

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Napět'ové a proudové poměry na venkovním vedení pro
různé harmonické**

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan BŮŽEK**
Osobní číslo: **E10N0100P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Napěťové a proudové poměry na venkovním vedení pro různé harmonické**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Navrhněte a realizujte matematický model venkovního vedení 22 kV.
2. Proveďte výpočty napěťových a proudových poměrů pro různé harmonické.
3. Výpočty realizujte pro různé stavy zátěže.
4. Proveďte vyhodnocení a popis dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I. : Teorie elektrických strojů, SNTL, Praha, 1968
2. Ibler, Z. a kol. : Energetika, BEN, Praha, 2002
3. Artur, R., Bergen, Vijay, V. : Power systems analysis, Upper Saddle River, New Jersey, 2000
4. William, D., Stevenson : Elements of power system analysis, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1982
5. Kolcun, M., Mühlbacher, J., Haller, H. : Mathematical analysis of electrical networks, BEN, Praha, 2004
6. Kolcun, M., Griger, V., Mühlbacher, J. : Electric power system operation control, Mercury-Smékal Publishing House, Košice, 2004

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




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

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato práce popisuje proudové a napětové poměry na venkovním vedení 22kV, při existenci vyšších harmonických složek napětí a proudů.

Klíčová slova

Venkovní vedení 22kV, pasivní parametry vedení, vyšší harmonické, Dynast.

Annotation

This thesis deals with description of current and voltage conditions on the exterior power line 22kV, which is affected with existence of higher harmonics.

Key words

Exterior power lines 22kV, passive line parameters, higher harmonics, Dynast.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a elektronických zdrojů, které jsou v této práci uvedeny.

Dále prohlašuji, že veškerý použitý software, při tvorbě této práce, je legální.

V Plzni dne 24. 2. 2012

Jan Bůžek

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. i konzultantovi Doc. Ing. Karlovi Noháčovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky, které mi pomohli k vytvoření této práce.

Obsah

Úvod	8
Seznam symbolů.....	9
1 Návrh a realizace matematického modelu venkovního vedení 22 kV.	10
1.1 Obecné předpoklady.....	10
1.1.1 Specifikace venkovního vedení 22 kV	10
1.2 Výpočet pasivních parametrů venkovního vedení 22 kV	12
1.2.1 Rezistance	12
1.2.2 Indukčnost	15
1.2.3 Kapacita	20
1.3 Náhradní schéma venkovního vedení 22kV	28
2 Výpočty napětových a proudových poměrů pro různé harmonické	29
2.1 Vyšší harmonické složky proudu či napětí	29
2.2 Výpočtové prostředí.....	32
2.3 Model sítě 22kV.....	33
2.4 Napětové a proudové poměry pro různé harmonické	37
3 Výpočty pro různé stavy zátěže.....	42
4 Zhodnocení dosažených výsledků	49
Použitá literatura.....	51
Seznam příloh	52

Úvod

Tato práce popisuje návod pro výpočet pasivních parametrů venkovního vedení na napětové úrovni 22kV, v úvahu je brána nesymetrie vedení a symetrické aktivní parametry. V další části je zhotoven model sítě, který obsahuje distribuční transformátor 110/22 kV, tři venkovní vedení různé délky a čtyři spotřebiče, z nichž jeden je modelovaný jako nelineární a vnáší nám tedy do sítě vyšší harmonické složky napětí a proudů. Následně je zkoumán provoz této imaginární sítě, hlavně pak šíření vyšších harmonických do zbytku sítě, ovlivnění ostatních prvků a to vše v prostředí systému Dynast. Ke konci práce jsou do výpočtů zahrnuty různé typy spotřebičů, aby byly předvedeny různé situace, které mohou v praxi nastat.

Text je rozdělen do čtyř částí, v nichž je postupně popsán návrh matematického modelu venkovního vedení 22kV, výpočty napětových a proudových poměrů pro různé harmonické, výpočty pro různé stavy zátěže a zhodnocení dosažených výsledků.

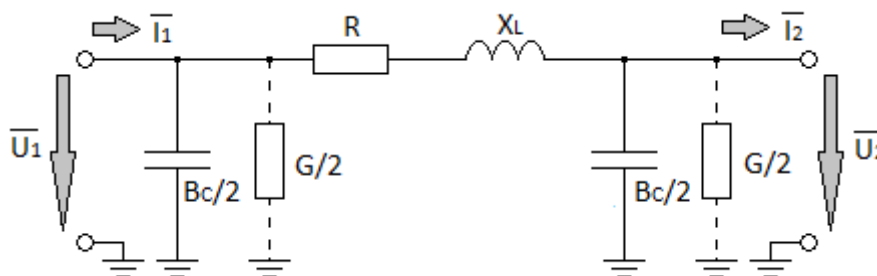
Seznam symbolů

3f [-]	.....	Počet fází
AC	.....	Alternating Current – střídavý proud, označení střídavých veličin
VN	.....	Vysoké napětí
HDO	.....	Hromadné dálkové ovládání
AlFe	.....	Označení elektrovodného lana používaného v elektroenergetice
PF	.....	Power Factor – účinník s uvažováním deformačního výkonu a vyšších harmonických složek proudu a napětí
PZ1	.....	Průmyslový závod 1
Spot.1	.....	Spotřebič 1
FVE	.....	Fotovoltaická elektrárna
UPS	.....	Uninterruptible Power Supply – Nepřerušitelný zdroj napájení

1 Návrh a realizace matematického modelu venkovního vedení 22 kV.

1.1 Obecné předpoklady

Venkovní vedení modelujeme pomocí dvojbranu tvaru π článku.



Obr. 1.1 π - článek

Složky podélné impedance tvoří rezistance a induktivní reaktance. Složky příčné admittance tvoří svod, který obvykle ve výpočtech zanedbáváme, protože je menší než imaginární složka, která je dána kapacitní susceptancí.

Jednotlivé pasivní parametry závisí na průřezu vodiče jedné fáze, na vzdálenostech mezi vodiči jednotlivých fází a vzdálenostech mezi vodiči a zemí, případně zemními lany, na tvaru stožárů nesoucí vedení, na konstrukci kabelu a druhu izolace [1].

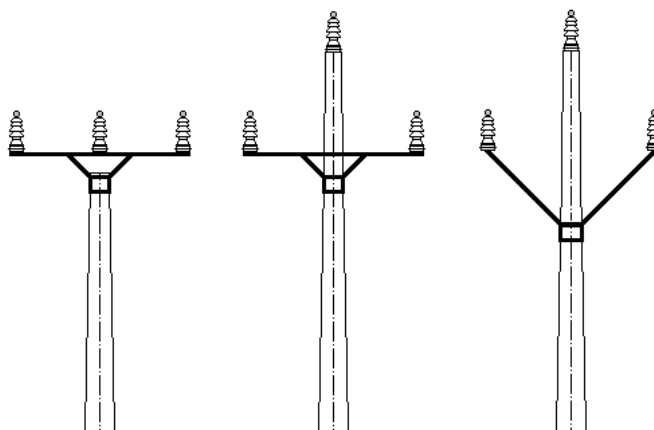
Při výpočtech bude uvažována nesouměrnost vedení, avšak aktivní prvky budou brány jako souměrné.

1.1.1 Specifikace venkovního vedení 22 kV

Venkovní vedení 22kV je používáno k distribuci elektrické energie z elektrických stanic do menších měst či vesnic, nebo průmyslových podniků. Toto vedení dokáže uspokojit dodávku až pro přibližně 100 000 obyvatel (cca 20MW), nebo pro průmyslový závod s příkonem do 15MW, výjimečně až do 50MW. Délky těchto vedení jsou v řádech desítek km, nejvíce však do 40 km v příhraničních oblastech, nebo v těžce dostupných lokalitách. Tato vedení se konstruují jako paprsková, nebo okružní s tím, že jsou jako paprsková provozována a distributor tak může svému zákazníkovi zajistit vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie. Z hlediska uzemnění uzlu transformátoru jsou provozovány venkovní sítě

22kV s neúčinně uzemněným uzlem přes Petersonovu tlumivku. Spolu s kabelovými rozvody tvoří venkovní vedení 22kV nejrozsáhlejší síť v české elektroenergetice s přibližně 62 000 km vedení [2].

Na obrázku 1.2 je zobrazeno nejčastější použití stožárů pro venkovní vedení na napětové hladině 22 kV. Obrázek je však pouze ilustrativní a měl by hlavně znázornit uspořádání vodičů. V praxi pak můžeme vidět konzole s tímto rozložením na betonových či dřevěných sloupech. Příhradové stožáry jsou, vzhledem ke své konstrukci, určeny pro dvojnásobná a vícenásobná vedení holých a jednoduchých izolovaných vodičů. V jednoduchých vedeních se použijí v případě nutnosti umístění vyššího podpěrného bodu, nebo při vyšších vrcholových silách vodičů jako stožáry rohové, odbočné, křížovatkové, výztužné a koncové. Typ stožáru na Obr. 1.2 vpravo je nazýván jako „Pařát“, instaluje se na nově budované, nebo rekonstruované vedení s důrazem na ochranu ptactva [3].



Obr. 1.2 Nejběžnější typy stožárů na napětové hladině 22kV

Jak již bylo řečeno, tak pro výpočet pasivních parametrů vedení je nutné znát vzdálenosti fázových vodičů od země a mezi sebou. Mezifázové vzdálenosti lze získat u výrobců konzol, detailní technická dokumentace uvedených konzol na Obr. 1.2 bude uvedena v příloze. Vzdálenosti fázových vodičů od země již ale nejsou tak konkrétně určeny, výšky sloupů nesoucích konzole s podpěrnými, nebo závěsnými izolátory jsou v rozmezí 9 až 13,5 metrů, příhradové stožáry mohou být až 24 metrů vysoké. Minimální vzdálenosti vodičů od země řeší norma ČSN EN 50423-1 s názvem Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1kV do AC 45kV včetně. Ve výpočtu musí být zohledněno, v jakém prostoru se vedení nachází, např. ve volném terénu, nad vozovkami, železnicí, samozřejmě je nutné brát v úvahu i křížení s jiným silovým či telekomunikačním vedením atd. Nicméně většina venkovních vedení 22kV, směřujících z elektrických stanic na okraje měst či vesnic, jsou vedena přes pole

a několik výjimek, jako je křížení s jiným vedením, či pozemní komunikací, může být vzhledem k délce vedení zanedbáno a pro výpočet pasivních parametrů brát v úvahu konstantní výšku vodičů od země pro celou délku vedení.

Další nedílnou součástí venkovního vedení jsou vodiče, tedy téměř výhradně používaná AlFe lana. U napětové hladiny VN se používají: AlFe 42/7, AlFe 70/11, AlFe 100/25, AlFe 110/22 a pro hlavní vedení také AlFe 185/31. Číselný podíl vždy ukazuje průřez elektrovedného hliníku/průřez ocelového jádra. Volba lana závisí jak na velikosti přenášeného výkonu, tak i na délce vedení.

1.2 Výpočet pasivních parametrů venkovního vedení 22 kV

Pasivní parametry vedení budou vztaženy na 1 km délky, v úvahu budou brány souměrné aktivní parametry a nesouměrné uložení vodičů. Pro porovnání bude počítáno s rovinným uspořádáním vodičů i s uspořádáním do trojúhelníka.

1.2.1 Rezistance [1][4]

Na velikost rezistance nemá typ použitého stožáru vliv, proto bude vypočtená hodnota stejná pro rovinné uspořádání i pro uspořádání vodičů do trojúhelníka. Jako vodič bylo zvoleno lano AlFe 185/31.

Činný odpor při průchodu stejnosměrného proudu se stanovuje známým výrazem:

$$R_{SS} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega]$$

kde: ρ je rezistivita, nebo též měrný elektrický odpor $[\mu\Omega\text{m}]$

- udává se pro teplotu 20°C,
- $\rho_{20} = 0,02941 \mu\Omega\text{m}$ pro hliník
- $\rho_{20} = 0,13 \mu\Omega\text{m}$ pro železo

l je délka vodiče $[\text{m}]$

S je průřez vodiče $[\text{mm}^2]$

Pro průchod střídavého proudu se musí hodnota R_{SS} vynásobit korekčními koeficienty:

$$R_{ST\check{R}} = R_{SS} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

kde:

k_1 – respektuje změnu rezistance vlivem teploty

$$k_1 = 1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_{20})$$

α [1/°C] je teplotní součinitel odporu

$$\alpha_{Al} = 0,004 \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{Fe} = 0,0045 \text{ K}^{-1}$$

ϑ [°C] je uvažovaná nová teplota

$$\vartheta_{20} \text{ [°C]} = 20^\circ\text{C}$$

k_2 – respektuje změnu rezistance vlivem skin efektu

$$\text{Parametr } m: \quad m = \sqrt{\frac{\mu \cdot f \cdot 10^3}{2R}}$$

μ [H/m] je permeabilita

f [Hz] je frekvence

$$\text{Pro } m \leq 1,2: \quad k_2 = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442}$$

$$\text{Pro } m > 1,2: \quad k_2 = 0,25 + 0,708m + \frac{0,06625}{m}$$

k_3 – respektuje změnu rezistance vlivem kroucení vodičů v laně

$$k_3 = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n}$$

a_n [m] je výška závitu n – tého vodiče

D_n [m] je průměr lana v poloze n – tého vodiče

d [m] je průměr vodiče

Pro přesné určení tohoto koeficientu je nutné znát konkrétní lano. Hodnota tohoto koeficientu je přibližně: $k_3 = 1,02$

k_4 – respektuje změnu rezistance vlivem průhybu zavěšeného vodiče

$$k_4 = \frac{l_p}{a}$$

l_p [m] je délka prohnutého vodiče $l_p = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}$

c [-] je parametr řetězovky

a [m] rozpětí stožárů

Číselný výpočet rezistance pro lano AlFe 185/31:

$$R_{SSAl} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,02941 \cdot \frac{1000}{185} = \underline{0,158973\Omega/\text{km}}$$

$$R_{SSFe} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,13 \cdot \frac{1000}{31} = \underline{4,193548\Omega/\text{km}}$$

$$R_{SS} = \frac{R_{SSAl} \cdot R_{SSFe}}{R_{SSAl} + R_{SSFe}} = \frac{0,158973 \cdot 4,193548}{0,158973 + 4,193548} = \underline{0,153167\Omega/\text{km}}$$

Přepočet na 40°C. Aby byl výpočet korektní, musel by se u AlFe lana počítat nárůst rezistance zvlášť pro ocelové jádro a zvlášť pro hliníkové vodiče z důvodu rozdílné hodnoty teplotního součinitele odporu pro tyto materiály. Jelikož je ale podíl hliníku/železa v laně 6/1 a hodnoty α se od sebe moc neliší, tak bude počítáno pouze se součinitelem odporu pro hliník.

$$k_1 = 1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_{20}) = 1 + 0,004 \cdot (40 - 20) = \underline{1,08}$$

$$m = \sqrt{\frac{\mu \cdot f \cdot 10^3}{2R}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 50 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,153167}} = \underline{0,453}$$

$$k_2 = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} = 1 + \frac{0,453^4}{12} - \frac{0,453^8}{180} + \frac{0,453^{12}}{2442} = \underline{1,0035}$$

$$k_3 = 1,02$$

Koeficient k_4 dosahuje na vedení 22kV velmi malých hodnot, proto bude zanedbán.

$$R_{STŘ} = R_{SS} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,153167 \cdot 1,08 \cdot 1,0035 \cdot 1,02 = \underline{\mathbf{0,169319\Omega/\text{km}}}$$

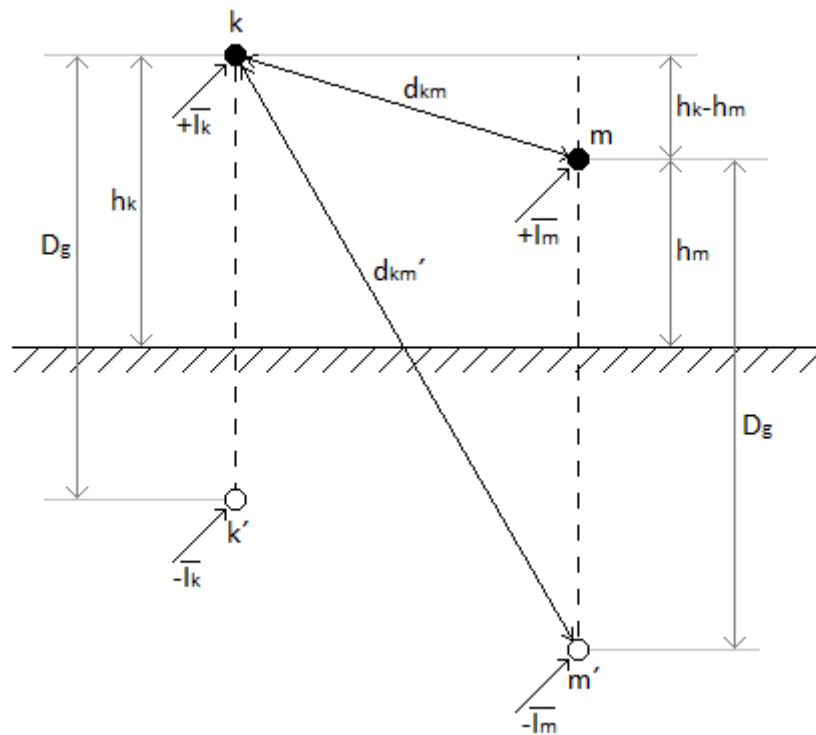
Výsledek odpovídá i uvedené hodnotě odporu v tabulce 1.1. Z vypočítaných hodnot je patrné, že velikost rezistance je nejvíce ovlivněna teplotou vodiče.

Lana AlFe pro vedení VN							
Lano AlFe	Průměr lana [mm]	Hmotnost lana [kg/km]	Odpor při 20°C [Ω/km]	Průměr drátu [mm]		Počet drátů [ks]	
				Al	Fe	Al	Fe
42/7	9	171,6	0,69	3	3	6	1
70/11	11,7	269,8	0,43	3,75	1,4	6	7
100/25	14,6	478,5	0,28	2,06	2,12	30	7
110/22	14,96	484,9	0,26	2,24	2	28	7
185/31	19,08	756,8	0,16	3	2,36	26	7

Tab. 1.1 Přehled lan AlFe používaných na napětové hladině 22kV

1.2.2 Indukčnost [1][4]

Při výpočtech indukčností nahrazujeme uspořádání smyček n skutečných vodičů a země n skutečnými vodiči s n fiktivními vodiči ve vzdálenosti D_g . Viz Obr. 1.3.



Obr. 1.3

Veličina D_g je vzdálenost fiktivního vodiče a je závislá na měrném odporu země, tedy na místě postaveného vedení. Pro $f = 50 \text{ Hz}$ bývá $D_g = 600 - 800 \text{ m}$. Je určována ze vztahu:

$$D_g = 0,178 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{f}} \quad [m]$$

kde: ρ je měrný odpor země $[\Omega\text{m}]$
 f je frekvence $[\text{Hz}]$

Indukčnost vodiče k a fiktivního vodiče k' , který s ním tvoří smyčku, je nazývána **vlastní indukčnost**:

$$L_{kk} = 0,46 \cdot \log \frac{D_g}{\xi \cdot r_k} \quad [\text{mH/km}]$$

kde: r_k je poloměr k – tého vodiče $[\text{m}]$

k, m obecné značení vodiče

ξ je činitel respektující nerovnoměrné rozložení proudu v průřezu vodiče a permeabilitu feromagnetických materiálů

- pro nemagnetické materiály při $\mu = 1$ je $\xi = 0,7788$
- pro ocelové lano je $\mu = 1000$, pak $\xi = 0,7788$
- pro AlFe lana je ξ závislé na počtu poloh drátů a počtu drátů:

$$2 \text{ polohy s } 26 \text{ drátů} \rightarrow \xi = 0,809$$

$$3 \text{ polohy s } 30 \text{ drátů} \rightarrow \xi = 0,826$$

Indukční vazba mezi vodičem k , skutečným vodičem m a jemu odpovídajícím fiktivnímu vodiči m' je **vzájemná indukčnost**:

$$L_{km} = 0,46 \cdot \log \frac{d_{km'}}{d_{km}} \quad [\text{mH/km}]$$

Vzhledem k tomu, že v praxi platí:

$$d_{km} \ll D_g; (h_k - h_m) \ll D_g$$

Lze psát podle trojúhelníka v Obr. 1.3:

$$d_{km'} = \sqrt{[D_g + (h_k - h_m)]^2 + d_{km}^2 - (h_k - h_m)^2} \cong D_g$$

A rovnice pro výpočet vzájemné indukčnosti bude potom:

$$L_{km} = 0,46 \cdot \log \frac{D_k}{d_{km}} = L_{mk} \quad [\text{mH/km}] \quad (\text{pro } m = k \text{ je } d_{kk} = \xi \cdot r_k)$$

Úbytek napětí ve skutečném vodiči k způsobený vlivem indukčností – vlastní a vzájemných je dán Ohmovým zákonem:

$$\Delta \bar{U}_k = \sum_{m=1}^n j\omega L_{km} \bar{I}_m \quad [V/km]$$

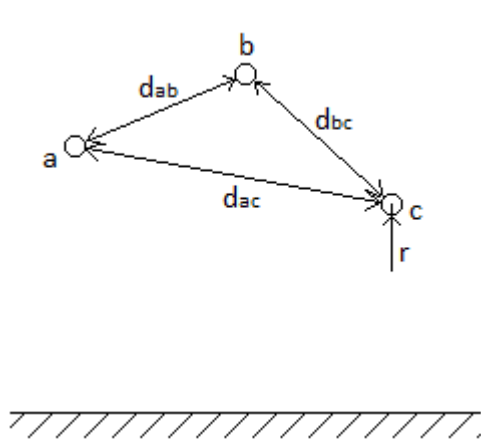
Nyní definujeme pojem **provozní indukčnost** tak, že účinek pravé strany rovnice uvedené výše nahradíme stejným účinkem, který by vyvolala provozní indukčnost \bar{L}_{pk} k -tého vodiče v uvažovaném n -vodičovém systému:

$$\Delta \bar{U}_k = j\omega \bar{L}_{pk} \bar{I}_k$$

Porovnáním rovnic dostaneme výraz pro stanovení provozní indukčnosti k -tého vodiče:

$$\bar{L}_{pk} = \frac{\sum_{m=1}^n L_{km} \bar{I}_m}{\bar{I}_k} \quad [mH/km]$$

Jestliže je trojfázové vedení uspořádáno na stožáru v obecném trojúhelníku, jako na Obr. 1.4 a předpokládáme-li symetrické zatížení, pak lze psát:



Obr. 1.4

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_a \\ \bar{I}_b &= \bar{a}^2 \bar{I}_a \\ \bar{I}_c &= \bar{a} \bar{I}_a \end{aligned}$$

kde jednotkové fázory natočení:

$$\begin{aligned} \bar{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \bar{a} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{+j\frac{2}{3}\pi} \end{aligned}$$

Z výrazu pro stanovení provozní indukčnosti platí pro vodič a :

$$\bar{L}_{pa} = \frac{L_{aa} \bar{I}_a + L_{ab} \bar{I}_b + L_{ac} \bar{I}_c}{\bar{I}_a}$$

A po dosazení výše uvedeného:

$$\overline{L_{pa}} = L_{aa} + \overline{a}^2 L_{ab} + \overline{a} L_{ac}$$

Obdobně pro vodiče b, c :

$$\overline{L_{pb}} = \frac{L_{ab} \overline{I_a} + L_{bb} \overline{I_b} + L_{bc} \overline{I_c}}{\overline{I_b}}$$

$$\overline{L_{pb}} = \frac{L_{ab}}{\overline{a}^2} + L_{bb} + \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} L_{bc}$$

$$\overline{L_{pc}} = \frac{L_{ac} \overline{I_a} + L_{ab} \overline{I_b} + L_{cc} \overline{I_c}}{\overline{I_c}}$$

$$\overline{L_{pc}} = \frac{L_{ac}}{\overline{a}} + \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} L_{ab} + L_{cc}$$

Kde jednotlivé indukčnosti jsou:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r}$$

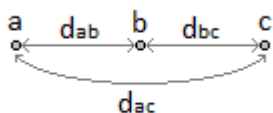
$$L_{ab} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ab}}$$

$$L_{ac} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ac}}$$

$$L_{bc} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{bc}}$$

Číselný výpočet indukčnosti pro následující uspořádání vodičů:

a)



Obr. 1.5 Rovinné uspořádání vodičů

kde:

a, b, c jsou lana AlFe 185/31; $\varnothing = 19,08\text{mm}$

$d_{ab} = d_{bc} = 50\text{cm}$

$d_{ac} = 100\text{cm}$

$h_a = h_b = h_c = 10\text{m}$

Jelikož má lano AlFe 185/31 podle tabulky Tab. 1.1 počet drátů = 26 ve dvou polohách, pak $\xi = 0,809$. Měrný odpor země bude uvažovaný s hodnotou 100Ω .

$$r = \frac{d}{2} = \frac{19,08}{2} = \underline{9,54 \text{ mm}}$$

$$D_g = 0,178 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{f}} = 0,178 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot 10^7}{50}} = \underline{796 \text{ m}}$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} = 0,46 \log \frac{796}{0,809 \cdot 9,54 \cdot 10^{-3}} = \underline{2,306 \text{ mH/km}}$$

$$L_{ab} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ab}} = 0,46 \log \frac{796}{0,5} = \underline{1,473 \text{ mH/km}} = L_{bc}$$

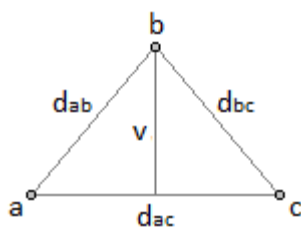
$$L_{ac} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ac}} = 0,46 \log \frac{796}{1} = \underline{1,334 \text{ mH/km}}$$

$$\begin{aligned} \overline{L_{pa}} &= L_{aa} + \overline{a}^2 L_{ab} + \overline{a} L_{ac} = 2,306 + e^{-j120^\circ} \cdot 1,473 + e^{j120^\circ} \cdot 1,334 = \\ &= 2,306 - 0,737 - j1,276 - 0,667 + j1,155 = 0,902 - j0,121 = \\ &= \underline{0,91 \cdot e^{-j7,6^\circ} \text{ mH/km}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{L_{pb}} &= \frac{L_{ab}}{\overline{a}^2} + L_{bb} + \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} L_{bc} = \frac{1,473}{e^{-j120^\circ}} + 2,306 + \frac{e^{j120^\circ}}{e^{-j120^\circ}} \cdot 1,473 = \\ &= 1,473 \cdot e^{j120^\circ} + 2,306 + 1,473 \cdot e^{j240^\circ} = \\ &= -0,737 + j1,276 + 2,306 - 0,737 - j1,276 = \underline{0,832 \text{ mH/km}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{L_{pc}} &= \frac{L_{ac}}{\overline{a}} + \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} L_{ab} + L_{cc} = \frac{1,334}{e^{j120^\circ}} + \frac{e^{-j120^\circ}}{e^{j120^\circ}} \cdot 1,473 + 2,306 = \\ &= 1,334 \cdot e^{-j120^\circ} + 1,473 \cdot e^{-j240^\circ} + 2,306 = \\ &= -0,667 - j1,155 - 0,737 + j1,276 + 2,306 = 0,902 + j0,121 = \\ &= \underline{0,91 \cdot e^{j7,6^\circ} \text{ mH/km}} \end{aligned}$$

b)



Obr. 1.6 Uspořádání vodičů do trojúhelníka

kde:

a,b,c jsou lano AlFe 185/31; $\varnothing = 19,08 \text{ mm}$

$d_{ac} = 160 \text{ cm}$

$v = 130 \text{ cm}$

$h_a = h_c = 10 \text{ m}; h_b = 11,3 \text{ m}$

$$d_{ab} = d_{bc} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot d_{ac}\right)^2 + v^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot 1,6\right)^2 + 1,3^2} = \underline{1,526m = 152,6cm}$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} = 0,46 \log \frac{796}{0,809 \cdot 9,54 \cdot 10^{-3}} = \underline{2,306mH/km}$$

$$L_{ab} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ab}} = 0,46 \log \frac{796}{1,526} = \underline{1,25mH/km} = L_{bc}$$

$$L_{ac} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{ac}} = 0,46 \log \frac{796}{1,6} = \underline{1,24mH/km}$$

$$\begin{aligned} \overline{L_{pa}} &= L_{aa} + \overline{a}^2 L_{ab} + \overline{a} L_{ac} = 2,306 + e^{-j120^\circ} \cdot 1,25 + e^{j120^\circ} \cdot 1,24 = \\ &= 2,306 - 0,625 - j1,083 - 0,62 + j1,074 = 1,061 - j0,009 = \\ &= \underline{1,061 \cdot e^{-j0,5^\circ} mH/km} \end{aligned}$$

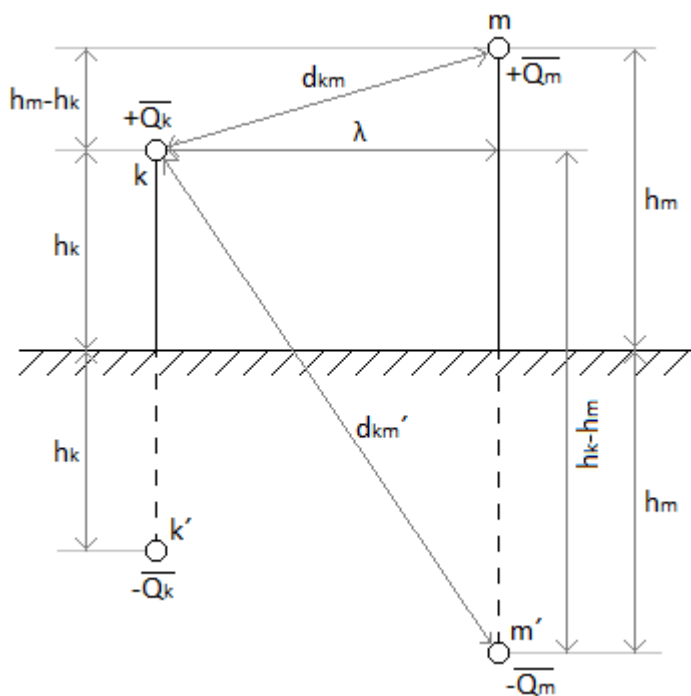
$$\begin{aligned} \overline{L_{pb}} &= \frac{L_{ab}}{\overline{a}^2} + L_{bb} + \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} L_{bc} = \frac{1,25}{e^{-j120^\circ}} + 2,306 + \frac{e^{j120^\circ}}{e^{-j120^\circ}} \cdot 1,25 = \\ &= 1,25 \cdot e^{j120^\circ} + 2,306 + 1,25 \cdot e^{j240^\circ} = \\ &= -0,625 + j1,083 + 2,306 - 0,625 - j1,083 = \underline{1,056mH/km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{L_{pc}} &= \frac{L_{ac}}{\overline{a}} + \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} L_{ab} + L_{cc} = \frac{1,24}{e^{j120^\circ}} + \frac{e^{-j120^\circ}}{e^{j120^\circ}} \cdot 1,25 + 2,306 = \\ &= 1,24 \cdot e^{-j120^\circ} + 1,25 \cdot e^{-j240^\circ} + 2,306 = \\ &= -0,62 - j1,074 - 0,625 + j1,083 + 2,306 = 1,061 + j0,009 = \\ &= \underline{1,061 \cdot e^{j0,5^\circ} mH/km} \end{aligned}$$

1.2.3 Kapacita [4]

Při stanovení kapacit vedení se předpokládá soustava stejných vodičů značné délky oproti ostatním rozměrům. Vodiče jsou brány jako přímkové, rovnoběžné navzájem i s povrchem země.

Pro stanovení elektrostatického potenciálu v libovolném bodu P , který leží mimo vodiče, v soustavě n vzájemně rovnoběžných vodičů je používána metoda zrcadlení – viz Obr. 1.7.



Obr. 1.7

$$\bar{U}_p = \sum_{k=1}^n \frac{\bar{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{pk'}}{d_{pk}}$$

kde d_{pk} resp. $d_{pk'}$ jsou vzdálenosti bodu P od osy skutečného vodiče k , resp. zrcadlového obrazu vodiče k' . Leží – li bod P na povrchu skutečného vodiče k , bude jeho potenciál:

$$\bar{U}_k = \sum_{m=1}^n \frac{\bar{Q}_m}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} = \sum_{m=1}^n \delta_{mk} \bar{Q}_m$$

Lze psát také v maticovém tvaru: $[\bar{U}] = [\delta_{km}] [\bar{Q}]$

V této poslední rovnici je podle Obr. 1.7:

$$d_{kk} = r_k; \quad d_{kk'} = 2h_k$$

Dále je zaveden pro $m = k$:

$$\delta_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_k}{r_k} \quad [m/F]$$

což je vlastní potenciálový součinitel vodiče k , pro $m \neq k$:

$$\delta_{km} = \delta_{mk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} \quad [m/F]$$

Z pravoúhlých trojúhelníků na Obr. 1.7 platí:

$$d_{km}'^2 = (h_k + h_m)^2 + \lambda^2; \quad \lambda^2 = d_{km}^2 - (h_m - h_k)^2$$

$$d_{km}' = d_{mk}' = \sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2}$$

a vzájemný potenciálový součinitel mezi vodiči k, m ($k \neq m$) bude:

$$\delta_{km} = \delta_{mk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{\sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2}}{d_{km}} \quad [m/F]$$

Do rovnic dosadíme:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-6} \quad [F/km] \quad - \text{dielektrická konstanta vakua}$$

$$\varepsilon_r = 1 \quad \text{pro vzduch} \quad - \text{dielektrická konstanta prostředí}$$

$$\ln x = 2,3 \cdot \log x$$

a dostaneme praktické vzorce pro výpočet potenciálových součinitelů:

$$\delta_{kk} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h_k}{r_k} \quad [km/\mu F]$$

$$\delta_{mk} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2}}{d_{km}} \quad [km/\mu F]$$

Předpokládejme vodiče v obecné poloze, jako na Obr. 1.8, kde každý fázový vodič má *dílčí kapacitu k zemi* a mezi vodiči jsou *dílčí kapacity vzájemné*. Dále předpokládejme souměrná napětí fázových vodičů proti zemi:

$$\overline{U_a} = \overline{U_a}$$

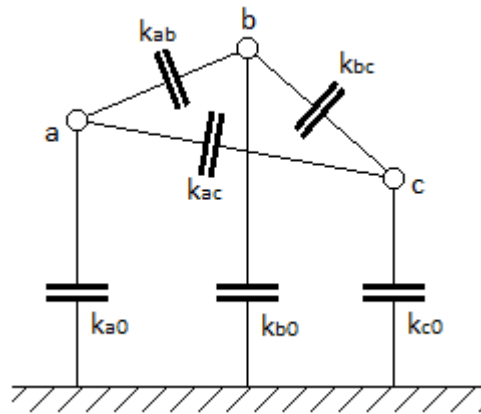
kde jednotkové fázory natočení:

$$\overline{U_b} = \overline{a}^2 \overline{U_a}$$

$$\overline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j\frac{2}{3}\pi}$$

$$\overline{U_c} = \overline{a} \overline{U_a}$$

$$\overline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{+j\frac{2}{3}\pi}$$



Obr. 1.8

Pro náboje jednotlivých vodičů platí:

$$\bar{Q}_a = k_{a0} \cdot \bar{U}_a + k_{ab} \cdot (\bar{U}_a - \bar{U}_b) + k_{ac} \cdot (\bar{U}_a - \bar{U}_c)$$

$$\bar{Q}_b = k_{b0} \cdot \bar{U}_b + k_{ab} \cdot (\bar{U}_b - \bar{U}_a) + k_{bc} \cdot (\bar{U}_b - \bar{U}_c)$$

$$\bar{Q}_c = k_{c0} \cdot \bar{U}_c + k_{ac} \cdot (\bar{U}_c - \bar{U}_a) + k_{bc} \cdot (\bar{U}_c - \bar{U}_b)$$

A po úpravě rovnic dostaneme:

$$\bar{Q}_a = (k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) \cdot \bar{U}_a - k_{ab} \cdot \bar{U}_b - k_{ac} \cdot \bar{U}_c$$

$$\bar{Q}_b = -k_{ab} \cdot \bar{U}_a + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) \cdot \bar{U}_b - k_{bc} \cdot \bar{U}_c$$

$$\bar{Q}_c = -k_{ac} \cdot \bar{U}_a - k_{bc} \cdot \bar{U}_b + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) \cdot \bar{U}_c$$

Dále zavedeme pro zjednodušení zápisu *kapacitní součinitele* c_{km} , jejichž význam vyplývá porovnáním s předchozími rovnicemi:

$$\bar{Q}_a = c_{aa} \cdot \bar{U}_a + c_{ab} \cdot \bar{U}_b + c_{ac} \cdot \bar{U}_c$$

$$\bar{Q}_b = c_{ab} \cdot \bar{U}_a + c_{bb} \cdot \bar{U}_b + c_{bc} \cdot \bar{U}_c$$

$$\bar{Q}_c = c_{ac} \cdot \bar{U}_a + c_{bc} \cdot \bar{U}_b + c_{cc} \cdot \bar{U}_c$$

Taktéž zapsáno v maticovém zápisu: $[\bar{Q}] = [c_{km}] [\bar{U}]$

A jak již bylo uvedeno na začátku kapitoly o výpočtu kapacit vedení, platí také:

$$[\bar{U}] = [\delta_{km}] [\bar{Q}] \Rightarrow [\bar{Q}] = [\delta_{km}]^{-1} [\bar{U}]$$

Z porovnání posledních dvou rovnic tedy vyplývá, že:

$$[c_{km}] = [\delta_{km}]^{-1}$$

Podobně jako u indukčností zavádíme pojem *provozní kapacita* k -tého vodiče, která je vztažena na jednotku délky:

$$\overline{C_{pk}} = \frac{\overline{Q_k}}{\overline{U_k}}$$

Podle této definice stanovíme provozní kapacity uvažovaného vedení:

$$\overline{C_{pa}} = \frac{(k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) \cdot \overline{U_a} - k_{ab} \cdot \overline{U_b} - k_{ac} \cdot \overline{U_c}}{\overline{U_a}}$$

Po úpravě:

$$\begin{aligned} \overline{C_{pa}} &= \frac{(k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) \cdot \overline{U_a}}{\overline{U_a}} - \frac{k_{ab} \cdot \overline{U_b}}{\overline{U_a}} - \frac{k_{ac} \cdot \overline{U_c}}{\overline{U_a}} = \\ &= \frac{(k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) \cdot \overline{U_a}}{\overline{U_a}} - \frac{k_{ab} \cdot \overline{a}^2 \overline{U_a}}{\overline{U_a}} - \frac{k_{ac} \cdot \overline{a} \overline{U_a}}{\overline{U_a}} = \\ &= (k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) - k_{ab} \cdot \overline{a}^2 - k_{ac} \cdot \overline{a} \end{aligned}$$

Obdobně pro vodiče b, c :

$$\begin{aligned} \overline{C_{pb}} &= \frac{-k_{ab} \cdot \overline{U_a} + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) \cdot \overline{U_b} - k_{bc} \cdot \overline{U_c}}{\overline{U_b}} \\ \overline{C_{pb}} &= -\frac{k_{ab}}{\overline{a}^2} + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) - \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} \cdot k_{bc} \\ \overline{C_{pc}} &= \frac{-k_{ac} \cdot \overline{U_a} - k_{bc} \cdot \overline{U_b} + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) \cdot \overline{U_c}}{\overline{U_c}} \\ \overline{C_{pc}} &= -\frac{k_{ac}}{\overline{a}} - \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} \cdot k_{bc} + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) \end{aligned}$$

kde velikosti jednotlivých kapacit k_{km} získáme ze zjednodušeného zápisu rovnic pro náboje jednotlivých vodičů:

$$k_{ac} = -c_{ac} ; k_{bc} = -c_{bc} ; k_{ab} = -c_{ab}$$

$$(k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) = c_{aa} \quad \Rightarrow \quad k_{a0} = c_{aa} - k_{ab} - k_{ac}$$

$$(k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) = c_{bb} \quad \Rightarrow \quad k_{b0} = c_{bb} - k_{ab} - k_{bc}$$

$$(k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) = c_{cc} \quad \Rightarrow \quad k_{c0} = c_{cc} - k_{ac} - k_{bc}$$

Číselný výpočet kapacit:

Uspořádání vodičů a typ vodiče je stejný jako u číselného výpočtu indukčností.

a) rovinné uspořádání vodičů

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h_a}{r_a} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2 \cdot 10}{9,54 \cdot 10^{-3}} = \underline{137,251 \text{ km}/\mu\text{F}}$$

$$\delta_{ab} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_a h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 0,5^2}}{0,5} = \underline{66,206 \text{ km}/\mu\text{F}}$$

$$\delta_{ac} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_a h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1^2}}{1} = \underline{53,784 \text{ km}/\mu\text{F}}$$

$$\delta_{bc} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_b h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 0,5^2}}{0,5} = \underline{66,206 \text{ km}/\mu\text{F}}$$

Matice $[\delta_{km}]$ a po následné inverzi matice $[\delta_{km}]^{-1} = [c_{km}]$ mají tedy tvar:

<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="text-align: center;">137,251</td><td style="text-align: center;">66,206</td><td style="text-align: center;">53,784</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">66,206</td><td style="text-align: center;">137,251</td><td style="text-align: center;">66,206</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">53,784</td><td style="text-align: center;">66,206</td><td style="text-align: center;">137,251</td></tr> </table>	137,251	66,206	53,784	66,206	137,251	66,206	53,784	66,206	137,251	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px; display: inline-block;">inverze</div>	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="text-align: center;">0,00992</td><td style="text-align: center;">-0,00379</td><td style="text-align: center;">-0,00206</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-0,00379</td><td style="text-align: center;">0,01095</td><td style="text-align: center;">-0,00379</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-0,00206</td><td style="text-align: center;">-0,00379</td><td style="text-align: center;">0,00992</td></tr> </table>	0,00992	-0,00379	-0,00206	-0,00379	0,01095	-0,00379	-0,00206	-0,00379	0,00992
137,251	66,206	53,784																		
66,206	137,251	66,206																		
53,784	66,206	137,251																		
0,00992	-0,00379	-0,00206																		
-0,00379	0,01095	-0,00379																		
-0,00206	-0,00379	0,00992																		

$$k_{ac} = -c_{ac} = \underline{0,00206 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$k_{bc} = -c_{bc} = \underline{0,00379 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$k_{ab} = -c_{ab} = \underline{0,00379 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$k_{a0} = c_{aa} - k_{ab} - k_{ac} = 0,00992 - 0,00379 - 0,00206 = \underline{0,00407 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$k_{b0} = c_{bb} - k_{ab} - k_{bc} = 0,01095 - 0,00379 - 0,00379 = \underline{0,00337 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$k_{c0} = c_{cc} - k_{ac} - k_{bc} = 0,00992 - 0,00206 - 0,00379 = \underline{0,00407 \mu\text{F}/\text{km}}$$

$$\begin{aligned}\overline{C_{pa}} &= (k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) - k_{ab} \cdot \overline{a}^2 - k_{ac} \cdot \overline{a} = \\ &= (0,00407 + 0,00379 + 0,00206) - 0,00379 \cdot e^{-j120^\circ} - 0,00206 \cdot e^{j120^\circ} \\ &= 0,00992 + 0,001895 + j0,00328 + 0,00103 - j0,00178 = \\ &= 0,012845 + j0,0015 = 0,01293 \cdot e^{j6,7^\circ} \mu F / km = \underline{12,93 \cdot e^{j6,7^\circ} nF / km}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{C_{pb}} &= -\frac{k_{ab}}{\overline{a}^2} + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) - \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} \cdot k_{bc} = \\ &= -\frac{0,00379}{e^{-j120^\circ}} + (0,00337 + 0,00379 + 0,00379) - \frac{e^{j120^\circ}}{e^{-j120^\circ}} \cdot 0,00379 = \\ &= 0,001895 - j0,00328 + 0,01095 + 0,001895 + j0,00328 = \\ &= 0,01474 \mu F / km = \underline{14,74 nF / km}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{C_{pc}} &= -\frac{k_{ac}}{\overline{a}} - \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} \cdot k_{bc} + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) = \\ &= -\frac{0,00206}{e^{j120^\circ}} - \frac{e^{-j120^\circ}}{e^{j120^\circ}} \cdot 0,00379 + (0,00407 + 0,00206 + 0,00379) = \\ &= 0,00103 + j0,00178 + 0,001895 - j0,00328 + 0,00992 = \\ &= 0,012845 - j0,0015 = 0,01293 \cdot e^{-j6,7^\circ} \mu F / km = \underline{12,93 \cdot e^{-j6,7^\circ} nF / km}\end{aligned}$$

b) uspořádání vodičů do trojúhelníka

$$\delta_{aa} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h_a}{r_a} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2 \cdot 10}{9,54 \cdot 10^{-3}} = \underline{137,251 km / \mu F}$$

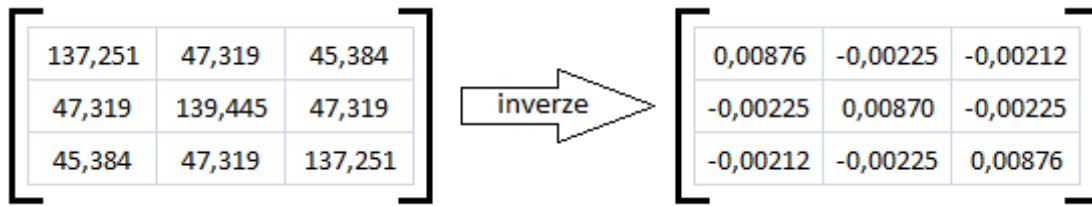
$$\delta_{bb} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h_b}{r_b} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2 \cdot 11,3}{9,54 \cdot 10^{-3}} = \underline{139,445 km / \mu F}$$

$$\delta_{ab} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_a h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 11,3 + 1,526^2}}{1,526} = \underline{47,319 km / \mu F}$$

$$\delta_{ac} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_a h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1,6^2}}{1,6} = \underline{45,384 km / \mu F}$$

$$\delta_{bc} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_b h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 11,3 \cdot 10 + 1,526^2}}{1,526} = \underline{47,319 km / \mu F}$$

Matice $[\delta_{km}]$ a po následné inverzi matice $[\delta_{km}]^{-1} = [c_{km}]$ mají tedy tvar:



$$k_{ac} = -c_{ac} = \underline{0,00212 \mu F / km}$$

$$k_{bc} = -c_{bc} = \underline{0,00225 \mu F / km}$$

$$k_{ab} = -c_{ab} = \underline{0,00225 \mu F / km}$$

$$k_{a0} = c_{aa} - k_{ab} - k_{ac} = 0,00876 - 0,00225 - 0,00212 = \underline{0,00439 \mu F / km}$$

$$k_{b0} = c_{bb} - k_{ab} - k_{bc} = 0,0087 - 0,00225 - 0,00225 = \underline{0,0042 \mu F / km}$$

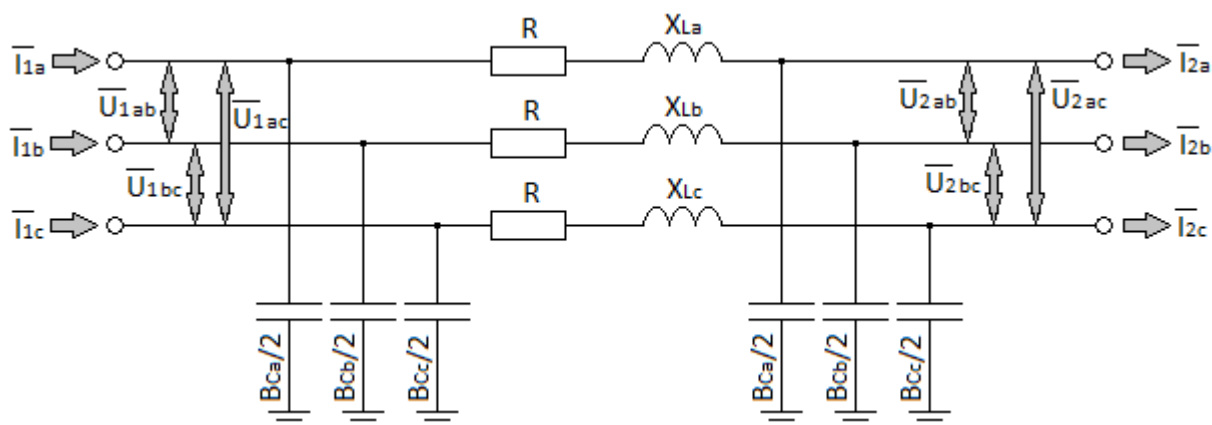
$$k_{c0} = c_{cc} - k_{ac} - k_{bc} = 0,00876 - 0,00212 - 0,00225 = \underline{0,00439 \mu F / km}$$

$$\begin{aligned} \overline{C_{pa}} &= (k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) - k_{ab} \cdot \overline{a}^2 - k_{ac} \cdot \overline{a} = \\ &= (0,00439 + 0,00225 + 0,00212) - 0,00225 \cdot e^{-j120^\circ} - 0,00212 \cdot e^{j120^\circ} = \\ &= 0,00876 + 0,001125 + j0,00195 + 0,00106 - j0,00184 = \\ &= 0,010945 + j0,00011 = 0,01095 \cdot e^{j0,6^\circ} \mu F / km = \underline{10,95 \cdot e^{j0,6^\circ} nF / km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{C_{pb}} &= -\frac{k_{ab}}{\overline{a}^2} + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) - \frac{\overline{a}}{\overline{a}^2} \cdot k_{bc} = \\ &= -\frac{0,00225}{e^{-j120^\circ}} + (0,0042 + 0,00225 + 0,00225) - \frac{e^{j120^\circ}}{e^{-j120^\circ}} \cdot 0,00225 = \\ &= 0,001125 - j0,00195 + 0,0087 + 0,001125 + j0,00195 = \\ &= 0,01095 \mu F / km = \underline{10,95 nF / km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{C_{pc}} &= -\frac{k_{ac}}{\overline{a}} - \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}} \cdot k_{bc} + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) = \\ &= -\frac{0,00212}{e^{j120^\circ}} - \frac{e^{-j120^\circ}}{e^{j120^\circ}} \cdot 0,00225 + (0,00439 + 0,00212 + 0,00225) = \\ &= 0,00106 + j0,00184 + 0,001125 - j0,00195 + 0,00876 = \\ &= 0,010945 - j0,00011 = 0,01095 \cdot e^{-j0,6^\circ} \mu F / km = \underline{10,95 \cdot e^{-j0,6^\circ} nF / km} \end{aligned}$$

1.3 Náhradní schéma venkovního vedení 22kV



Obr. 1.9 Náhradní schéma venkovního vedení 22kV

a) rovinné uspořádání vodičů

$$R = \underline{0,1693\Omega/\text{km}}$$

$$X_{La} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pa} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 0,91 \cdot 10^{-3} = \underline{0,2859\Omega/\text{km}}$$

$$X_{Lb} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pb} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 0,832 \cdot 10^{-3} = \underline{0,2614\Omega/\text{km}}$$

$$X_{Lc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pc} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 0,91 \cdot 10^{-3} = \underline{0,2859\Omega/\text{km}}$$

$$B_{Ca} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pa} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 12,93 \cdot 10^{-9} = \underline{4,0621\mu\text{S}/\text{km}}$$

$$B_{Cb} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pb} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 14,74 \cdot 10^{-9} = \underline{4,6307\mu\text{S}/\text{km}}$$

$$B_{Cc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pc} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 12,93 \cdot 10^{-9} = \underline{4,0621\mu\text{S}/\text{km}}$$

b) uspořádání vodičů do trojúhelníka

$$R = \underline{0,1693\Omega/\text{km}}$$

$$X_{La} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pa} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 1,061 \cdot 10^{-3} = \underline{0,3333\Omega/\text{km}}$$

$$X_{Lb} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pb} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 1,056 \cdot 10^{-3} = \underline{0,3318\Omega/\text{km}}$$

$$X_{Lc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{pc} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 1,061 \cdot 10^{-3} = \underline{0,3333\Omega/\text{km}}$$

$$B_{Ca} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pa} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 10,95 \cdot 10^{-9} = \underline{3,44\mu\text{S}/\text{km}}$$

$$B_{Cb} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pb} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 10,95 \cdot 10^{-9} = \underline{3,44\mu\text{S}/\text{km}}$$

$$B_{Cc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{pc} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 10,95 \cdot 10^{-9} = \underline{3,44\mu\text{S}/\text{km}}$$

2 Výpočty napětových a proudových poměrů pro různé harmonické

2.1 Vyšší harmonické složky proudu či napětí

Je všeobecně známo, že výroba, přenos a rozvod elektrické energie se uskutečňuje pomocí střídavého proudu. Samozřejmě že existují i např. stejnosměrné generátory tedy dynamo, avšak pokud výrobce nezužítuje tuto vyrobenou energii pro své účely a má zájem jí poskytnout, lépe řečeno prodat, distribučním firmám elektrické energie, je nucen vybavit své stejnosměrné zařízení střídači. Může tak být využíváno výhod střídavého rozvodu, jako je možnost transformace či u tří fázové sítě možnost využití točivého magnetického pole. Po připojení spotřebiče k takovéto síti se střídavým, sinusovým napětím začne obvod zátěže protékat střídavý proud. Tento proud může mít několik různých vlastností, podle charakteru spotřebiče. Jednak můžeme mluvit o fázovém posunu proudu vůči napětí podle toho, zda je spotřebič odporového, induktivního, či kapacitního charakteru a u tzv. **nelineárních spotřebičů** bude mít navíc procházející proud **nesinusový průběh**.

Periodické signály nesinusového tvaru lze nahradit velkým množstvím sinusových harmonických průběhů, nazývají se **harmonickými složkami** a touto teorií rozkladu signálu se zabývá harmonická analýza. Využívá se Fourierův rozvoj funkce:

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(h\omega t + \vartheta_h) = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot e^{j(h\omega t + \vartheta_h)}$$

kde:

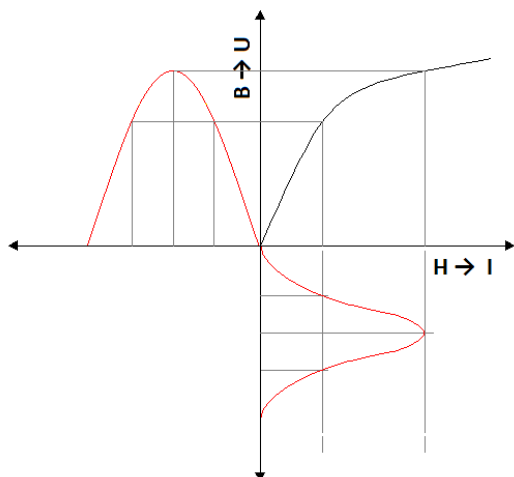
$$i_0 = \text{stejnosměrná složka}$$

$$i_1(t) = \text{základní harmonická, } f = 50\text{Hz}$$

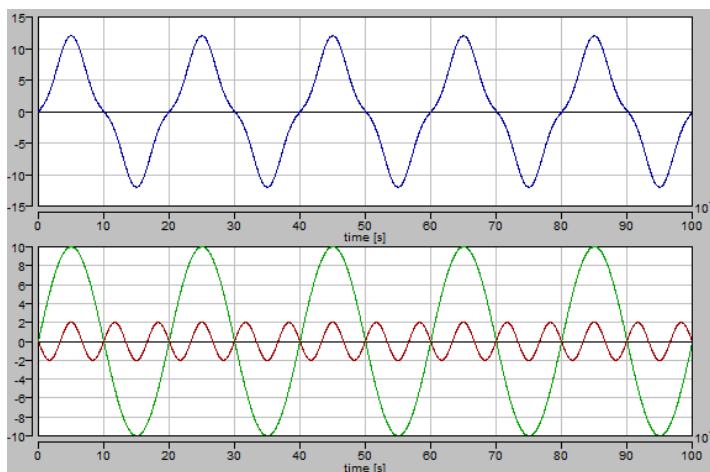
$$\text{pro } h \geq 2 \quad i_h(t) = \text{harmonické složky, } f_h = h \cdot 50$$

V praxi je možné se setkat i s necelistvými harmonickými, např. systém HDO využívá frekvenci $216 + \frac{2}{3} \text{ Hz}$. Tyto složky nazýváme interharmonické, nebo také mezilehlé harmonické.

Jak již bylo řečeno, tak zdroje vyšších harmonických jsou nelineární spotřebiče, za něž lze považovat všechna zařízení na bázi výkonové elektroniky, spínané zdroje, zářivky, elektrické pece, stmívače, přesycené indukčnosti atd.



Obr. 2.1 Magnetizační charakteristika bez uvažování hystereze



Obr. 2.2 Průběh magnetizačního proudu a jeho rozklad

Na Obr. 2.1 a 2.2 je názorně zobrazeno, jak přesycené indukčnosti vnášejí nelinearity do napájecí sítě. Magnetizační proud lze rozložit na základní harmonickou a 3. harmonickou složku.

Posouzení obsahu vyšších harmonických v napájecím napětí:

- a) Lze posuzovat individuálně podle obsahu jednotlivých vyšších harmonických

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad [-]$$

- b) Lze posuzovat souhrnně, celkový činitel zkreslení napětí je pak:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

Negativní vlivy vyšších harmonických

Obecně lze říci, že vznik vyšších harmonických složek proudu, či napětí vnáší do napájecí sítě mnoho problémů, jako jsou přídavné ztráty při přenosu elektrické energie, přídavné ztráty točivých strojů, zvýšená hlučnost u transformátorů, ovlivňují funkci elektronických zařízení a HDO, ruší telekomunikační zařízení, problém nastává např. i u zhášení zemního spojení, protože Petersonova tlumivka kompenzuje pouze 1. harmonickou složku. Negativně může být ovlivněna i funkce ochran, které vyhodnocují impedanci, protože dochází k chybám měření:

$$Z = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}$$

Kde indexy veličin vyjadřují řád harmonické, tedy poměr kmitočtu srovnávané harmonické k základní.

Pokud by byl měřen příkon spotřebičů v síti znečištěné vyššími harmonickými, pak by měření prokázalo, že $S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$. Zde byl zaveden pojem deformační výkon D [VAd] a rovnice dostala tvar: $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$.

Velikost činného výkonu musí být počítána i s příspěvky vyšších harmonických:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi$$

$$P_3 = \sqrt{3} \cdot U_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi$$

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi$$

Pak:
$$P = P_1 + P_3 + \dots P_n$$

Obdobně:
$$Q = Q_1 + Q_3 + \dots Q_n$$

Skutečný účinník značený λ , nebo PF (Power Factor) pak vypočteme podle vztahu:

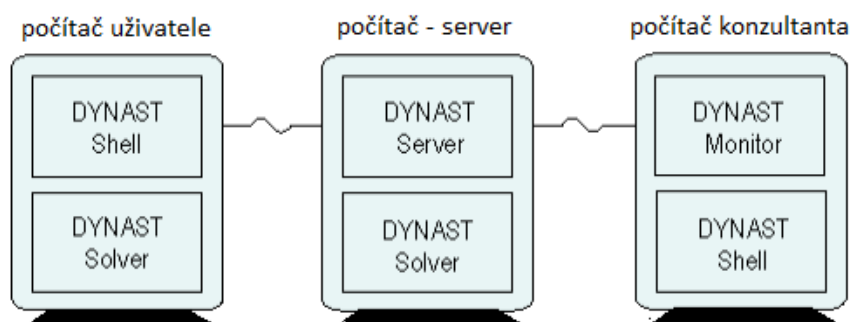
$$PF = \frac{P \text{ (i s příspěvky vyšších harmonických)}}{S \text{ (i s deformačním výkonem)}}$$

S účinníkem souvisí i jeho kompenzace, která je často technicky řešena pomocí kondenzátorových baterií, zde nastává problém s tím, že kondenzátory představují pro vysoké harmonické nejmenší cestu odporu a kondenzátory jsou tak přetěžovány. Avšak k nadměrnému zatěžování prvků elektrických obvodů, může docházet i vlivem rezonančních jevů, které nastávají díky existenci vyšších harmonických.

Všechny tyto problémy je nejjednodušší odstranit opatřeními eliminující vyšší harmonické. To lze učinit již vhodnou volbou při projektu rozvodu daného průmyslového závodu tím, že bude rozdělena rušivá a pasivní zátěž a následně zapojena do místa s velkým zkratovým výkonem, kde již ovlivnění obvodů vyššími harmonickými bude mnohem menší. Pokud ale připojení rušivé zátěže do již zkonstruovaného podniku nedovolí tak zásadní změny v jeho napájecí soustavě, pak se nabízí využití pasivních či aktivních filtrů [2].

2.2 Výpočtové prostředí

Pro výpočet napětových a proudových poměrů bude využíván software **DYNAST** vyvinutý na pražské universitě ČVUT. Název softwaru, složený ze slov dynamika a statika, již napovídá, že pomocí tohoto programu bude jednoduché zvládnout modelování, simulace a animace fyzikálních soustav. Modely soustav lze zadávat v podobě fyzikálních schémat znázorňujících reálnou konfiguraci. Rovnice pro simulace si DYNAST formuluje sám a navíc je unikátní tím, že podporuje oboustrannou interakci učitel-student při řešení úloh a vzájemnou spolupráci studentů po internetu [5].



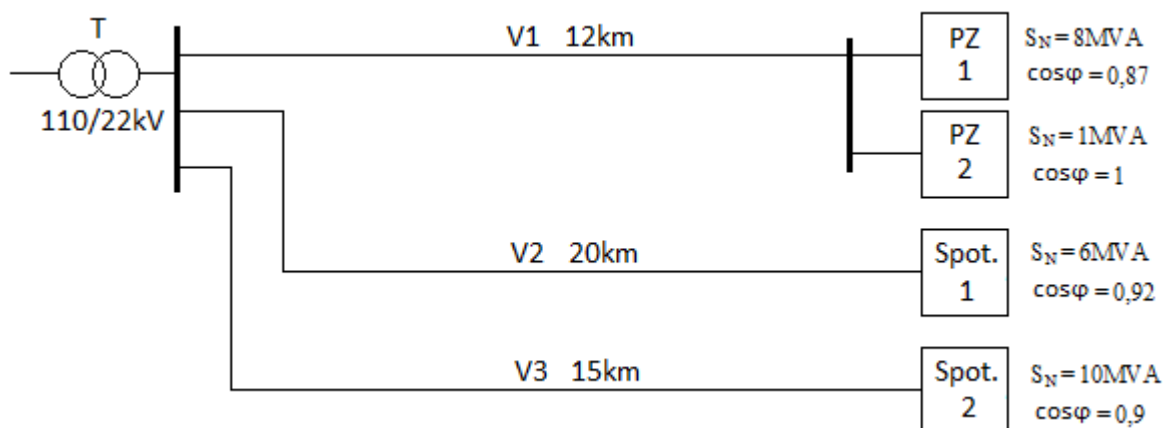
Obr. 2.3 Konfigurace systému

Jak naznačuje obrázek, DYNAST je systém sestávající z programů instalovaných na vzdálených počítačích propojených prostřednictvím internetu nebo lokální sítě. Může však být provozován i na jediném počítači. Uživatelsky přátelské pracovní prostředí *DYNAST Shell* slouží k přípravě zadání řešené úlohy, k odeslání tohoto zadání k dalšímu zpracování místním nebo vzdáleným řešičem *DYNAST Solver* a k zobrazení průběhu výsledků po jejich získání z řešiče. Soubor programů *DYNAST Server* je určen pro obsluhu počítačů propojených internetem nebo lokální sítí. Součástí tohoto souboru je *DYNAST Monitor*, který umožňuje sledování úloh zasílaných uživateli z jejich počítačů na *DYNAST Server*. Může být rovněž využíván k ověřování správnosti zadaných úloh i k jejich případným opravám, a také ke konzultacím uživatelů. *DYNAST Monitor* je velmi užitečným výukovým nástrojem i tehdy, když učitel sdílí se svými studenty tutéž počítačovou učebnu, nebo když více studentů pracuje na společném projektu [5].

DYNAST si můžete bezplatně stáhnout z internetu a nainstalovat na svém počítači, instalační soubor, podrobný návod k systému a další zajímavé informace naleznete na adrese:

<http://virtual.cvut.cz/dynastcz/>

2.3 Model sítě 22kV



Obr. 2.4 1f schéma modelu sítě 22kV

Představme si následující situaci, znázorněnou na Obr. 2.4. Transformátor umístěný v elektrické stanici napájený z distribuční sítě 110kV, transformuje napětí na hodnotu 23kV (23kV z důvodu zohlednění úbytku napětí na vedeních). Na této napětové úrovni bude představovat zdroj pro připojená tři vedení V1 až V3, která dopravují elektrickou energii ke spotřebitelům. Spotřebitele budou tvořit dva průmyslové závody a dva obecné spotřebiče, jako například množina distribučních transformátorů 22/0,4kV napájející malé město, veřejné osvětlení atd. V průmyslovém závodě 1 bude namodelována rušící zátěž a pak bude zkoumáno, jak zde vzniklé vyšší harmonické ovlivní napětové a proudové poměry ve zbytku sítě. Průmyslový závod 2 bude namodelovaný s čistě odporovou zátěží, což v praxi není obvyklé, ale na tomto příkladu bude připomenuto to, že i odporová zátěž může odebírat nesinusový proud.

Tato síť bude modelována v prostředí softwaru DYNAST, bude zde využito náhradního schématu venkovního vedení z kapitoly 1.3 a samozřejmě k němu související typy stožárů a vodiče uvedené v kapitole 1.2, pro které byli počítány pasivní parametry vedení. V souvislosti s použitím softwaru DYNAST bude jen nutné počítat v náhradních schématech s velikostmi indukčností a kapacit místo reaktancí, jelikož schémata jsou tvořena samotnými indukčnostmi a kondenzátory.

Specifikace prvků v modelované síti:

Transformátor:

Transformátor zde bude modelovaný jako ideální zdroj trojfázového symetrického napětí.

Vedení:

Vedení bude modelováno dvojbranem ve tvaru π článku – viz kapitola 1.3 na straně 28.

Rovinné uspořádání vodičů				Uspořádání vodičů do trojúhelníka			
	V1	V2	V3		V1	V2	V3
l [km]	12	20	15	l [km]	12	20	15
R [Ω]	2,0316	3,386	2,5395	R [Ω]	2,0316	3,386	2,5395
L _a [mH]	10,92	18,2	13,65	L _a [mH]	12,732	21,22	15,915
L _b [mH]	9,984	16,64	12,48	L _b [mH]	12,672	21,12	15,84
L _c [mH]	10,92	18,2	13,65	L _c [mH]	12,732	21,22	15,915
C _a /2 [nF]	77,58	129,3	96,975	C _a /2 [nF]	65,7	109,5	82,125
C _b /2 [nF]	88,44	147,4	110,55	C _b /2 [nF]	65,7	109,5	82,125
C _c /2 [nF]	77,58	129,3	96,975	C _c /2 [nF]	65,7	109,5	82,125

Tabulka 2.1 Parametry vedení

Spotřebiče:

Spotřebiče nahradíme v modelu sítě sériovým spojením rezistoru a induktoru. Budeme uvažovat stejnou velikost ve všech fázích. Velikost těchto prvků vypočteme podle vztahů:

$$Z = \frac{U_f}{I} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I}; \quad I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \Rightarrow Z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U^2}{\sqrt{3} \cdot S} = \frac{U^2}{S}$$

$$R = Z \cdot \cos\varphi; \quad X = Z \cdot \sin\varphi; \quad L = \frac{X}{2\pi f}$$

PZ 1: $S_N = 8MVA$; $\cos\varphi = 0,87$

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{22000^2}{8 \cdot 10^6} = \frac{22^2}{8} = 60,5\Omega; \quad R = Z \cdot \cos\varphi = 60,5 \cdot 0,87 = \underline{52,635\Omega}$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 60,5 \cdot 0,493 = 29,827\Omega; \quad L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{29,827}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = \underline{94,94mH}$$

PZ 2: $S_N = 1MVA$; $\cos\varphi = 1$

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{22^2}{1} = 484\Omega; \quad R = Z = \underline{484\Omega}$$

Spot. 1: $S_N = 6MVA$; $\cos\varphi = 0,92$

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{22^2}{6} = 80,667\Omega; \quad R = Z \cdot \cos\varphi = 80,667 \cdot 0,92 = \underline{74,214\Omega}$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 80,667 \cdot 0,392 = 31,621\Omega; \quad L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{31,621}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = \underline{100,65mH}$$

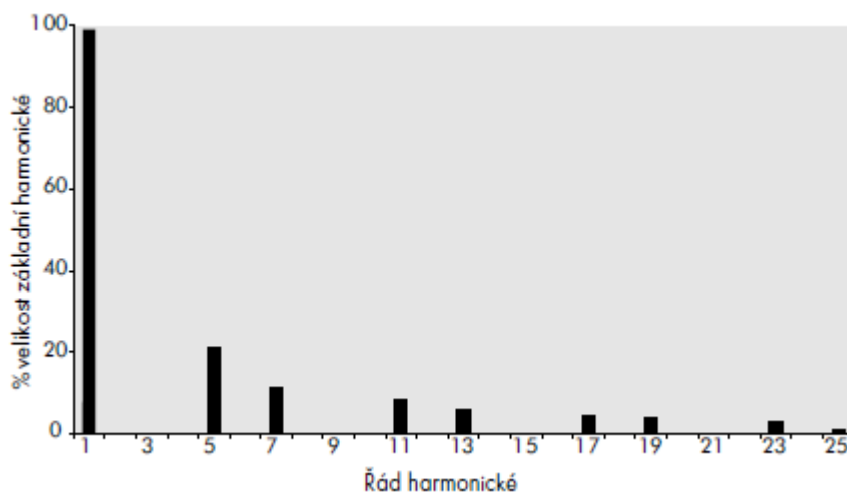
Spot. 2: $S_N = 10MVA$; $\cos\varphi = 0,9$

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{22^2}{10} = 48,4\Omega; \quad R = Z \cdot \cos\varphi = 48,4 \cdot 0,9 = \underline{43,56\Omega}$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 48,4 \cdot 0,436 = 21,097\Omega; \quad L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{21,097}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = \underline{67,15mH}$$

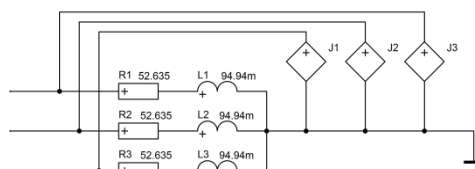
Nelineární spotřebič:

Nelineární spotřebič namodelujeme tím způsobem, že k obecné pasivní zátěži připojíme proudové zdroje, které budou generovat vyšší harmonické. Pokud však bude potřeba modelovat konkrétní nelineární spotřebič, je nutné získat pro tento spotřebič jeho spektrální analýzu. Názorně zde bude předveden postup pro trojfázový šesti-pulzní usměrňovací můstek:



Obr. 2.5 Spektrum harmonických trojfázového šesti-pulzního usměrňovače

Ze spektra daného spotřebiče zjistíme jaký procentuální podíl, n -tého řádu harmonické vůči první harmonické, musíme nadefinovat proudovému zdroji v jedné fázi. V druhé fázi bude velikost amplitud stejná, jen budou signály posunuty o $-2\pi/3$ a v třetí fázi budou posunuty o $+2\pi/3$. Velikost amplitudy první harmonické přitom musíme odhadnout z předpokládaného příkonu zařízení.



$I1^{\circ} \cdot 0.215^{\circ} \cdot \text{SIN}(500\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.115^{\circ} \cdot \text{SIN}(700\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.08^{\circ} \cdot \text{SIN}(1100\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.06^{\circ} \cdot \text{SIN}(1300\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.0045^{\circ} \cdot \text{SIN}(1700\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.04^{\circ} \cdot \text{SIN}(1900\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.03^{\circ} \cdot \text{SIN}(2300\pi \cdot \text{time}) + I1^{\circ} \cdot 0.01^{\circ} \cdot \text{SIN}(2500\pi \cdot \text{time})$
 $I1^{\circ} \cdot 0.215^{\circ} \cdot \text{SIN}(500\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.115^{\circ} \cdot \text{SIN}(700\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.08^{\circ} \cdot \text{SIN}(1100\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.06^{\circ} \cdot \text{SIN}(1300\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.0045^{\circ} \cdot \text{SIN}(1700\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.04^{\circ} \cdot \text{SIN}(1900\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.03^{\circ} \cdot \text{SIN}(2300\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.01^{\circ} \cdot \text{SIN}(2500\pi \cdot \text{time} - 2\pi/3)$
 $I1^{\circ} \cdot 0.215^{\circ} \cdot \text{SIN}(500\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.115^{\circ} \cdot \text{SIN}(700\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.08^{\circ} \cdot \text{SIN}(1100\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.06^{\circ} \cdot \text{SIN}(1300\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.0045^{\circ} \cdot \text{SIN}(1700\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.04^{\circ} \cdot \text{SIN}(1900\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.03^{\circ} \cdot \text{SIN}(2300\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3) + I1^{\circ} \cdot 0.01^{\circ} \cdot \text{SIN}(2500\pi \cdot \text{time} + 2\pi/3)$

Obr. 2.6 Model nelineární zátěže pro 6tí-pulzní usměrňovač definovaný v prostředí DYNAST

Petersonova tlumivka:

Jelikož se transformátory napájející venkovní vedení 22kV provozují s nepřímou uzemněným uzlem a to přes zhášecí, neboli Petersonovu tlumivku, nesmí ani v modelu sítě chybět. Její funkcí je kompenzace kapacitního poruchového proudu při vzniklém zemním spojení. Velikost indukčnosti tak určíme ze vztahu:

$$I_{KAP} = I_L \Rightarrow 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_p \cdot l = \frac{U_f}{\omega \cdot L} \Rightarrow L = \frac{1}{3 \cdot C_p \cdot l \cdot \omega^2}$$

Velikost kapacity celé sítě $3 \cdot C_p \cdot l$ však platí při předpokladu souměrného vedení. Při uvažování nesouměrného vedení musíme počítat s velikostmi kapacit pro každou fázi zvlášť, jelikož nemají stejnou velikost: $C_a \cdot l + C_b \cdot l + C_b \cdot l$. Jelikož modelujeme celou síť s tím, že vedení V1 až V3 jsou tvořena stejnými vodiči a stožáry, pak lze brát v úvahu celkovou délku vedení $12+20+15 = 47\text{km}$.

$$C_{s\text{íT}\check{E}a) = C_a \cdot l + C_b \cdot l + C_b \cdot l = 12,93 \cdot 47 + 14,74 \cdot 47 + 12,93 \cdot 47 = \underline{1908,2nF}$$

pro rovinné uspořádání vodičů na stožárech a pro uspořádání do trojúhelníka platí:

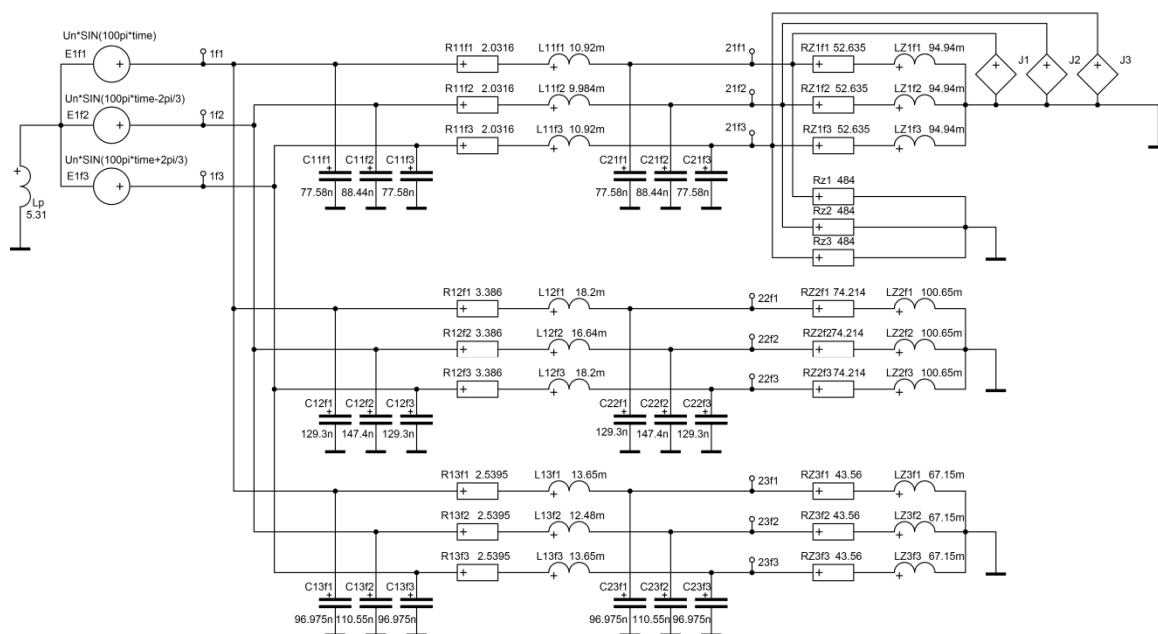
$$C_{s\text{íT}\check{E}b) = C_a \cdot l + C_b \cdot l + C_b \cdot l = 10,95 \cdot 47 + 10,95 \cdot 47 + 10,95 \cdot 47 = \underline{1543,95nF}$$

Nyní tedy můžeme vyčíslit indukčnost tlumivky pro uspořádání vodičů v rovině (a) a v trojúhelníku (b):

$$L_a) = \frac{1}{C_{s\text{íT}\check{E}a) \cdot \omega^2} = \frac{1}{1908,2 \cdot 10^{-9} \cdot (2 \cdot 3,1415 \cdot 50)^2} = 5,31H$$

$$L_b) = \frac{1}{C_{s\text{íT}\check{E}b) \cdot \omega^2} = \frac{1}{1543,95 \cdot 10^{-9} \cdot (2 \cdot 3,1415 \cdot 50)^2} = 6,56H$$

2.4 Napětové a proudové poměry pro různé harmonické



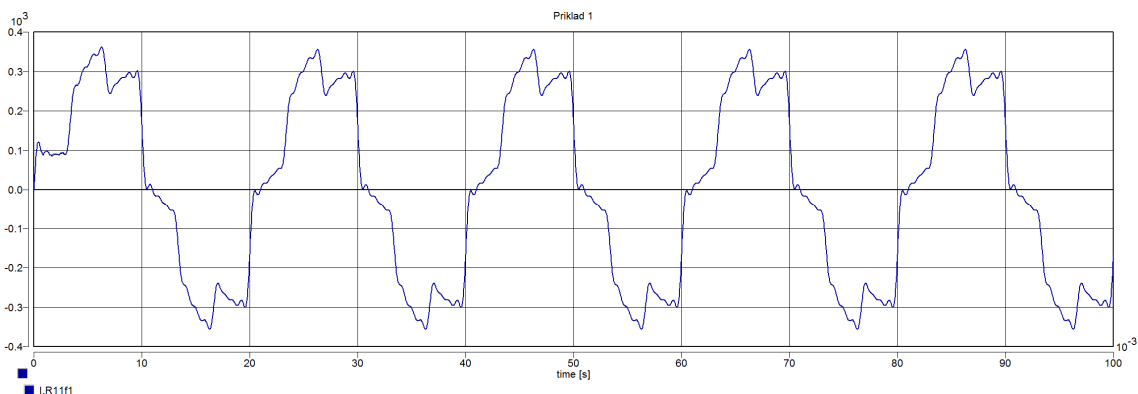
$$292^{\circ} \cdot 0.215 \cdot \sin(500\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.115 \cdot \sin(700\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.08 \cdot \sin(1100\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.06 \cdot \sin(1300\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.045 \cdot \sin(1700\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.04 \cdot \sin(1900\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.03 \cdot \sin(2300\pi t) + 292^{\circ} \cdot 0.01 \cdot \sin(2500\pi t)$$

$$292^{\circ} \cdot 0.215 \cdot \sin(500\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.115 \cdot \sin(700\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.08 \cdot \sin(1100\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.06 \cdot \sin(1300\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.045 \cdot \sin(1700\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.04 \cdot \sin(1900\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.03 \cdot \sin(2300\pi t - 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.01 \cdot \sin(2500\pi t - 2\pi/3)$$

$$292^{\circ} \cdot 0.215 \cdot \sin(500\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.115 \cdot \sin(700\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.08 \cdot \sin(1100\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.06 \cdot \sin(1300\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.045 \cdot \sin(1700\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.04 \cdot \sin(1900\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.03 \cdot \sin(2300\pi t + 2\pi/3) + 292^{\circ} \cdot 0.01 \cdot \sin(2500\pi t + 2\pi/3)$$

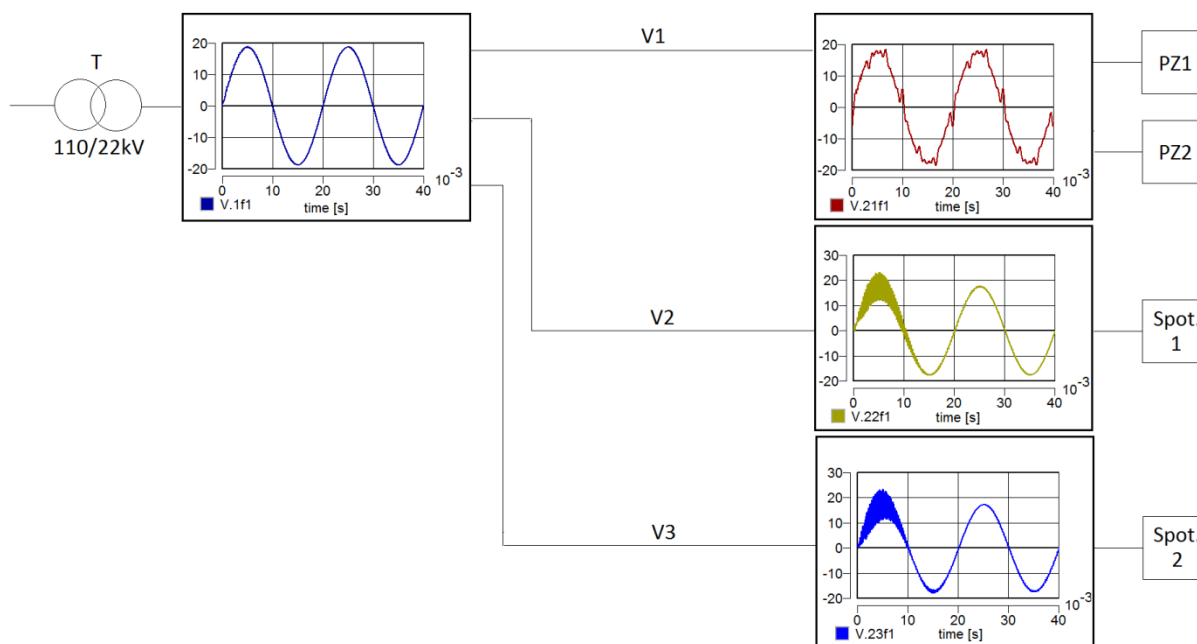
Obr. 2.7 Model sítě z Obr. 2.4 vytvořený v softwaru DYNAST

Při modelování rozsáhlejší sítě je doporučováno průběžně kontrolovat správnost dosažených výsledků, např. kontrolou velikosti odebíraného proudu zátěží. Vhodné je také definovat rušivou zátěž až na konec, aby bylo možné otestovat modelovanou síť na průmyslové frekvenci 50Hz. Nesmí být zapomináno, že systém DYNAST zobrazuje průběhy fázového napětí, pro případný odečet hodnoty je tedy nutné velikost amplitudy vydělit $\sqrt{2}$ pro získání efektivní hodnoty a následně vynásobit $\sqrt{3}$ pro získání sdružené hodnoty napětí.



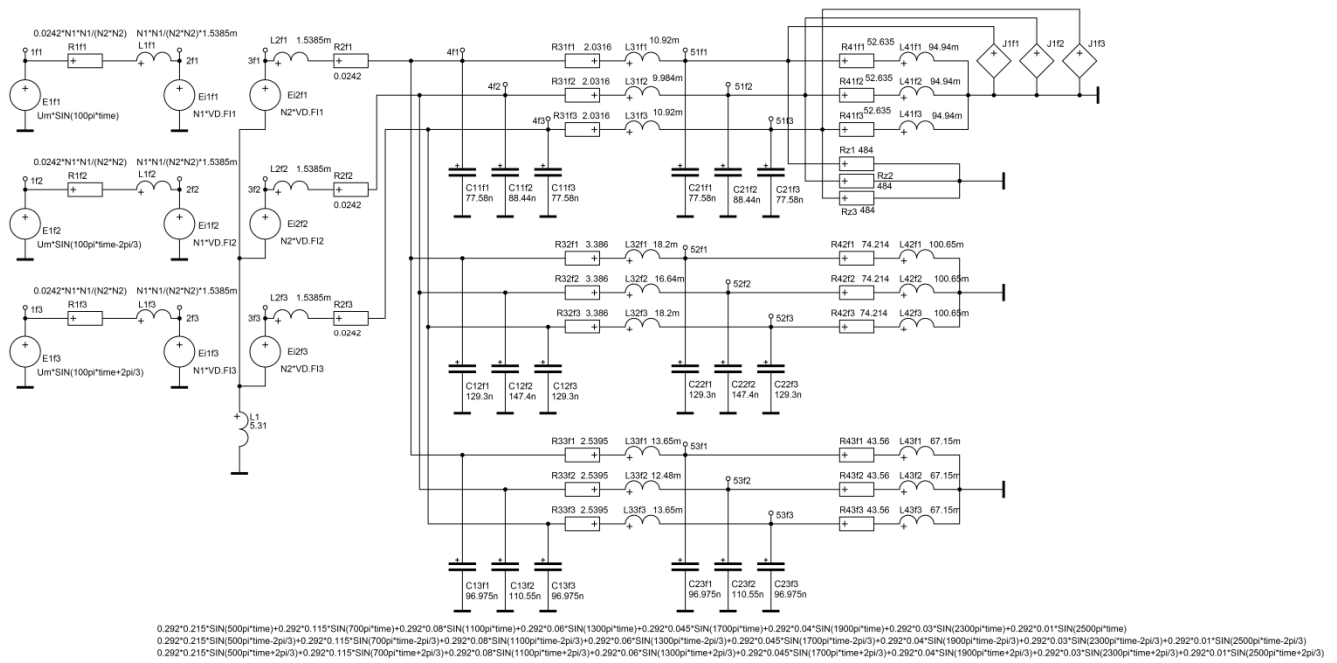
Obr. 2.8 Proud ve fázi 1 odebíraný rušivou zátěží v průmyslovém závodě 1

Nyní zkontrolujeme, jak ovlivnil nelineární spotřebič napětové poměry v celé síti. Průběhy napětí budou názorně vloženy do schematického obvodu sítě v místě jeho měření.

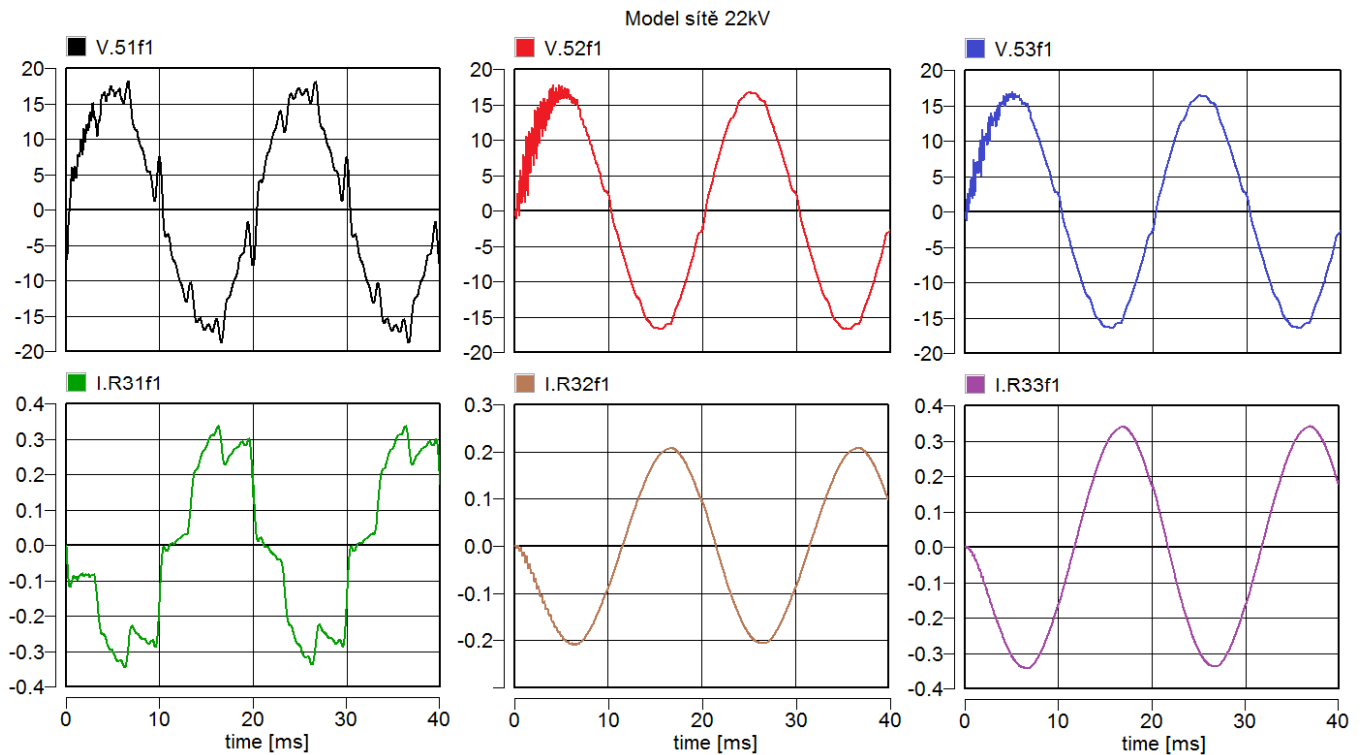


Obr. 2.9 Průběhy fázového napětí ve fázi 1 v měřených místech sítě

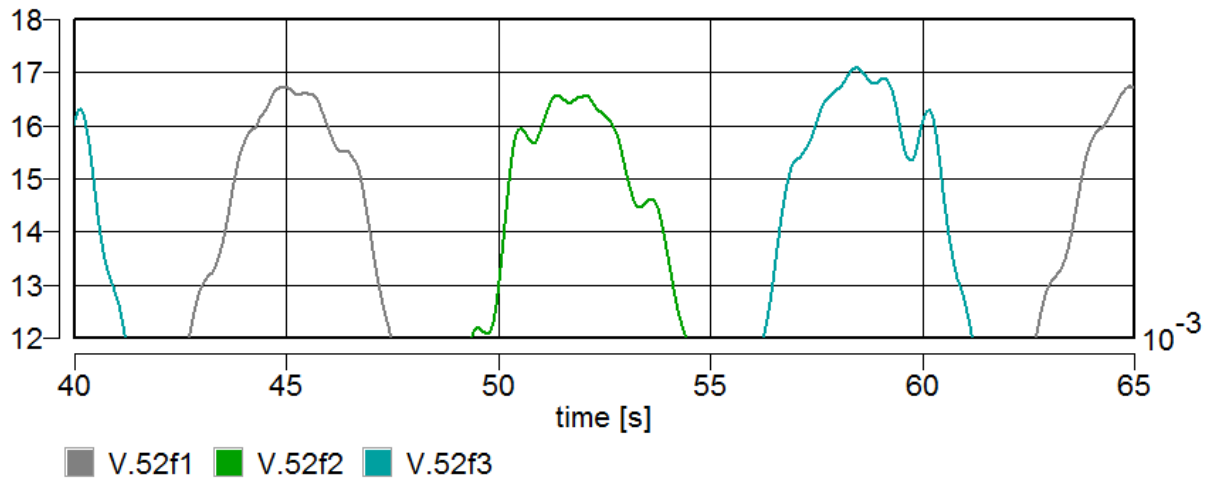
Na výše uvedeném obrázku je patrné, že průběh napětí před průmyslovým závodem 1 je zdeformovaný. Jelikož je na toto napětí připojen i PZ2, bude samozřejmě provoz elektrických zařízení v tomto objektu ovlivněn. Spotřebič 1 a 2 již ale napájí sinusové napětí a kromě přechodového děje v první periodě nelze z průběhů napětí nic vyčíst z hlediska vyšších harmonických složek. Zde je patrné, že na tom bude mít svůj podíl nevhodně zvolený zdroj napětí. Jelikož je zdroj namodelovaný jako ideální, nemůže být očekáván žádný úbytek napětí na jeho impedanci a jak je patrné z Obr. 2.7, nemůže být ani zkoumáno, jaký vliv bude mít znečištěná síť vyššími harmonickými složkami na distribuční síť 110kV. K vyřešení těchto nedostatků je nutné vytvořit hodnotnější model transformátoru, jelikož však náplní této práce není modelování prvků elektrizační soustavy, nebude už zde popsán podrobný popis tohoto modelu, nicméně bude v příloze uveden zdrojový text systému DYNAST, ze kterého lze postup vyčíst. Bude využito modelu transformátoru, který zohledňuje jak úbytek napětí na jeho impedanci, tak i syčení magnetického obvodu a byl vytvořený podle výkladu pana Doc. Ing. Karla Noháče, Ph.D. v rámci předmětu Přechodové děje v elektrizačních soustavách (KEE/PJS). Parametry transformátoru 110/22kV byly brány: $S_{NT} = 50MVA$; $u_{K\%} = 10\%$; $i_{0\%} = 1\%$; $\Delta P_K = 250kW$; $\Delta P_0 = 50kW$; $U_N = 22kV$.



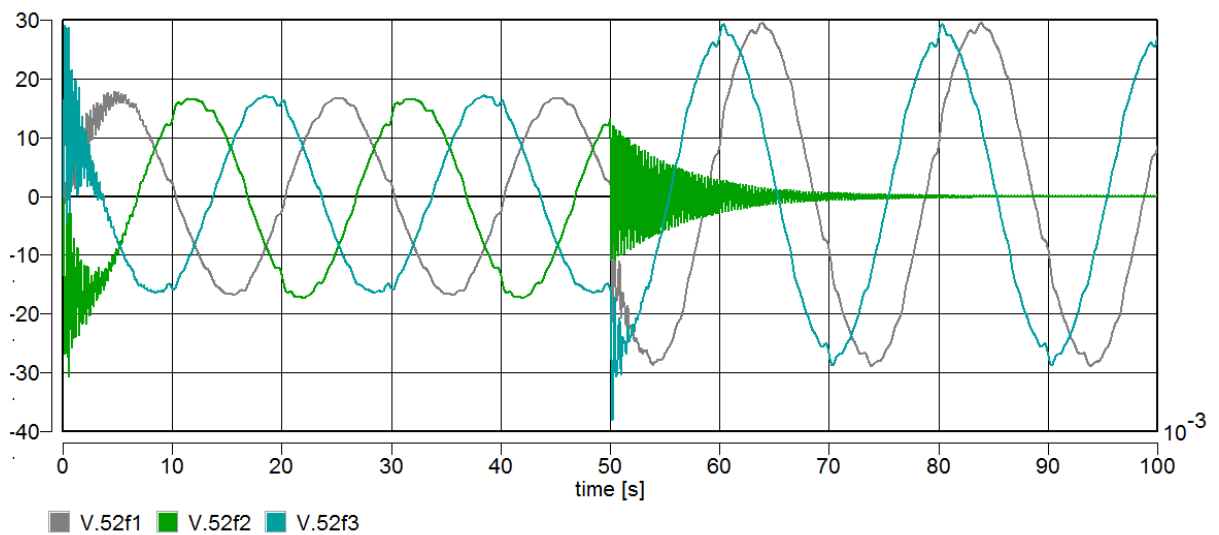
Obr. 2.10 Model sítě s upraveným transformátorem



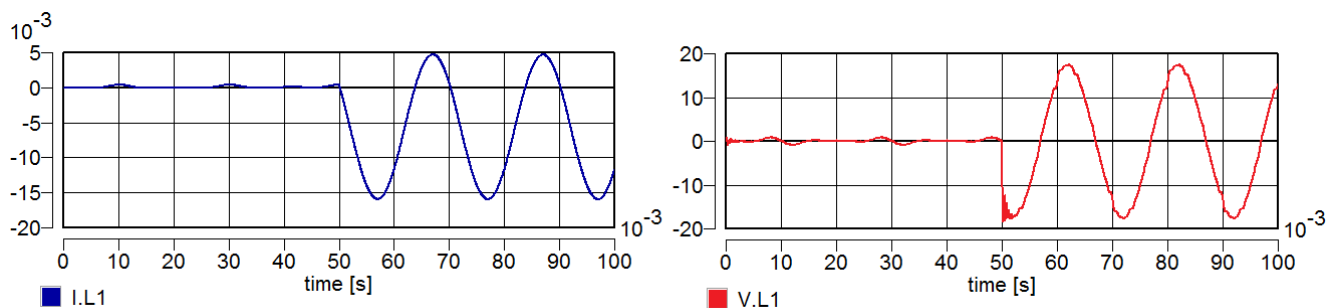
Obr. 2.11 Průběhy napětí a proudů ve fázi 1 na konci vedení V1, V2 a V3



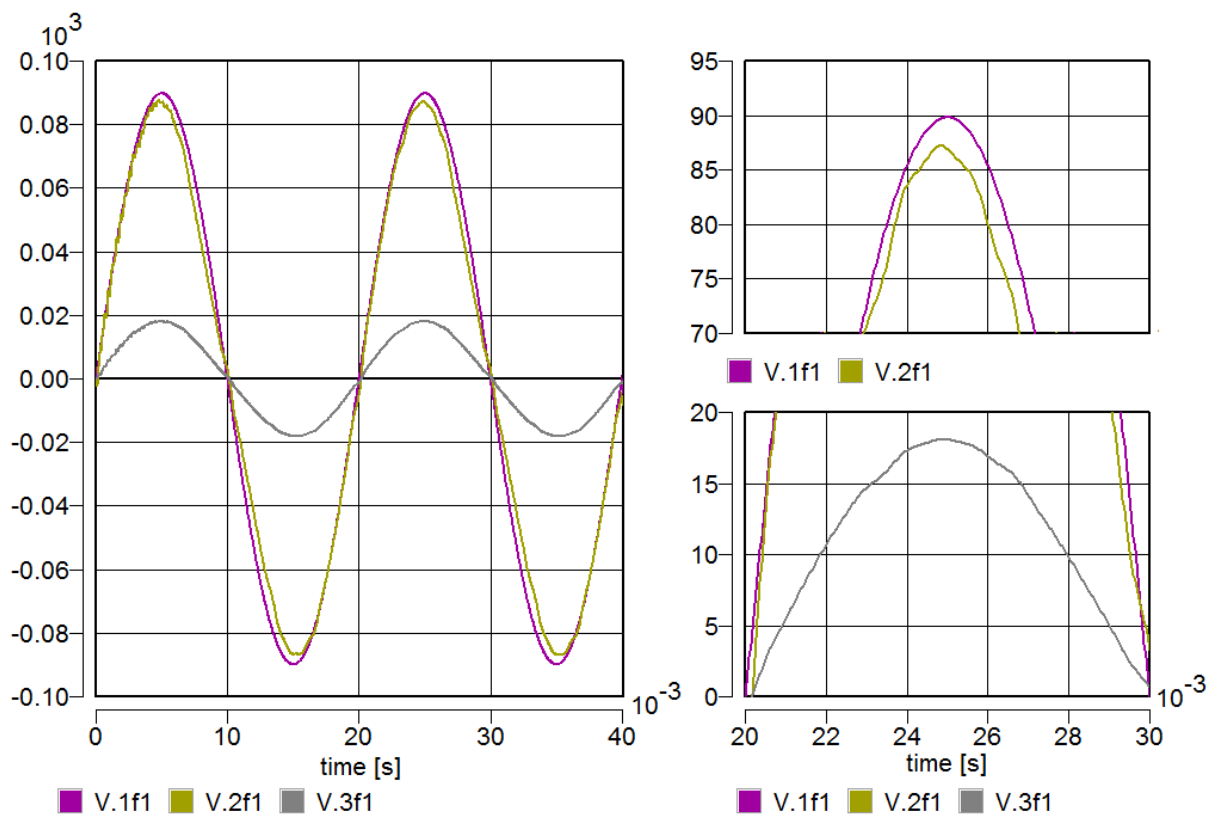
Obr. 2.12 Nesymetrie napětí na konci V2 způsobená nesymetrií vedení a detaily amplitud napětí



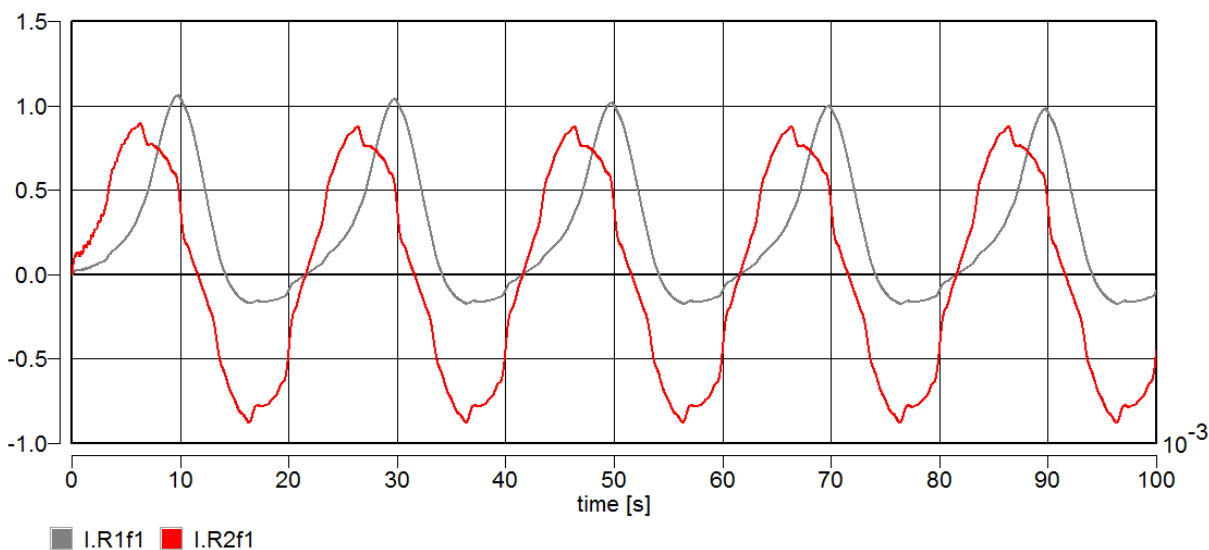
Obr. 2.13 Napětové poměry na vedení V2 při vzniku zemního spojení



Obr. 2.14 Průběhy napětí a proudu přes Petersonovu tlumivku při vzniklém zemním spojení



Obr. 2.15 Průběhy napětí na modelovaném transformátoru 110/22kV



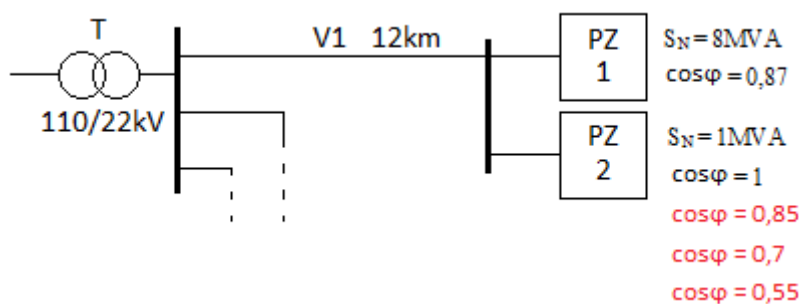
Obr. 2.16 Průběhy primárního a sekundárního proudu transformátorem

Výše uvedené grafy ukazují napětové a proudové poměry na modelu sítě z Obr. 2.10. Jak je z grafů patrné, tak svíslé osy jsou kalibrovány v kV, nebo v kA, podle zobrazované veličiny. Na prvním obrázku Obr. 2.11 jsou zobrazeny průběhy napětí a proudů na konci

každého vedení ve fázi 1. Nelineární spotřebič v průmyslovém závodě 1, modelovaný jako šesti pulzní usměrňovací můstek, může představovat například vstupní část frekvenčního měniče, který napájí indukční pece. Provoz tohoto zařízení vnáší do celé sítě nežádoucí nelinearity. Průběhy napětí a proudů na konci vedení V2 se již přibližují sinusovému tvaru, ale jak je vidět na Obr. 2.12, tak při detailním pohledu na průběhy je ještě patrná přítomnost vyšších harmonických. Nicméně proti poměrům na vedení V1 je tento stav mnohem příznivější, hlavní roli zde hrají kapacity vedení, které představují pro vyšší harmonické nejmenší cestu odporu a s narůstající délkou tedy postupně narůstá útlum ve frekvenčním spektru signálu. V malé míře pronikají nelinearity i do sítě 110kV, proud transformátorem na straně nižšího napětí je ještě poměrně deformovaný, ale velká indukčnost transformátoru vyhladí skokové změny proudu a na straně vyššího napětí je již tvar křivky odebíraného proudu příznivější. Případný vznik zemního spojení v takovéto síti zvýrazní vliv vyšších harmonických v nepostižených fázích, ale jinak se podle výše zobrazených výsledků nijak nezmění napětové a proudové poměry od klasické situace. Problém může u rozsáhlejší sítě nastat se zhášením zemního spojení, protože Petersonova tlumivka kompenzuje pouze 1. harmonickou složku kapacitního poruchového proudu. Nesymetrie napětí způsobená nesymetrií venkovního vedení jen lehce odlišuje síť se stožáry nesoucí vodiče v jedné rovině od sítě se stožáry s trojúhelníkovým rozložením vodičů.

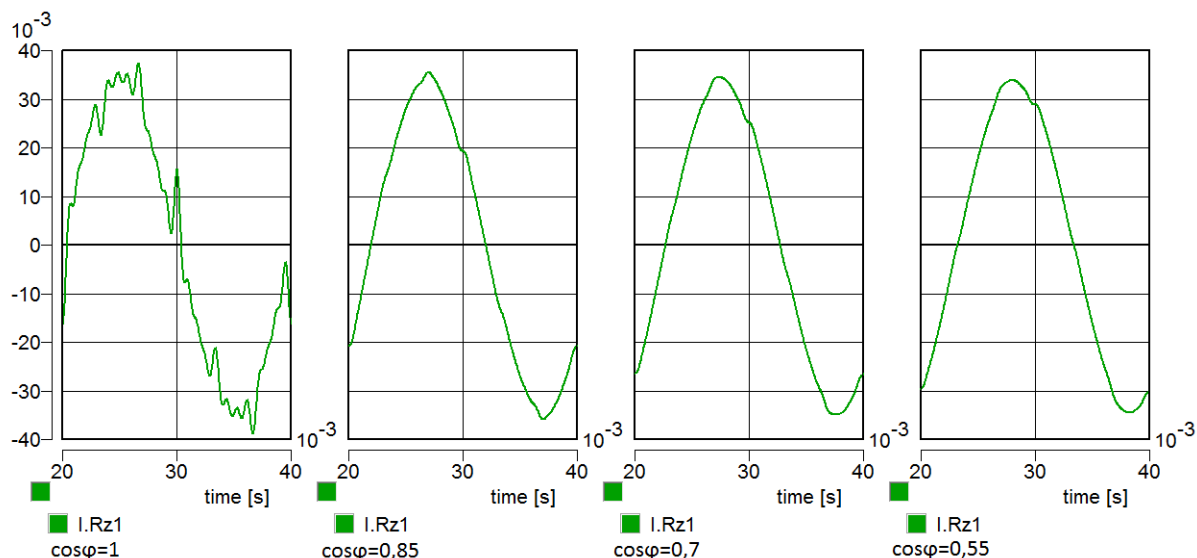
3 Výpočty pro různé stavy zátěže

Na úvod této kapitoly bude připomenuto, že pokud je k napájecímu napětí znehodnocenému vyššími harmonickými složkami připojena čistě odporové zátěž, odebírá nesinusový proud, který má stejný průběh jako napájecí napětí.



Obr. 3.1 1f schéma modelu sítě 22kV s modifikacemi zátěže v PZ2

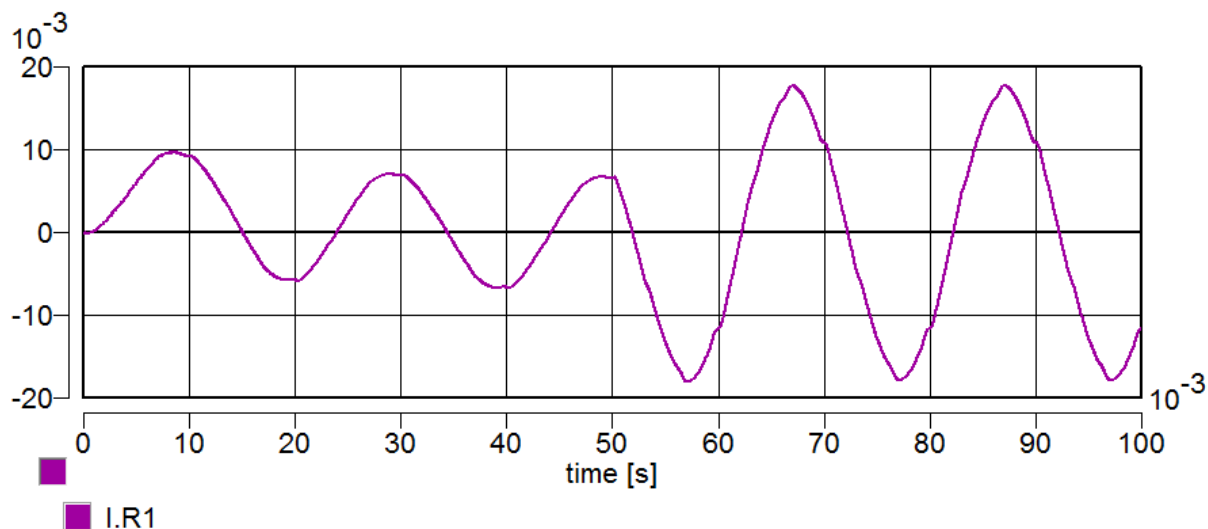
Tento stav bude připomenut na již řešené situaci z předchozí kapitoly s tím rozdílem, že modelovaná čistě odporová zátěž bude změněna na zátěž o stejné velikosti impedance, však s rozdílnými poměry činné a jalové složky a to pro $\cos\varphi=1, 0,85, 0,7$ a $0,55$. V závislosti na těchto poměrech byla sledována závislost odebíraného proudu danou zátěží.



Obr. 3.2 Průběhy odebíraných proudů zátěžemi v PZ2 s rozdílným účínkem

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že čím více jalové složky zátěž obsahuje, tím méně harmonických složek zahrnuje odebíraný proud. Závěr tohoto pokusu je logický, protože induktory, představující jalovou složku impedance zátěže, jsou frekvenčně závislé prvky a s rostoucími velikostmi indukčností představují pro vyšší harmonické vysokou cestu odporu. Napětí na společné přípojnici pro PZ1 a PZ2 mělo přitom téměř stejný průběh při všech modifikacích zátěže v PZ2 a to shodný jako proud na Obr. 3.2 pro $\cos\varphi=1$, samozřejmě v jiném měřítku. Důvodem bude fakt, že poměr výkonů v PZ1/ PZ2 je modelovaný 8/1 a proto se změny napětí téměř neprojeví, protože úbytek napětí na vedení se odvíjí hlavně od velikosti proudu neměnné zátěže v průmyslovém závodě 1 a napětí na společné přípojnici je rovno rozdílu napětí zdroje právě od úbytku napětí na vedení.

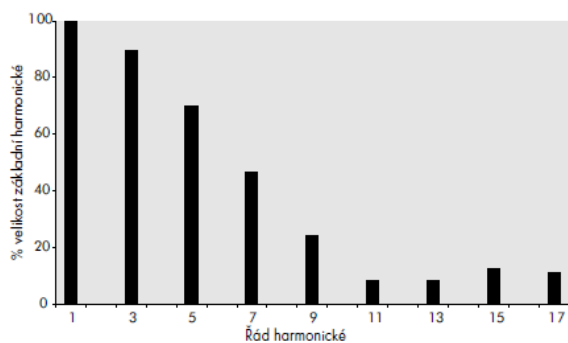
Tato problematika úzce souvisí s chodem asynchronních motorů v síti znečištěné vyššími harmonickými. U asynchronních motorů dochází se změnou zatížení i ke změnám účínku a účinnosti. Běžné hodnoty účínku u motoru běžícího naprázdno jsou kolem 0,3 a přitom hodnota proudu naprázdno dosahuje i 40% proudu jmenovitého. Při plném zatížení se pak účíník pohybuje v rozmezí od 0,7 do 0,9 podle typu motoru.



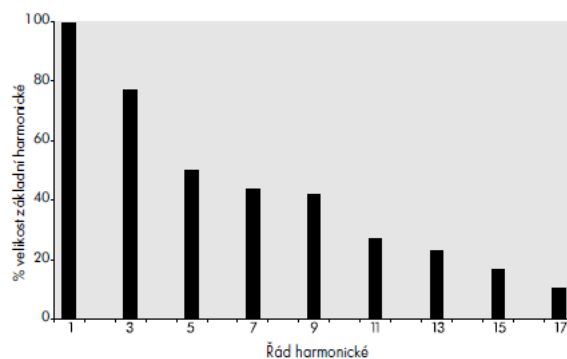
Obr. 3.3 Průběh proudu odebíraného asynchronním motorem při náhlém zatížení z chodu naprázdno

Průběh proudu asynchronního motoru z Obr. 3.3 odpovídá pokusu z Obr. 3.2, kdy jmenovitý proud obsahuje větší podíl vyšších harmonických složek než proud naprázdno z důvodu proměnného účinníku se změnou zátěže. Model asynchronního motoru použitý pro tento experiment však není zcela slučitelný se skutečností. U chodu naprázdno není zahrnuto sycení magnetického obvodu, které by do obvodů vneslo výraznější 3. harmonickou složku v odebíraném proudu, jak je naznačeno v kapitole 2.1 na straně 30 a další chybou je fakt že asynchronní motor i při sinusovém napětí odebírá nesinusový proud, lze jej tedy považovat za nelineární spotřebič (v malé míře). Tento stav je způsoben konstrukcí motoru, protože dochází ke vzniku vyšších harmonických magnetického pole z důvodu nesinusového prostorového rozložení magnetomotorických sil vinutí a tedy nesinusové časové změny proudů protékající vinutími [x]. Nutno podotknout, že toto vše platí pro asynchronní stroje připojené přímo do sítě, pokud jsou regulovány polovodičovým měničem, nastávají úplně jiné podmínky, jelikož frekvenční měniče pracují se stejnosměrným meziobvodem.

Zdrojem vyšších harmonických složek proudů, či napětí pro venkovní síť 22kV mohou být i síť 0,4kV s připojenými nelineárními spotřebiči právě na hladině 400V. Tyto spotřebiče mají obvykle příkon zanedbatelný v poměru přenášeného výkonu sítě 400V, nebo dokonce 22kV. Problém však nastává, pokud je těchto nelineárních spotřebičů shromážděno velké množství na jednom místě. Typickými moderními spotřebiči tohoto druhu jsou spínané zdroje počítačů a například elektronické předřadníky kompaktních svítidel.

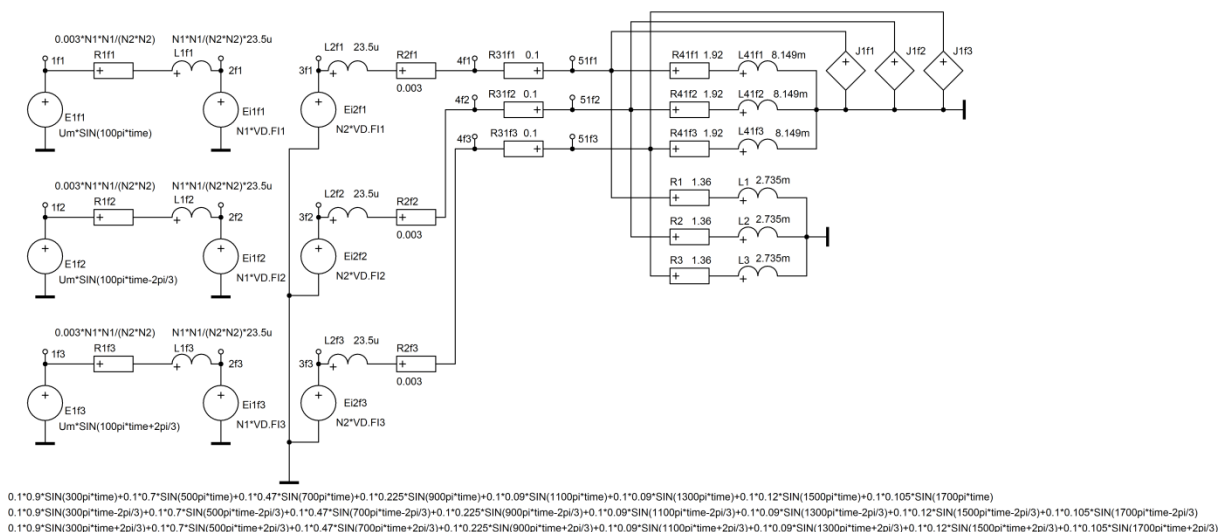


Obr. 3.4 Spektrum harmonických standardního PC



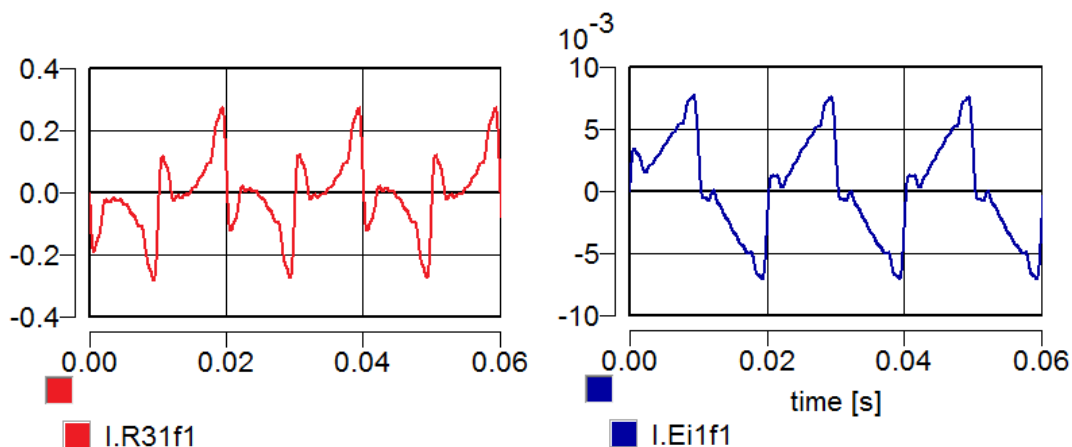
Obr. 3.5 Spektrum harmonických kompaktních svítidel

Oba tyto spotřebiče lze jistě nalézt v mnoha domácnostech, však z hlediska problematiky vyšších harmonických na vedení 22kV jsou nepodstatné. Problém nastává u napájení serveroven a např. hotely mají potíže s náhradou velkého množství klasických žárovek s wolframovým vláknem za kompaktní svítidla. Tyto případy jsou zde řešeny ve dvou částech. První částí je model sítě 400V s danými spotřebiči a výstupem je primární proud transformátoru 22/0,4kV, který bude představovat zatěžovací proud v síti 22kV.

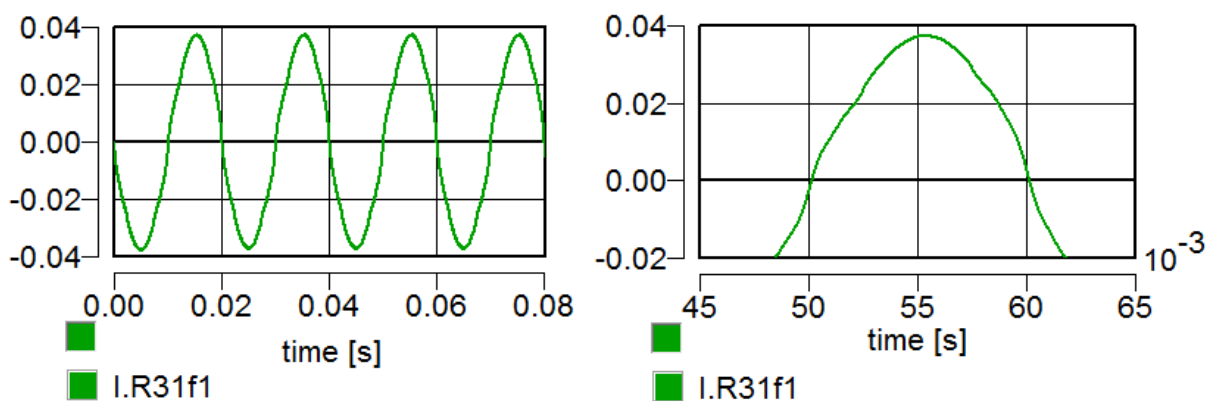


Obr. 3.6 Model sítě 400V napájející obecný spotřebič 100kVA a serverovnu 50kVA

V tomto modelu sítě 400V byl namodelován transformátor 22/0,4kV s těmito parametry: $S_{NT} = 400kVA$; $u_{K\%} = 4\%$; $i_{0\%} = 5\%$; $\Delta P_K = 6kW$; $\Delta P_0 = 930W$; $U_N = 400V$, a jako vodič byl uvažován tří fázový měděný kabel CYKY o průřezu $150mm^2$.



Obr. 3.7 Proud odebíraný nelineárním spotřebičem – serverovnou a primární proud transformátoru na napětové hladině 400V

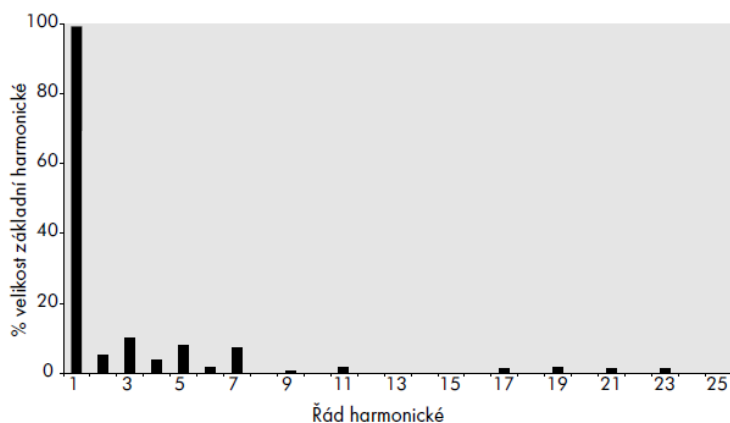


Obr. 3.8 Proud odebíraný transformátorem 22/0,4kV superponovaný na proud ostatní všeobecné zátěže v síti 22kV na konci vedení V1 ve fázi 1

Z následné analýzy zobrazených výsledků vyplynulo, že vliv sítě 400V na síť 22kV je z hlediska vyšších harmonických zanedbatelný, přítomnost vyšších harmonických je patrná jen na průběhu proudu na konci vedení V1, které napájí distribuční transformátor 22/0,4kV a další obecnou zátěž. Ostatní veličiny v jiných místech sítě 22kV byli i po detailním přiblížení sinusové. Aby se nelineární spotřebiče připojené na 400V projeví i v síti 22kV, musel by být venkovním vedením přenášen jen příkon distribučního transformátoru napájející tyto spotřebiče. Tato situace je v praxi možná, ale spíše ojediněle, jako například přívodní vedení pro malou, špatně dostupnou vesničku, kde vedení 22kV je málo zatížené, ale pro svou délku nutné z hlediska úbytku napětí. Při této predikci je ale velmi nepravděpodobné, že ve zmíněné vesnici bude umístěna serverovna, nebo velká budova osvětlená kompaktními svítilidly. Tato problematika spíše zasahuje jednak do sítě 400V a hlavně do městských aglomerací, kde spolu s relativně velkým příkonem ostatních spotřebičů budou panovat opět jiné poměry.

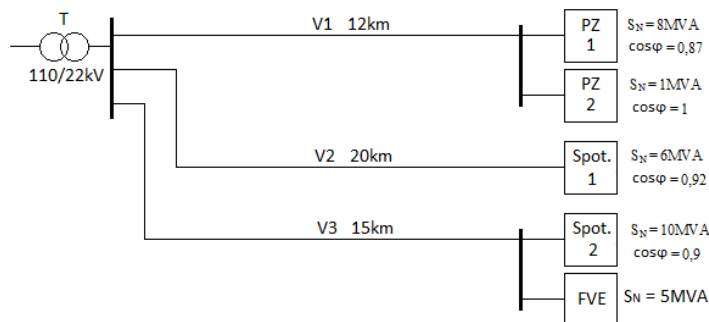
Pokud se zamyslíme jaké lze v technické praxi nalézt nejčastější a největší nelineární spotřebiče v síti s napětovou hladinou 22kV, pak i odpověď, že žádné nejsou, je v pořádku, neboť napětí 22kV je pro majoritní většinu spotřebičů příliš veliké. Mezi těmito spotřebiči a sítí 22kV byl vždy zanedbán alespoň jeden transformátor (např. 22/6kV), který by napětové a proudové poměry pro vyšší harmonické nepatrně změnil. Nicméně největšími a nejčastějšími nelineárními spotřebiči připojené tedy přes transformátor do sítě 22kV jsou bezpochyby polovodičové měniče. Nalezli bychom je ve všech zařízeních na bázi výkonové elektroniky, jako jsou regulované pohony, elektrické pece, velké UPS jednotky, svařovací agregáty atd. Jsou schopny pracovat s výkonem v řádech MW až desítky MW. Velká část měničů přitom pracuje se stejnosměrným meziobvodem, takže se opět dostáváme na již řešený příklad s usměrňovačem v kapitole 2.4.

Mezi polovodičové měniče patří jistě i střídače, které jsou nutnou výbavou každé fotovoltaické elektrárny. Ty se v posledních několika letech hojně budovali kvůli slíbenému zisku za vyrobenou „zelenou“ energii a tyto elektrárny jsou většinou připojovány právě do sítě 22kV. Zmíněné střídače nejen že zhoršují účinnost celé přeměny světla na elektrickou energii, ale také přispívají do sítě vyššími harmonickými složkami.

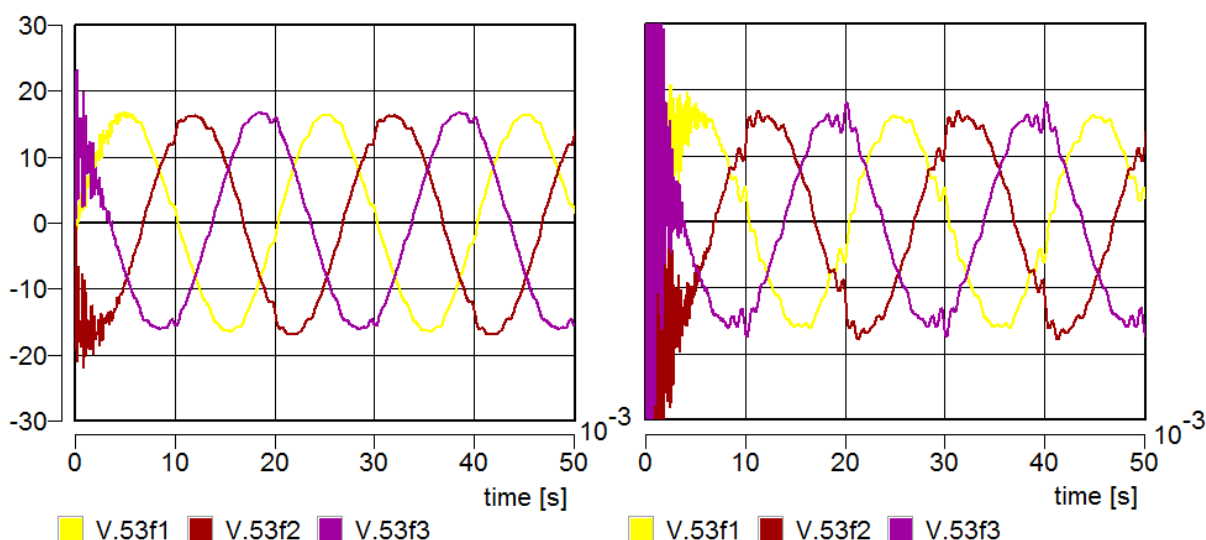


Obr. 3.9 Spektrum harmonických proudů dodávaného do sítě střídačem z FVE

Na výše uvedeném obrázku je spektrum dodávaného proudu z měniče fotovoltaické elektrárny, spektrum bylo získáno na webových stránkách nejmenovaného výrobce měničů, který považuje své výrobky za kvalitní. Oproti spektru např. spínaných zdrojů počítačů je tento stav mnohem příznivější, ale při představě, že největší fotovoltaická elektrárna na území České republiky má podle webu Wikipedie, výkon 38,2MW, je i toto spektrum dostačující pro silné rušení, obzvláště v blízkém okolí připojení elektrárny do veřejné sítě.



Obr. 3.10 Schéma sítě s připojenou FVE, v PZ1 modelovaná rušící zátěž



Obr. 3.11 Průběhy napětí před a po připojení FVE k vedení V3

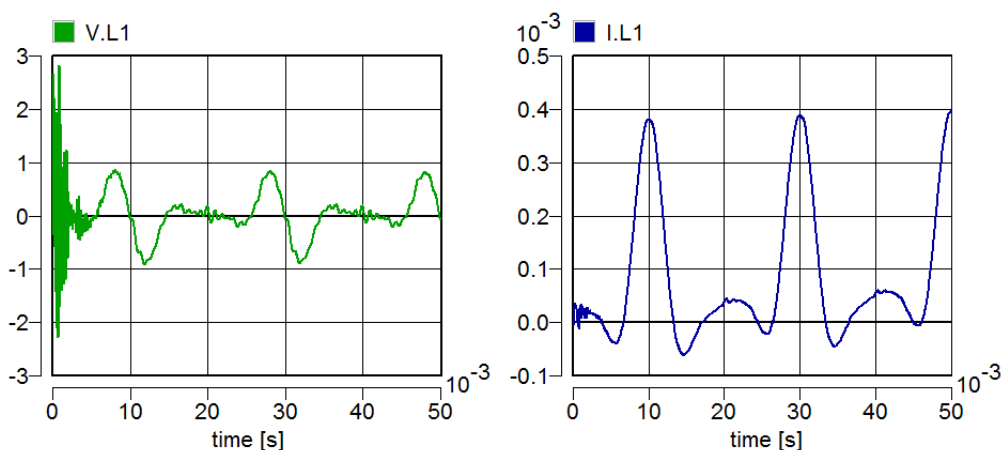
Po připojení FVE o výkonu 5MVA k modelované síti se změnila napětová a proudová poměry v celé síti, nejvýrazněji však v místě připojení. Křivka napětí je výrazně deformována i na konci vedení V2 oproti stavu před připojením. Proud odebíraný obecnými zátěžemi z hlediska vyšších harmonických je opět závislý na podílu jalové složky impedance dané zátěže. Z tohoto modelu není vidět další nevýhoda FVE a to kolísání napětí v závislosti na intenzitě osvětlení fotovoltaických panelů, je však nutné brát tuto situaci jako modelovanou, ve skutečnosti by provozovatel sítě 22kV možná ani neumožnil připojení dvou takto rušících spotřebičů do této relativně malé sítě bez použití pasivních či aktivních filtrů. Nicméně při tomto stavu je patné jak je Petersonova tlumivka zatížena vlivem existence vyšších harmonických složek. Tato problematika úzce souvisí i s přetěžováním středního vodiče ve 3f obvodech sítě 0,4kV, protože jestliže se při stejném zatížení fází proud základní harmonické

ve středním vodiči neobjeví, nelze to bohužel říci o proudech harmonických, kde proudy 3. harmonické a jejich násobků se naopak ve středním vodiči sčítají.

$$I_{B3} = I_{A3} \cdot e^{-j \cdot 3 \cdot 120^\circ}$$

$$I_{C3} = I_{A3} \cdot e^{j \cdot 3 \cdot 120^\circ}$$

3. harmonické a jejich násobky tak přispívají k netočivé složce proudu [2].



Obr. 3.12 Průběh napětí a proudu na Petersonově tlumivce

4 Zhodnocení dosažených výsledků

Hodnoty pasivních parametrů vedení pro matematický model vyšli podle teoretických předpokladů. Spočítána byla varianta jak pro stožáry nesoucí vodiče v rovinném uspořádání, tak i pro uspořádání vodičů do trojúhelníka. U první varianty byla brána v úvahu mezifázová rozteč 50cm, což odpovídá nově budovaným stožárům, dřívější typy stožárů měli rozteče o něco větší, takže by při výpočtech pasivních parametrů vyšli větší indukčnosti a menší kapacity. U stožárů nesoucích vodiče v trojúhelníku stojí za povšimnutí, že i přes to, že

Parametr	Vodiče v jedné rovině	Vodiče v trojúhelníku
R [Ω/km]	0,1693	0,1693
L _a [mH/km]	0,91	1,061
L _b [mH/km]	0,832	1,056
L _c [mH/km]	0,91	1,061
C _a [nF/km]	12,93	10,95
C _b [nF/km]	14,74	10,95
C _c [nF/km]	12,93	10,95

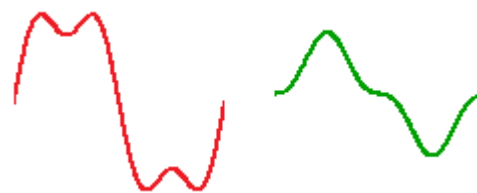
Tab. 4.1 Souhrn pasivních parametrů venkovního vedení 22kV s lany AIFe 185/31

se nejedná o trojúhelník rovnostranný, ale pouze rovnoramenný (mezifázové rozteče 160cm, 152,6 a 152,6cm), jsou hodnoty indukčnosti téměř stejné a velikosti kapacit se lišili až na šestém desetinném místě. Nutno dodat že pro výpočet byli uvažovány symetrické aktivní parametry.

Při modelování nelineárních spotřebičů za pomoci jejich spektrální analýzy je do modelů vnesena chyba, způsobená tím, že z daného spektra nelze odečíst konkrétní zápis pro daný nesinusový průběh. Pokud by například spektrum obsahovalo kromě základní harmonické také 30% 3. harmonické složky, pak je možný dvojitý zápis s rozdílným výsledkem:

$$100 * \sin(100\pi * time) + 30 * \sin(100\pi * time)$$

$$100 * \sin(100\pi * time) - 30 * \sin(100\pi * time)$$



Spektrum obsahující 10 harmonických, pak můžeme zapsat mnoha různými kombinacemi jednotlivých složek. Výsledný modelovaný průběh se tedy může lišit od skutečného, nicméně všechny harmonické složky odpovídají spektru svou četností, proto můžeme tuto chybu považovat jen za „kosmetickou“ a není tedy nějak fatální.

Všechny modelované situace potvrdili teoretické předpoklady, připojení nelineárního spotřebiče, bez opatření eliminujících šíření vyšších harmonických dál do napájecí sítě, přináší provozovateli mnoho nežádoucích problémů. Obecně lze říci, že přenos elektrické energie v takovéto síti je nákladnější, neboť vznikají přídavné ztráty, navíc jsou ovlivňována všechna zařízení do této sítě připojená. Nejvíce znevýhodněné jsou ty spotřebiče, které jsou připojeny v blízkosti nelineární zátěže, pro vzdálenější zařízení panují již trochu příznivější napětové a proudové poměry, neboť zde hrají důležitou roli kapacity vedení, které se více či méně podílejí na útlumu harmonických složek, v závislosti na celkové délce vedení. Vyššími harmonickými jsou více zatížena nejen samotná vedení, ale např. i transformátory a Petersova tlumivka. Při případném zemním spojení pak může být problém se zhášením oblouku, protože tlumivka kompenzuje pouze 1. harmonickou poruchového kapacitního proudu. Nejčetnějšími nelineárními spotřebiči jsou polovodičové měniče, které jsou součástí mnoha zařízení a představují tedy možný, relativně velký příkon rušivého charakteru. Bez instalace filtrů vyšších harmonických, alespoň u větších nebo silně rušících spotřebičů by se pak mohly dostávat nelinearity i do vyšší napětové hladiny čímž by se už tak velké problémy ještě znásobili.

Použitá literatura

- [1] Jiřina MERTLOVÁ, doc. Ing. CSc., Ing. Pavla HEJTMÁNKOVÁ, Ph.D. a Ing. Tomáš TAJTL. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vydání. Plzeň: TYPOS - Digital Print, spol. s r.o., Plzeň, 2004, s. 189. ISBN 80-7043-307-8.
- [2] Miloslava TESAŘOVÁ, doc. Ing. Ph.D., *Přednášky z předmětu Průmyslová energetika (KEE/PE)*.
- [3] Koncepce venkovních sítí VN: Příloha č. 5. *ČEZ Distribuce* [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-5.doc>
- [4] Zdeněk FEJT, doc. Ing. CSc. a Ing. Jaroslav ČERMÁK, CSc. *Elektroenergetika*. 3. vydání. Ostrava: Moravské tiskařské závody, n. p., provoz 21, Novinářská 7, Ostrava, 1989, s. 359. ISBN 80-01-00060-5
- [5] Softwarový systém DYNAST. [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://virtual.cvut.cz/dynastcz/>

Kopírované obrázky:

Obr. 1.1 Jiřina MERTLOVÁ, doc. Ing. CSc., Ing. Pavla HEJTMÁNKOVÁ, Ph.D. a Ing. Tomáš TAJTL. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vydání. Plzeň: TYPOS - Digital Print, spol. s r.o., Plzeň, 2004, s. 189. ISBN 80-7043-307-8.

Obr. 1.3, Obr. 1.4, Obr. 1.7, Obr. 1.8

Zdeněk FEJT, doc. Ing. CSc. a Ing. Jaroslav ČERMÁK, CSc. *Elektroenergetika*. 3. vydání. Ostrava: Moravské tiskařské závody, n. p., provoz 21, Novinářská 7, Ostrava, 1989, s. 359. ISBN 80-01-00060-5

Obr. 2.3 Softwarový systém DYNAST. [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://virtual.cvut.cz/dynastcz/>

Obr. 2.5, Obr. 3.4, Obr. 3.5

Harmonické: Kvalita elektrické energie. *MedPortal: Elektrické vedení* [online]. 2007 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.medportal.cz/elektricke-vedeni/kvalita-elektricke-energie/harmonicke>

Obr. 3.9 Měníče firmy Control Techniques pro fotovoltaické elektrárny. [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.controltechniques.cz/pdf/KonferenceELPO09.pdf>

Seznam příloh

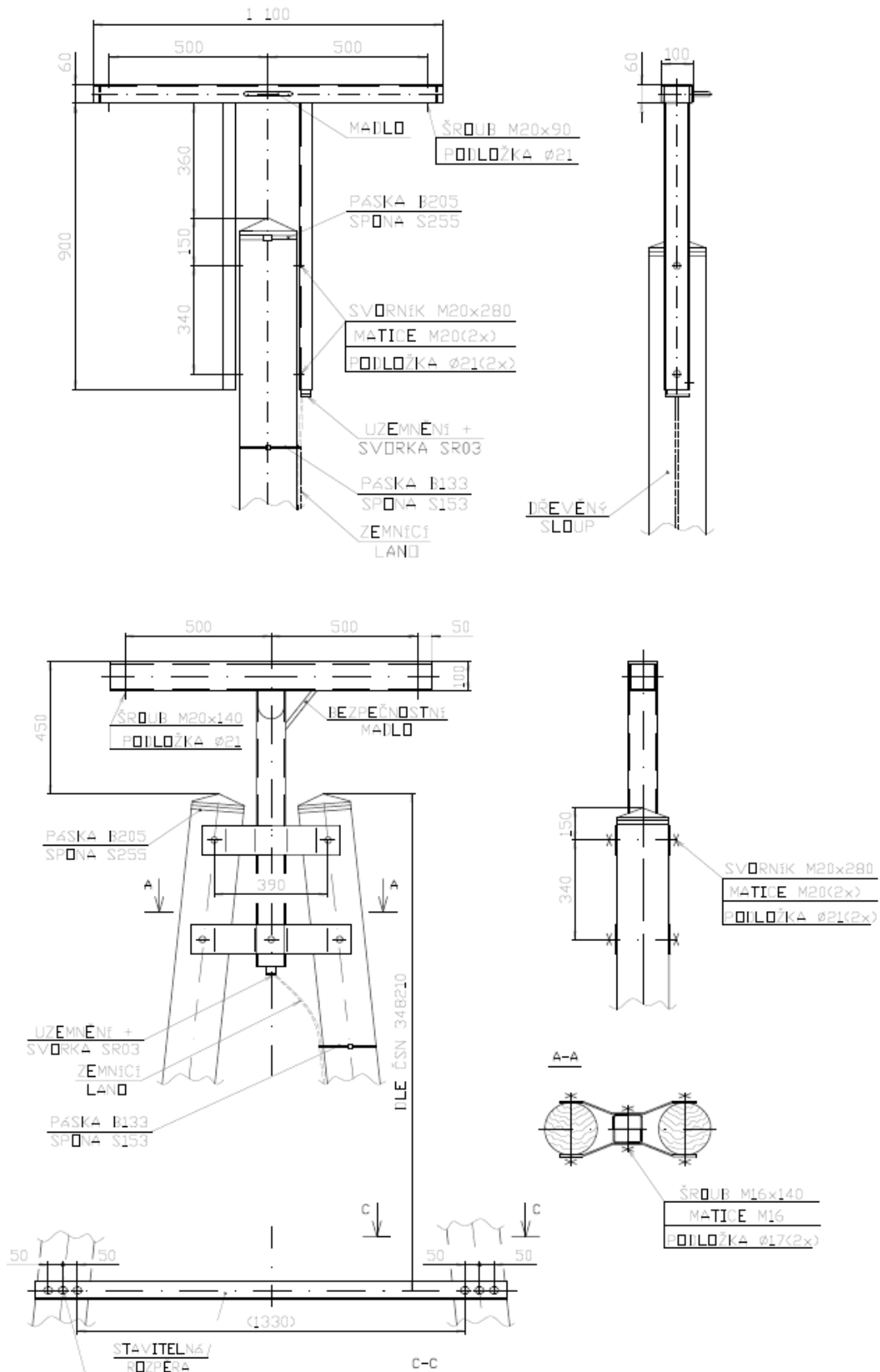
Příloha 1 – Konzole pro dřevěný sloup – rovinné uspořádání vodičů

Příloha 2 – Konzole odbočná pro dřevěný sloup – uspořádání vodičů do trojúhelníka

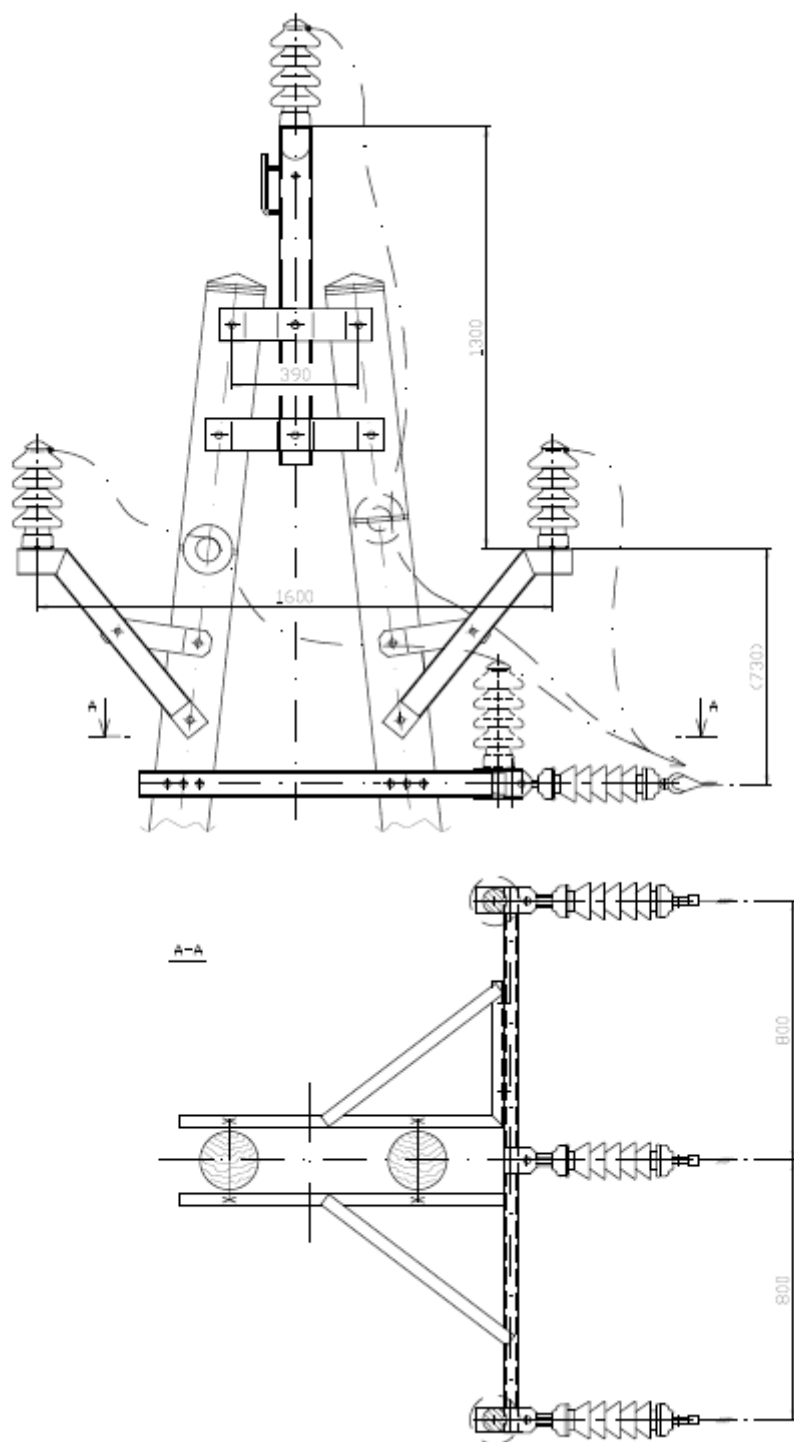
Příloha 3 – Konzole typu pařát pro dřevěné sloupy

Příloha 4 – Model sítě 22kV vytvořený v systému Dynast

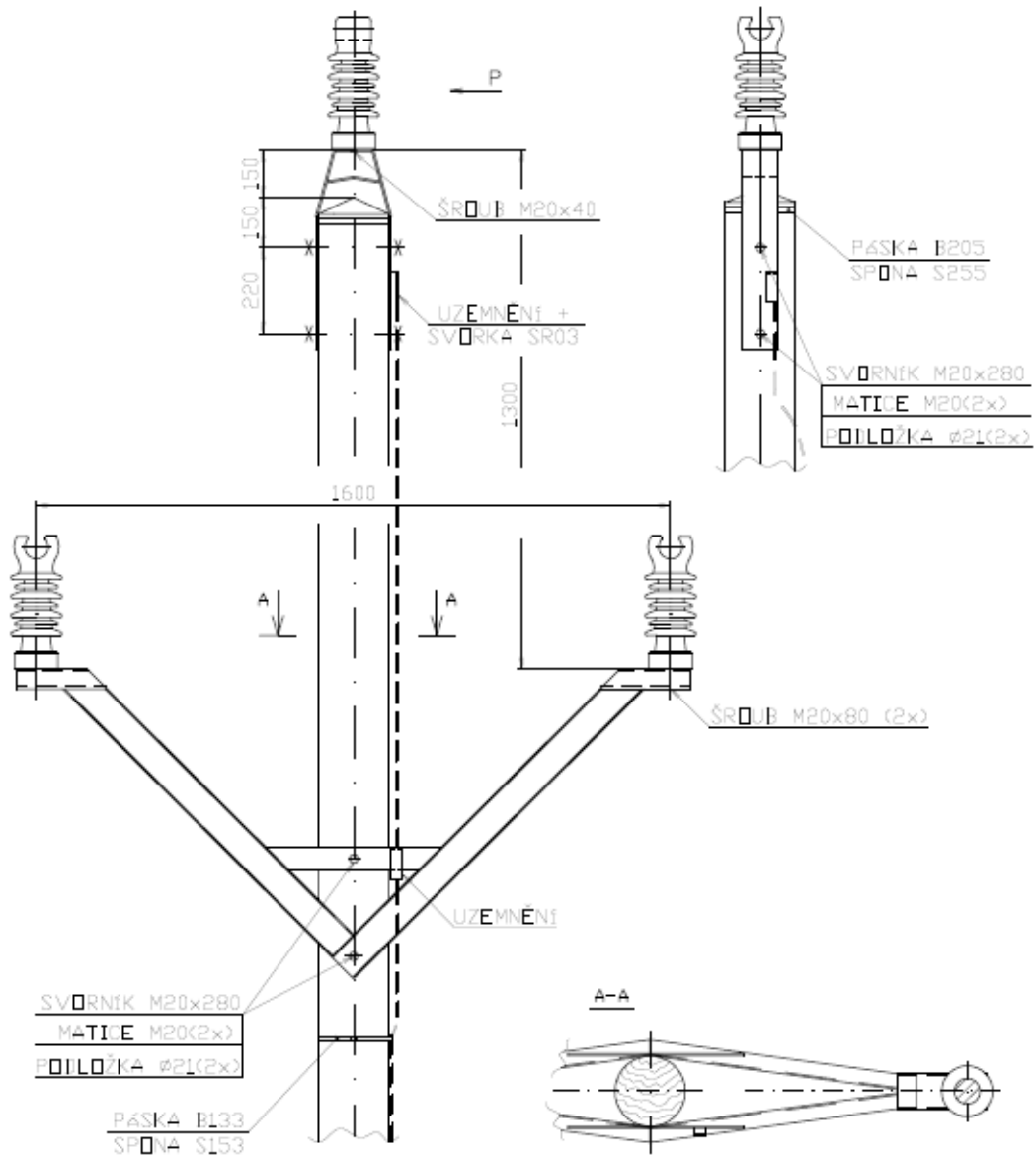
Příloha 1 - Konzole IZVE-D-6-J a IZVE-D-6-A pro dřevěné sloupy vyráběné firmou Energetika Servis s.r.o. (<http://www.energetika-servis.cz/tp.html>)



Příloha 2 - Konzole ODBOČNÁ-DS-PŘÍMÁ pro dřevěné sloupy vyráběné firmou Energetika Servis s.r.o. (<http://www.energetika-servis.cz/tp.html>)



Příloha 3 - Konzole PAŘÁT-DS-N-J pro dřevěné sloupy vyráběné firmou Energetika Servis s.r.o. (<http://www.energetika-servis.cz/tp.html>)



Model sítě 22kV

Purpose

Model sítě 22kV

Description

Model sítě 22kV s Rovinné uspořádání vodičů

Solution

System Parameters

$$N_1 = 110000$$

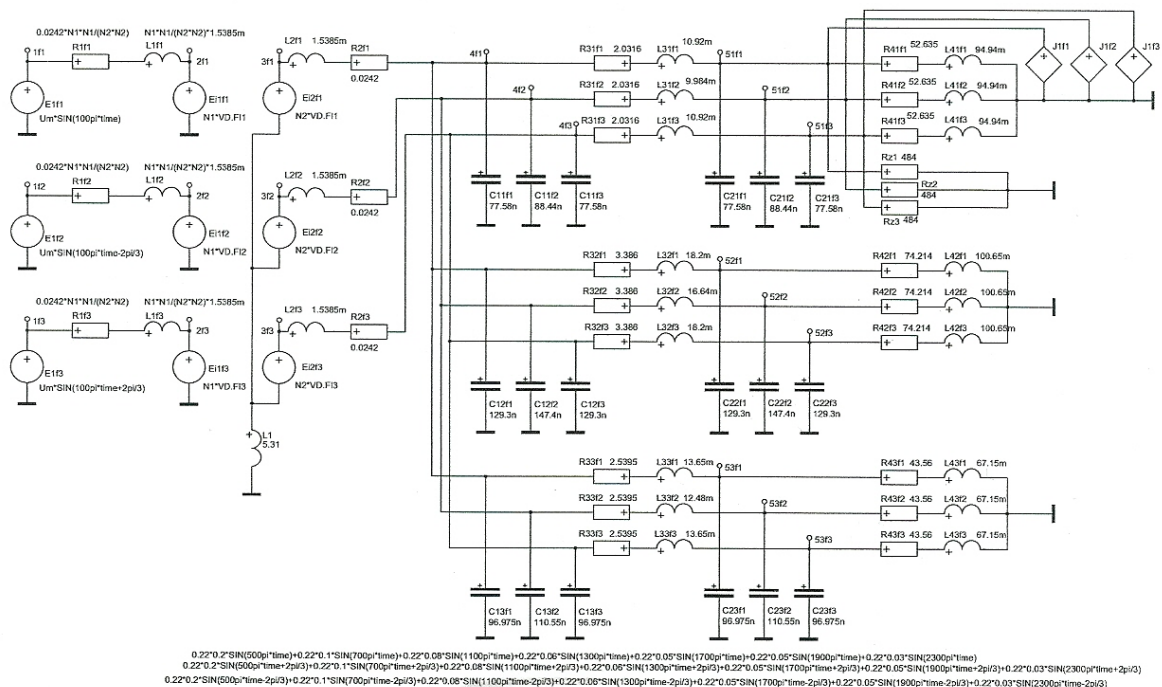
$$N_2 = 23000$$

$$U_m = 110/\sqrt{3} * \sqrt{2}$$

$$\omega_{mega} = 100\pi$$

$$U_k = 0.1$$

Model



Data

*: Model sítě 22kV

*SYSTEM;

Page: 2

Example: P5

```

sysvar FI1, FI2, FI3;
N1=110000;
N2=23000;
Rm=N2*N2/3.09;
MGODPOR /TAB/ 0,Rm, 1u,Rm, 5u,100*Rm;

Um=110/sqrt(3)*sqrt(2);
omega=100pi;
Uk = 0.1;
MGODPOR2f1=Rm*EXP(ABS(FI1*1e6));
0 = FI1-(N1*I.Ei1f1+N2*I.Ei2f1)/MGODPOR2f1;
MGODPOR2f2=Rm*EXP(ABS(FI2*1e6));
0 = FI2-(N1*I.Ei1f2+N2*I.Ei2f2)/MGODPOR2f2;
MGODPOR2f3=Rm*EXP(ABS(FI3*1e6));
0 = FI3-(N1*I.Ei1f3+N2*I.Ei2f3)/MGODPOR2f3;
C11f1 4f1 = 77.58n;
C21f1 51f1 = 77.58n;
R31f1 4-4f1 = 2.0316;
R41f1 51f1-5 = 52.635;
L31f1 4-51f1 = 10.92m;
L41f1 5 = 94.94m;
C12f1 4f1 = 129.3n;
C22f1 52f1 = 129.3n;
R32f1 6-4f1 = 3.386;
R42f1 52f1-7 = 74.214;
L32f1 6-52f1 = 18.2m;
L42f1 7 = 100.65m;
C13f1 4f1 = 96.975n;
C23f1 53f1 = 96.975n;
R33f1 8-4f1 = 2.5395;
R43f1 53f1-9 = 43.56;
L33f1 8-53f1 = 13.65m;
L43f1 9 = 67.15m;
R31f2 10-4f2 = 2.0316;
L31f2 10-51f2 = 9.984m;
R31f3 11-4f3 = 2.0316;
L31f3 11-51f3 = 10.92m;
C11f2 4f2 = 88.44n;
C11f3 4f3 = 77.58n;
R41f2 51f2-12 = 52.635;
L41f2 12 = 94.94m;
R41f3 51f3-13 = 52.635;
L41f3 13 = 94.94m;
C21f2 51f2 = 88.44n;
C21f3 51f3 = 77.58n;
R32f2 14-4f2 = 3.386;
L32f2 14-52f2 = 16.64m;
R32f3 15-4f3 = 3.386;
L32f3 15-52f3 = 18.2m;
C12f2 4f2 = 147.4n;
C12f3 4f3 = 129.3n;
L42f2 16 = 100.65m;
R42f2 52f2-16 = 74.214;
L42f3 17 = 100.65m;
R42f3 52f3-17 = 74.214;
C22f2 52f2 = 147.4n;

```

```

C22f3 52f3 = 129.3n;
L33f2 18-53f2 = 12.48m;
R33f2 18-4f2 = 2.5395;
L33f3 19-53f3 = 13.65m;
R33f3 19-4f3 = 2.5395;
R43f2 53f2-20 = 43.56;
L43f2 20 = 67.15m;
R43f3 53f3-21 = 43.56;
L43f3 21 = 67.15m;
C13f2 4f2 = 110.55n;
C13f3 4f3 = 96.975n;
C23f2 53f2 = 110.55n;
C23f3 53f3 = 96.975n;
E1f1 1f1 = Um*SIN(100pi*time);
R1f1 1f1-1 = 0.0242*N1*N1/(N2*N2);
L1f1 1-2f1 = N1*N1/(N2*N2)*1.5385m;
L2f1 3f1-2 = 1.5385m;
R2f1 2-4f1 = 0.0242;
Ei1f1 2f1 = N1*VD.FI1;
Ei2f1 3f1-3 = N2*VD.FI1;
E1f2 1f2 = Um*SIN(100pi*time-2pi/3);
R1f2 1f2-22 = 0.0242*N1*N1/(N2*N2);
L1f2 22-2f2 = N1*N1/(N2*N2)*1.5385m;
L2f2 3f2-23 = 1.5385m;
R2f2 23-4f2 = 0.0242;
Ei1f2 2f2 = N1*VD.FI2;
Ei2f2 3f2-3 = N2*VD.FI2;
E1f3 1f3 = Um*SIN(100pi*time+2pi/3);
R1f3 1f3-24 = 0.0242*N1*N1/(N2*N2);
L1f3 24-2f3 = N1*N1/(N2*N2)*1.5385m;
L2f3 3f3-25 = 1.5385m;
R2f3 25-4f3 = 0.0242;
Ei1f3 2f3 = N1*VD.FI3;
Ei2f3 3f3-3 = N2*VD.FI3;
L1 3 = 5.31;
J1f1 51f1 = 0.22*0.2*SIN(500pi*time)+0.22*0.1*SIN(700pi*
time)+0.22*0.08*SIN(1100pi*time)+0.22*0.06*SIN(1300pi*
time)+0.22*0.05*SIN(1700pi*time)+0.22*0.05*SIN(1900pi*
time)+0.22*0.03*SIN(2300pi*time);
J1f3 51f3 = 0.22*0.2*SIN(500pi*time-2pi/3)+0.22*0.1*SIN(
700pi*time-2pi/3)+0.22*0.08*SIN(1100pi*time-2pi/3)+0.22*
0.06*SIN(1300pi*time-2pi/3)+0.22*0.05*SIN(1700pi*
time-2pi/3)+0.22*0.05*SIN(1900pi*time-2pi/3)+0.22*0.03*
SIN(2300pi*time-2pi/3);
J1f2 51f2 = 0.22*0.2*SIN(500pi*time+2pi/3)+0.22*0.1*SIN(
700pi*time+2pi/3)+0.22*0.08*SIN(1100pi*time+2pi/3)+0.22*
0.06*SIN(1300pi*time+2pi/3)+0.22*0.05*SIN(1700pi*time+
2pi/3)+0.22*0.05*SIN(1900pi*time+2pi/3)+0.22*0.03*SIN(
2300pi*time+2pi/3);
Rz1 51f1 = 484;
Rz2 51f2 = 484;
Rz3 51f3 = 484;
*TR;
TR 0 0.2;
PRINT(3001) I.L1, V.2f2, V.3f2, V.1f2, V.1f1, V.2f1, V.3f1, V.1f3,
V.2f3, V.3f3, V.4f1, V.4f2, V.4f3, V.53f1, V.52f1,

```

Page: 4

Example: P5

```
V.51f1, V.51f2, V.52f2, V.53f2, V.52f3, V.53f3, V.51f3,  
I.R1f1, I.R1f2, I.R1f3, I.R2f3, I.R2f2, I.R2f1, I.R41f3,  
I.R41f2, I.R41f1, I.R31f2, I.R31f3, I.R31f1, I.R32f1,  
I.R42f1, I.R32f2, I.R32f3, I.R42f2, I.R42f3, I.R43f2,  
I.R43f3, I.R43f1, I.R33f1, I.R33f2, I.R33f3;
```

```
RUN;  
*END;
```

Last Update

April 17, 2012