]$.
s_e	Poměrný elektrický průřez vodiče $[-]$.
s_n	Poměrný jmenovitý průřez vodiče $[-]$.
l	Délka $[km]$.
z	Přetížení námrazou $[mm]$.

r_1	Poloměr vodiče [mm].
r_2	Celkový poloměr lana [mm].
d	Průměr lana [mm].
p	Činitel zkrutu [-].
c	Parametr řetězovky [-].
a	Vzdálenost mezi stožáry [m].
a_n	Výška závitů [mm].
k	Kapacitní součinitel [Fm^{-1}].
h	Výška vodičů nad zemí [m].
c_{0i}	Kapacita vodiče proti zemi [F].
c_{ij}	Kapacita mezi vodiči [F].
ω	Úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$].
α	Ochranný úhel zemnicího lana [$^\circ$].
ρ	Měrný odpor [$\Omega mm^2 m^{-1}$].
σ_H	Horizontální tah [MPa].
γ'	Měrná tíha [$N mm^{-2} m^{-1}$].
ϑ	Teplota [$^\circ$].
Φ	Magnetický tok [Wb].
μ_0	Permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7} [Hm^{-1}]$).
μ_0	Poměrná permeabilita
ε_0	Permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} [Fm^{-1}]$).
ε_r	Poměrná permitivita.
δ	Potenciální součinitel [mF^{-1}].
ACCR	Aluminum Conductor Composite Reinforced. Kompozitně vyztužený hliníkový vodič.
OPGW	Optical Ground Wire. Zemnicí lano s optickými vlákny.
nn	Nízké napětí.
vn	Vysoké napětí.
vvv	Velmi vysoké napětí.
zv	Zvláště vysoké napětí.

1

Úvod

Dnešní společnost je na elektrické energii existenčně závislá. Každý, byť sebekratší, výpadek dodávky elektrické energie či přepětí, způsobené poruchou na vedení, znamenají nejen velké finanční ztráty, ale také přímé ohrožení zdraví a majetku osob.

Elektrizační soustava České republiky, její přenosová a distribuční část, je velmi rozlehlá a většina energie je přenášena venkovními vedeními, u kterých je pravděpodobnost poruch největší. Na venkovních vedeních může dojít k poruchám po přerušení nebo spojení vodičů vlivem povětrnostních podmínek, tak vzniká zkrat, popřípadě zemní spojení v sítích s nepřímo uzemněným uzlem, či k poruchám souvisejícím s atmosférickým přepětím, vzniklém úderem blesku buď přímo do vedení nebo v jeho blízkém okolí. Čestnost úderů blesku do vedení je relativně vysoká a každý přímý úder může být pro samotné vedení a hlavně napájené spotřebiče fatální. Venkovní vedení je proto třeba vybavovat vhodnými ochranami. Základní ochrannou vedení vn, vvn a zvn před vlivy atmosférických přepětí je zemnicí lano. Zemnicí lano poskytuje stíněný prostor, kde chrání fázové vodiče před přímým úderem blesku, a zároveň snižuje indukované přepětí vzniklé úderem blesku v blízkosti vedení.

Cílem této práce je detailní odvození pasivních parametrů trojfázového vedení vn s uvažováním jednoho zemnicího lana a následné posouzení jeho vlivu na aktivní parametry zvoleného vedení v různých provozních stavech a proměnnou zátěží s využitím programu Dynast.

2

Distribuční venkovní vedení z konstrukčního a provozního hlediska

2.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava (ES) v České republice se skládá ze tří hlavních součástí: z výroben (jaderné, tepelné, vodní a další druhy elektráren), přenosových a rozvodných soustav a spotřebičů elektrické energie. Spojovacími prvky mezi těmito součástmi jsou elektrické stanice, které zajišťují transformaci napětí, mění střídavé napětí na stejnosměrné a naopak. Elektrické stanice také umožňují měřit veličiny a sledovat celkový stav soustavy nebo sítě. [11]

Napěťová úroveň		Jmenovité napětí		Použití
Nízké napětí	nn	400	V	Distribuční soustava
Vysoké napětí	vn	3, 6, 10, 22, 35	kV	Distribuční soustava
Velmi vysoké napětí	vvn	110, 220	kV	Distribuční, přenosová soustava
Zvláště vysoké napětí	zvn	400	kV	Přenosová soustava

Tab. 2.1: Charakteristika napěťových úrovní používaných v elektrizační soustavě České republiky (normalizovaná stupnice sdružených napětí).

2.1.1 Přenosová soustava

Smyslem přenosové nebo také nadřazené soustavy je přenos elektrické energie na velké vzdálenosti, propojení uzlů, do kterých je přiváděna energie z výrobních jednotek, a uzlů, ze kterých je napájena rozvodná soustava tak, aby bylo rozložení výkonů v celé oblasti optimální. Do přenosové soustavy jsou paralelně zapojeny výrobní větších a velkých výkonů – jaderné, tepelné, velké vodní i větrné elektrárny. Pro přenos energie se využívají výhradně venkovní vedení.

Napěťové úrovně používané v přenosové soustavě jsou 400 a 220 kV. Síť s napěťovou úrovní 400 kV prochází podélně celou Českou republikou, v současné době měří podle ČEPS, a.s. téměř 3000 kilometrů (2 979 km k 1. 8. 2011), a je spojena s evropskou sítí **UCTE** (Union for the Coordination of the Transmission of Electricity). Síť s napěťovou úrovní 220 kV je méně rozlehlá (1 371 km k 1. 8. 2011). Z ekonomického a především pak z provozního hlediska je nevýhodná a s jejím dalším rozvojem se již od roku 1960 nepočítá. [6][10]

V České republice provozuje přenosovou soustavu ze zákona společnost ČEPS, a. s.: „*ČEPS, a.s. zajišťuje přenos elektřiny, provoz, údržbu a rozvoj přenosové soustavy, dispečerské řízení elektrizační soustavy České republiky v reálném čase. Jako systémovou službu dále zpracovává a testuje plán obrany přenosové soustavy proti šíření poruch a plán obnovy elektrizační soustavy po rozsáhlých systémových poruchách. Technicky řídí systémové služby, jako je regulace výkonu a kmitočtu, regulace napětí a jalového výkonu a řídí potřebné výkonové rezervy.*“ [3]

Oficiální internetové stránky společnosti ČEPS, a.s. popisují přenosovou soustavu doslova takto: „*Přenosová soustava ČEPS, a.s. představuje subsystém elektrizační soustavy České republiky, který propojuje všechny významné subjekty v soustavě a zajišťuje rozhodující podíl zahraniční spolupráce. Přenosovou soustavu ČEPS, a.s. tvoří 38 rozvodných zařízení 420 kV a 245 kV umístěných ve 30 transformovnách, dále 2 979 km tras vedení 400 kV a 1 371 km tras vedení 220 kV. Do přenosové soustavy patří i jedna rozvodna 122 kV a 56 km tras vedení 110 kV.*“ [3]

Celkový instalovaný výkon transformátorů ve 30 transformovnách je 18 830 MVA. Celkový výkon kompenzačních tlumivek v těchto transformovnách dosahuje hodnoty 1 346,2 MVar. [3]

2.1.2 Distribuční soustava

Distribuční (rozvodná) soustava zajišťuje dodávku elektrické energie spotřebitelům. Je napájena převážně z uzlových stanic přenosové soustavy 400 (220)/110 kV a z výroben menších výkonů, které jsou označovány jako *distribučované*. Jsou to malé podnikové elektrárny, kogenerační jednotky a obnovitelné zdroje.

Distribuční soustava tvoří podstatnou část elektrizační soustavy. Je velmi rozlehlá a má charakter venkovského nebo městského rozvodu. V současné době je součet délek všech sítí patřících do distribuční soustavy větší než 100 000 kilometrů. Slouží k napájení průmyslových závodů, elektrické trakce, zemědělství, nevýrobní sféry a obyvatelstva. Páteří distribuční soustavy je napěťová úroveň vvn 110 kV, která se dále rozvětňuje na úrovně vn 35 kV (východní Čechy) a 22 kV zastoupené v převážné části České republiky. Menší obce jsou napájeny napěťovou úrovní 6 kV, respektive 10 kV pro oblasti s 35 kV sítí. Do distribuční soustavy patří také napěťová úroveň 400 V, která slouží především pro napájení domácností a dalších malých odběrů.

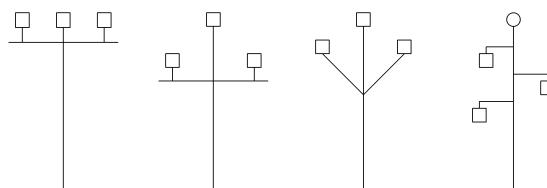
Sítě 110 kV a vn distribuční soustavy jsou provozovány paprskově nebo formou průběžného rozvodu. Konstrukční řešení sítí umožňuje propojení dvoupaprskovým i okružním způsobem. Sítě nn jsou provozovány jako paprskové nebo průběžné. Husté (městské) sítě jsou provozovány jako mřížové. [11] [12]

2.2 Elektrická vedení v distribuční soustavě

Pro přenos elektrické energie se v distribuční soustavě používají vedení venkovní i kabelová. Pro sítě 110 kV jsou to především vedení venkovní, která jsou navíc z více než 70% dvojitá. Venkovní vedení se běžně používají i pro sítě 22 a 35 kV. Pro sítě městských a venkovských rozvodů (6 kV, 10 kV, 400 V) se používají vedení venkovní, kabelová a venkovní kabelová. [11]

2.2.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení jsou složena z fázových vodičů, stožárů, konzolí a izolátorů. Mezi další části patří například ochrany proti přepětí – svodiče přepětí, ochranná jiskřiště, zemnicí a výběhová lana, nebo zařízení a přípravky sloužící při revizi nebo údržbě vedení. V poslední době se na venkovní vedení instalují také speciální plastové kryty nebo zábrany, které zamezují úhynu ptactva po úrazu elektrickým proudem, a výstražné koule, používané k vizuálnímu zvýraznění vedení, zejména v blízkosti komunikací, letišť a vodních toků. Hlavními výhodami venkovních vedení jsou relativně nízké investiční náklady do výstavby a údržby, přehlednost a jednoduchost a také snadná lokalizace a odstranění (většinou přechodných) poruch. Mezi nevýhody patří především velká náročnost na prostor, poruchovost a obecně horší hospodárnost přenosu. Při stejných vzdálenostech mají v porovnání s kabelovými vedeními větší úbytky napětí ΔU a také větší jalové ztráty ΔQ . [12]



Obr. 2.1: Schématické znázornění různých druhů stožárů vn.

Základním stavebním prvkem všech venkovních vedení jsou stožáry a jejich základy. Stožáry mohou být dřevěné, používané dnes už jen velmi výjimečně – většinou v místech, kde by ostatní druhy stožáru příliš narušili přirozený ráz krajiny, betonové, železobetonové nebo ocelové. Podle účelu se dělí na: nosné, rohové, výstužné, odbočné a koncové. Pro vedení vn 22 kV a 35 kV se často používají jednodřívkové příhradové ocelové stožáry s uspořádáním vodičů v obecném trojúhelníku. Mezi další v praxi obecně používané typy

stožárů patří: soudek, stromek, donau, delta a portál, přičemž některé z těchto typů jsou vhodné také pro dvojité vedení.

Pro přenos a rozvod elektrické energie na venkovních vedeních jsou nejčastěji použity holé vodiče – tzv. AlFe lana. Vodiče AlFe nejsou lana složená, tzn. mají ocelovou duši (drát nebo lano) a na ní ve vrstvách navinuté hliníkové dráty. Znak n značí poměr mezi materiály. Ocelová duše zaručuje dostatečnou mechanickou pevnost vodiče, zatímco hliníkové dráty mají dobrou vodivost. Každý vodič je určen především jmenovitým průřezem, dále pak matematickým průřezem, skutečným průřezem (maximálně 105% jmenovitého průřezu) a elektrickým průřezem, který se počítá z měřené délky, z měřeného celkového odporu a předepsaného měrného odporu vodiče a nesmí být menší než 95% jmenovitého průřezu, tj. musí platit $s_e \geq 0,95s_n$. [10]

Novým typem vodičů, které se používají v distribuční a přenosové soustavě České republiky, a které pomalu nahrazují poměrně zastaralé lana AlFe, jsou vodiče označované zkratkou **ACCR** (Aluminum Conductor Composite Reinforced), vyvinuté a dodávané firmou **3M**. Jsou určeny pro napěťové úrovně 22 kV až 400 kV.

Vodiče ACCR mají, díky své pokročilé konstrukci, podstatně nižší hmotnost, větší mechanickou pevnost a hlavně menší (minimální) tepelnou roztažnost, než klasická lana AlFe. Jádro vodiče je tvořeno čistěným oxidem hliníku zpracovaným do podoby mikrovláken, která jsou poté stočena do jednotlivých pramenů. Jeden pramen může obsahovat až 20 000 mikrovláken. Pevnost tohoto jádra je až osmkrát větší než pevnost samotného hliníku, je srovnatelná s pevností jádra z oceli, a přitom si zachovává poloviční hmotnost. Plášť lana je tvořen kompozitem hliníku a zirkonu. Zirkon pomáhá stabilitě lana při větším teplotním zatížení. Průřez může být sektorový nebo kruhový. Protože je lano tvořeno převážně hliníkem, nedochází ke korozi lana a odpadá tak nutnost mazání jádra.



Obr. 2.2: Hliníkový vodič typu ACCR s kompozitním jádrem. |Převzato z [1]|

Pro svou velkou pevnost a malou tepelnou roztažnost (umožňují větší proudové zatížení) se vodiče ACCR používají k až několikanásobnému zvýšení přenosové kapacity stávajících venkovních vedení, u kterých stačí vyměnit klasická AlFe lana za pokročilejší ACCR vodiče. Není tedy nutné měnit stávající stožáry, jejich výšku, nosnost nebo vzdálenost, a ani budovat vedení nová. V praxi slouží vodiče ACCR také jako prevence proti tzv. Black-out (úplnému výpadku sítě) v energeticky náročných oblastech. [1]

Izolátory mohou být porcelánové, skleněné, skleněné s plastovými prvky, nebo kompozitní. Na napěťové úrovni vn jsou nejpoužívanější izolátory kompozitní, protože jsou nejodolnější a zároveň nejlehčí. Podle způsobu upevnění na stožáru a tvaru jsou izolátory: podpěrné, závěsné (od 22 kV), tyčové a talířové.

2.2.1.1 Vedení 22 kV s izolovanými vodiči typu PAS

Kromě přechodu z vodičů AlFe na vodiče ACCR se v současné době také začínají klasická venkovní vedení vn 22 kV (35 kV) distribuční soustavy s holými vodiči nahrazovat vedeními s izolovanými vodiči typu PAS. Systém PAS značně snižuje počet poruch na venkovních vedeních způsobených vnějšími vlivy, a tím zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie. „Podle závadových charakteristik se množství výpadku sítě snížilo z 4,5/100 km/rok na 0,9/100 km/rok.“ [5, str. 5] Díky izolovaným vodičům je také možné zmenšit mezifázové vzdálenosti a ochranná pásma od krajních vodičů. Zmenšením mezifázových a ochranných vzdáleností se samozřejmě zmenšují celkové rozměry vedení. Použití vedení systému PAS je proto velmi výhodné především v oblastech, kde není pro stavbu klasického vedení dostatek místa – typicky tedy lesní průseky nebo chráněné krajinné oblasti. Například šířku lesního průseku lze použitím izolovaných vodičů zmenšit o více než 50%.



Obr. 2.3: 3D model izolovaného vodiče SAX-W systému PAS.

Vodiče systému PAS jsou vybaveny černou plastovou izolací typu XLPE schopnou odolávat vnějším klimatickým jevům a UV záření. Vodiče se vyrábí ve standardizované řadě jmenovitých průřezů: 35, 50, 70, 95, 120 a 150 mm² pouze pro jmenovité napětí 22 kV (35 kV). Žíla je kulatá, stočená z drátů vyrobených z legovaného hliníku AlMgSi a utěsněná bobtnavým práškem. Základní vlastností vodičů jsou uvedeny v tabulce 2.2.

S _{jmen} [mm ²]	d [mm]	I _{max} [A]	I _k [kA]	R _{ss} (20°C) [Ωkm ⁻¹]	R _{st} (80°C) [Ωkm ⁻¹]
35	11,5	200	3,2	0,986	1,220
50	12,7	245	4,3	0,720	0,890
70	14,3	310	6,4	0,493	0,610
95	16,1	370	8,6	0,363	0,450
120	17,6	430	11	0,288	0,360
150	18,9	485	13,5	0,236	0,290

Tab. 2.2: Vybrané elektrické parametry izolovaných vodičů SAX-W systému PAS. [Převzato z [5]]

2.2.2 Kabelová vedení

Kabelová vedení převažují v elektrických sítích vn a nn ve městech a v sítích průmyslových objektů. Ve velkých městech se používají kabely i pro napěťovou hladinu 110 kV. Kabelová vedení jsou obecně dražší a méně přehledná. Poruchy jsou většinou trvalé.

2.3 Elektrické sítě v distribuční soustavě

Sítí nazýváme vedení a elektrické stanice pracující na stejné napěťové hladině. Soustava je pak složena z různých sítí.

2.3.1 Požadavky na elektrické sítě v distribuční soustavě

Požadavky na elektrické sítě přímo vyplývají z definice cíle elektrizační soustavy: „– *zajistit zásobování spotřebitelů el. energií v požadovaném čase, potřebném množství a místě při požadované kvalitě a spolehlivosti dodávky. Přitom respektovat hospodárnost.*“ [12, str. 32]

2.3.1.1 Kvalita elektrické energie

Kvalitu elektrické energie určuje především stálost frekvence ($f = 50$ Hz), kterou však nelze v distribuční síti nijak ovlivnit a je dána zdroji pracujícími do přenosové soustavy, a odchylky napětí od svých jmenovitých hodnot, které vznikají především kvůli úbytkům napětí na vedeních (v závislosti na typu a rozsahu sítě) a transformátorech. Odchylky napětí je možné zmenšit použitím vhodné regulace a podle normy by neměli být v sítích distribuční soustavy větší než $\pm 10\%$ svých jmenovitých hodnot. Důležitým kritériem kvality je kolísání napětí, které je způsobeno například rozběhem asynchronních motorů velkých výkonů. Kolísání napětí se projevuje takzvaným *flikr* efektem, tj. viditelným blikáním osvětlení. Mezi další faktory patří nesymetrie napětí a různé vyšší harmonické, které vznikají převážně v průmyslové sféře. Nesymetrie napětí je způsobena nesouměrným zatížením vedení a znemožňuje jeho provoz s plným jmenovitým výkonem.

Sledování a udržování těchto parametrů v normou doporučených mezích je nezbytné, protože kvalita elektrické energie přímo souvisí se správnou funkčností a životností spotřebičů připojených k síti.

2.3.1.2 Spolehlivost dodávky

Spolehlivost dodávky se vyjadřuje takzvaným stupněm zajištění dodávky. Stupně zajištění dodávky jsou celkem tři – od nejpřísnějšího stupně 1, při kterém nesmí za žádných okolností dojít k výpadku elektrické energie (platí pro nemocnice, průmyslové pece aj.), až po stupeň 3, který nemá žádné speciální nároky na plynulost dodávky a platí obecně

pro domácnosti a malé odběry, kde není bezprostřední nebezpečí ohrožení na životech a velkých finančních ztrát.

Požadavek na spolehlivost dodávky často rozhoduje o konečné podobě elektrické sítě. Pro sítě s 1. a 2. stupněm zajištění dodávky se volí sítě uzavřené se záložními vedeními a transformátory napájené z více míst (rozveden s více systémy přípojníc). Sítě 3. stupně zajištění dodávky jsou navrhovány jako otevřené. Zvýšení spolehlivosti sítě je možné také zajistit volbou kvalitních zařízení s nízkou poruchovostí, napájením sítě z více uzlů přenosové soustavy a také použitím systému automatiky opětovného zapnutí sítě v případě, že se jednalo o poruchu přechodného charakteru.

„Přerušování dodávky může trvat několik hodin. V současné době existují standardy přerušování dodávky stanovené Energetickým zákonem (vyhl. 540/2005) a za jejich nedodržení (překročení) je provozovatel soustavy penalizován.“ [11, str. 9]

2.3.1.3 Přehlednost a jednoduchost

Jednoduchá a přehledná síť se obecně dobře udržuje, chrání, její uspořádání zamezuje zbytečným chybám při obsluze a řízení a zvyšuje bezpečnost osob. Jednoduchá síť znamená, že je použito co nejméně různých průřezů vodičů, typů zařízení a také různých výkonů a typů transformátorů. V jednoduché a přehledné síti je možné velmi rychle a přesně lokalizovat a následně odstranit trvalou poruchu.

S požadavkem na jednoduchou síť přímo souvisí požadavek na možnost jejího snadného rozšiřování a přidávání zařízení. Při návrhu sítě se proto musí počítat s jejím dalším rozvojem přímo úměrným zvyšujícímu se počtu nových přípojních míst. Každá síť má proto rezervy ve výkonech transformátorů, možnosti přezbrojení na vyšší napětí a s tím související větší průřezy vodičů.

2.3.1.4 Ekonomický návrh a provoz sítě

Důležitým hlediskem je také hospodárny provoz zejména při různých zatíženích sítě nebo proměnném účinníku. Hospodárnost přenosu elektrické energie se zvyšuje především zmenšením činných a jalových ztrát ideální konfigurací sítě, optimálním dělením, počtem transformátorů a samozřejmě kompenzací spotřebičů na straně odběratele.

Návrh konkrétní sítě by měl být vhodným kompromisem mezi všemi požadavky na elektrické síť distribuční soustavy a finanční náročností investic do jejich budování a provozu (údržba, ztráty). Při návrhu sítě je tedy nutné správně zvolit typ sítě, průřez vodičů, počet transformátorů a transformoven (110 kV/vn, vn/nn) a samozřejmě vhodný typ elektrické stanice s příslušným počtem systémů přípojníc. [12]

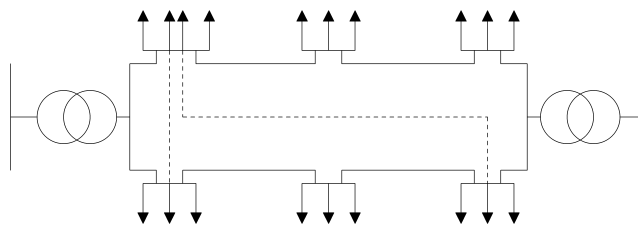
2.3.2 Základní druhy sítí z hlediska propojení a provozu

Elektrické sítě mohou být zauzlené nebo neuzužené. Výběr vhodného druhu sítě záleží na způsobu provozu z hlediska rozdělování výkonu, hospodárnosti a bezpečnosti.

2.3.2.1 Zauzlené (uzavřené) elektrické sítě

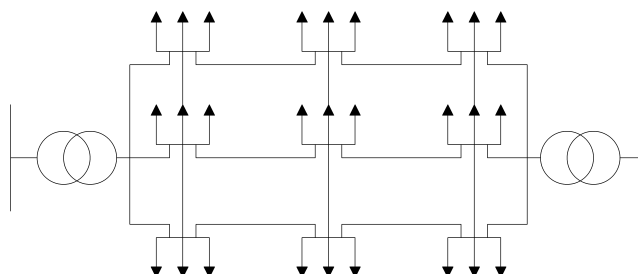
Uzavřené sítě jsou napájeny z více míst nezávislymi napáječi. Energie je tedy spotřebiči dodávána z několika různých míst, čímž je zaručena vysoká spolehlivost dodávky (1. a 2. stupeň zajištění dodávky). Uzavřené sítě jsou konstrukčně složité, méně přehledné než sítě otevřené a investice do výstavby a údržby jsou velké. Výhodou uzavřené sítě jsou menší ztráty a malé úbytky napětí na vedení (sítě je označována jako tvrdá). Nevýhodou jsou pak vyšší hodnoty zkratových proudů. V uzavřené síti se velmi špatně nastavuje selektivita jištění. Používají se nejčastěji v přenosové (nadřazené) soustavě, kde je vyžadován vysoký stupeň spolehlivosti dodávky, pro napájení velkých měst a průmyslových rozvodů. Mezi zauzlené sítě patří síť: mřížová, okružní, hřebenová a různé další modifikace. [11]

Okružní (smyčková) síť je základní typ zauzlené elektrické sítě. Vedení okružní sítě je spojeno do kruhu, ze kterého vycházejí paprskové nebo smyčkové odbočky napájející spotřebiče nebo podružné rozvodnice. Používá se v přenosové (nadřazené) soustavě nebo v průmyslových rozvodech. Časté je použití této sítě v městské zástavbě, kde se očekává nerovnoměrné zatížení vývodů a tedy i větší kolísání napětí.



Obr. 2.4: Schéma elektrické sítě okružního typu.

Mřížová síť je nejsložitější a také nejdražší typ elektrické sítě. Tvoří ji minimálně dvě napájecí místa s hlavními rozváděči a hustá síť vzájemně pospojovaných vedení s podružnými rozváděči. Každý podružný rozváděč této sítě je tedy napájen ze dvou a více směrů. Mřížová síť se používá hlavně v hustě zabydlených oblastech nebo ve velkých průmyslových závodech, kde je vyžadován nejvyšší stupeň zajištění dodávky a velmi malé kolísání napětí na vývodech.

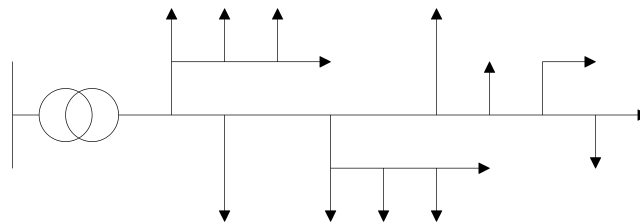


Obr. 2.5: Schéma elektrické sítě mřížového typu.

2.3.2.2 Nezauzlené (otevřené) elektrické sítě

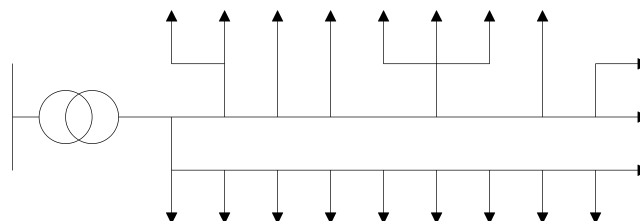
Otevřené sítě jsou na rozdíl od sítí uzavřených napájeny pouze z jednoho místa jedním napáječem. Jednotlivé vývody nejsou nijak propojené a energie je spotřebiči dodávána jen jednou cestou. Jsou jednoduché, přehledné, snadno se udržují a i investice do jejich výstavby a údržby jsou nižší než v případě sítí uzavřených. Nevýhodou takového řešení je nízká spolehlivost dodávky (3. stupeň zajištění dodávky) a hlavně velké ztráty a úbytky napětí na vedení (sít' je označována jako měkká). Naopak velkou výhodou jsou nízké hodnoty zkratových proudů a snadné zajištění selektivity jištění. Používají se v sítích distribuční soustavy na napěťových úrovních nn, vn a vvn. Mezi nezauzlené sítě patří sít': paprsková, stromečková, průběžná a další.

Paprsková (radiální) sít' je nejjednodušší, nejlacinější a především základní typ nezauzlené elektrické sítě. Je tvořena jedním napáječem, ze kterého vychází *paprsky* a ty napájejí podružné rozváděče. Používá se převážně na hladinách nízkého napětí (nn), v průmyslových rozvodech a v rozvodech venkovského vedení a platí pro ni všechny výhody a nevýhody nezauzlené sítě. Paprsková sít' se nepoužívá u kabelových vedení, kde se na odbočkách musí použít takzvané **T** spojky. V místě spojky vzniká slabé místo a zvyšuje se pravděpodobnost poruchy.



Obr. 2.6: Schéma elektrické sítě paprskového typu.

Průběžná sít' je tvořena dlouhým průběžným vedením s odbočkami, které přímo napájejí spotřebiče nebo podružné rozvodnice. Kvůli délce a jednostrannému napájení těchto vedení dochází při přenosu elektrické energie ke značným úbytkům napětí a sít' je měkká. Typickým využitím průběžné sítě jsou rozvody veřejného osvětlení a osvětlení komunikací. Jsou však vhodné také pro napájení menších spotřebičů a osvětlení větších průmyslových objektů. Velmi výhodné je použití průběžné sítě v případě kabelových vedení, kde se díky minimálnímu počtu **T** spojek snižuje pravděpodobnost poruchy. [11] [12]



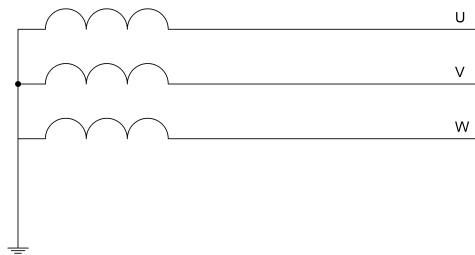
Obr. 2.7: Schéma elektrické sítě průběžného typu.

2.3.3 Elektrické sítě z hlediska způsobu provozu uzlu

Uzel elektrické sítě může být provozován jako uzemněný, tj. úmyslně spojený se zemními elektrodami (zemniči), nebo izolovaný. Uzemněný může být účinně (přímo) nebo neúčinně (nepřímo) přes samoladitelnou zhášecí tlumivku nebo odporník. U symetrických sítí v normálním (bezporuchovém) provozu se způsob spojení uzlu a země nijak neprojeví. Odlišnost jednotlivých zapojení se projeví až při nesymetrických stavech, které vznikají při poruchách. [10] [12]

2.3.3.1 Síť s účinně (přímo) uzemněným uzlem

Účinně uzemněná síť má uzel spojený se zemnicími elektrodami téměř bezodporovou ($Z_N \rightarrow 0$) spojkou (vodičem). Zemnicí elektrody (zemniče) jsou vodivé předměty umístěné pod povrchem a mohou být náhodné (kovové potrubí, části ocelových konstrukcí v zemi) nebo speciální s vhodným tvarem. Zapojení s účinně uzemněným uzlem se používá v sítích nízkého (nn), velmi vysokého (vvn) a zvláště vysokého napětí (zvn). [10]



Obr. 2.8: Síť s účinně (přímo) uzemněným uzlem.

Nejčastější poruchou v sítích s přímo uzemněným uzlem je zkrat. Zkrat je charakterizován jako bezodporové spojení dvou fází mezi sebou nebo jako spojení fáze (popř. fází) se zemí. V praxi může ale dojít také k odporovému zkratu, který může způsobit například vlhká větev. Při zkratu prochází uzavřeným obvodem poruchový proud I_p , který má induktivní charakter a je závislý na místě vzniku poruchy. Tento proud způsobuje elektrické poškození dielektrik a tepelně a silově namáhá vodiče.

$$\bar{I}_p = \frac{3\bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3R_p} \quad [A] \quad (2.1)$$

Napětí poškozené fáze v místě poruchy:

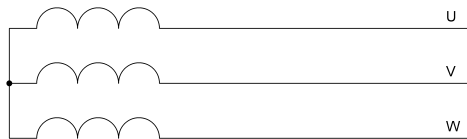
$$U_p = R_p I_p \quad [V] \quad (2.2)$$

Při kovovém zkratu ($R_p \rightarrow 0$) klesne hodnota napětí poškozené fáze na nulu ($U_p = 0$). V ideálním případě ($Z_1 = Z_0$) zůstanou napětí nepoškozených fází nezměněna. V opačném případě fázová napětí i úhly mírně vzrostou.

Při zkratu vznikají v sítích s přímo uzemněným uzlem velmi nebezpečné hodnoty krokových a dotykových napětí. Takovou síť tedy není možné provozovat a je nutná okamžitá detekce poruchy a bezprostřední vypnutí postižené části sítě. [12]

2.3.3.2 Síť izolovaným uzlem

Uzel sítě není spojen se zemí ($Z_N \rightarrow \infty$) a v bezporuchovém symetrickém stavu je napětí mezi uzlem a zemí nulové ($U_N = 0$). V opačném (neideálním) případě (nesymetrický stav) je napětí U_N i tak menší než $1\%U_f$. Použití izolovaného uzlu je dovoleno pouze pro malé sítě (vlastní spotřeba elektráren a tepláren, sítě průmyslových závodů), kde $I_{kap} < 20$ A, přičemž již od $I_{kap} > 10$ A je doporučena kompenzace kapacitních proudů.



Obr. 2.9: Síť s izolovaným uzlem.

V sítích s izolovaným uzlem nevzniká při poruše klasický zkrat, nýbrž takzvané zemní spojení. Zemní spojení je vodivé spojení jedné fáze se zemí a od zkratu liší především tím, že obvodem neteče velký zkratový proud (obvod není uzavřen), ale pouze malý poruchový proud, který se uzavírá přes kapacity proti zemi a napájecí transformátor. Proud má tedy kapacitní charakter. Jeho velikost nezávisí na místě zemního spojení a je dána základními parametry vedení (především měrnou kapacitou vodiče proti zemi C_k).

$$\bar{I}_p = \bar{U}_f \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j3\omega C_k} \cdot j3\omega C_k \quad [A] \quad (2.3)$$

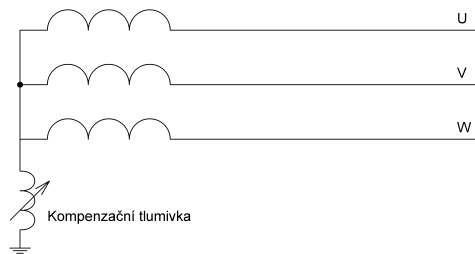
Kapacitní charakter poruchového proudu je nepříznivý především z hlediska zhašení oblouku, kdy krátce po zhašení (v řádu ms) původního oblouku může dojít k opětovnému zapálení vlivem rychlého nárůstu napětí na poškozené fázi. Tímto vzniká takzvané přerušované zemní spojení a následné přepětí, které může způsobit průraz izolace a tím i dvojitě zemní spojení (mezifázový zkrat). „Dvojitě zemní spojení představuje dvoufázový zkrat doprovázený velkými hodnotami poruchových proudů, a je nutné ho ihned vypnout.“ [12, str. 107] Zemní spojení je také provázáno zvýšením napětí v obou nepostižených fázích a to až na hodnoty napětí sdružených. Při zemním spojení s malým přechodovým odporem ($R_p \rightarrow 0$, kovové zemní spojení) hodnota napětí v postižené fázi klesne na nulu a napětí mezi uzlem transformátoru a zemí vzroste z nuly na hodnotu fázového napětí, tj. $U_N = U_f$.

$$\bar{U}_N = \bar{U}_f \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + j3\omega C_k} \quad [A] \quad (2.4)$$

Vedení postižené zemním spojením je možné provozovat po dobu potřebnou k detekci a odstranění poruchy. [12] [11]

2.3.3.3 Síť s neúčinně (nepřímo) uzemněným uzlem

Uzel neúčinně uzemněné sítě je se zemí spojen přes nenulovou impedanci ($Z_N > 0$). V případě venkovních vedení je touto impedancí myšlena laditelná tlumivka (indukčnost), která kompenzuje velikost kapacitních proudů a zmenšuje tak účinky zemního spojení na síť. Pro síť 22 kV je indukčnost kompenzačních tlumivek obvykle 0,14 až 3,6 H. Kabelová vedení jsou obvykle uzemněna pouze přes činný odpor. [12]



Obr. 2.10: Síť s neúčinně (nepřímo) uzemněným uzlem.

V ideálním případě (vykompenzovaný stav, zanedbané odpory tlumivky a svodu) je indukční proud protékající indukčností I_L stejně velký jako kapacitní proud I_{kap} a proud I_p v místě poruchy je tedy nulový. Stav $I_{kap} = I_L$ nastává při hodnotě tlumivky L :

$$L = \frac{1}{3}\omega^2 C \quad [H] \quad (2.5)$$

Proudové a napěťové poměry lze vyjádřit z náhradního schématu vzniklého zanedbáním impedance transformátoru, vedení a svodových odporů. Napětí uzlu proti zemi U_N :

$$\bar{U}_N = \bar{U}_f \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} \quad [A] \quad (2.6)$$

Při bezodporovém zemním spojení ($R_p \rightarrow 0$) vzroste hodnota napětí U_N až na hodnotu fázového napětí. Na velikosti napětí U_N se značně projevuje kapacitní nesymetrie, a to i v případě velmi malých rozdílů (obvykle $< 0,5\%$), což způsobuje, že i v bezporuchovém stavu může napětí U_N dosáhnout i několika procent fázového napětí. Právě kvůli tomuto relativně malému napětí protéká i při bezporuchovém stavu tlumivkou malý proud. S využitím napětí U_N je možné, při uvažování odporu tlumivky, vyjádřit vztah pro proud v místě poruchy:

$$\bar{I}_P = \bar{U}_N \left[\frac{1}{R_p} + j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad [A] \quad (2.7)$$

Výsledný poruchový proud I_p je tvořen nevykompenzovanou činnou složkou I_W , která odpovídá ztrátám v tlumivce, a složkou obsahující rozdíl kapacitního proudu sítě a kompenzačního indukčního proudu tlumivky ($I_{kap} - I_L$). Výsledný (vykompenzovaný) poruchový proud je mnohem menší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. Právě díky výslednému činnému charakteru je možné mnohem lépe zhaset oblouky při zemních spojení bez opětovných samovolných zápalů. [12]

3

Zemní lano a důvody jeho použití

Zemní lano je vedle svodičů přepětí, tyčových hromosvodů a ochranných jiskřišť jedním ze základních prostředků pro ochranu vedení proti atmosférickému přepětí ¹.

Jedná se o uzemněný nebo slabě izolovaný vodič, který je umístěn nad fázovými vodiči venkovních vedení velmi vysoké se zesílenou izolací a všech vedeních velmi vysokého napětí. Vedení velmi vysokého napětí jsou běžně opatřena dvěma a více zemními lany. U venkovních vedení s napěťovou úrovní vn 22 kV a 35 kV se používají pouze výběhová lana, která jsou spojena s uzemňovací soustavou a ochranami rozvodny a vyvedena jen asi do jednoho kilometru od rozvodny. [10]

Zemní lano většinou nemá smysl používat na vedeních vn bez zesílené izolace, tj. vedeních na kovových stožárech nebo s kovovými konzolemi. U těchto vedení je totiž vysoká pravděpodobnost výskytu přeskového napětí, které je dáno impedancí zemní cesty (impedancí přilehlých úseků zemního lana, svodu k zemi, zemi a odporem půdy), strmostí a amplitudou proudové vlny bleskového výboje. Toto napětí způsobuje tzv. zpětný přeskok ze zemního lana nebo svodové cesty na fázové vodiče, kde opět vzniká přepětí.

Základní zemní lano se konstrukcí nijak neliší od klasických fázových vodičů. Jsou vyrobená buď jako čistě ocelová, nebo častěji jako hliníková s ocelovou duží (AlFe). Mezi běžné typy používaných zemních lan patří například vodič AlFe 6 35 mm² nebo AlFe 6 50 mm². Základní parametry těchto dvou vybraných lan jsou uvedeny v tabulce 3.1.

S_{jmen} [mm ²]	S_{mat} [mm ²]	d [mm]	Poměr Al:Fe	R_{max} [Ωkm^{-1}]
35	43,10	8,40	6,00	0,778
50	54,55	8,45	6,00	0,615

Tab. 3.1: Konstrukce a vlastnosti lan AlFe 6 dle ČSN 02 4210.

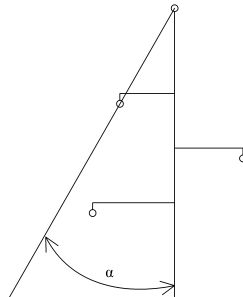
¹Přepětí je každé napětí, jehož amplituda je větší než amplituda jmenovitého napětí sítě. Přepětí může být atmosférického nebo provozního původu. Atmosférické přepětí vzniká buď přímým úderem blesku do vodičů nebo je indukované. Provozní přepětí vzniká při zemních spojeních, zkratech a také při manipulaci s vypínači a odpojovači.

3.1 Důvody použití zemnicího lana

3.1.1 Ochrana vedení před přímým úderem blesku

Ochrana venkovních vedení před přepětím vzniklém přímým úderem blesku do fázových vodičů je základním důvodem použití zemnicího lana. Většina venkovních vedení prochází otevřenými krajinami, kde jsou vrcholky stožárů mnohdy nejvyššími body v blízkém okolí. Pravděpodobnost zásahu bleskového výboje do fázových vodičů je tedy velmi vysoká. V České republice pak statisticky vychází asi 30 přímých zásahů blesku na každých 100 kilometrech vedení ročně.

Zemnicí lano umístěné nad fázovými vodiči svým stínícím efektem, tj. vymezeným prostorem, kde jsou fázové vodiče s velkou pravděpodobností chráněny před přímým zásahem blesku, působí jako běžný bleskosvod. Stíněný prostor je dán tzv. ochranným úhlem. „Je to úhel, který v rovině kolmé na osu vedení svírá spojnice zemnicího lana a fázového vodiče se svislou rovinou, proloženou zemnicím lanem – viz obr. 3.1.“ [9]



Obr. 3.1: Ochranný úhel zemnicího lana.

3.1.2 Zmenšení přepětí vzniklého elektrostatickou indukci

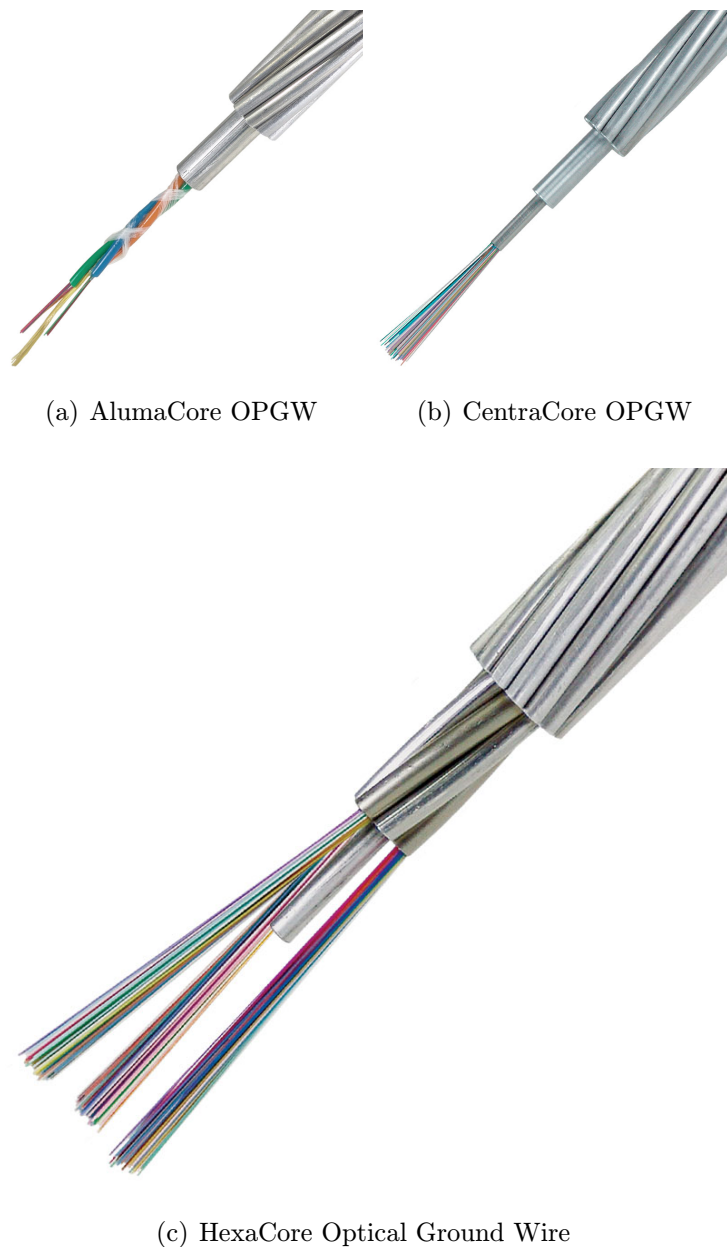
Zemnicí lano, díky svému uzemnění na každém stožáru, zvyšuje dílčí kapacitu proti zemi (přibližuje zem fázovým vodičům) a tím snižuje přepětí na fázových vodičích vzniklé elektrostatickou indukci napětí způsobeného úderem blesku v blízkosti vedení. [9]

3.1.3 Zmenšení krokového napětí a proudu jdoucího do země

„Udeří-li blesk do stožáru bez ZL, veškerá energie blesku se svede do země jen tímto jedním stožárem. Mezi konstrukcí stožáru a zemí existuje přechodový odpor. Pokud se bude v ten okamžik někdo pohybovat v blízkosti stožáru, projde jím rovněž část proudu, jehož velikost bude záviset na měrném odporu země, délce kroku (odtud název krokové napětí), resp. vzdálenosti mezi částmi těla, které se dotýkají země a dále na velikosti proudu. Velikost proudu svedeného do země jedním stožárem při úderu blesku omezuje právě ZL. Pokud jsou totiž stožáry propojeny ZL, část proudu se dostane do země také přes stožáry sousední. Rozdíl mezi velikostí proudu u vedení se ZL a bez ZL může být pro člověka fatální.“ [13]

3.1.4 Přenos informace optickými vlákny

Moderní formou zemnicích lan jsou zemnicí lana **kombinovaná**, v anglické literatuře a katalozích výrobců uváděné pod zkratkou **OPGW** (Optical Ground Wire). Od základních AlFe lan se liší jen tím, že mají ve svém jádře uloženo jedno nebo více optických vláken, po kterých je možné přenášet nejen data mezi rozvodnami a dispečinky, ale také informace *třetích stran*, například vysokorychlostní internet nebo hromadné dálkové ovládání (HDO). Není proto potřeba budovat žádnou další speciální (jednoúčelovou) a nákladnou infrastrukturu.



Obr. 3.2: Různé druhy optických zemnicích lan (OPGW) dodávaných firmou AFL. |Převzato z [2]|

4

Odvození pasivních parametrů venkovních vedení

Před samotným řešením provozních stavů venkovních vedení je důležité určit jejich vlastnosti určené čtyřmi základními elektrickými parametry: činným odporem (R), indukčností (L), svodem (G) a kapacitou (C). Tyto parametry možné určit měřením, výpočtem nebo kombinací těchto metod, kdy jsou při výpočtu použity dříve změřené nebo vypočtené tabulkové hodnoty.

Kromě základních elektrických parametrů existují také parametry odvozené. Mezi odvozené parametry patří zejména indukční reaktance $X = \omega L$ a kapacitní susceptance $B = \omega C$. Pro řešení přenosu elektrické energie je vhodné vyjádřit také podélnou impedanci $\bar{Z} = R + jX = R + j\omega L$, která určuje vlastnosti vedení v podélném směru, a příčnou admitanci $\bar{Y} = G + jB = G + j\omega C$ závisující převážně na kapacitě vedení mezi vodiči a kapacitě proti zemi. Svod se u venkovních vedení při většině výpočtů zanedbává.

4.1 Činný odpor

Činný odpor vodiče je závislý na měrném odporu ρ , délce l a průřezu S :

$$R_{ss} = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega mm^2 m^{-1}, m, mm^2] \quad (4.1)$$

Vztah 4.1 platí pro vodiče protékané stejnosměrným proudem při *normální* teplotě $\vartheta_{20} = 20^\circ C$. Pro většinu běžných (orientačních) výpočtů je dostatečně přesný.

Při přesných výpočtech je třeba uvažovat i další vlivy, které způsobuje střídavý proud tekoucí vodičem, zejména pak vliv oteplení vodiče respektovaný činitelem k_ϑ a vliv skin efektu respektovaným činitelem k_s . Činitele k_ϑ , k_s a další jsou zahrnuty v násobném koeficientu k :

$$k = k_\vartheta k_s k_e k_p \quad (4.2)$$

kde k_ϑ – činitel respektující vliv oteplení, k_s – činitel respektující skin efekt, k_e – činitel zkrutu, k_p – činitel průhybu.

Činný odpor vodiče protékaného střídavým proudem:

$$R_{st} = kR_{ss} \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

Činitel k_{ϑ} :

$$k_{\vartheta} = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad (4.4)$$

kde $\alpha = \alpha_{AlFe} = 0,00387 [^{\circ}C^{-1}]$, $\vartheta_{20} = 20^{\circ}C$ – normální teplota, ϑ – teplota okolí.

V bezporuchovém stavu se součinitel β neuplatňuje. Svůj význam má až při průchodu zkratového proudu, který způsobuje velké oteplení vodiče. Činitel k_{ϑ} při normálním (bezporuchovém) stavu:

$$k_{\vartheta} = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) \quad (4.5)$$

Činitel k_s :

$$k_s = 1 + 0,375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 - R_{ss}} \right]^2 \quad (4.6)$$

Vztah 4.6 platí pro hliníkové vodiče s ocelovým jádrem (AlFe n) s poměrem $n = 3 \div 8$.

Pokud jsou vyžadovány opravdu přesné výpočty, je třeba počítat i s dalšími vlivy. Vliv na činný odpor vodiče má i kroucení vodičů v laně respektovaný činitelem zkrutu k_e a také průhyb vodiče respektovaný činitelem průhybu k_p .

Činitel k_e :

$$k_e = \sqrt{\frac{a_n^2 - (D_n - d)^2 \pi^2}{a_n}} \quad (4.7)$$

kde a_n – výška závitu n -tého vodiče, D_n – průměr lana v poloze n -tého vodiče, d – průměr drátu. Výšku závitu lze určit podle normy ČSN ze vztahu pro činitel krutu p :

$$p = \frac{a_n}{D} \quad (4.8)$$

Činitel zkrutu pro venkovní vedení bývá $10 \div 13$. [7]

Činitel k_p :

$$k_p = \frac{l_p}{a} \quad (4.9)$$

$$k_p = \frac{2c \cdot \sinh\left(\frac{a}{2c}\right)}{a} \quad (4.10)$$

kde c – parametr řetězovky, a – vzdálenost mezi stožáry (rozpětí stožárů). Parametr řetězovky je závislý na horizontálním tahu σ_H , měrné tíže γ' a přetížení námrazou z :

$$c = \frac{\sigma_H}{\gamma' \cdot z} \quad (4.11)$$

4.2 Indukčnost

Pro určení vlastností venkovního vedení v bezporuchovém a poruchovém stavu je třeba znát indukční reaktanci X_L . Pro X_L při průmyslovém kmitočtu $f = 50$ Hz platí:

$$X_L = 2\pi f L \cdot 10^{-3} \quad [\Omega; mHkm^{-1}] \quad (4.12)$$

4.2.1 Indukčnost vodiče jednofázové smyčky

Celková indukčnost vodiče je dána součtem své vnitřní (L_i) a vnější složky (L_e). Výpočet vychází z rozboru elektromagnetického pole pro jednofázovou smyčku dvou rovnoběžných vodičů. Výchozím vztahem pro určení indukčnosti válcového vodiče s plným průřezem je **1. Maxwellova rovnice** známá také jako *zákon celkového proudu*:

$$\oint \bar{H} d\bar{S} = I \quad (4.13)$$

Ze zákona celkového proudu vyplývá vztah pro vnější intenzitu magnetického pole H_e :

$$H_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I}{x} \quad (4.14)$$

Ze známé vnější intenzity magnetického pole vychází vnější magnetická indukce B_e (pro $\mu_r = 1$):

$$B_e = \mu_0 H_e \quad (4.15)$$

S využitím vztahu 4.15 je pak možné psát základní rovnici pro výpočet magnetického toku vyvozeného prvním vodičem v prostoru mezi vodiči na jednotku délky:

$$\Phi_{e1} = \int_r^{a-r} B_e dx + \int_{a-r}^{a+r} B_e dx \quad (4.16)$$

kde první složka zahrnuje magnetický tok obepínající celý proud I . Druhá složka zahrnuje magnetický proud obepínající jen část proudu I tak, jak s rostoucí vzdáleností zabírá magnetický tok vyvozený prvním vodičem a proudem procházejícím vodičem druhým. Za předpokladu, že je vzdálenost mezi vodiči a mnohonásobně větší než poloměr r , tj. platí $a \gg r$, je možné poloměr r zanedbat. Po úpravě mezí, sečtení obou složek a dosazení za $B_e = \mu_0 H_e$ je výsledný magnetický tok Φ_{e1} :

$$\Phi_{e1} = \frac{\mu_0}{2\pi} I \int_a^r \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0}{2\pi} I [\ln x]_r^a = \frac{\mu_0}{2\pi} I \ln \frac{a}{r} \quad (4.17)$$

Stejný postup platí i pro určení magnetického toku druhého vodiče Φ_{e2} :

$$\Phi_{e2} = \frac{\mu_0}{2\pi} I \ln \frac{a}{r} \quad (4.18)$$

Celkový magnetický tok smyčky je součet dílčích toků Φ_{e1} a Φ_{e2} :

$$\Phi_c = \Phi_{e1} + \Phi_{e2} = \frac{\mu_0}{\pi} I \ln \frac{a}{r} \quad (4.19)$$

Konečný vztah pro výpočet vnější indukčnosti vyplývá ze statické definice indukčnosti $\Phi = L_e I$. Pro výpočet elektrických vedení je vhodné vyjádřit indukčnost na jeden vodič v $[mHkm^{-1}]$. Po dosazení konkrétních hodnot ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$) a převodu $\ln x = 2,3 \log x$ je výsledný výraz pro určení vnější (externí) indukčnosti L_e na jednotku délky:

$$L_e = 0,46 \log \frac{a}{r} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.20)$$

Výpočet vnitřní intenzity magnetického pole H_i vychází z teorie, že uvnitř vodiče je uzavřena jen část proudu I' . Za předpokladu rovnoměrného rozdělení proudu po průřezu:

$$\frac{I'}{I} = \frac{x^2}{r^2} \Rightarrow I' = I \frac{x^2}{r^2} \quad (4.21)$$

Proud I' je poté možné dosadit za proud I do základního vztahu pro výpočet intenzity magnetického pole H vycházejícího ze zákona celkového proudu. Po dosazení a následných elementárních úpravách je vnější intenzita magnetického pole H_i :

$$H_i = \frac{1}{2\pi} I \frac{x}{r^2} \quad (4.22)$$

Uvnitř vodiče z nemagnetického materiálu ($\mu_r = 1$) je vnitřní magnetická indukce B_i :

$$B_i = \mu_0 H_i \quad (4.23)$$

Energie magnetického pole v elementu objemu ($dV = 2\pi x dx$):

$$dW = \frac{1}{2} B H dV = \frac{1}{2} \mu_0 H_i^2 2\pi x dx \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} W &= \int_0^r \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{1}{2\pi} I \frac{x}{r^2} \right)^2 2\pi x dx = \int_0^r \frac{1}{2} \mu_0 \frac{1}{4\pi^2} I^2 \frac{x^2}{r^4} 2\pi x dx = \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{1}{4\pi^2} I^2 \frac{1}{r^4} 2\pi \int_0^r x^3 dx = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{1}{4\pi^2} I^2 \frac{1}{r^4} 2\pi \left[\frac{x^4}{4} \right]_0^r = \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{1}{4\pi^2} I^2 \frac{1}{r^4} 2\pi \frac{r^4}{4} = \frac{1}{16\pi} \mu_0 I^2 = \frac{1}{16\pi} \mu_0 I^2 = \frac{1}{2} L_i I^2 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Obecný vztah pro výpočet vnitřní indukčnosti:

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (4.26)$$

Po dosazení ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$) a převodu na $[mHkm^{-1}]$ je vnitřní indukčnost L_i :

$$L_i = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{8\pi} \cdot 10^6 = 0,05 \quad (4.27)$$

Celková indukčnost jednoho vodiče s plným kruhovým průřezem na jednotku délky:

$$L_c = L_e + L_i = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.28)$$

4.2.2 Indukčnost trojfázového vedení bez zemnicího lana

Výpočet vlastních a vzájemných indukčností vodičů trojfázového vedení, uspořádaného v obecném trojúhelníku, vychází z výpočtu indukčnosti vodiče pro jednofázovou smyčku. Při výpočtu je použita úvaha o superpozici magnetických toků tj.

$$\bar{\Phi}_{ci} = \bar{\Phi}_{ii} + \bar{\Phi}_{ij} + \bar{\Phi}_{ik} \quad (4.29)$$

kde $\bar{\Phi}_{ci}$ – celkový magnetický tok vodiče i , $\bar{\Phi}_{ii}$ – vlastní magnetický tok vodiče i , $\bar{\Phi}_{ij}$, $\bar{\Phi}_{ik}$ – vzájemné magnetické toky vyvolané vodičem i ve vodičích j a k .

Pro vodič 1 trojfázového vedení je celkový magnetický tok $\bar{\Phi}_{c1}$

$$\bar{\Phi}_{c1} = \bar{\Phi}_{11} + \bar{\Phi}_{12} + \bar{\Phi}_{13} \quad (4.30)$$

Vlastní a vzájemné magnetické toky vycházejí z výpočtů jednofázové smyčky:

$$\bar{\Phi}_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_1 \ln \frac{a_x}{r_e} \quad (4.31)$$

$$\bar{\Phi}_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_2 \ln \frac{a_x}{a_{12}} \quad (4.32)$$

$$\bar{\Phi}_{13} = \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_3 \ln \frac{a_x}{a_{13}} \quad (4.33)$$

kde a_x – vzdálenost vodiče k myšlené vzdálené přímce rovnoběžné s vodiči, a_{12} , a_{13} – vzdálenost mezi jednotlivými vodiči, r_e – efektivní poloměr (střední geometrický poloměr) vlastního vodiče. Některé hodnoty efektivního poloměru pro charakteristické konstrukce lan AlFe jsou uvedeny v tabulce 4.1 převzaté ze zdroje [7].

Počet poloh	Počet drátů	Efektivní poloměr
1		(0,55 až 0,7)r
2	26	0,809r
2	30	0,826r
3	54	0,810r

Tab. 4.1: Efektivní poloměr vodičů (bez uvážení povrchového jevu)

Celkový magnetický tok vodiče 1 (podle vztahu 4.30):

$$\bar{\Phi}_{c1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_1 \ln \frac{a_x}{r_e} + \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_2 \ln \frac{a_x}{a_{12}} + \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_3 \ln \frac{a_x}{a_{13}} \quad (4.34)$$

Po úpravě:

$$\bar{\Phi}_{c1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_1 \ln \frac{1}{r_e} + \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_2 \ln \frac{1}{a_{12}} + \frac{\mu_0}{2\pi} \bar{I}_3 \ln \frac{1}{a_{13}} + \frac{\mu_0}{2\pi} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \ln a_x \quad (4.35)$$

Stejným způsobem lze určit i další dva magnetické toky vodičů $\bar{\Phi}_{c2}$ a $\bar{\Phi}_{c3}$.

V trojfázové soustavě platí:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0 \quad (4.36)$$

Celková indukčnost vodiče 1:

$$L_1 \bar{I}_1 = L_{11} \bar{I}_1 + L_{12} \bar{I}_2 + L_{13} \bar{I}_3 \quad (4.37)$$

S využitím rovnic 4.36, 4.35 a statické definice indukčnosti $\Phi = LI$ je možné psát výsledné vztahy pro výpočet vlastních a vzájemných indukčností jednoduchého trojfázového vedení bez zemnicího lana ve tvaru:

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{e1}} = 0,46 \log \frac{1}{r_{e1}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.38)$$

$$L_{22} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{e2}} = 0,46 \log \frac{1}{r_{e2}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.39)$$

$$L_{33} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{e3}} = 0,46 \log \frac{1}{r_{e3}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.40)$$

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{a_{12}} = 0,46 \log \frac{1}{a_{12}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.41)$$

$$L_{23} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{a_{23}} = 0,46 \log \frac{1}{a_{23}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.42)$$

$$L_{31} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{a_{31}} = 0,46 \log \frac{1}{a_{13}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.43)$$

kde L_{11} , L_{22} , L_{33} – vlastní indukčnosti jednotlivých vodičů, $L_{12} = L_{21}$, $L_{23} = L_{32}$, $L_{31} = L_{13}$ – vzájemné indukčnosti mezi vodiči.

4.2.3 Indukčnost trojfázového vedení se zemnicím lanem

Výchozí vztahy pro výpočet vlastní a vzájemných indukčností s respektováním vlivu země:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{ei}} + \ln \frac{a_{zi} a_{zj}}{r_{ez}} \right) \quad (4.44)$$

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{a_{ij}} + \ln \frac{a_{zj} a_{zi}}{r_{ez}} \right) \quad (4.45)$$

kde L_{ii} – vlastní indukčnost vodiče, L_{ij} – vzájemná indukčnost mezi vodiči, r_{ei} – efektivní poloměr vodiče i , r_{ez} – efektivní poloměr země, a_{ij} – vzdálenost mezi vodiči i a j , a_{zi} , a_{zj} – vzdálenosti mezi vodiči i , j a zemí.

Tyto vztahy však nelze obecně použít, protože efektivní poloměr země a vzdálenosti mezi vodiči a zemí nejsou známy. Pro výpočet je proto třeba využít Carsonových rovnic pro vlastní a vzájemné impedance publikovaných v jeho článku roku 1926. V jeho práci je země brána jako nekonečná jednotná plocha s rovným povrchem a konstantní rezistivitou. Při odvozování rovnic je použita metoda zrcadlení, tj. každému vodiči je přiřazen obraz ve stejné vzdálenosti pod povrchem země. [8]

Pro určení vlastních a vzájemných indukčností dvou vodičového systému s vodiči i a j , podle originálních Carsonových rovnic, stačí uvažovat pouze imaginární složku \bar{Z} :

$$L_{ii} = L_i + 2G \ln \frac{a_{ii'}}{r_i} + 4Q_{ii}G \quad (4.46)$$

$$L_{ij} = 2G \ln \frac{a_{ij'}}{a_{ij}} + 4Q_{ij}G \quad (4.47)$$

kde L_{ii} – vlastní indukčnost vodiče, L_{ij} – vzájemná indukčnost mezi vodiči, $a_{ii'}$ – vzdálenost mezi vodičem i a jeho obrazem i' , $a_{ij'}$ – vzdálenost mezi vodičem i a obrazem vodiče j' , a_{ij} – vzdálenost mezi vodičem i a j , $G = 0,099940449 \Omega \text{ km}^{-1}$.

$$L_i = 2G \ln \frac{r_i}{r_{ei}} \quad (4.48)$$

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (4.49)$$

$$k_{ij} = 8,565 \cdot 10^{-4} \cdot a_{ij'} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (4.50)$$

Pro praktické výpočty postačují pouze tzv. modifikované Carsonovy rovnice, ve kterých se uplatňují pouze dvě složky proměnné Q_{ij} :

$$Q_{ij} = -0,03860 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} = -0,03860 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{8,565 \cdot 10^{-4} \cdot a_{ij'} \sqrt{\frac{f}{\rho}}} \quad (4.51)$$

$$2Q_{ij} = 7,6786 - \ln a_{ij'} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \quad (4.52)$$

Vlastní indukčnost vodiče je pak:

$$L_{ii} = 2G \ln \frac{r_i}{r_{ei}} + 2G \ln \frac{a_{ii'}}{r_i} + 4Q_{ii}G \quad (4.53)$$

$$L_{ii} = 2G \left(\ln \frac{a_{ii'}}{r_{ei}} + \ln \frac{r_i}{r_i} + 2Q_{ii} \right) = 2G \left(\ln \frac{a_{ii'}}{r_{ei}} + 2Q_{ii} \right) \quad (4.54)$$

$$L_{ii} = 2G \left(\ln \frac{a_{ii'}}{r_{ei}} + 7,6786 - \ln a_{ii'} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (4.55)$$

$$L_{ii} = 2G \left(\ln \frac{1}{r_{ei}} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (4.56)$$

Po dosazení hodnot $f = 50\text{Hz}$, $\rho = 100\Omega\text{m}$ je vlastní indukčnost L_{ii} :

$$L_{ii} = 2G \left(\ln \frac{1}{r_{ei}} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{100}{50} \right) \quad (4.57)$$

$$L_{ii} = 2G \left(\ln \frac{1}{r_{ei}} + 8,0252 \right) \quad (4.58)$$

Podobné odvození platí i pro vzájemnou indukčnost L_{ij} :

$$L_{ij} = 2G \left(\ln \frac{a_{ij'}}{a_{ij}} + 2Q_{ii} \right) = 2G \left(\ln \frac{a_{ij'}}{a_{ij}} + 2Q_{ii} \right) \quad (4.59)$$

$$L_{ij} = 2G \left(\ln \frac{a_{ij'}}{a_{ij}} + 7,6786 - \ln a_{ij'} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{f} \right) \quad (4.60)$$

$$L_{ij} = 2G \left(\ln \frac{1}{a_{ij}} + 8,0252 \right) \quad (4.61)$$

Zřejmě platí:

$$\frac{a_{zi}a_{zj}}{r_{ez}} = \frac{a_{zj}a_{zi}}{r_{ez}} = 8,0252 \quad (4.62)$$

Vliv zemnicího lana je možné respektovat rozšířenou maticí funkčních závislostí mezi potenciály jednotlivých vodičů V a proudy tekoucí vodiči I :

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V' \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & L_{vz} \\ L_{zv} & L_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_z \end{bmatrix}$$

Vlastní L_{ii} , L_{zz} a vzájemné L_{ij} , $L_{zv} = L_{vz}$ indukčnosti jsou dány vztahy 4.59 a 4.62. Rozepsaná matice:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ V'_3 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{1z} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{2z} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{3z} \\ L_{z1} & L_{z2} & L_{z3} & L_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_z \end{bmatrix}$$

Zemnicí lano je na každém stožáru uzemněno a proto je jeho potenciál V_z nulový. Díky nulovému potenciálu je pak snadné vyjádřit proud tekoucí zemnicím lanem I_z :

$$I_z L_{zz} = -(L_{z1}I_1 + L_{z2}I_2 + L_{z3}I_3) \quad (4.63)$$

Po úpravě:

$$I_z = -L_{zz}^{-1}(L_{z1}I_1 + L_{z2}I_2 + L_{z3}I_3) \quad (4.64)$$

S využitím vztahu 4.64 je potenciál V_1 :

$$\begin{aligned} V_1 &= V'_1 + L_{11}I_1 + L_{12}I_2 + L_{13}I_3 + L_{1z} \left[-L_{zz}^{-1}(L_{z1}I_1 + L_{z2}I_2 + L_{z3}I_3) \right] \\ &= V'_1 + L_{11}I_1 + L_{12}I_2 + L_{13}I_3 - \frac{L_{1z}}{L_{zz}}(L_{z1}I_1 + L_{z2}I_2 + L_{z3}I_3) \end{aligned}$$

$$= V_1' + L_{11}I_1 + L_{12}I_2 + L_{13}I_3 - \frac{L_{1z}^2}{L_{zz}}I_1 - \frac{L_{1z}L_{z2}}{L_{zz}}I_2 - \frac{L_{1z}L_{z3}}{L_{zz}}I_3 \quad (4.65)$$

$$V_1 = V_1' + \left(L_{11} - \frac{L_{1z}^2}{L_{zz}}\right)I_1 + \left(L_{12} - \frac{L_{1z}L_{z2}}{L_{zz}}\right)I_2 + \left(L_{13} - \frac{L_{1z}L_{z3}}{L_{zz}}\right)I_3 \quad (4.66)$$

Stejným způsobem lze odvodit i zbývající dva potenciály V_2 a V_3 :

$$V_2 = V_2' + \left(L_{21} - \frac{L_{2z}L_{z1}}{L_{zz}}\right)I_1 + \left(L_{22} - \frac{L_{2z}^2}{L_{zz}}\right)I_2 + \left(L_{23} - \frac{L_{2z}L_{z3}}{L_{zz}}\right)I_3 \quad (4.67)$$

$$V_3 = V_3' + \left(L_{31} - \frac{L_{3z}L_{z1}}{L_{zz}}\right)I_1 + \left(L_{32} - \frac{L_{3z}L_{z2}}{L_{zz}}\right)I_2 + \left(L_{33} - \frac{L_{3z}^2}{L_{zz}}\right)I_3 \quad (4.68)$$

Vlastní a vzájemné indukčnosti třífázového vedení s uvažováním vlivu zemnicího lana:

$$L_{11} = L_{11} - \frac{L_{1z}^2}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.69)$$

$$L_{22} = L_{22} - \frac{L_{2z}^2}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.70)$$

$$L_{33} = L_{33} - \frac{L_{3z}^2}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.71)$$

$$L_{12} = L_{21} = L_{12} - \frac{L_{1z}L_{z2}}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.72)$$

$$L_{23} = L_{32} = L_{23} - \frac{L_{2z}L_{z3}}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.73)$$

$$L_{31} = L_{13} = L_{31} - \frac{L_{3z}L_{z1}}{L_{zz}} \quad [mHkm^{-1}] \quad (4.74)$$

4.3 Svod

Svod je činnou složkou příčné admitance a pro svou absolutní velikost a *nestálost* se při výpočtech většinou zanedbává. Uvažuje se jen při některých (přesných) výpočtech vedení vn a při výpočtech vedení vvn. V případě, že se svod uvažuje, počítají se jeho maximální a minimální hodnoty tak, aby bylo možné posoudit jak velký vliv má na vlastnosti vedení. Do svodu se u venkovních elektrických vedení počítá nedokonalost izolačního odporu R_i a ztráty korónou. [7]

Výchozí vztah pro výpočet svodu venkovního vedení je

$$G = \frac{1}{R_i} \quad [\Omega km; Skm^{-1}] \quad (4.75)$$

kde R_i – minimální izolační odpor venkovního vedení daný tabulkou 4.2. [7]

Vedení	Izolační odpor
nn	24
vn (do 20 kV)	0,08 na volt
při 1 kV	80
při 10 kV	800
při 20 kV	1600
vn (nad 20 kV)	1600

Tab. 4.2: Minimální izolační odpor R_i venkovního vedení za vlhkého počasí

Jednofázové ztráty na jeden kilometr vedení vycházejí z proudu jdoucího do svodu $I = GU_f$ a fázového napětí U_f

$$\Delta P = U_f I = U_f^2 G \quad (4.76)$$

Celkové trojfázové ztráty na vedení způsobené nedokonalostí izolačního odporu R_i jsou pak

$$\Delta P = 3U_f^2 G \cdot 10^3 = U_s^2 G \cdot 10^3 \quad [kW km^{-1}; kV, S km^{-1}] \quad (4.77)$$

$$\Delta P = 3U_f^2 G \cdot 10^{-3} = U_s^2 G \cdot 10^{-3} \quad [kW km^{-1}; kV, \mu S km^{-1}] \quad (4.78)$$

K dalším ztrátám u venkovních vedení, které v součtu zahrnujeme do příčné složky svodu, patří ztráty způsobené korónou. První známky koróny se objeví, je-li intenzita elektrického pole na vodiči tak velká, že energie koncentrovaná na povrchových nerovnostech (na drobných hrotech a hranách) umožní výboj – nárazovou ionizaci v přilehlé vrstvě vzduchu.[7, str. 99]

Ztráty korónou většinou určují experimentálně na podobných nebo pokusných vedení.

4.4 Kapacita

Pro každý systém, který se skládá z více než dvou vodičů (vodič je i zem), není možné počítat pouze jeho jednoduchou kapacitu, ale je třeba určit jeho dílčí kapacity, tj. kapacity proti zemi a kapacity mezi vodiči. Každý obecný systém o n vodičích má n dílčích kapacit proti zemi a $n(n-1)/2$ dílčích kapacit mezi jednotlivými vodiči. Každý n fázový systém má tedy $n(n+1)/2$ dílčích kapacit. Pro obecné n -vodičové uspořádání systému platí následující funkční závislosti mezi potenciály a náboji vyjádřené v maticové formě:

$$\mathbf{V} = \delta \mathbf{Q} \quad (4.79)$$

kde \mathbf{V} – sloupcová matice potenciálů jednotlivých vodičů (1 až n), \mathbf{Q} – sloupcová matice nábojů na vodičích (1 až n), δ – čtvercová symetrická matice potenciálních součinitelů řádu n .

Odvození obecného vztahu pro potenciál vychází z představy dlouhého osamělého vodiče s rovnoměrně rozloženým nábojem ve výšce h nad zemí. Pro naznačené uspořádání

je intenzita elektrického pole na jednotku v délky v místě x :

$$E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{1}{x} \quad (4.80)$$

Určení potenciálu V :

$$E = -\frac{dV}{dx} \quad (4.81)$$

$$V = -\int_{\varrho_0}^{\varrho} E dx \quad (4.82)$$

$$\begin{aligned} V &= -\int_{\varrho_0}^{\varrho} E dx = -\int_{\varrho_0}^{\varrho} \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{1}{x} dx = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \int_{\varrho_0}^{\varrho} \frac{1}{x} dx = \\ &= -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} [\ln x]_{\varrho_0}^{\varrho} = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} [\ln \varrho - \ln \varrho_0] = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{\varrho_0}{\varrho} \end{aligned} \quad (4.83)$$

S uplatněním metody zrcadlení, principu superpozice a s předpokladem, že je výška h je mnohem větší než poloměr r (platí $2h \gg r$), je potenciál na povrchu vodiče i :

$$V_{ii} = \frac{Q_i}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{2h_i}{r_i} = \delta_{ii}Q_i \quad (4.84)$$

kde δ_{11} – vlastní potenciální součinitel vodiče i .

Pro systém složený z n dlouhých válcových vodičů je třeba určit také vzájemné potenciály mezi vodiči a jim odpovídající potenciální součinitele. Pro potenciál mezi vodiči i a j platí:

$$V_{ij} = \frac{Q_j}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{\varrho_{ij}'}{\varrho_{ij}} \quad (4.85)$$

kde ϱ_{ij} – vzdálenost mezi vodiči i a j , ϱ_{ij}' – *fiktivní* vzdálenost mezi obrazem vodiče j a vodičem i (obr. 4.1).

S využitím Pythagorovy věty je možné pro uspořádání vodičů podle obr. 4.1 určit vzdálenost mezi vodiči ϱ_{ij} a také vzdálenost mezi obrazem vodiče j a vodičem i ϱ_{ij}' . S předpokladem, že vzdálenost $\varrho_{ij} = a_{ij}$ a je známá (vychází ze známých rozměrů stožáru), platí pro vzdálenost ϱ_{ij}' vztah:

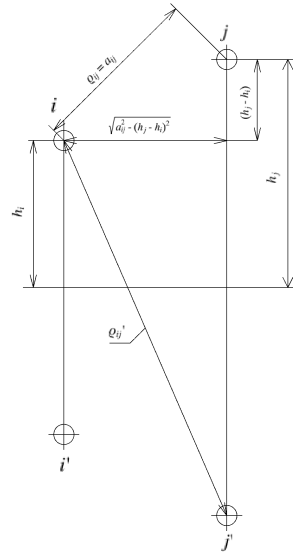
$$\varrho_{ij}' = \sqrt{\left(\sqrt{a_{ij}^2 - (h_j - h_i)^2}\right)^2 + (h_j - h_i)^2} \quad (4.86)$$

$$\varrho_{ij}' = \sqrt{4h_i h_j + a_{ij}^2} \quad (4.87)$$

Po dosazení vztahu 4.87 do rovnice 4.85 je vzájemný potenciál mezi vodiči i a j :

$$V_{ij} = \frac{Q_j}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{\sqrt{4h_i h_j + a_{ij}^2}}{a_{ij}} = \delta_{ij}Q_j \quad (4.88)$$

kde δ_{ij} – vzájemný potenciální součinitel mezi vodiči i a j .



Obr. 4.1: Vzdálenosti mezi vodiči.

4.4.1 Kapacita trojfázového vedení bez zemnicího lana

Matice funkčních závislostí mezi potenciály jednotlivých vodičů V a náboji na vodičích:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}$$

kde $\delta_{11}, \delta_{22}, \delta_{33}$:

$$\delta_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_1}{r_1} \quad (4.89)$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_2}{r_2} \quad (4.90)$$

$$\delta_{33} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_3}{r_3} \quad (4.91)$$

a $\delta_{12} = \delta_{21}, \delta_{13} = \delta_{31}, \delta_{23} = \delta_{32}$:

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\sqrt{4h_1h_2 + a_{12}^2}}{a_{12}} \quad (4.92)$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\sqrt{4h_1h_3 + a_{13}^2}}{a_{13}} \quad (4.93)$$

$$\delta_{23} = \delta_{32} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\sqrt{4h_2h_3 + a_{23}^2}}{a_{23}} \quad (4.94)$$

Z vlastních (δ_{ii}) a vzájemných (δ_{ij}) potenciálních součinitelů vycházejí podle vztahu 4.95 kapacitní součinitele, které určují dílčí kapacity vodičů proti zemi a mezi vodiči.

$$\delta^{-1} = \mathbf{k} \quad (4.95)$$

kde \mathbf{k} – čtvercová matice kapacitních součinitelů, δ^{-1} – inverzní matice potenciálních součinitelů.

Rozepsaný vztah 4.95:

$$\delta^{-1} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} +\delta_{22}\delta_{33} - \delta_{23}^2 & -\delta_{12}\delta_{33} + \delta_{13}\delta_{23} & +\delta_{12}\delta_{23} - \delta_{13}\delta_{22} \\ -\delta_{12}\delta_{33} + \delta_{13}\delta_{23} & +\delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}^2 & -\delta_{11}\delta_{23} + \delta_{12}\delta_{13} \\ +\delta_{12}\delta_{23} - \delta_{22}\delta_{13} & -\delta_{11}\delta_{23} + \delta_{12}\delta_{13} & +\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2 \end{bmatrix}$$

kde D – determinant matice potenciálních součinitelů.

$$D = \delta_{11}\delta_{22}\delta_{33} + 2\delta_{12}\delta_{13}\delta_{23} - \delta_{13}^2\delta_{22} - \delta_{23}^2\delta_{11} - \delta_{12}^2\delta_{33} \quad (4.96)$$

Dílčí kapacity proti zemi:

$$c_{11} = k_{11} + k_{12} + k_{13} \quad (4.97)$$

$$c_{11} = D^{-1}(\delta_{22}\delta_{33} - \delta_{23}^2 - \delta_{12}\delta_{33} + \delta_{13}\delta_{23} + \delta_{12}\delta_{23} - \delta_{13}\delta_{22}) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.98)$$

$$c_{22} = k_{22} + k_{12} + k_{23} \quad (4.99)$$

$$c_{22} = D^{-1}(-\delta_{12}\delta_{33} + \delta_{13}\delta_{23} + \delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}^2 - \delta_{11}\delta_{23} + \delta_{12}\delta_{13}) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.100)$$

$$c_{33} = k_{33} + k_{13} + k_{23} \quad (4.101)$$

$$c_{33} = D^{-1}(\delta_{12}\delta_{23} - \delta_{22}\delta_{13} - \delta_{11}\delta_{23} + \delta_{12}\delta_{13} + \delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.102)$$

Dílčí kapacity mezi vodiči:

$$c_{12} = -k_{12} = D^{-1}(\delta_{12}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{23}) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.103)$$

$$c_{23} = -k_{23} = D^{-1}(\delta_{11}\delta_{23} - \delta_{12}\delta_{13}) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.104)$$

$$c_{31} = -k_{31} = D^{-1}(-\delta_{12}\delta_{23} + \delta_{22}\delta_{13}) \quad [Fm^{-1}] \quad (4.105)$$

4.4.2 Kapacita trojfázového vedení se zemnicím lanem

Vliv zemnicího lana je možné respektovat rozšířenou maticí funkčních závislostí mezi potenciály V jednotlivých vodičů a náboji Q na vodičích:

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta & \delta_{vz} \\ \delta_{zv} & \delta_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ Q_z \end{bmatrix}$$

kde δ – vlastní a vzájemné potenciální součinitele mezi vodiči, $\delta_{vz} = \delta_{zv}$ – vzájemné potenciální součinitele mezi vodiči a zemnicím lanem, δ_{zz} – vlastní potenciální součinitel zemnicího lana.

Rozepsaná matice:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{1z} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{2z} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{3z} \\ \delta_{z1} & \delta_{z2} & \delta_{z3} & \delta_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_z \end{bmatrix}$$

kde jsou vlastní a vzájemné potenciální součinitele dané vztahy 4.90 až 4.95. Z poslední funkční závislosti lze vyjádřit náboj zemnicího lana Q_z :

$$Q_z \delta_{zz} = -(\delta_{z1} Q_1 + \delta_{z2} Q_2 + \delta_{z3} Q_3) \quad (4.106)$$

$$Q_z = -\delta_{zz}^{-1} (\delta_{z1} Q_1 + \delta_{z2} Q_2 + \delta_{z3} Q_3) \quad (4.107)$$

S využitím vztahu 4.107 je potenciál V_1 :

$$\begin{aligned} V_1 &= \delta_{11} Q_1 + \delta_{12} Q_2 + \delta_{13} Q_3 + \delta_{1z} [-\delta_{zz}^{-1} (\delta_{z1} Q_1 + \delta_{z2} Q_2 + \delta_{z3} Q_3)] \\ &= \delta_{11} Q_1 + \delta_{12} Q_2 + \delta_{13} Q_3 - \frac{\delta_{1z}}{\delta_{zz}} (\delta_{z1} Q_1 + \delta_{z2} Q_2 + \delta_{z3} Q_3) \\ &= \delta_{11} Q_1 + \delta_{12} Q_2 + \delta_{13} Q_3 - \frac{\delta_{1z}^2}{\delta_{zz}} Q_1 - \frac{\delta_{1z} \delta_{z2}}{\delta_{zz}} Q_2 - \frac{\delta_{1z} \delta_{z3}}{\delta_{zz}} Q_3 \\ V_1 &= \left(\delta_{11} - \frac{\delta_{1z}^2}{\delta_{zz}} \right) Q_1 + \left(\delta_{12} - \frac{\delta_{1z} \delta_{z2}}{\delta_{zz}} \right) Q_2 + \left(\delta_{13} - \frac{\delta_{1z} \delta_{z3}}{\delta_{zz}} \right) Q_3 \end{aligned} \quad (4.108)$$

Stejným způsobem lze odvodit i další dva potenciály V_2 a V_3 :

$$V_2 = \left(\delta_{21} - \frac{\delta_{2z} \delta_{z1}}{\delta_{zz}} \right) Q_1 + \left(\delta_{22} - \frac{\delta_{2z}^2}{\delta_{zz}} \right) Q_2 + \left(\delta_{23} - \frac{\delta_{2z} \delta_{z3}}{\delta_{zz}} \right) Q_3 \quad (4.109)$$

$$V_3 = \left(\delta_{31} - \frac{\delta_{3z} \delta_{z1}}{\delta_{zz}} \right) Q_1 + \left(\delta_{32} - \frac{\delta_{3z} \delta_{z2}}{\delta_{zz}} \right) Q_2 + \left(\delta_{33} - \frac{\delta_{3z}^2}{\delta_{zz}} \right) Q_3 \quad (4.110)$$

kde $\frac{\delta_{1z}^2}{\delta_{zz}} = \delta_{r1}$, $\frac{\delta_{2z}^2}{\delta_{zz}} = \delta_{r2}$, $\frac{\delta_{3z}^2}{\delta_{zz}} = \delta_{r3}$ – vlastní redukční součinitele zemnicího lana, $\frac{\delta_{1z} \delta_{z2}}{\delta_{zz}} = \frac{\delta_{2z} \delta_{z1}}{\delta_{zz}} = \delta_{r12}$, $\frac{\delta_{1z} \delta_{z3}}{\delta_{zz}} = \frac{\delta_{3z} \delta_{z1}}{\delta_{zz}} = \delta_{r13}$, $\frac{\delta_{2z} \delta_{z3}}{\delta_{zz}} = \frac{\delta_{3z} \delta_{z2}}{\delta_{zz}} = \delta_{r23}$ – vzájemné redukční součinitele zemnicího lana.

Upravené rovnice:

$$V_1 = \delta_{m11} Q_1 + \delta_{m12} Q_2 + \delta_{m13} Q_3 \quad (4.111)$$

$$V_2 = \delta_{m21}Q_1 + \delta_{m22}Q_2 + \delta_{m23}Q_3 \quad (4.112)$$

$$V_3 = \delta_{m31}Q_1 + \delta_{m32}Q_2 + \delta_{m33}Q_3 \quad (4.113)$$

Přepsání do maticové formy:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{m11} & \delta_{m12} & \delta_{m13} \\ \delta_{m21} & \delta_{m22} & \delta_{m23} \\ \delta_{m31} & \delta_{m32} & \delta_{m33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}$$

kde $\delta_{m11} = \delta_{11} - \delta_{r1}$, $\delta_{m22} = \delta_{22} - \delta_{r2}$, $\delta_{m33} = \delta_{33} - \delta_{r3}$ – modifikované vlastní potenciální součinitele s respektováním vlivu zemnicího lana, $\delta_{m12} = \delta_{m21} = \delta_{12} - \delta_{r12}$, $\delta_{m23} = \delta_{m32} = \delta_{23} - \delta_{r23}$, $\delta_{m31} = \delta_{m13} = \delta_{13} - \delta_{r13}$ – modifikované vzájemné potenciální součinitele s respektováním vlivu zemnicího lana.

Výpočet dílčích kapacit je pak analogický postupu výpočtu pro vedení bez uvažování vlivu zemnicího lana jen s tím rozdílem, že se uvažují modifikované součinitele δ_{mii} a δ_{mij} . Dílčí kapacity proti zemi:

$$c_{01} = D_m^{-1}(\delta_{m22}\delta_{m33} - \delta_{m23}^2 - \delta_{m12}\delta_{m33} + \delta_{m13}\delta_{m23} + \delta_{m12}\delta_{m23} - \delta_{m13}\delta_{m22}) \quad (4.114)$$

$$c_{02} = D_m^{-1}(-\delta_{m12}\delta_{m33} + \delta_{m13}\delta_{m23} + \delta_{m11}\delta_{m33} - \delta_{m13}^2 - \delta_{m11}\delta_{m23} + \delta_{m12}\delta_{m13}) \quad (4.115)$$

$$c_{03} = D_m^{-1}(\delta_{m12}\delta_{m23} - \delta_{m22}\delta_{m13} - \delta_{m11}\delta_{m23} + \delta_{m12}\delta_{m13} + \delta_{m11}\delta_{m22} - \delta_{m12}^2) \quad (4.116)$$

Dílčí kapacity mezi vodiči

$$c_{12} = D_m^{-1}(\delta_{m12}\delta_{m33} - \delta_{m13}\delta_{m23}) \quad (4.117)$$

$$c_{23} = D_m^{-1}(\delta_{m11}\delta_{m23} - \delta_{m12}\delta_{m13}) \quad (4.118)$$

$$c_{31} = D_m^{-1}(-\delta_{m12}\delta_{m23} + \delta_{m22}\delta_{m13}) \quad (4.119)$$

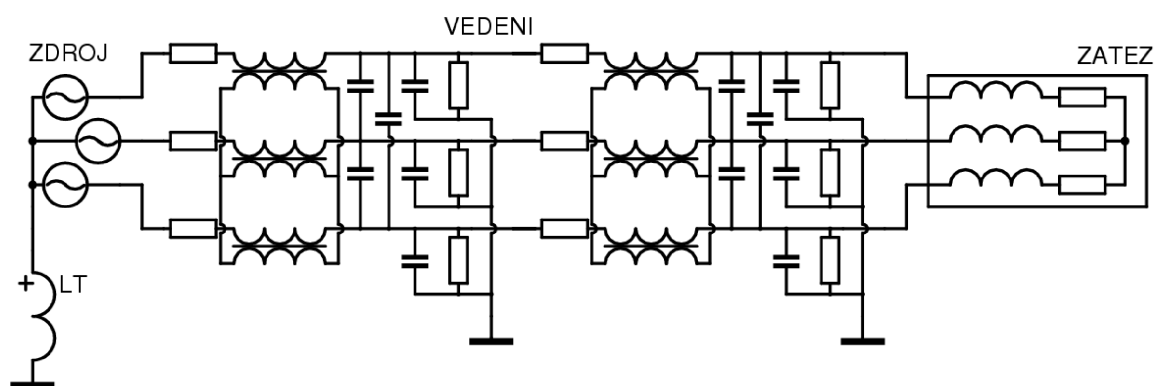
kde D – determinant matice modifikovaných potenciálních součinitelů.

$$D_m = \delta_{m11}\delta_{m22}\delta_{m33} + 2\delta_{m12}\delta_{m13}\delta_{m23} - \delta_{m13}^2\delta_{m22} - \delta_{m23}^2\delta_{m11} - \delta_{m12}^2\delta_{m33} \quad (4.120)$$

5

Model venkovního vedení v programu Dynast

Sestavený model odpovídá trojfázovému netransponovanému vedení s nepřímo uzemněným uzlem přes pevnou tlumivku a izolovanou zátěží spojenou do hvězdy. Abych mohl posoudit vliv zemnicího lana a symetrie zátěže na aktivní parametry, musel jsem sestavit několik modelů s rozdílnými parametry jednotlivých prvků. Samotná struktura modelu se však zůstává zachována.



Obr. 5.1: Model (diagram) venkovního vedení s nepřímo uzemněným uzlem.

5.1 Parametry vedení

Vyšetřované vedení vn 22 kV je umístěno na jednodřívovém příhradovém stožáru s vodiči typu AlFe 6 3 × 120 mm² uspořádanými obecným trojúhelníku. Na vedení není provedena transpozice a v úvahu nejsou brány ani další zjednodušující předpoklady. Základní specifikace vedení, parametry fázových vodičů a zátěže jsou uvedeny v příloze B.1.

6

Analýza provozních stavů venkovních vedení

6.1 Vedení v ustáleném stavu se symetrickou zátěží

Ustálený stav je stav vedení před poruchou (původní ustálený stav) nebo stav po odeznění přechodného děje způsobeného touto poruchou (nový ustálený stav).

Souměrnou (symetrickou) zátěž tvoří trojfázový spotřebič se stejným odběrem ve všech fázích. Při symetrickém zatížení mají fázová napětí a proudy v ideálním případě stejné amplitudy a stejný fázový posun $\pm 120^\circ$. V symetrické soustavě platí:

$$u_U(t) + u_V(t) + u_W(t) = 0 \quad (6.1)$$

A také:

$$\bar{U}_U + \bar{U}_V + \bar{U}_W = 0 \quad (6.2)$$

„Soustava s nulovým součtem napětí je vyvážená. Analogické vztahy lze napsat i pro okamžité hodnoty proudů, resp. pro jejich fázory.“ [4, str. 81]

	(a) Vedení			(b) Zátěž			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
U_{BZL} [kV]	18,300	17,756	16,830	U_{BZL} [kV]	16,734	16,739	16,735
U_{ZL} [kV]	18,605	16,975	17,505	U_{ZL} [kV]	16,735	16,739	16,739
ΔU [kV]	-0,305	0,781	-0,675	ΔU [kV]	-0,001	0	-0,004

Tab. 6.1: Srovnání amplitud fázových napětí při symetrickém zatížení.

Z průběhů přiložených v příloze C.1 a tabulky 6.1 je patrné, že ani při symetrickém zatížení nejsou amplitudy napětí na fázových vodičích vedení stejné. Rozdíl je dán odlišnými pasivními parametry jednotlivých vodičů. Naopak amplitudy napětí na zátěži jsou již téměř shodné. Z tabulky 6.1 také vyplývá, že zemnicí lano způsobuje určité *výkyvy* napětí, které jsou závislé na poloze fázových vodičů vůči zemnicímu lanu.

6.2 Vedení v ustáleném stavu s nesymetrickou zátěží

Nesouměrnou zátěž tvoří typicky jednofázové spotřebiče, s různě velkým odběrem, připojené na trojfázovou síť. Napětí a proudy mají při nesouměrném (nesymetrickém) zatížení různé amplitudy, libovolný fázový posun a nulovým vodičem, je-li vyveden, teče vyrovnávací proud. Soustava s nesouměrným zatížením není vyvážená. Nesymetrie zvyšuje ztráty v síti, snižuje výkon a přenosovou schopnost soustavy. Platí:

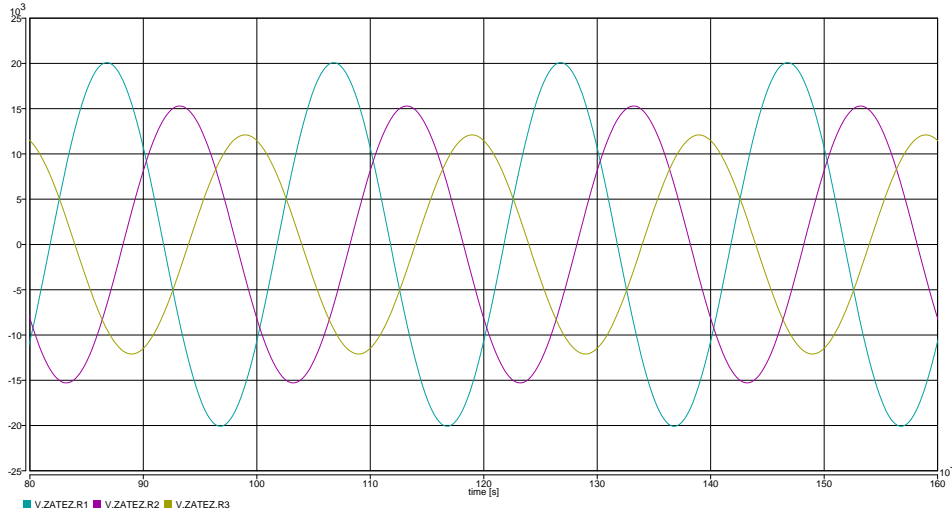
$$u_U(t) + u_V(t) + u_W(t) \neq 0 \quad (6.3)$$

A také:

$$\bar{U}_U + \bar{U}_V + \bar{U}_W \neq 0 \quad (6.4)$$

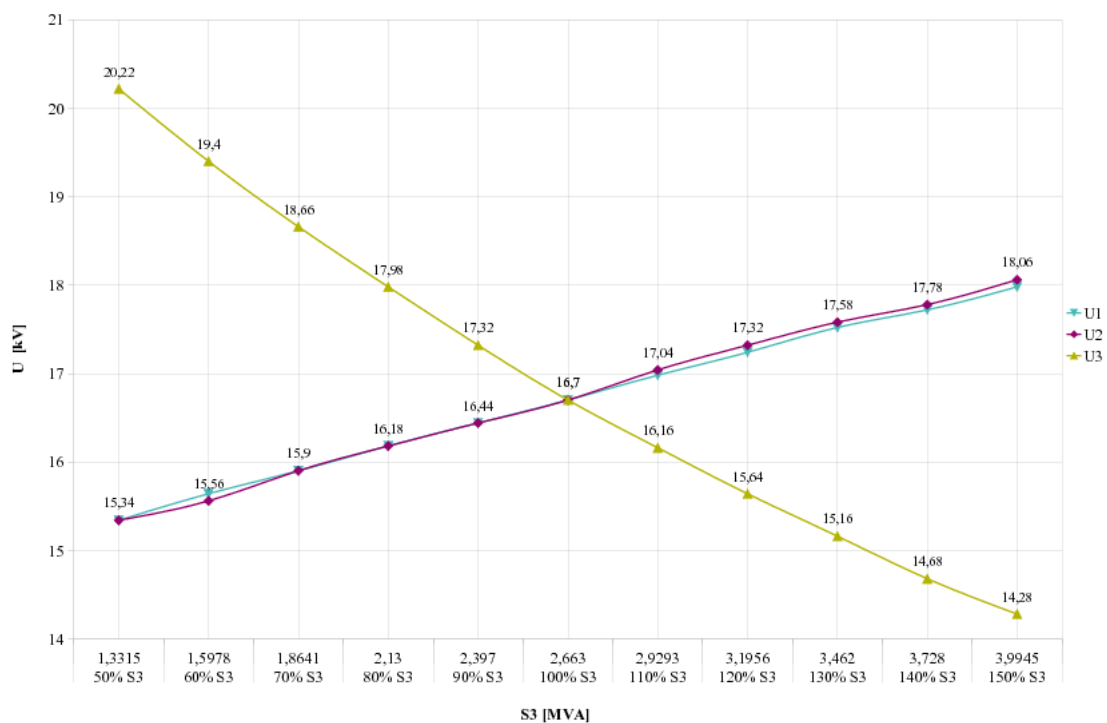
	(a) Vedení			(b) Zátěž			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
U_{BZL} [kV]	18,238	17,920	16,934	U_{BZL} [kV]	20,100	15,300	12,080
U_{ZL} [kV]	18,650	16,940	17,375	U_{ZL} [kV]	20,100	15,280	12,060
ΔU [kV]	-0,267	0,980	-0,441	ΔU [kV]	0	0,02	0,02

Tab. 6.2: Srovnání amplitud fázových napětí při nesymetrickém zatížení.

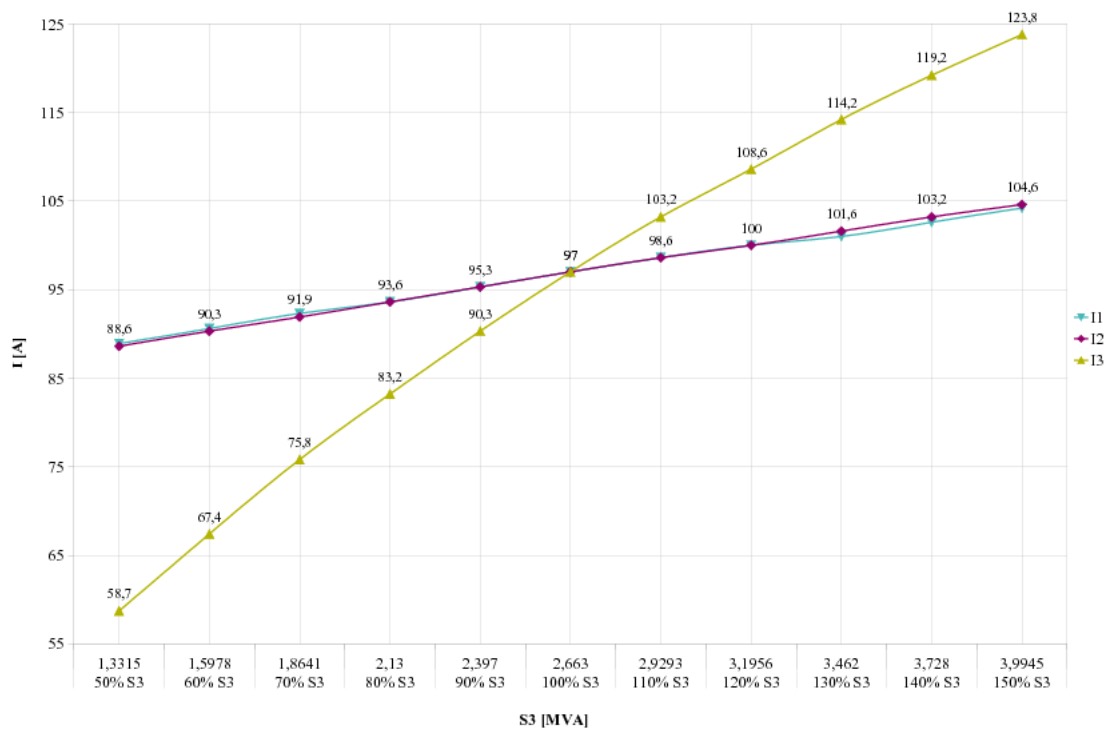


Obr. 6.1: Průběh napětí na zvolené (pevné) nesymetrické zátěži.

Průběhy napětí a proudů na proměnné nesymetrické zátěži jsou znázorněny na obrázcích 6.2 a 6.3. Zátěž představují dva jednofázové spotřebiče konstantním odběrem, tj. platí $S_1 = S_2 = konst.$, a jeden spotřebič s proměnným zdánlivým výkonem S_3 (obr. 6.2), nebo proměnným účinníkem $\cos \varphi$ (obr. 6.3).

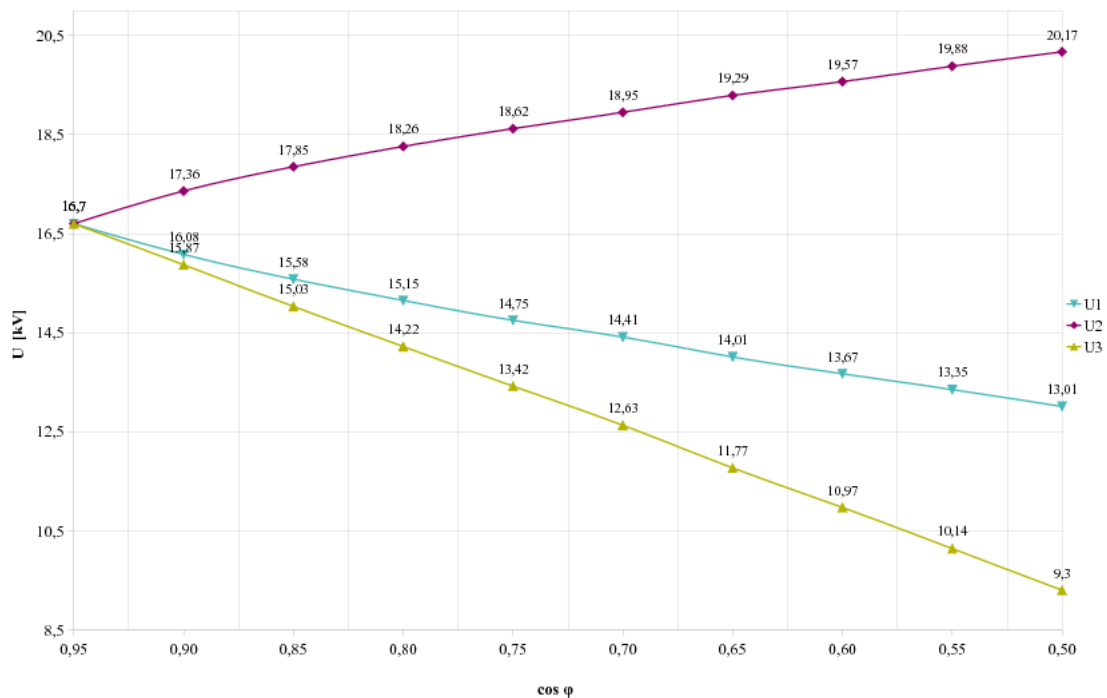


(a) Napětí

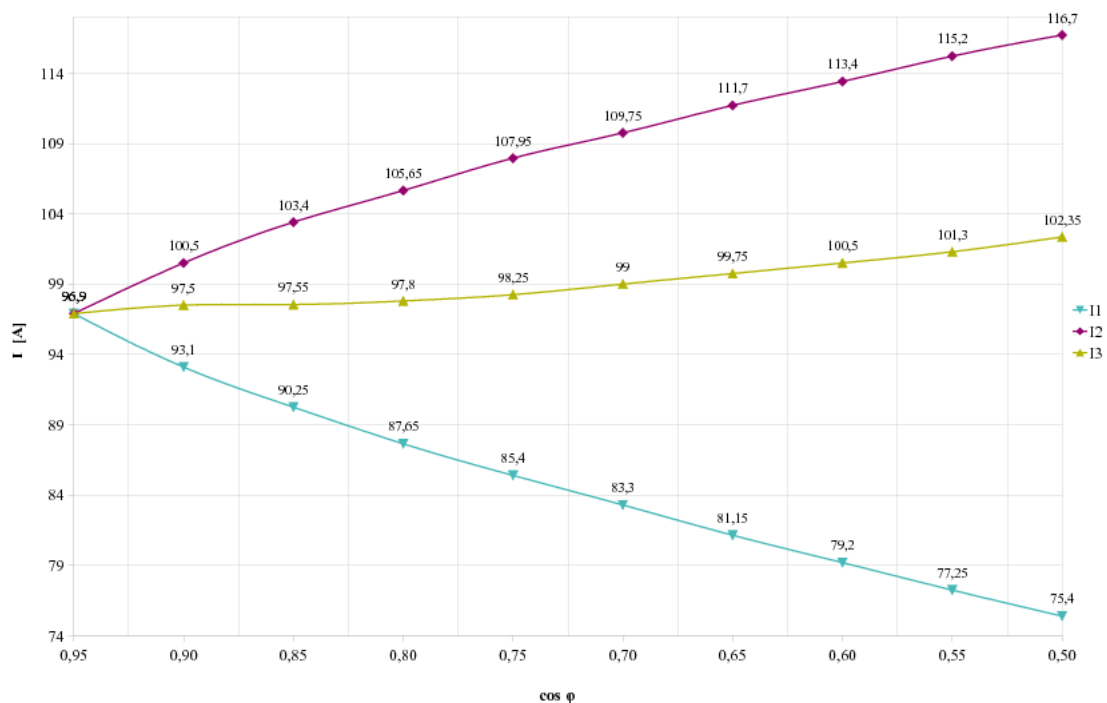


(b) Proudý

Obr. 6.2: Průběhy veličin na nesymetrické zátěži v závislosti na změně zatížení třetí fáze.



(a) Napětí



(b) Proudý

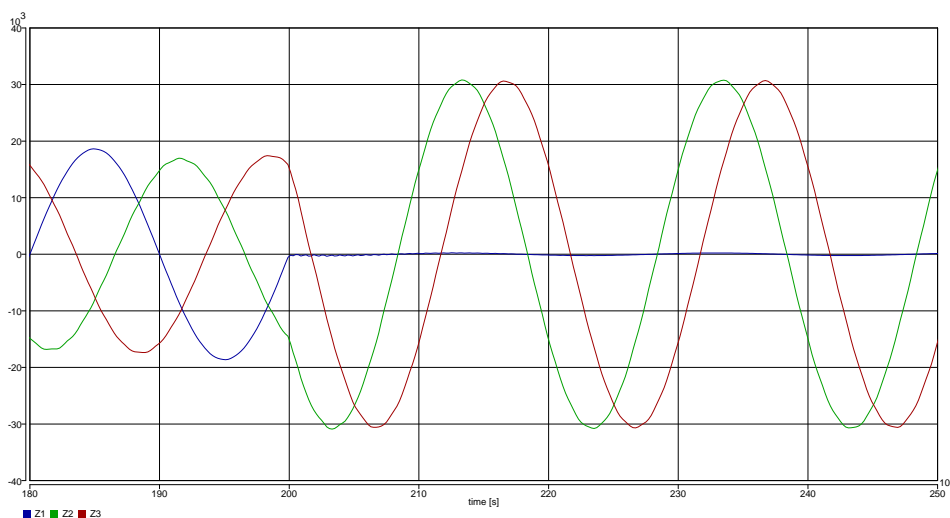
Obr. 6.3: Průběhy veličin na nesymetrické zátěži v závislosti na změně účinníku $\cos \varphi$ třetí fáze.

6.3 Vedení v přechodném stavu

„Přechodný děj nastává v elektrickém obvodu při změně jeho topologické nebo fyzikální struktury; tedy při připojení, zkratování nebo rozpojení větve nebo části obvodu, případně při připojení či odpojení zdroje nebo zátěže.“ [4, str. 81] Na venkovních vedeních dochází k těmto topologickým změnám většinou vinou poruchy. V sítích s nepřímo uzemněným uzlem, popř. s uzlem izolovaným, je změna způsobena buď jednofázovým zemním spojením nebo mezifázovým zkratem (dvoufázovým zemním spojením).

6.3.1 Jednofázové zemní spojení

Vznik a účinky jednofázového zemního spojení jsou detailně popsány v kapitolách 2.3.3.2 a 2.3.3.3, kde jsou vysvětleny i průběhy napětí na obrázku 6.4. V tomto konkrétním případě nastane zemní spojení v čase $t = 0,02$ s. Napětí na postižené fázi podstatně klesne a napětí na nepostižených fázích významně vzrostou. Zároveň vzroste i napětí na tlumivce z původního $U_{TL} = 1,07$ kV na $U_{TL} = 17,77$ kV a proud z $I_{TL} = 48,1$ mA na $I_{TL} = -1639,4$ mA. Jednofázové zemní spojení nemá vliv na napětí na zátěži.



Obr. 6.4: Průběhy napětí na vedení při jednofázovém zemním spojení. V čase $t \geq 0,2$ s jsou velikosti napětí: $U_1 = 0,26$ kV, $U_2 = 30,83$ kV, $U_3 = 30,61$ kV.

6.3.2 Vícefázové zemní spojení

Vícefázové zemní spojení představuje pro vedení v podstatě mezifázový zkrat. I v tomto případě nastalo zemní spojení v čase $t = 0,02$ s. Z průběhů v příloze C.4 je patrné, že při dvoufázovém zemním spojení spojení dojde ke sjednocení amplitud napětí postižených fázích a po odeznění přechodného děje k jejich poklesu k nule, zatímco napětí nepostižené fáze opět významně vzroste. U trojfázového zemního spojení dojde ke sjednocení amplitud napětí, přechodnému jevu a poklesu všech třech napětí k nule.

7

Závěr

V první části této bakalářské práce je proveden teoretický rozbor jednotlivých druhů elektrických sítí z hlediska konstrukčního řešení a způsobu provozu uzlu transformátoru.

V další části je práce zaměřena na detailní odvození všech pasivních parametrů vedení. Při výpočtech nejsou brány v úvahu žádné zjednodušující předpoklady, vodiče jsou tedy na stožáru uspořádány v nepravidelném trojúhelníku a u vedení není provedena transpozice. Z výpočtů je patrné, že zemnicí lano má vliv na vlastní i vzájemné indukčnosti a také na vzájemné kapacity mezi vodiči a kapacity vodičů proti zemi. Vlastní i vzájemné indukčnosti vodičů klesnou vlivem zemnicího lana zhruba o $0,5 \text{ mHkm}^{-1}$, přičemž záleží na poloze vodiče vůči zemnicímu lanu. Asi o $0,5 \text{ nFkm}^{-1}$ klesnou také vzájemné kapacity mezi vodiči. Podle teoretických předpokladů by mělo zemnicí lano zvýšit kapacity vodičů proti zemi. Z výpočtů vyplývá, že tyto kapacity vzrostou o zhruba $0,5 \div 2,2 \text{ nFkm}^{-1}$ a to pouze na vodičích 2 a 3, které jsou blíže zemnicímu lanu. Na vodiči 1 kapacita proti zemi dokonce klesne o $1,6 \text{ nFkm}^{-1}$.

Praktická část práce se zabývá analýzou vedení v různých provozních stavech s různou zátěží. Všechny simulace odpovídají trojfázovému vedení s nepřímo uzemněným uzlem přes pevnou zhášecí tlumivku. Ze simulací provedených v ustáleném stavu na vedení se symetrickou zátěží je vidět, že má zemnicí lano vliv pouze na napětí na fázových vodičích, kde způsobuje výkyvy napětí závislé na poloze vodiče vůči zemnicímu lanu. Na zátěži jsou pak napětí téměř ideálně symetrická, zemnicí lano na ně nemá v podstatě žádný vliv. Zároveň se měřením potvrdilo, že i v tomto stavu je na tlumivce napětí $U_{TL} = 1,07 \text{ kV}$ a také jí protéká proud $I_{TL} = 48,13 \text{ mA}$.

Nejvíce simulací bylo provedeno na vedení zatíženém nesymetrickou zátěží. První simulace odpovídá nesymetrické zátěži s různými, ale konstantními, odběry. V tomto případě jsou napětí na fázových vodičích srovnatelná s předchozím měřením. Napětí na zátěži však mají různé amplitudy závislé na velikosti odebíraného zdánlivého výkonu S . I v tomto případě má zemnicí lano na napětí na zátěži zanedbatelný vliv. Při nesouměrném zatížení je na tlumivce napětí $U_{TL} = 1,07 \text{ kV}$ a protéká jí proud $I_{TL} = 48,24 \text{ mA}$. Nesymetrie na zátěži může vzniknout také náhlou změnou zatížení na jedné fázi. Tento stav je znázorněn na grafech 6.2 a 6.3.

Graf 6.2 zobrazuje závislost napětí a proudů na změně odebíraného zdánlivého výkonu ve fázi 3. Graf 6.3 znázorňuje závislost těchto napětí a proudů na změně účinníku ve fázi 3.

Pozornost byla také věnována určení vlastností vedení v přechodných stavech. Nejčastější poruchou v sítích vn s izolovaným uzlem je jednofázové zemní spojení. Měřením bylo ověřeno, že tato porucha však nemá prakticky vliv na velikost napětí na zátěži. Všechny průběhy jsou proto téměř shodné, rozdíly jsou maximálně v jednotkách voltů. Při jednofázovém zemním spojení se uplatňuje kompenzační tlumivka, na které je napětí $U_{TL} = 17,77 \text{ kV}$. Na napětí na zátěži mají vliv až několikanásobná zemní spojení (dvoufázové, třífázové), které mají na vedení stejné účinky jako mezifázové bezodporové zkraty (viz. C.5, C.6).

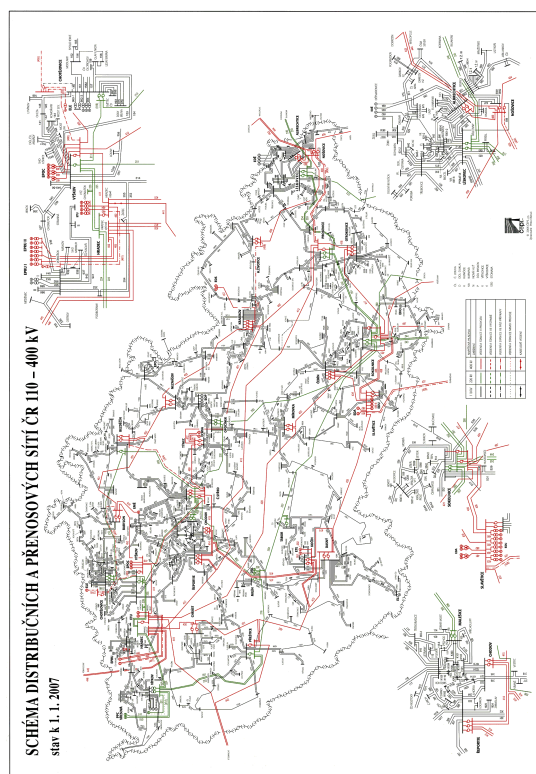
Literatura

- [1] 3M Česko, s.r.o. *ACCR lana řeší energetické přetížení sítí*. [online]. Praha: 3M Česko, s.r.o., 2011. [cit. 29. 5. 2012]. Dostupné z: <http://www.etmslovensko.sk/index.php/rubriky/energetika/605-accr-lana-resi-energeticke-pretizeni-siti>
- [2] AFL *OPGW* [online]. Duncan: AFL. [cit. 29. 5. 2012]. Dostupné z: <http://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/OPGW.aspx>
- [3] ČEPS, a.s. *Přenosová soustava*. [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2011. [cit. 10. 10. 2011]. Dostupné z: <http://ceps.cz/>
- [4] BENEŠOVÁ, Zdeňka, LEDVINOVÁ, Marcela. *Základy elektrických obvodů v příkladech*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-640-0
- [5] ENSTO CZECH, s.r.o. *Příslušenství izolovaných a holých vedení vn. Jednoduché izolované vodiče*. [online]. Praha: ENSTO CZECH, s.r.o., 2007. [cit. 13. 5. 2012]. Dostupné z: <http://www.ensto.com/download/>
- [6] HODINKA, Miroslav, FECKO, Štefan, NĚMEČEK, František. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00065-3
- [7] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1980.
- [8] KERSTING, William H. *Distribution System Modeling and Analysis*. 2. vydání. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 0-8493-5806-X
- [9] Laboratorní cvičení z techniky vysokého napětí. *Úloha č. 14: Ochrana venkovního vedení zemnicím lanem*. [online] Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. [Cit. 25. 4. 2012]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/laurenc/tvn.php>
- [10] MATĚNA, Štěpán. *Výroba a rozvod elektrické energie II*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1975.
- [11] MERTLOVÁ, Jiřina, NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7

- [12] TESAŘOVÁ, Miloslava, ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová energetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-703-3
- [13] TŘETÍ PÓL *Zpověď zloděje*. [online]. Praha: TŘETÍ PÓL, 2004. [cit. 1. 6. 2012]. Dostupné z: 3pol.cz/download/15/TP8.pdf

Příloha A

Elektrické sítě distribuční soustavy

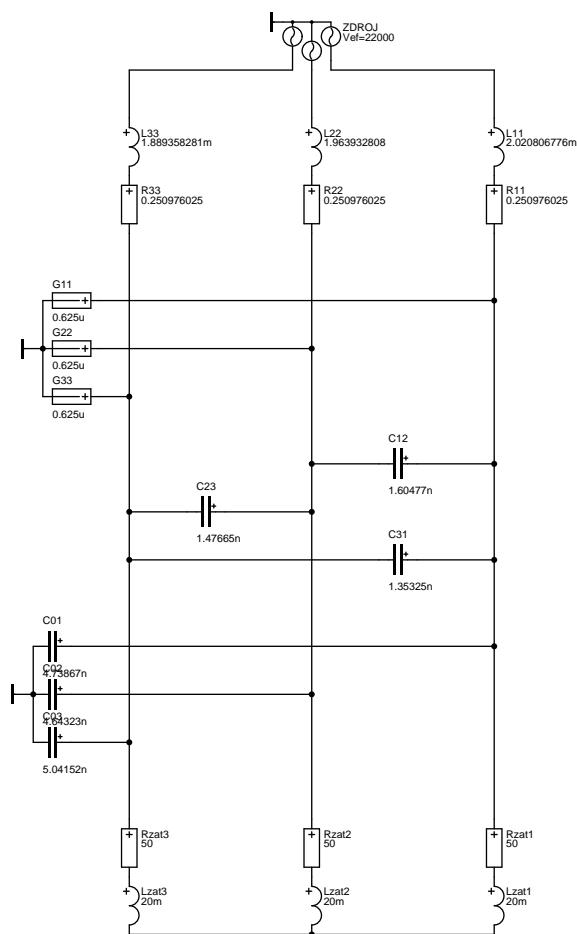


Obr. A.1: Schéma distribuční a přenosové soustavy České republiky.

Příloha B

Model a parametry vedení

B.1 Model (diagram) vedení



Obr. B.1: Model jedné části trojfázového vedení.

(a) Specifikace podmínek vyšetřovaného vedení.

U_N [kV]	Délka [km]	Teplota okolí ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Izolační odpor R_i [Ω/km]
22	10	50	1600

(b) Zvolené parametry symetrické zátěže.

S_{\max} [MVA]	P_{3f} [MW]	P_{1f} [MW]	Q_{3f} [MVA]	Q_{1f} [MVA]	$\cos \varphi$
8	7,6	2,53	2,48	0,83	0,95

(c) Zvolené parametry nesymetrické zátěže.

	Fáze 1 (U)	Fáze 2 (V)	Fáze 3 (W)
P [MW]	2,34	1,26	4,0
Q [MVA]	0,83	1,12	0,48

(d) Konstrukce a vlastnosti lan AlFe 6 120 mm² dle ČSN 02 4210.

S_{jmen} [mm ²]	S_{mat} [mm ²]	d [mm]	Poměr Al:Fe	R_{\max} [Ωkm^{-1}]
120	149,62	16	5,8	0,225

Tab. B.1: Základní parametry všech částí venkovního vedení.

B.2 Pasivní parametry vyšetřovaného vedení

R_{ss} [Ω]	R_{st} [Ω]	G [μS]
2,248	2,509	6,25

Tab. B.2: Činný stejnosměrný a střídavý odpor fázových vodičů a svod.

(a) Vlastní indukčnosti.

	L_{11} [mH]	L_{22} [mH]	L_{33} [mH]
Se zemnicím lanem	20,2080	19,6393	18,8935
Bez zemnicího lana	24,1619	24,1619	24,1619

(b) Vzájemné indukčnosti

	L_{12} [mH]	L_{23} [mH]	L_{31} [mH]
Se zemnicím lanem	7,9681	7,2592	7,3443
Bez zemnicího lana	12,2064	12,1513	11,9303

Tab. B.3: Vlastní a vzájemné indukčnosti vyšetřovaného trojfázového vedení.

(a) Kapacity proti zemi.

	C_{01} [nF]	C_{02} [nF]	C_{03} [nF]
Se zemnicím lanem	47,3867	46,4323	50,4152
Bez zemnicího lana	48,9949	45,9722	48,2022

(b) Kapacity vzájemné.

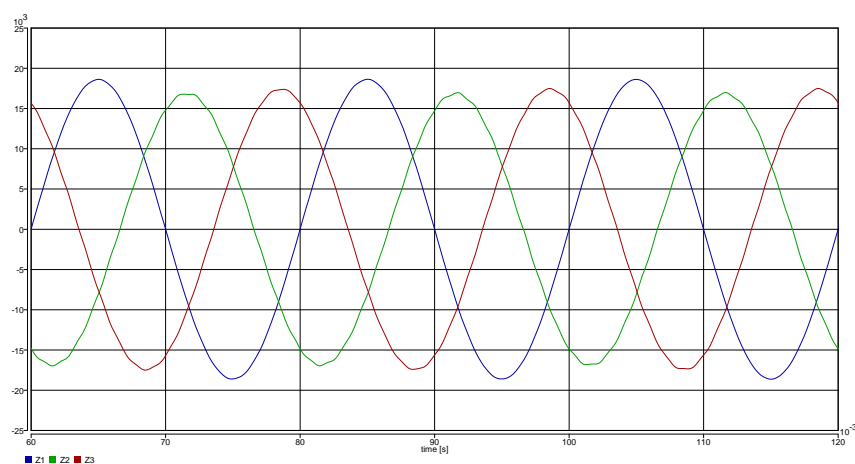
	C_{12} [nF]	C_{23} [nF]	C_{31} [nF]
Se zemnicím lanem	16,0477	14,7665	13,5325
Bez zemnicího lana	19,3709	19,3089	17,0494

Tab. B.4: Vlastní a vzájemné kapacity vyšetřovaného trojfázového vedení.

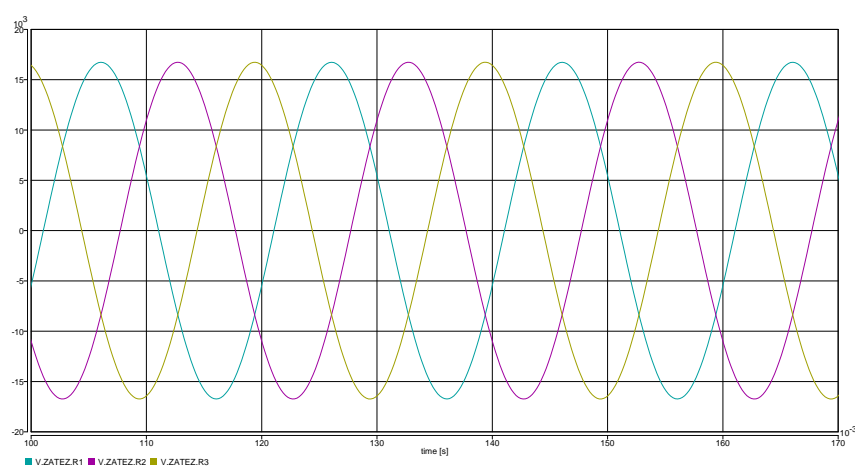
Příloha C

Analýza vedení

C.1 Vedení se symetrickou zátěží



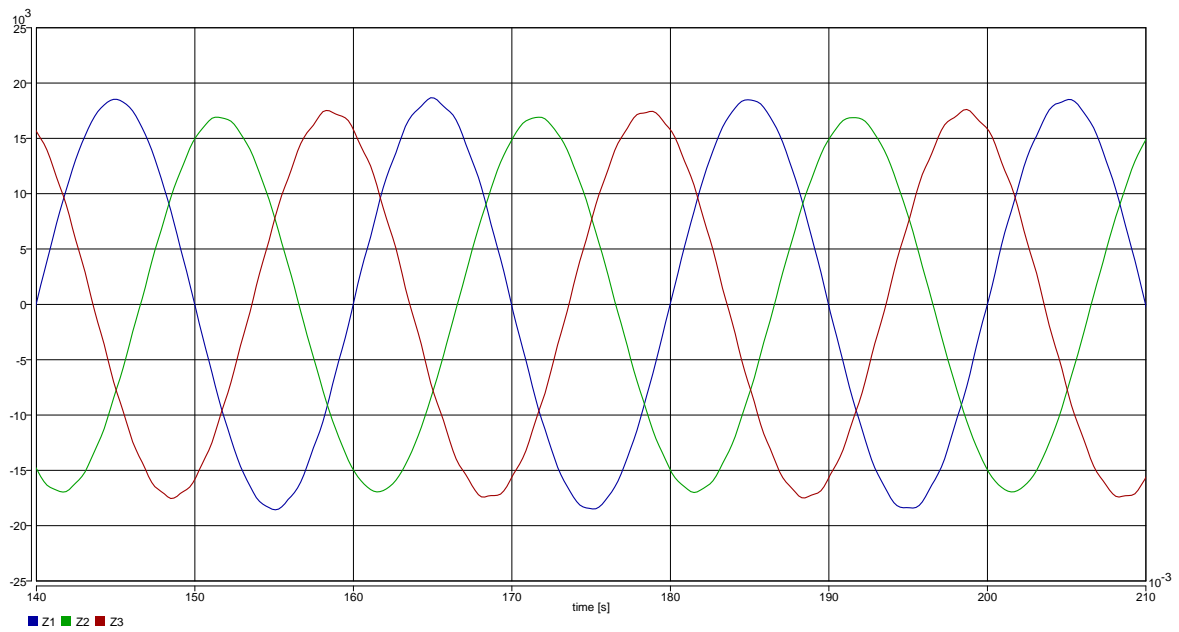
(a) Vedení



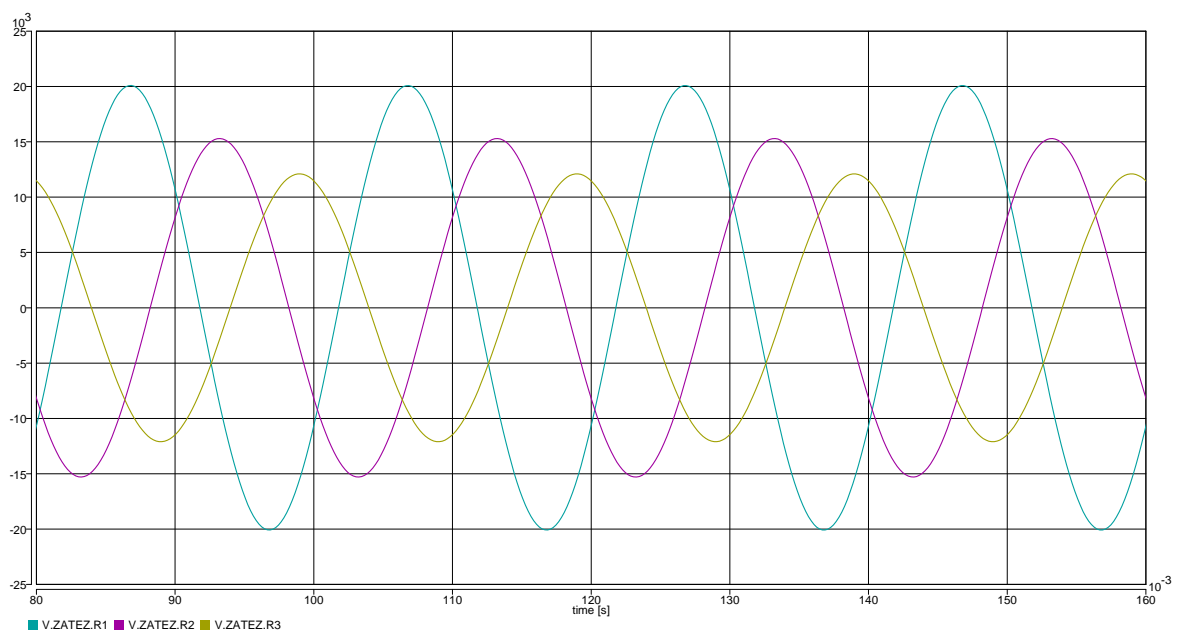
(b) Zátěž

Obr. C.1: Průběhy napětí na vedení se symetrickou zátěží a zemnicím lanem.

C.2 Vedení s nesymetrickou zátěží



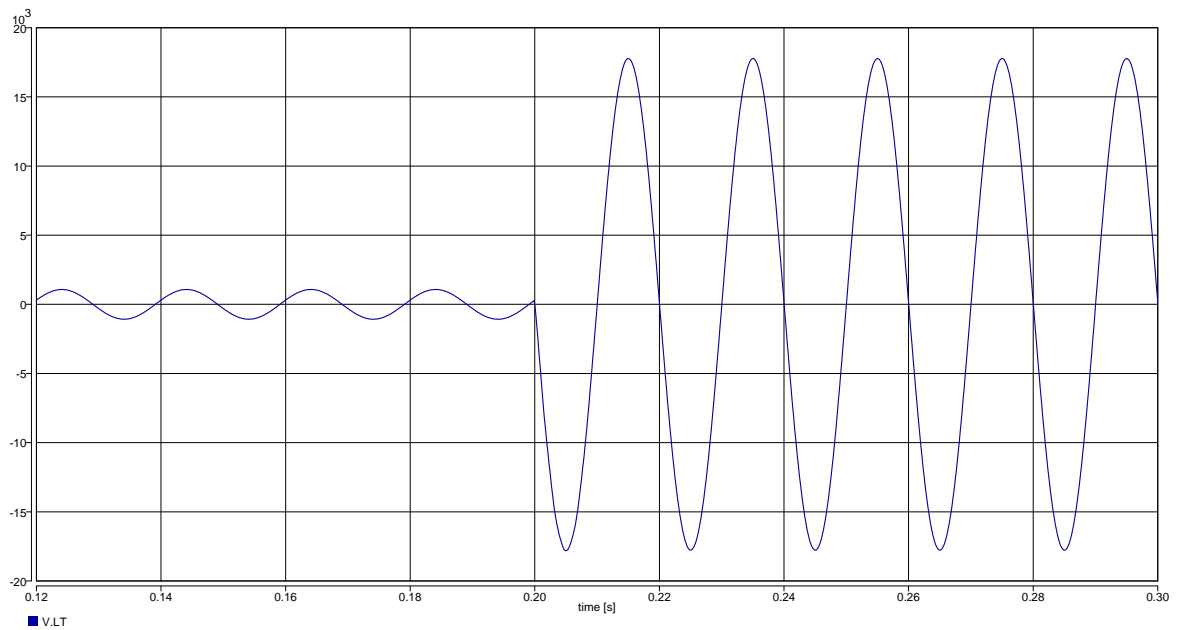
(a) Vedení



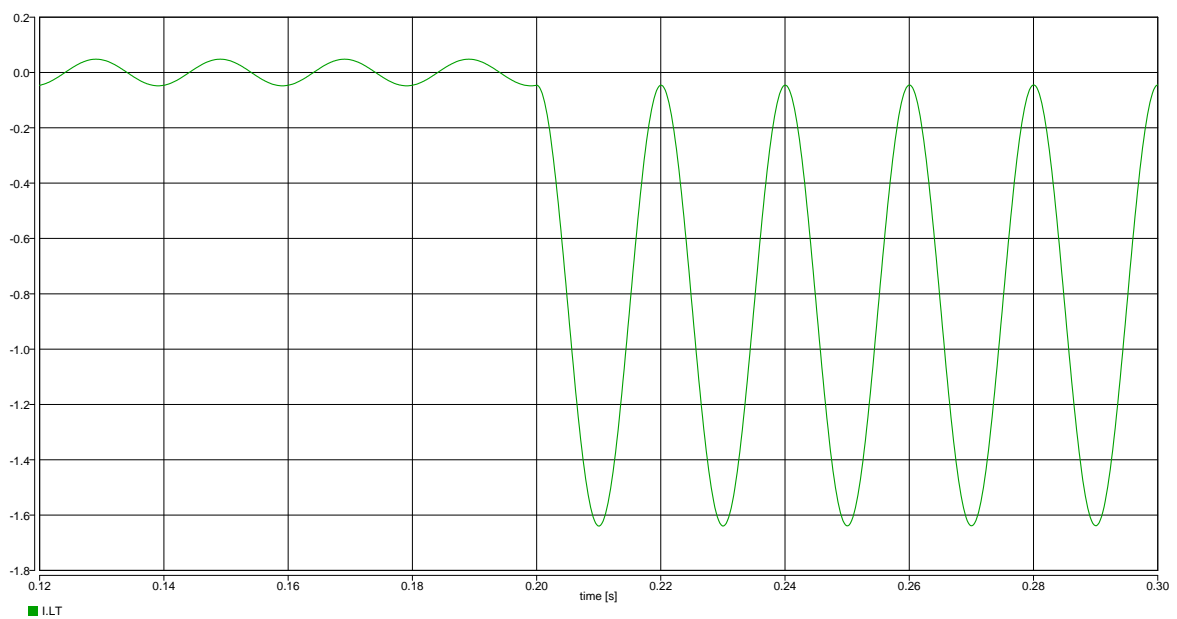
(b) Zátěž

Obr. C.2: Průběhy napětí na vedení s nesymetrickou zátěží a zemnicím lanem.

C.3 Jednofázové zemní spojení



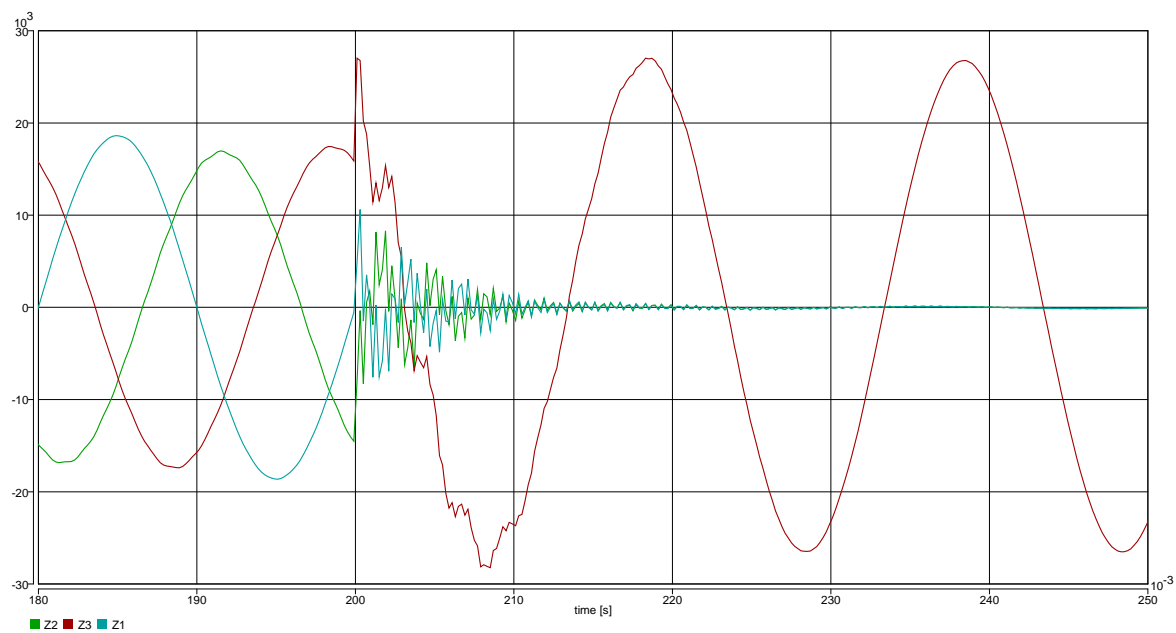
(a) Napětí



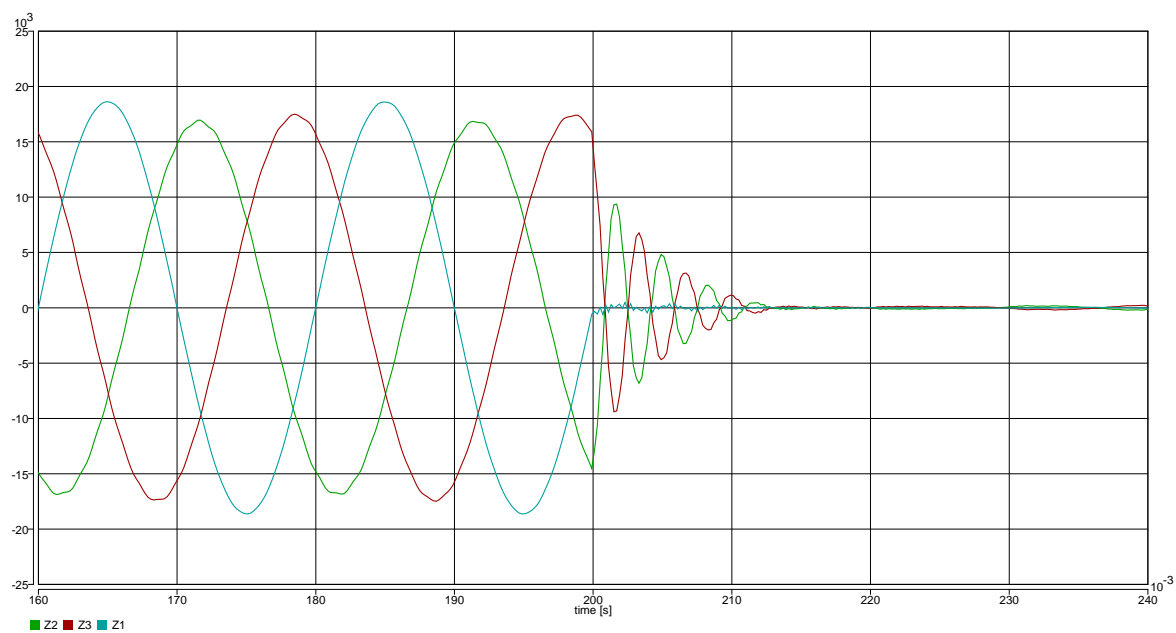
(b) Proud

Obr. C.3: Průběh napětí a proud na tlumivce v bezporuchovém a poruchovém stavu.

C.4 Vícefázové zemní spojení

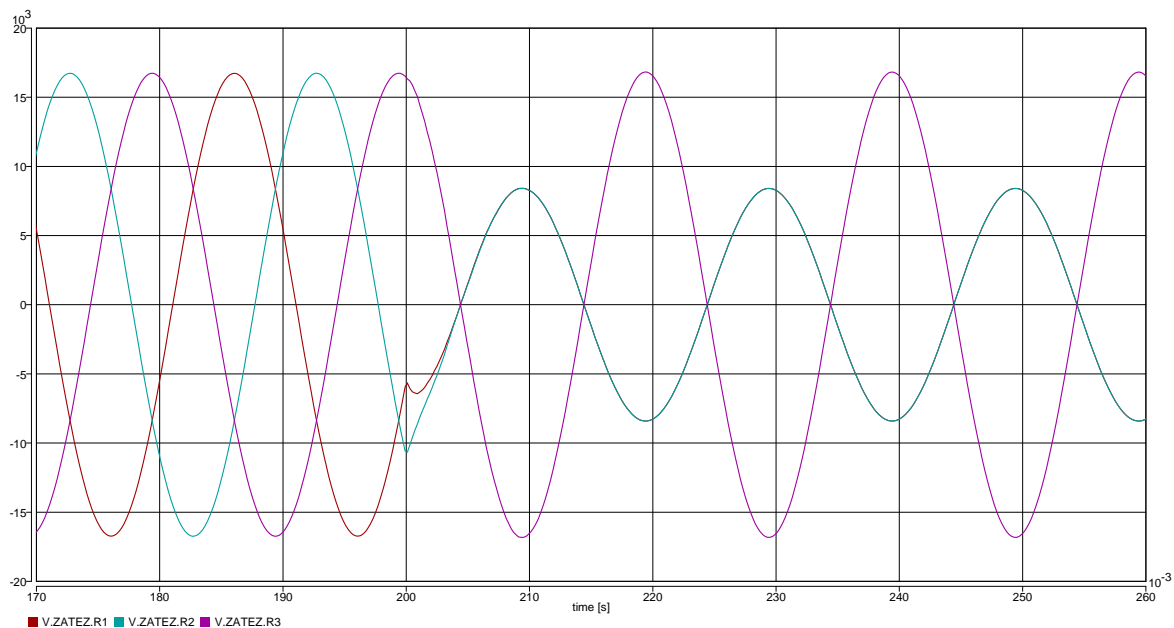


(a) Průběh napětí na zátěži při dvoufázovém zemním spojení

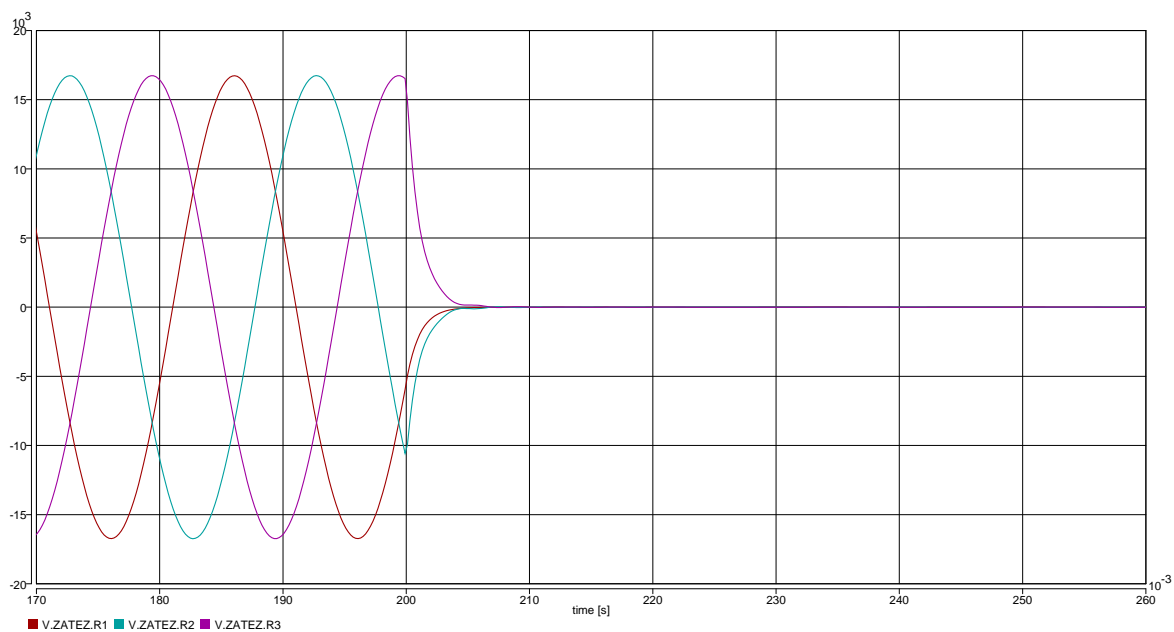


(b) Průběh napětí na zátěži při trojfázovém zemním spojení

Obr. C.4: Průběhy napětí na vedení při bez odporovém vícefázovém zemním spojení.



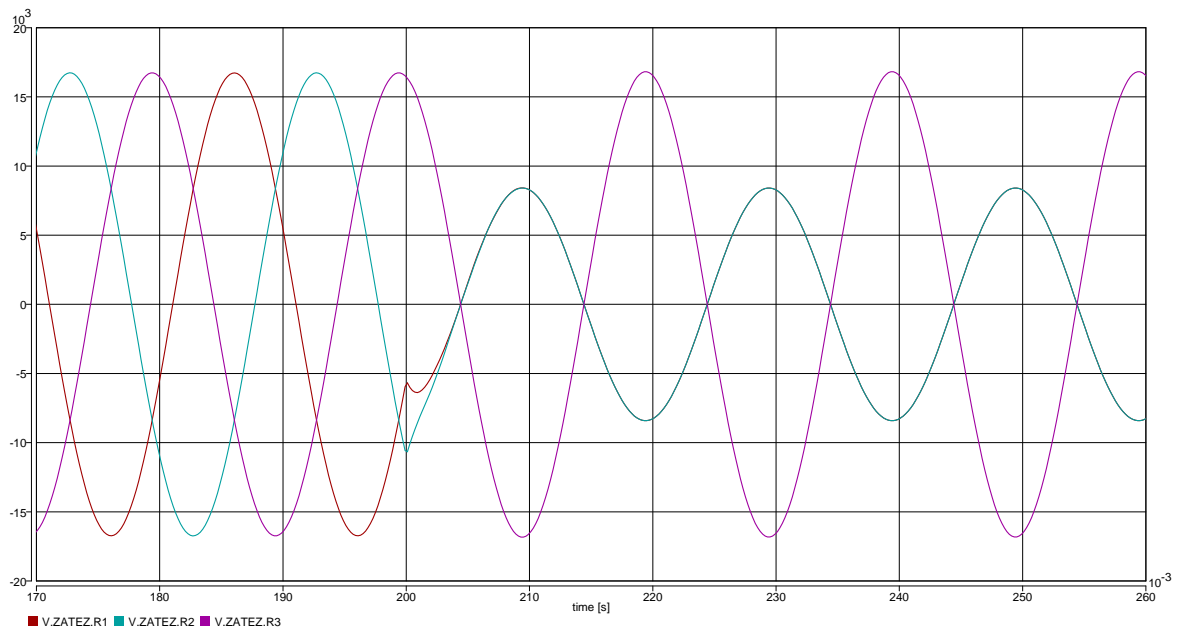
(a) Průběh napětí na zátěži při dvoufázovém zemním spojení



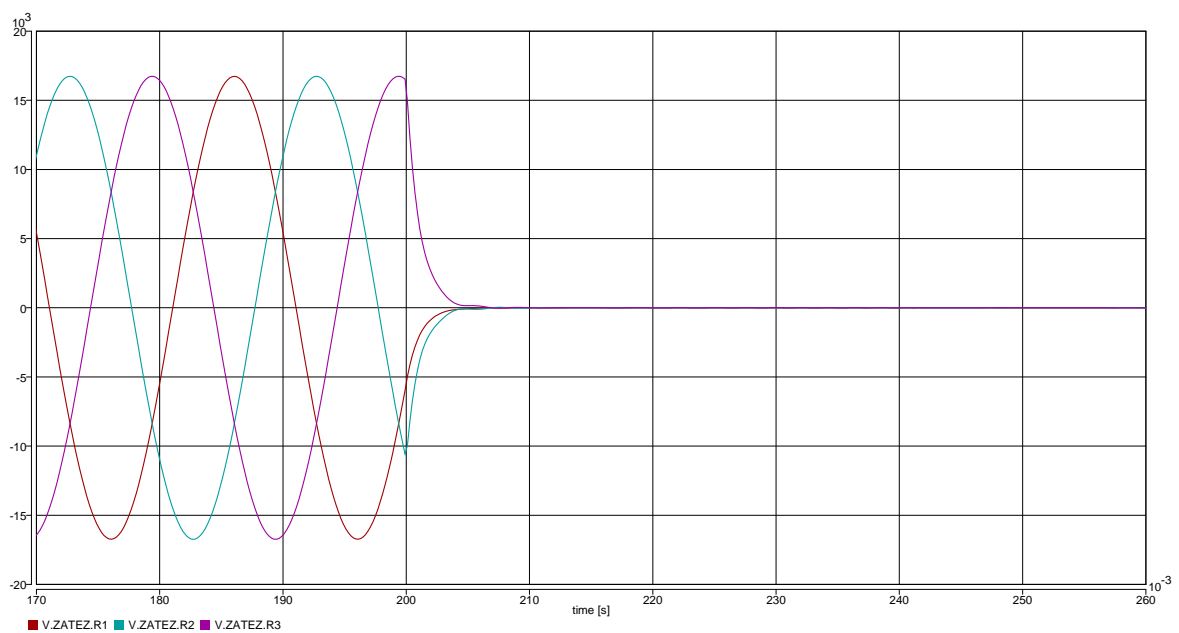
(b) Průběh napětí na zátěži při trojfázovém zemním spojení

Obr. C.5: Průběhy napětí na zátěži při bez odporovém vícefázovém zemním spojení.

C.5 Mezifázové zkraty



(a) Průběh napětí při zkratu mezi dvěma fázemi



(b) Průběh napětí při zkratu mezi třemi fázemi

Obr. C.6: Průběhy napětí na zátěži při bez odporovém mezifázovém zkratu.