

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher CSc.

2013

autor: Bc. Martin Pero

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin PERO**
Osobní číslo: **E11N0127P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Napěťové a proudové poměry na venkovním vedení pro různé harmonické**
Zadávající 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. Vypočtete napěťové poměry na venkovním vedení při zkratech.
2. Určete nabíjecí proud při připojení delšího vedení ve stavu naprázdno.
3. Popište jak probíhá přenos vyšších harmonických po vedení, co to znamená, jaké problémy to přináší pro soustavu.
4. Proveďte výpočet zkratových proudů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Artur R. Bergen, Vijay Vittal: Power systems analysis, Upper Saddle River, New Jersey, 2000
2. Mertlová, J.: Přenos a rozvod el energie, ZCU Plzeň
3. Ibler, Z. a kol.: Energetika, BEN, Praha, 2002
4. William D. Stevenson: Elements of power system analysis, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1982
5. Kolcun, M., Mühlbacher, J., Haller, R. : Mathematical analysis of electrical networks, BEN, Praha, 2004

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Téma: Napěťové a proudové poměry na venkovním vedení pro různé harmonické

Tato diplomová práce se zabývá proudovými a napěťovými poměry na venkovním vedení 22 kV, které je postiženo účinky vyšších harmonických proudů a napětí. Práce se též zabývá poměry v soustavě při vzniku zkratu u jednoho z odběrů.

Klíčová slova

Venkovní vedení, napěťové a proudové poměry, vyšší harmonické, nabíjecí proud, zkrat, DYNAST

Abstract

Theme: Voltage and current condition on the HV transmission lines owing to over harmonics

This thesis deals with the current and voltage ratios on outside power line 22 kV, which is affected by the effects of overharmonics currents and voltages. Furthermore the thesis deals with ratios in the system when a short circuit on the power lines.

Keywords

Overhead lines, voltage and currents ratios, over harmonics, charging current, short-circuit, DYNAST

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni, dne 6.5.2013

Bc. Martin Pero

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi pomohli či jinak přispěli v mém studiu na Západočeské univerzitě v Plzni. Především pak děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc. a konzultantovi Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odbornou pomoc při našich konzultacích k diplomové práci.

Bc. Martin Pero

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD	10
2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	11
2.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA	12
2.2 ROZVODNÁ SOUSTAVA	12
2.3 NAPĚŤOVÉ ÚROVNĚ	13
2.4 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH SÍTÍ Z HLEDISKA NULOVÉHO BODU [1]	14
2.4.1 <i>Sítě izolované</i>	15
2.4.2 <i>Sítě neúčinně uzemněné</i>	17
2.4.3 <i>Sítě účinně uzemněné</i>	19
3 ELEKTRICKÁ VEDENÍ	19
3.1 KABELOVÁ VEDENÍ	20
3.2 VENKOVNÍ VEDENÍ	20
3.2.1 <i>Model venkovního vedení</i>	21
3.3 FERRANTIHO JEV	21
3.3.1 <i>Příklad výpočtu</i>	23
3.4 VLNOVÁ IMPEDANCE A PŘIROZENÝ VÝKON VEDENÍ	25
4 VYŠŠÍ HARMONICKÉ	27
4.1 MODEL VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	28
4.2 ZDROJE VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	30
4.3 ÚČINKY VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	31
4.4 OPATŘENÍ ELIMINUJÍCÍ VYŠŠÍ HARMONICKÉ	39
5 MODELOVÁNÍ SÍTĚ V PROGRAMU DYNAST	43
5.1 SIMULAČNÍ SYSTÉM DYNAST	43
5.2 TVORBA MODELU SOUSTAVY 22 kV	44
5.3 NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ POMĚRY V SÍTI 22 kV	50

5.4	VLIV NELINEÁRNÍHO SPOTŘEBIČE NA HLADINĚ 0,4 kV NA SÍŤ 22 kV	53
5.5	PROUDOVÉ A NAPĚŤOVÉ POMĚRY PŘI 2F A 3F ZKRATU	55
5.5.1	<i>Napěťové poměry</i>	56
5.5.2	<i>Proudové poměry</i>	58
6	ZÁVĚR	60
7	LITERATURA	61
8	PŘÍLOHA	62

Seznam symbolů

X_L	(Ω)	induktivní reaktance
X_C	(Ω)	kapacitní reaktance
U, I, Z	(V, A, Ω)	napětí, proud a impedance
U_h, I_h, Z_h	(V, A, Ω)	napětí, proud a impedance určité harmonické
U_f, U_s	(V)	fázové a sdružené napětí
PCC		bod společného napájení
HDO		hromadné dálkové ovládání
L	(H)	indukčnost
C	(F)	kapacita
R	(Ω)	elektrický odpor
B	(S)	susceptance
$\cos \varphi$	(-)	účinník
λ	(-)	skutečný účinník
P	(W)	činný výkon
Q	(VAr)	jalový výkon
S	(VA)	zdánlivý výkon
ω	(rad/s)	úhlová rychlost
f	(Hz)	frekvence
l	(km)	délka

1 Úvod

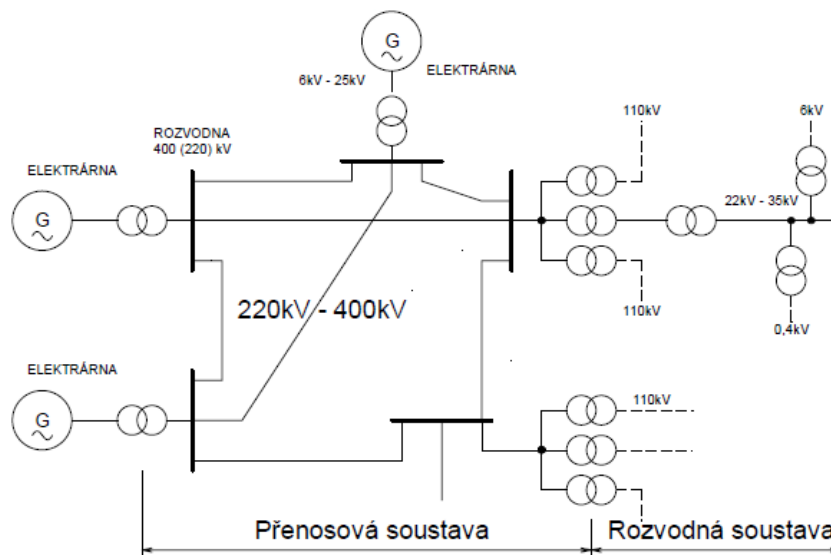
Elektrizační soustava je rozsáhlý systém, který obsahuje generátory, transformátory a elektrické sítě. Současně zahrnuje například řídicí mechaniky, ochrany a měřicí přístroje, které jsou významnou součástí elektrizační soustavy z hlediska bezpečnosti a stability. Základem pro přenos elektrické energie je již zmíněná elektrická síť, jež se dělí na přenosovou a distribuční soustavu, které přenáší elektrickou energii od zdroje ke spotřebiteli. Důležitými hledisky při provozu těchto soustav jsou napěťové hladiny, topologie sítí, typy spojení uzlu vinutí transformátoru se zemí. Nesmíme také zapomínat na jevy, které se zde projevují jako Ferrantiho jev či přirozený výkon vedení.

Vyšší harmonické jsou nedílnou součástí moderní elektrické sítě, do níž jsou připojeny spotřebiče, které se chovají jako nelineární, čímž ovlivňují parametry přenášené energie. Tyto vlivy jsou však nežádoucí a musí se eliminovat nebo velmi omezit pomocí izolačních transformátorů či aktivního a pasivního filtru.

Abychom se blíže podívali na účinky vyšších harmonických na soustavu je použit výpočetní program DYNAST, ve kterém zvolenou soustavu namodelujeme a řešíme. Poté vyhodnotíme výsledné průběhy napětí a proudů za provozních podmínek a při zkratu u jednoho z odběrů.

2 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava (dále jen ES) je centrálně a jednotně řízený soubor paralelně pracujících elektráren, elektrických přenosových a rozvodných zařízení a elektrických spotřebičů. Základem ES je přenosová soustava, která tvoří jakousi páteř a umožňuje přenos elektrické energie od zdroje ke spotřebiteli při dodržení požadovaných parametrů. Mezi tyto parametry patří např. množství přenášené energie v daném čase do daného místa spotřeby a to při zachování kvality elektrické energie (velikost napětí, frekvence, apod.), stability dodávek (bezpečnost dopravy elektrické energie i během abnormálních stavů sítě) a hospodárnosti provozu. Kromě hlavního výrobního, přenosového a distribučního zařízení zahrnuje i další funkce jako je např. měření, řízení soustavy, regulace, zabezpečovací systém atd. [1]



Obr. 2-1: Schéma zapojení elektrizační soustavy [3]

Jak je ze schématu vidět, generátory dodávají elektrickou energii přes blokové transformátory do přenosové soustavy na hladině vvn (220 kV, 400 kV). Z té se pak napájí distribuční soustava, která pracuje na hladinách 110, 35, 22,15, 10, 6, 3, 1 a 0,4 kV. Z této části elektrizační soustavy je pak elektrická energie vyvedena ke konečnému spotřebiteli.

2.1 Přenosová soustava

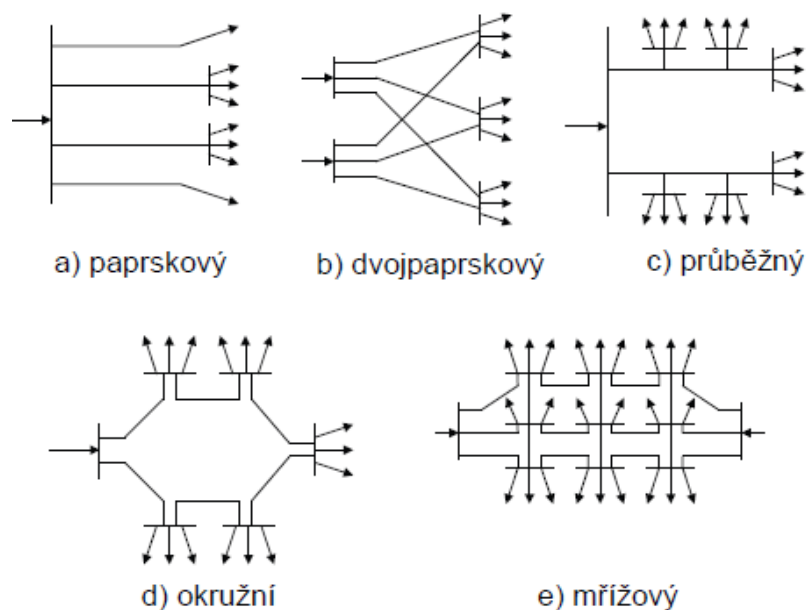
Přenosová soustava (PS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení (400 kV, 220 kV, vybraná vedení 110 kV) sloužící k vyvedení výkonu velkých, tzv. systémových elektráren do uzlů, ze kterých je napájena distribuční soustava. Přenosová soustava dále slouží k propojení do soustav sousedních států pomocí hraničních vedení. Hlavní prioritou těchto soustav je optimální rozložení výkonu v celé oblasti z pohledu finanční náročnosti na výrobu a přenos. Pro vysokou dominanci při rozvodu elektrické energie je také nazývána nadřazenou soustavou.

Do nadřazené soustavy, která je tvořena jako okružní síť, dále patří systémy měření, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační technika, atd.

2.2 Rozvodná soustava

Základní úlohou rozvodné neboli distribuční soustavy je přenos výkonu ke spotřebitelům. Hlavním zdrojem energie pro tuto soustavu je nadřazená síť. Další zdroje jsou spíše malých výkonů s místním charakterem provozu. Pro příklad to jsou malé vodní elektrárny, elektrárny v průmyslových závodech, kogenerační jednotky. Dále to jsou nekonvenční zdroje jako větrné elektrárny, fotovoltaické zdroje, geotermální zdroje, biomasa a další. Ovšem výkon těchto netradičních zdrojů energie je velmi závislý na okolnostech, za kterých pracují, jako je počasí a denní doba. Proto je velmi nutné věnovat velkou pozornost při připojování těchto zdrojů k distribuční soustavě, která by se mohla vlivem změny počasí a nárůstu výkonu přetížit.

Distribuční soustava se provozuje při napětích 110 kV (ta část sítě, která není určena pro přenos energie) a vn (35, 22, 10, 6, 3 kV). Z pohledu topologie sítě se provozuje jako paprsková, průběžná či mřížová (husté síť). Avšak díky konstrukčnímu řešení se dají sítě provozovat jako dvojpaprskové či okružní. Vzhledem k této konstrukci je možnost zálohování v případě poruchy.



Obr. 2.2-1: Druhy rozvodů [2]

2.3 Napěťové úrovně

Elektrizační soustava je tvořena různými napěťovými hladinami, které jsou dány technicko-ekonomickou rozvahou. Avšak hlavním parametrem velikosti napěťové úrovně je vzdálenost, na kterou je elektrická energie přenášena. Dá se říci, že čím vyšší je vzdálenost přenosu energie, tím vyšší je hladina napětí, která se provozuje na přenosové lince. Tato formulace je dána závislostí mezi hodnotou napětí a ztrátami, kde při vysokých hladinách napětí nám klesají ztráty na vedení.

Normalizovaná řada střídavých 3f napětí je zobrazena v Tab. 2.3-1. Normalizovaná stupnice uvádí napětí sdružená.

Tabulka 2.3-1: Normalizovaná řada střídavých třífázových napětí [4]

Nízké napětí (nn) [kV]	jmenovité	0,4/0,23			0,50	0,69
	max. provozovací	0,42/0,241			----	0,73
Vysoké napětí (vn) [kV]	jmenovité	3	6	10	22	35
	max. provozovací	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí (vvn) [kV]	jmenovité	110		220	400	----
	max. provozovací	123		245	420	----
Zvláště vysoké napětí (zvn) [kV]	jmenovité	750				
	max. provozovací	787 (předpokládá se zvýšení na 800)				

2.4 Rozdělení elektrických sítí z hlediska nulového bodu [1]

Různý způsob spojení uzlu vinutí transformátoru se zemí nám dává tři základní druhy provozu jednotlivých elektrických sítí:

- Uzel účinně uzemněný – uzel je propojen přímo se zemí
- Uzel izolovaný – uzel není se zemí propojen
- Uzel neúčinně uzemněný – uzel propojen se zemí přes impedanci (tlumivku nebo rezistenci)

Způsob spojení uzlu vinutí transformátoru se zemí je jedním z hlavních technicko-ekonomických ukazatelů. Při rozhodování o způsobu dimenzování a chránění v soustavě musíme posoudit velikost proudu, zatímco nároky na izolaci klade velikost napětí mezi vodičem a zemí.

Při souměrném chodu jsou mezi fázemi a mezi fází a zemí napětí odpovídající sdružené resp. fázové hodnotě napětí příslušné sítě. V případě souměrné zátěže se proud přes zem neuzavírá. V bezporuchovém provozu a při symetrickém zatížení sítě se všechny níže uvedené soustavy chovají stejně. Také tomu je i při 3f zkratu, kdy se všechny soustavy chovají obdobně. Ovšem při nesymetrických poruchách (1f porucha, 2f porucha, 2f zemní porucha), nesymetrickém zatížení a výskytu přepětových jevů se budou soustavy chovat odlišně.

Tab. 2.4-1: Rozdělení napětových úrovní podle propojení uzlu se zemí [4]

400 kV	Soustava účinně uzemněná	ZVN
220 kV		VVN
110 kV		
35 kV	Soustava izolovaná nebo neúčinně zemněná	VN
22 kV		
10 kV		
6 kV		
0,69 kV	Soustava izolovaná	NN
0,5 kV		
0,4 kV		

Způsob spojení uzlu má vliv na:

a) Velikost proudu při spojení jedné fáze se zemí

Účinně uzemněná soustava – při bez impedančním ($Z_{země} = 0$) spojení zasaženého místa s uzlem transformátoru vzniká jednopólový zkratový proud o velikosti desítek [kA].

Izolovaná soustava – mezi uzlem transformátoru a místem poruchy je velmi velká impedance \Rightarrow zemní proud se uzavírá pouze přes kapacity zdravých fází vedení. Zemní proudy mohou nabývat hodnot až stovek [A] a jejich velikost bude záviset na rozlehlosti sítě.

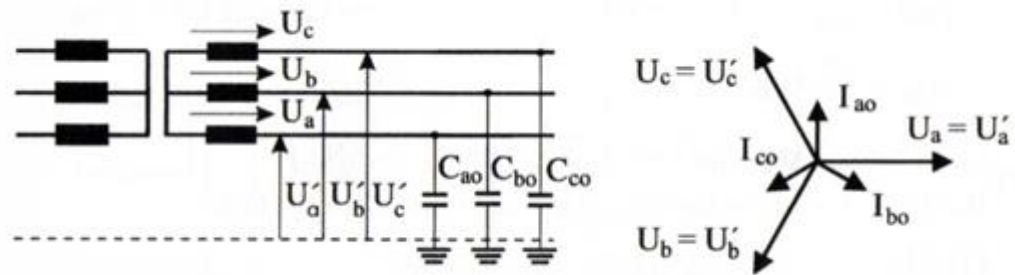
Neúčinně uzemněná soustava – uzel transformátoru je propojen se zemí přes tlumivku, pak se tato síť nazývá kompenzační a je používána pro venkovní vedení. Pro kabelová vedení se místo tlumivky používá rezistence (odporník). Obě tyto varianty omezují velikost poruchového proudu.

b) Velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí při spojení jedné fáze se zemí

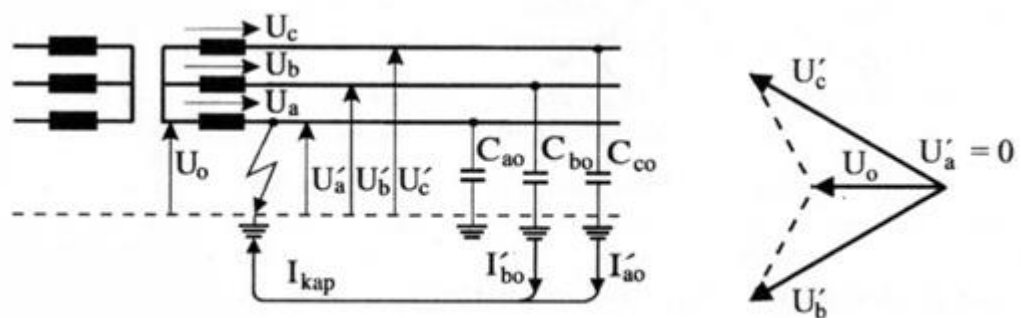
Hlavním rozdílem je velikost napětí zdravých fází. Zatímco u sítí s účinně uzemněným uzlem transformátoru mají fáze proti zemi napětí fázové (U_f), u sítí s izolovaným uzlem to bude již napětí sdružené (U_s).

2.4.1 Síť izolované

V této soustavě není uzel vinutí transformátoru propojen se zemí (Obr. 2.4.1-1), proto je napětí uzlu transformátoru proti zemi nulové ($U_0 = 0$). Ovšem při jednofázovém zemním spojení (spojení jedné fáze se zemí) vzroste velikost napětí uzlu vůči zemi na hodnotu fázovou, zatímco na zbylých zdravých fázích se zvýší hodnota napětí proti zemi na sdruženou hodnotu (Obr. 2.4.1-2). Možnost provozování izolované sítě i při poruchovém spojení jedné fáze se zemí je její velkou předností. Avšak s přihlédnutím k tomu, že v tomto poruchovém stavu nabývá napětí na zdravých fázích hodnotě sdružené, musí být i izolovaná soustava dimenzována na sdružené napětí zejména izolace vodičů.



Obr. 2.4.1-1: Izolovaná síť [4]



Obr. 2.4.1-2: Izolovaná síť, fáze 'a' spojena se zemí [4]

Další nevýhodou soustavy provozované při této poruše je, že místem spojení se zemí protéká proud hlavně kapacitního charakteru. Jeho velikost je dána rozlohou soustavy tj. odporem obvodu a kapacitami zdravých fází celé soustavy vůči zemi. Pro zjednodušení se odpor zanedbává, čímž se proud uvažuje jako čistě kapacitní (Obr. 2.4.1-3a).

$$I_{\text{kap}} = |I'_{b0}| \cdot \cos 30^\circ + |I'_{c0}| \cdot \cos 30^\circ$$

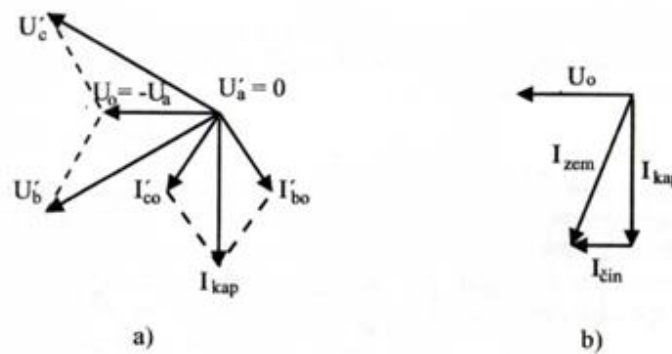
Za předpokladu souměrných parametrů platí:

$$C_{b0} = C_{c0} = C_0 \Rightarrow |I'_{b0}| = |I'_{c0}| \Rightarrow I_{\text{kap}} = U_s \cdot \omega \cdot C_0 \cdot l = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot B_0$$

B_0 [S] - susceptance celého vedení

C_0 [S/km] - kapacita 1 km vedení

l - délka všech připojených vedení



Obr. 2.4.1-3: Rozložení proudu při poruše [4]

Pokud je zemní proud menší než 10 A (někdy i 20 A) a spojení se zemí bude nepřerušované, tj. oblouk na izolátoru neustále hoří, pak obvykle nevznikají velké problémy (přepětí jen $1 \times U_n$). Pokud ovšem nastane případ, že oblouk uhasne a znovu se rozhoří (opakovaně), pak zde mluvíme o přerušovaném zemním spojení. To vyvolává 3-4 násobek U_n a to je již dostatečně vysoká hodnota na to, aby vyvolala vznik dalšího zemního spojení v jiných fázích. To je již nepřijatelné a vedení i určitá část sítě se musí vypnout. Proto se používá zhášecí tlumivka (tzv. Petersenova) zapojená mezi uzel transformátoru a zem jako obrana proti vzniklým přepětím a nebezpečným zemním proudům. Jak již název napovídá jejím účelem je uhasit oblouk, který vznikl z přepětí během zemního spojení.

2.4.2 Sítě neúčinně uzemněné

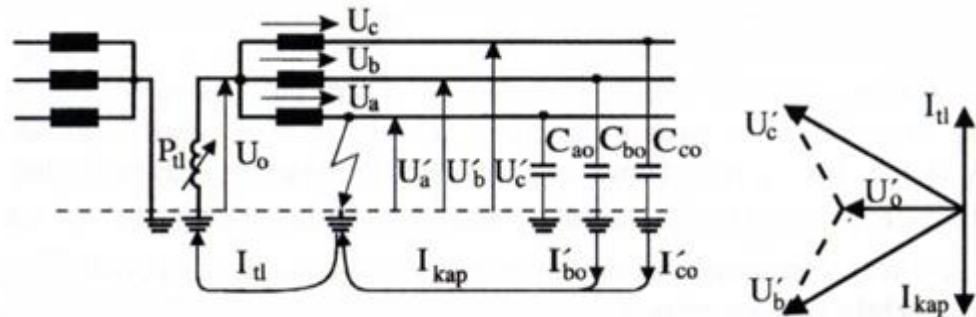
A. Sít' s uzlem vinutí spojeným se zemí přes rezistenci

Spojení se zemí přes rezistenci má význam pro snížení velikosti proudu při spojení fáze se zemí. Používá se pro rozsáhlá kabelová vedení, zejména v hustých městských zástavbách.

B. Sítě kompenzované

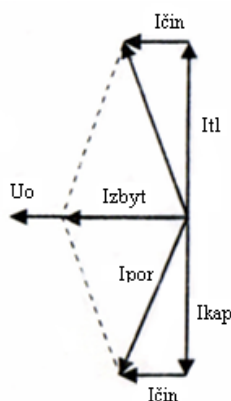
Uzel je spojen s vinutím transformátoru přes velkou regulovatelnou impedanci. Pro redukci zemního proudu je vinutí transformátoru spojeno se zemí přes tzv. zhášecí tlumivku (Petersenova tlumivka). Vlivem fázového napětí mezi zemí a uzlem transformátoru je tlumivka zdrojem induktivního proudu. Pokud uvažujeme tento proud za čistě induktivní (bez odporu), tak při stejné velikosti jako proud zemní dochází k tzv. vykompenzování zemního spojení (Obr. 2.4.2-1). Aby bylo možné dosáhnout vykompenzování pokaždé, musí být tlumivka regulovatelná. Důvodem její regulovatelnosti je proměnný zemní proud, který je dán

délkou galvanicky spojeného vedení sítě. Tato délka se bude měnit v závislosti na vypínání / zapínání jednotlivých vedení nebo rozšiřování sítě.



Obr. 2.4.2-1: Kompenzovaná síť [4]

Pokud uvažujeme i činné složky proudu zemního spojení a obvodu tlumivky, protéká místem spojení tzv. zbytkový proud, který je dosti malý a téměř činného charakteru (Obr. 2.4.2-2).



Zde zmíněné případy jsou uvažovány pro základní harmonickou, avšak se zde mohou objevit i proudy s vyšší harmonickou.

V případě: $I_{por} > 20 \text{ A}$ nutná kompenzace

$I_{por} > 10 \text{ A}$ doporučuje se kompenzace

$I_{por} < 10 \text{ A}$ s izolovaným uzlem

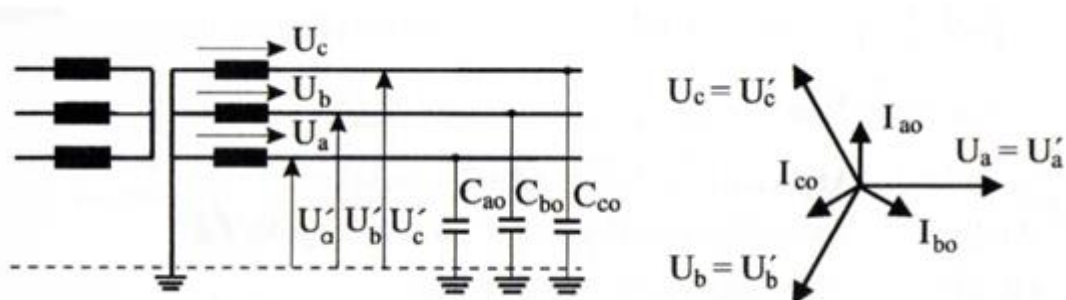
Obr. 2.4.2-2: Zbytkový proud [5]

Jednou z nesporných výhod kompenzace zemního proudu je v dimenzování uzemnění stožárů pouze na hodnotu zbytkového proudu, což je ekonomicky výhodnější. Vykompenzovaná síť se dá stejně jako izolovaná provozovat při zemi poruše až do doby opravy. Další výhodou je samozhášení přechodových poruch a redukce výskytu přerušovaných zemních spojení.

Jednou z nevýhod kompenzované sítě je stejně jako u izolované sítě dimenzování izolace vodičů na sdružené napětí. Další z nepříznivých jevů je možnost přepětí a špatná identifikace zemních spojení. Tu lze ovšem zlepšit pomocí odporníku R_N , který se připojí paralelně k tlumivce na 1÷3 vteřiny, a hlídáme jim činnou složku zemního proudu na vývodu.

2.4.3 Síť účinně uzemněné

Tyto sítě mají všechny nulové body transformátorů spojené přímo se zemí, nebo přes malou impedanci. V některých případech se odpojují nulové body některých transformátorů, ale tak, aby síť měla i nadále charakter účinně uzemněné sítě. Toto se provádí u vybraných transformátorů v sítích 110 kV kvůli snížení jednofázového zkratového proudu. Napětí uzlů vinutí transformátorů setrvává proti zemi prakticky nulové a napětí na zdravých fázích proti zemi je stále fázové. Z těchto důvodů se vedení sítí dimenzují pouze na jmenovité napětí, což má ekonomické výhody. Nicméně při spojení jedné fáze se zemí, kde hlavní úlohu hraje indukčnost transformátoru a vedení (zatímco činný odpor opět zanedbáváme – u hladin vvn), je nutné v co nejkratším čase odpojit vedení, protože zemní proud induktivního charakteru (zde zkratový proud) obvykle dosahuje značných hodnot.



Obr. 2.4.3–1: Síť účinně izolovaná [4]

Další výhodné vlastnosti této soustavy jsou snadná identifikace poruchového stavu, malá provozní přepětí. Nevýhodou jsou velké poruchové proudy a vznik velkých krokových napětí.

3 Elektrická vedení

Elektrická vedení jsou jedním ze základních prvků elektrizační soustavy pro přenos a rozvod elektrické energie. Volba vedení závisí na několika aspektech, jako je ekonomie stavby, napěťová hladina na vedení, dispozice výstavby, vlivy počasí a další. Základní rozdělení elektrických vedení je na kabelová a venkovní vedení.

3.1 Kabelová vedení

Kabelová vedení mají vysoké finanční náklady na pořízení, proto se většinou používají tam, kde není možné použít vedení venkovní. Základní vlastnosti oproti venkovním vedením:

- finančně nákladná realizace, avšak přenos energie je efektivnější
- menší úbytek napětí ΔU a menší jalové ztráty ΔQ
- menší indukčnost L a větší kapacitu C
- méně poruchová, avšak případné poruchy jsou přechodného charakteru

Podle materiálů, ze který jsou proudové dráhy zhotoveny, se kabely dělí na měděné a hliníkové. Kabely s měděným jádrem se používají pro řídicí obvody nízkého napětí a pro silové kabely velmi vysokého napětí. Hliníková jádra se používají v silových obvodech nízkého a vysokého napětí.

Podle počtu žil, které obsahují, se kabely dělí na jednožilové, trojžilové, čtyř žilové a více žilové.

Kabelová vedení se nejčastěji používají v městských a průmyslových sítích (vn, nn). Ve velkých městech se můžeme setkat i s kabely na napěťové hladině 110 kV.

3.2 Venkovní vedení

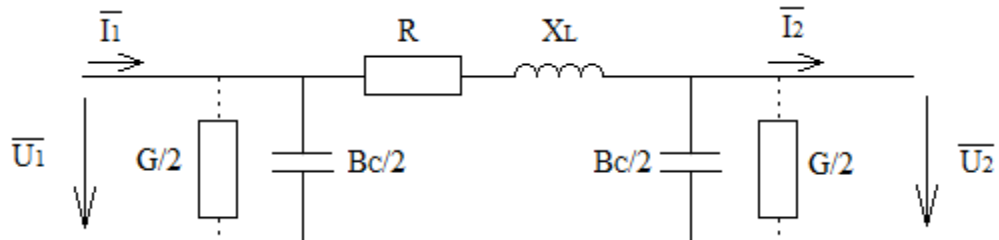
Venkovní vedení jsou nejrozšířenější možností přenosu elektrické energie. Jejich základ tvoří holé vodiče (dráty, lana), stožáry a izolátory. Při návrhu vedení hledáme ekonomické optimum mezi mechanickými vlastnostmi vedení a jeho elektrickými vlastnostmi. Proto důvodu je velmi důležitá volba správných materiálů pro stožáry a vlastní vedení, jak z hlediska ekonomického a pevnostního, tak i s ohledem na terén a klimatické vlivy.

Výhody venkovního vedení proti kabelovému:

- nízké investiční náklady
- vyšší indukčnost L a nižší kapacitu C
- na stejné vzdálenosti je při stejném průřezu větší úbytek napětí ΔU a větší jalové ztráty ΔQ
- snadná identifikace poruch
- jsou poruchovější, ale většina poruch má přechodný charakter

3.2.1 Model venkovního vedení

Venkovní vedení se modeluje pomocí π -článek, jak je ukázáno na Obr. 3.2.1 - 1



Obr. 3.2.1-1 π -článek

Podélnou složku impedance tvoří rezistence R a induktivní reaktance X_L . Příčnou složku admittance tvoří především kapacitní susceptance B_c a svod G . Jelikož je svod zanedbatelný oproti susceptanci, nemusíme jej zohlednit ve schématu.

Tab. 3.2.1-1: Převládající parametry vedení v různých napěťových hladinách

nn	R_K
vn	R_K, X_K
110 kV	R_K, X_K, B_K
220 kV	R_K, B_K
400 kV	R_K, B_K

Odpor: $R_K = \frac{\rho}{S} \left(\frac{\Omega}{km} \right)$ $R = R_K \cdot l \text{ (}\Omega\text{)}$

Induktivní reaktance: $L_K = 0,0046 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \left(\frac{H}{km} \right)$ $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_K \text{ (}\Omega\text{)}$

Susceptance: $C_K = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r}} \cdot 10^{-6} \left(\frac{F}{km} \right)$ $B_C = \omega \cdot C_K \cdot l \text{ (S)}$

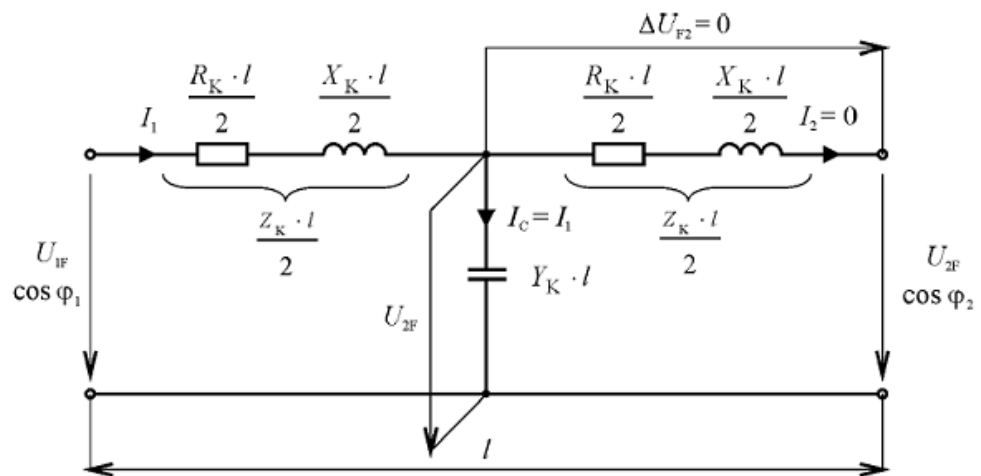
3.3 Ferrantihovo jev

Tento jev vzniká především u dlouhých vedení (vvn, zvn), která jsou provozována nezátížena (naprázdno) či s velmi malou zátěží. Vedením prochází ryze kapacitní (nabíjecí) proud, který vytváří na indukční reaktanci a na činném odporu úbytky napětí způsobující, že

napětí na konci vedení je vyšší než napětí na začátku vedení (provozní přepětí). V extrémních případech může napětí na konci vedení dosáhnout dvojnásobku napětí na začátku vedení.

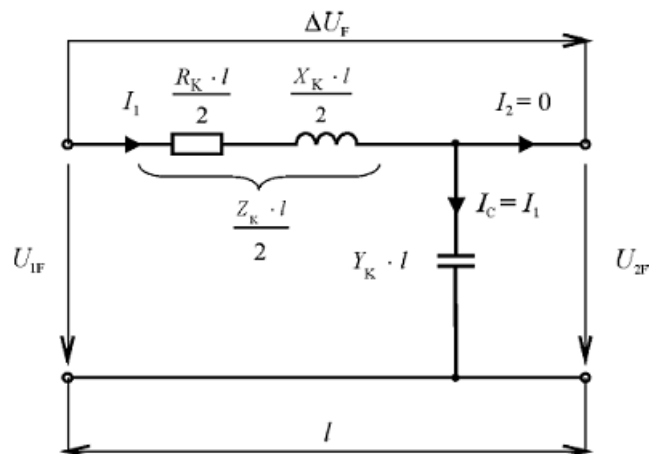
Ferrantiho jev je způsoben dílčími kapacitami mezi vodiči a dílčími kapacitami mezi vodiči a zemí, kterými protéká kapacitní (nabíjecí) proud úměrný napětí a celkové kapacitě vedení.

Vzhledem k délce vedení použijeme T-článek *Obr. 3.3-1* pro určení velikosti přepětí.



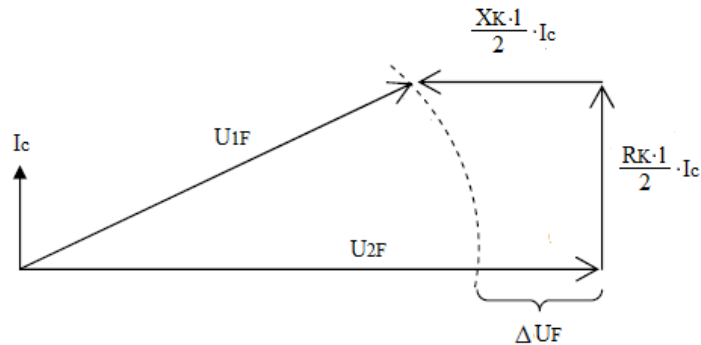
Obr. 3.3-1 T-článek

Protože při chodu naprázdno není na konci vedení připojen žádný odběr, je $I_2 = 0$. Proto můžeme zanedbat pravou část podélné impedance, na které nedochází k úbytku napětí $\Delta U_F = 0$. Tudiž napětí U_{2F} je přímo na příčné admitanci a kapacitní proud $I_C = I_1$. Z těchto důvodů lze původní T-článek zjednodušit, jak je ukázáno na *Obr. 3.3-2*.



Obr. 3.3-2 Zjednodušený T-článek

Fázorový diagram při chodu naprázdno:



Obr. 3.3-3 Fázorový diagram chodu naprázdno

Z fázorového diagramu je patrné, že přibližně platí: $\Delta U_F = 0,5 \cdot X_K \cdot l \cdot I_C$

$$\Delta U_F = 0,55 \cdot U_F \cdot l^2 \cdot 10^{-6} (\text{kV}, \text{kV}, \text{km})$$

Obvykle nás však zajímají hodnoty sdružené:

$$\Delta U_S = 0,55 \cdot U_S \cdot l^2 \cdot 10^{-6} (\text{kV}, \text{kV}, \text{km})$$

Jak je z předešlých vztahů vidět je ΔU_S závislé na vzdálenosti a to kvadraticky.

Nabíjecí proud

Při vysokých hladinách napětí se silně projevuje kapacita přenosového vedení. Tato kapacita pak vyvolává velké nabíjecí proudy a výkony, které ovlivňují přenos elektrické energie.

Nabíjecí proud 3f vedení:

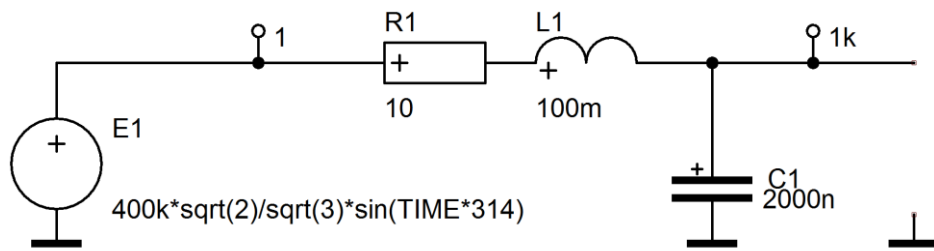
$$I_C = U_F \cdot \omega \cdot C_P \cdot l \quad (\text{A})$$

Nabíjecí výkon celého trojfázového vedení:

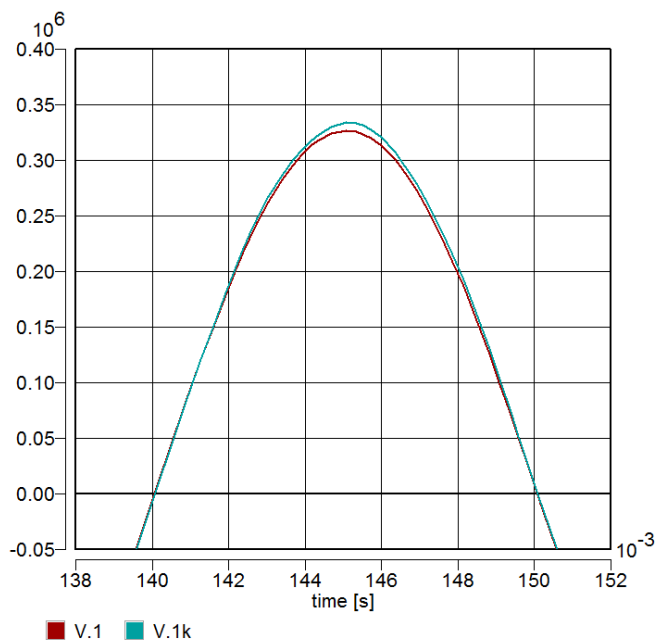
$$Q = 3 \cdot U_F \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_C \quad (\text{VAr})$$

3.3.1 Příklad výpočtu

Uvažujeme venkovní vedení o délce $l = 200$ km. Pro modelování v programu DYNAST použijeme Obr. 3.3-2, tedy poloviční T-článek.



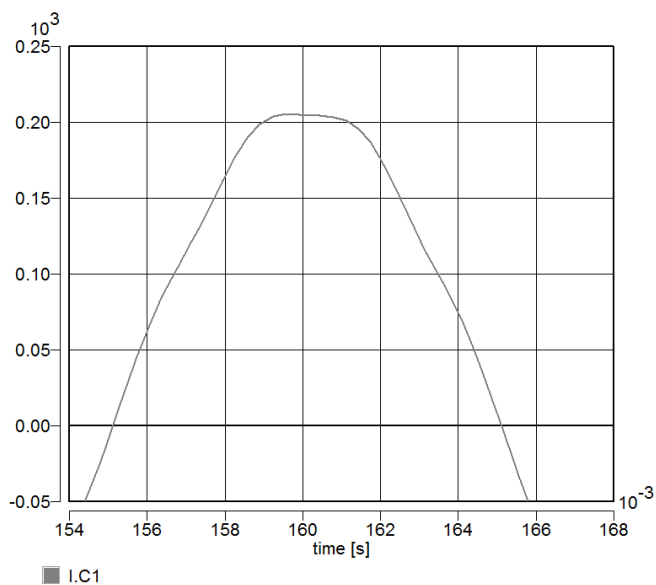
Obr. 3.3.1-1 Model vedení 400 kV

Graficky:

$$U_1 = 326,6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 400 \text{ kV}$$

$$U_2 = 333,8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 408,82 \text{ kV}$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 8,82 \text{ kV}$$

Obr. 3.3.1-2 Průběh napětí U_1 a U_2 

$$I_c = \frac{205}{\sqrt{2}} = 145 \text{ A}$$

Obr. 3.3.1-3 Průběh nabíjecího proudu I_c

Výpočet:

$$\Delta U_S = 0,55 \cdot U_S \cdot l^2 \cdot 10^{-6} = 0,55 \cdot 400 \cdot 200^2 \cdot 10^{-6} = 8,8 \text{ kV}$$

$$I_C = U_F \cdot \omega \cdot C_P \cdot l = \frac{400000}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 200 = 145,1 \text{ A}$$

$$: \quad Q = 3 \cdot U_F \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 400000 \cdot 145,1 = 58,04 \text{ MVar}$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} = \sqrt{\frac{0,1}{2 \cdot 10^{-6}}} = 223,6 \text{ } \Omega$$

$$P_{př} = 3 \cdot \frac{U_S^2}{3 \cdot Z_V} = \frac{U_S^2}{Z_V} = \frac{400000^2}{223,6} = 715,6 \text{ MW}$$

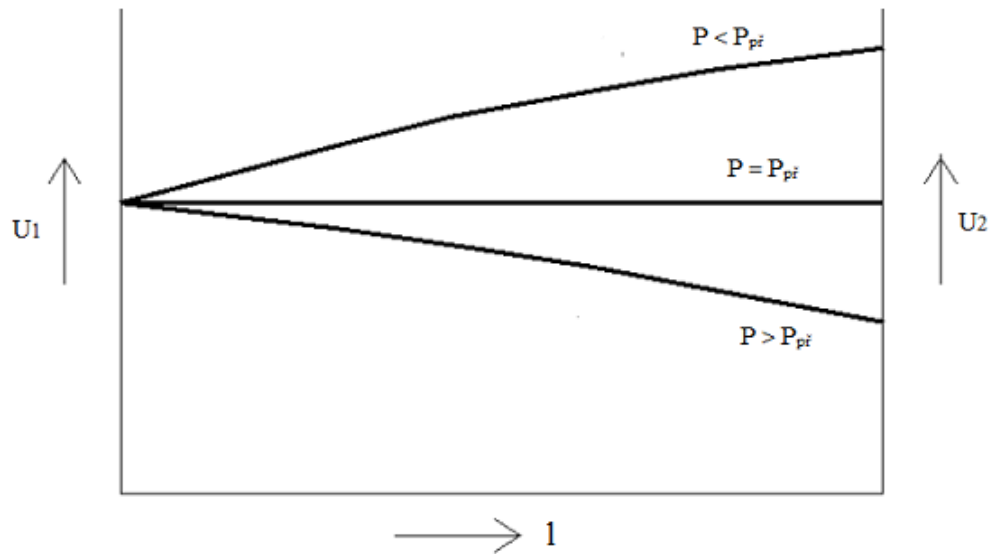
3.4 Vlnová impedance a přirozený výkon vedení

Přirozený výkon

Vycházíme-li z Ferrantiho jevu a na konci vedení budeme postupně zvyšovat hodnotu odběru od nuly, tak v určitém okamžiku dojde ke stavu, kdy napětí na konci vedení bude shodné jako na začátku. V tento okamžik se vedením přenáší tzv. přirozený výkon vedení $P_{př}$ a na konci vedení je připojena zátěž, která má shodnou velikost impedance s tzv. vlnovou impedancí vedení Z_V .

Pokud po vedení přenášíme právě přirozený výkon, tak pro nás nastává nejpříznivější stav. Protože při tomto přenosu dochází k minimálním ztrátám na vedení, které jsou způsobeny pouze činnými odpory. Energie elektrostatického a magnetického pole se vzájemně vyruší, jelikož pole působí proti sobě. Z tohoto vyplývá, že pokud budeme mít ideální vedení ($R=0$), bude napětí na začátku vedení shodné s napětím na konci vedení ($P = P_{př}$). *Obr. 3.4-1*

Pokud budeme přenášet výkon $P < P_{př}$, bude napětí na konci vyšší, než na začátku. Pokud budeme přenášet výkon $P > P_{př}$, bude napětí na konci nižší, než na začátku. *Obr. 3.4-1*



Obr. 3.4-1 Přirozený výkon

Výpočet přirozeného výkonu:

$$P_{př} = 3 \cdot U_F \cdot I_C = 3 \cdot U_F \cdot \frac{U_F}{Z_V} = 3 \cdot \frac{U_F^2}{Z_V} = 3 \cdot \left(\frac{U_S}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{1}{Z_V} = 3 \cdot \frac{U_S^2}{3 \cdot Z_V} = \frac{U_S^2}{Z_V}$$

Vlnová impedance

Při odvození vztahu pro vlnovou impedanci Z_V pro ideální vedení budeme vycházet z rovnosti magnetické a elektrostatické energie:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot U_F^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$\left(\frac{U_F}{I}\right)^2 = \frac{L}{C}$$

$$Z_V^2 = \frac{L}{C}$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_K \cdot l}{C_K \cdot l}} = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} \quad (\Omega)$$

Jak lze z předchozího vztahu vidět vlnová impedance nezávisí na délce vedení, ale na konstrukci, která ovlivňuje parametry L_K a C_K resp. d_s a r_e .

Vlnová impedance většinou nabývá hodnot 270 až 400 Ω pro venkovní vedení a 35 až

40 Ω pro kabelová vedení. Z toho vyplývá, že přirozený výkon kabelových vedení je přibližně desetkrát vyšší, než u venkovního vedení.

Výpočet příkladu přirozeného výkonu a vlnové impedance byl uveden v kapitole 3.3.1.

4 Vyšší harmonické

V dnešní moderní době jsou především do distribučních sítí připojovány spotřebiče, které obsahují nějaké elektronické součástky. Přestože jsou spotřebiče zapojeny do napájecího vedení, které má sinusové napětí, odebírají ze sítě nesinusový proud. Takovéto spotřebiče, které při sinusovém průběhu napájení odebírají ze sítě nesinusový proud a tím vnášejí do sítě vyšší harmonické, se všeobecně označují jako **nelineární spotřebiče**.

Proud, který je odebírán nelineárními spotřebiči, lze nahradit jako každou jinou periodickou nesinusovou funkcí. A to součtem sinusových složek popř. stejnosměrné složky, které mají odlišnou úroveň amplitudy a jejichž frekvence je celočíselným násobkem frekvence nesinusové funkce tzv. 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: $i_{0(t)} = I_0$ stejnosměrná složka proudu

I_1základní harmonická ($\omega_1 = \omega$, $f_1 = 50$ (Hz))

pro $h \geq 2$

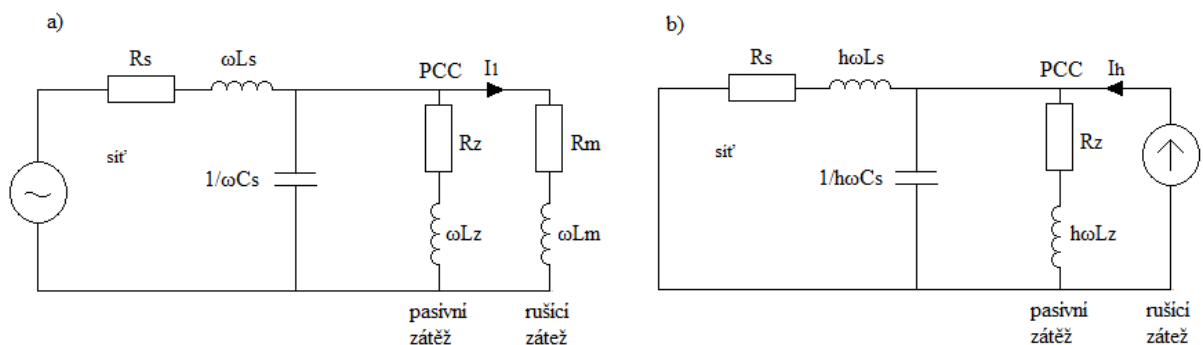
I_hharmonická složka ($\omega_1 = h \cdot \omega$, $f_1 = h \cdot 50$ (Hz))

Jak je z předešlých rovnic patrné, základní harmonickou je označována taková sinusová složka, která má stejnou frekvenci s nesinusovou složkou tedy 50 Hz. Další funkce, které jsou celočíselným násobkem základní harmonické, se nazývají vyšší harmonické nebo harmonické řádu h . Dalšími harmonickými jsou mezilehlé harmonické či interharmonické, jejichž kmitočet není celistvým násobkem frekvence sítě. Mezilehlé harmonické jsou způsobeny vlivem kolísání odběru nelineárních spotřebičů.

4.1 Model vyšších harmonických

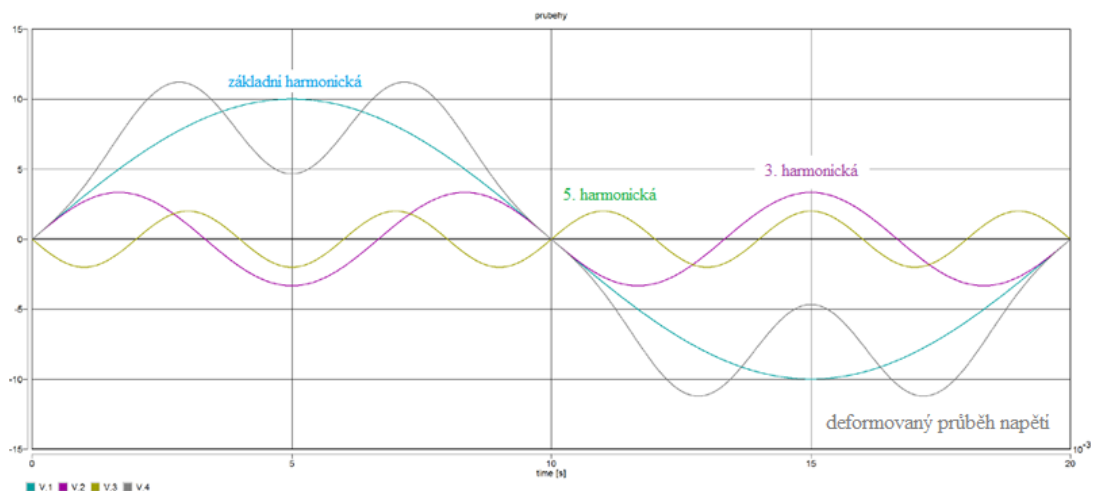
Podle praktických zkušeností a teoretických rozborů lze nelineární spotřebiče namodelovat jako zdroje proudu vyšších harmonických (I_h), které jsou obsaženy ve spektru odebíraného proudu. Harmonický proud teče od zdroje rušícího zařízení směrem do sítě (obr. 4.1-1). Tyto proudy ovlivňují impedanci sítě, kde vyvolávají úbytky napětí dané náležitým řádu harmonické:

$$U_h = Z_{Sh} \cdot I_h$$



Obr. 4.1-1 Náhradní schéma sítě pro: a) základní harmonickou a b) harmonickou řádu h [6]

Tyto jednotlivé harmonické úbytky napětí se superponují na základní průběh napětí. Výsledkem je deformace napájecího (síťového) napětí v bodě společného napájení PCC (Point of Common Coupling). Toto deformované napájecí napětí se přenáší i na další připojená zařízení, která však mohou být citlivá na průběh napětí a tím ovlivnit jejich funkčnost.



Obr. 4.1-2 Průběh deformovaného napětí

Úroveň napětí harmonických v síti je sumou harmonických proudů od všech odběratelů a závisí na:

- Z_h - impedanci sítě pro určitou harmonickou
- amplitudě a fázi I_h , který je dodáván od každého odběratele
- počtu zařízení zapojených do sítě
- na denní době

Posuzování obsahu vyšších harmonických v dané síti se hodnotí dvěma způsoby:

- a) **individuálně** - stanovují se poměrná harmonická napětí obsažená v napájecím napětí

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad \text{někdy} \quad u_h = \frac{U_h}{U_n}$$

kde U_n je jmenovité napětí

Tab. 4.1 Úrovně jednotlivých harmonických napětí [6]

Liché harmonické – nenásobky 3		Liché harmonické – násobky 3		Sudé harmonické	
řád harmonické h	harmonické napětí (%)	řád harmonické h	harmonické napětí (%)	řád harmonické h	harmonické napětí (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19, 23, 25	1,5				

- b) **souhrnně** – určuje se celkový činitel zkreslení napětí (Total Harmonic Distortion)

THD

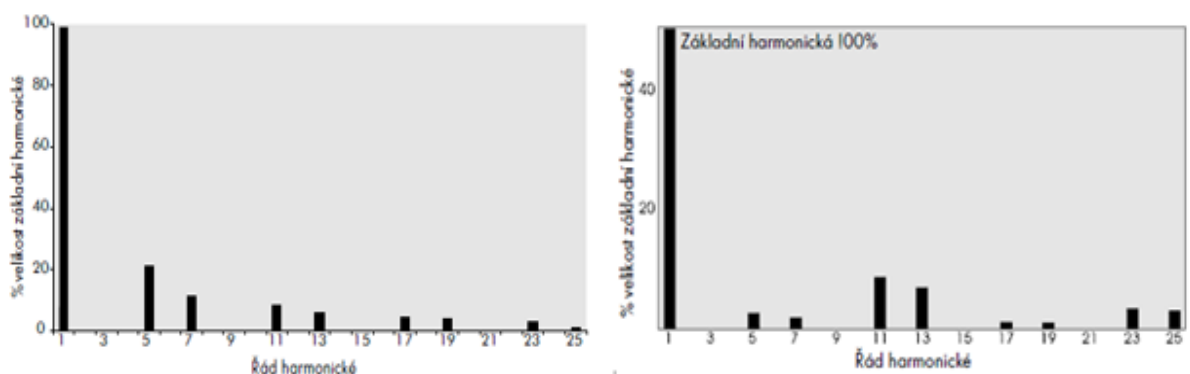
$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

4.2 Zdroje vyšších harmonických

Zdroje vyšších harmonických jsou všechny nelineární spotřebiče, které jsou zapojeny do napájecí sítě. Jsou to především:

Zařízení na bázi výkonové elektroniky (usměrňovače, střídače, měniče frekvence, atd.) generují liché řady harmonických (5., 7., 11., 13., atd.) proudů. Pro polovodičové měniče lze pro odhad spektra proudů použít tzv. amplitudový zákon:

$$I_h \cong \frac{I_1}{h}$$



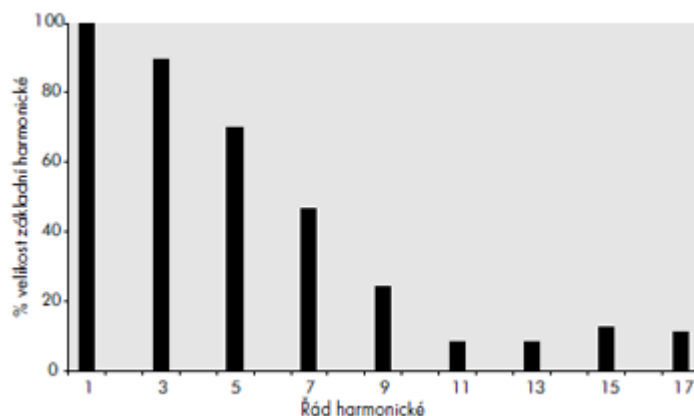
Obr. 4.2-1 Spektrum harmonických typického šesti a dvanácti pulsního můstku [7]

Jak je vidět, z předchozích spekter pro šesti a dvanácti pulsní můstek, dochází při zvýšení počtu pulsů k celkové redukci harmonického proudu. Pokud zapojíme dvě paralelní 12-ti pulsní jednotky tj. 24 pulsů, dostáváme téměř 100% základní harmonickou složku proudu. Tento typ zapojení se používá pouze v případě absolutní nutnosti redukce harmonického zkreslení, jelikož je zde vyšší pořizovací cena oproti běžným můstkům.

Obloukové a středofrekvenční elektrické pece jsou zdroji vyšších a mezilehlých harmonických díky nelinearitě elektrického oblouku, jehož odpor se mění s jeho délkou. Jelikož změny jsou rychlé a náhodné, je velice složité najít odpovídající spektrum vyšších harmonických.

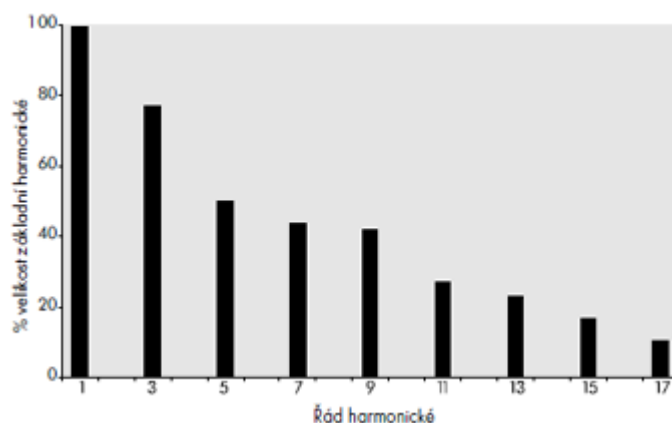
Přesycené indukčnosti vnášejí nelinearitu do napájecí sítě. Kde magnetizační proud obsahuje i 3. harmonickou.

Spínané napájecí zdroje (SMPS) jsou v dnešní době velice rozšířené a používají se skoro všude. Jejich základním principem je nabíjení kondenzátoru pomocí přímo řízeného usměrňovače, který napájí zátěž stejnosměrným proudem.



Obr. 4.2-2 Spektrum harmonických standardního PC [7]

Elektronická zařízení (mikrovlnné trouby, úsporná svítidla s elektronickým předřadníkem, aj.)



Obr. 4.2-3 Spektrum harmonických typického kompaktního svítidla [7]

4.3 Účinky vyšších harmonických

Výskyt vyšších harmonických napětí a proudů v elektrizační soustavě je pro nás velice nežádoucí, jelikož jeho přítomnost může ovlivňovat připojená zařízení odběratelů či dokonce ovlivnit provoz rozvodné sítě, do které je přiveden. Velikost a dosah rušivých jevů je závislý na výkonu zdroje, obsahu a velikosti vyšších harmonických, parametrech napájecí sítě a frekvenci. Činné odpory mají příznivý účinek, na omezení přepětí tím, že absorbují energii vyšších harmonických.

Nejpodstatnější vlivy vyšších harmonických v elektrizační soustavě jsou:

1) Vznik přídavných ztrát v síti

Vznikem přídavných ztrát dochází ke zhoršení účinnosti přenosu elektrické energie a tím k omezení využitelnosti zařízení. Výsledná efektivní hodnota proudu v síti se vlivem vyšších harmonických zvyšuje na hodnotu $I_{ef} = I_0 \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$. Tím jsme nuceni dimenzovat zařízení na vyšší zdánlivý výkon, čímž klesá jejich využitelnost a zhoršuje se účinnost napájecí sítě.

$$\text{Pro 1. harmonickou: } S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}, \quad \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}.$$

$$\text{S obsahem harmonických: } S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

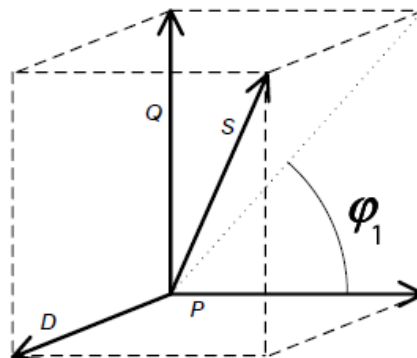
$$\text{Kde } P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \qquad P_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \cos \varphi_i$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \qquad Q_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \sin \varphi_i$$

D... deformační výkon vzniklý harmonickými

z čehož plyne, že skutečný účinnost bude nabývat odlišných hodnot:

$$\boxed{\lambda = \frac{P}{S}} \neq \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1$$



Obr. 4.3-1 Vztah mezi činným, jalovým, deformačním a zdánlivým výkonem [9]

Dále se přídavné ztráty podílí na oteplování samotných spotřebičů i spotřebičů v přenosové síti. Tyto ztráty harmonickými proudy lze vyjádřit jako:

$$\Delta P_j = \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h$$

kde I_h jsou harmonické proudy a R_h je odpor prvku v síti pro příslušnou harmonickou.

Vlivem přítomnosti vyšších harmonických v napájecí síti dochází k tepelnému přetěžování (způsobeno zvýšenou velikostí průchozího proudu) a zvýšení dielektrického namáhání izolace, čímž dochází ke zkracování životnosti zařízení např. transformátory, kondenzátory, motory.

2) **Ovlivňování činnosti HDO (Hromadné Dálkové Ovládání)**

Při rezonančních jevech v síti, které jsou způsobeny změnou impedance, dochází k tzv. odsávání signálu HDO.

3) **Chybná funkce ochran**

Problém nastává u distanční ochrany, která pro svou funkci vyhodnocuje impedanci sítě podle vzorce $Z = \frac{U}{I}$. Avšak při výskytu vyšších harmonických dochází ke zvýšení hodnoty měřeného proudu I , což ochrana mylně vyhodnotí jako poruchu. Proto se v dnešní době dává před distanční ochranu filtr, který zaručí, že ochrana bude počítat jen základní harmonickou napětí a proudu.

4) **Negativní vliv harmonických proudů na zhášení oblouku při zemním spojení**

Při samozhášení zemního spojení by vlivem vyšších harmonických mohlo docházet k opakovanému zapalování oblouku. Toto opakování přeskoků by způsobilo až několikanásobek přepětí, které by se šířilo do sítě. Proto se do obvodu zapojují tlumivky, které by měly zaručit, že se při uhasnutí oblouku už znovu nezapálí. Bohužel i zde je funkce tlumivek vlivem vyšších harmonických trochu omezena.

5) **Poruchy funkce elektronických a řídicích prvků nebo systémů**

6) **Chyby při měření energie**

7) **Rušivé vlivy na komunikační zařízení**

8) Skinefekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou částí vodiče. Tento jev je znám jako skinefekt, který je závislý na kmitočtu protékajícího proudu. Pokud se projevuje pouze základní harmonická je možno jej zanedbat, protože při frekvenci 50 Hz má jen velmi malý vliv. Ovšem pokud kmitočet je nad 350 Hz, tj. 7. harmonická a výše, stává se skinefekt významný a je nutno ho zahrnout při dimenzování, protože způsobuje přídavné ztráty a oteplení vodiče.

9) Vliv na transformátor

Vlivem harmonických proudů rostou ztráty vířivými proudy, které jsou obvykle 10 % ztrát za plného zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Z toho plyne, že transformátory namáhané harmonickými proudy budou mít vyšší provozní teplotu a tím kratší životnost.

U vinutí zapojeného do trojúhelníka je 3. harmonická ve fázi a proto se v tomto vinutí část uzavírá a již se tolik nešíří do napájecí sítě. Důsledkem toho je transformátor více zatížen a dochází k zvýšení provozní teploty.

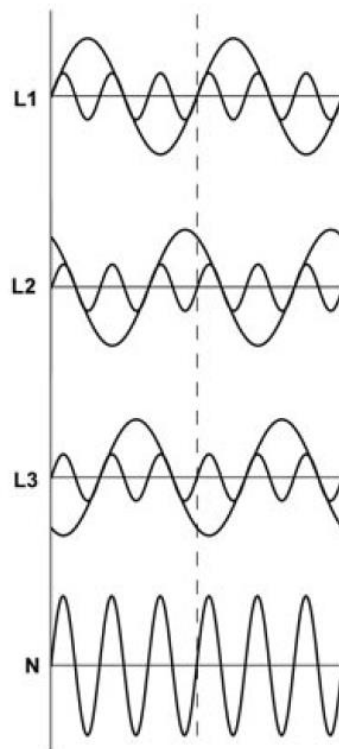
10) Vliv na indukční motory

Podobně jako u transformátorů zde dochází k nárůstu ztrát vířivými proudy způsobený napěťovým zkreslením. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé má různou rychlost a jiný směr otáčení. Proudů indukovaných do rotoru při vyšších harmonických dále zvyšují ztráty, a proto je nutné s nimi počítat při návrhu dimenzování chlazení motoru.

11) Přetížení středního vodiče

V trojfázové soustavě jsou fázová napětí, při stejném zatížení fází, vzájemně posunuta o 120° a vyrovnávací proud ve středním vodiči je nulový. Pokud je zatížení ve fázích rozdílné (nevyvážené), protéká středním vodičem proud, který je výsledkem vektorového součtu fázových proudů. Tento proud je menší než proud ve fázi. Z tohoto důvodu se v minulosti používali vodiče s nižším průřezem. Ovšem pokud je trojfázová soustava zatížena nelineárními zařízeními, dochází ve středním vodiči ke sčítání harmonických proudů 3. harmonické a jejich násobků *Obr. 4.3-2*. V důsledku sčítání harmonických

proudů dochází k přetěžování středního vodiče až 210 % hodnoty fázového proudu ve středním vodiči. Následkem toho, se v lokacích s větším počtem nelineárních zařízení, dimenzují střední vodiče na dvojnásobek fázové hodnoty proudu. Proud protékající středním vodičem dále způsobuje deformaci symetrie napětí.



Obr. 4.3-2 Průběh třetí harmonické ve středním vodiči [7]

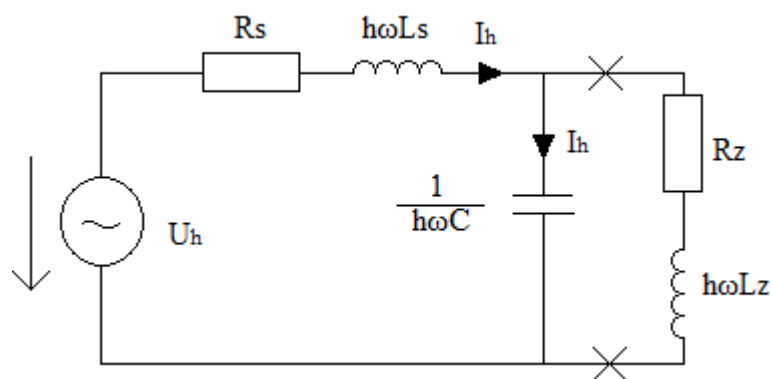
12) Změna impedance sítě

Vnitřní impedance soustavy v místě PCC určuje míru deformace napětí způsobenou vlivem zpětného působení nelineárních spotřebičů na síť. Impedance sítě se však může měnit, protože reaktance indukčností ($X_L = \omega \cdot L$) a kondenzátorů ($X_C = 1/\omega \cdot C$) je silně frekvenčně závislá. Za těchto předpokladů se bude impedance měnit s řádem harmonické. Zatímco při základní harmonické má impedance sítě většinou induktivní charakter, mohou při určitých harmonických frekvencích nabývat i kapacitního charakteru. Vzhledem k faktu, že síť obsahuje prvky induktivního i kapacitního charakteru, může zde docházet k tzv. rezonančním jevům. Dochází-li k rezonanci na frekvenci určité harmonické, může dojít ke značné deformaci napěťové křivky a přetěžování prvků sítě což není žádoucí.

a) Sériová rezonance

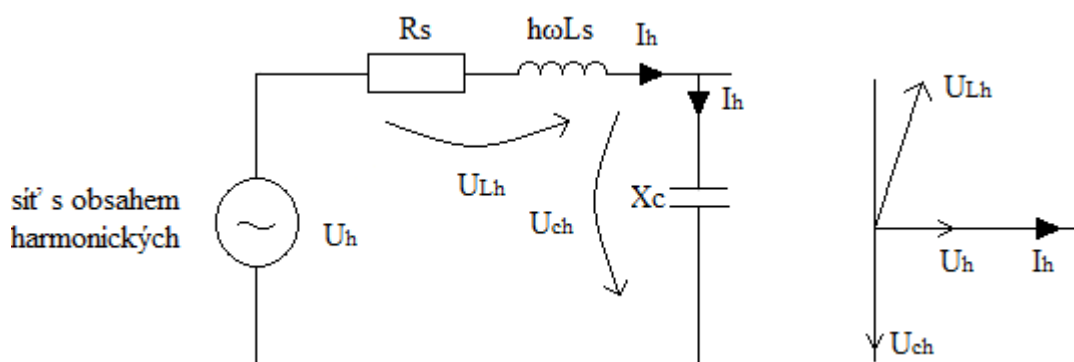
Tato rezonance vzniká například mezi reaktancí transformátoru a kapacitou kondenzátorové baterie určené ke kompenzaci. Z pohledu napájecí sítě tvoří tyto prvky sériový rezonanční obvod, který rezonuje za podmínky: $\omega_h \cdot L_s = \frac{1}{\omega_h \cdot C}$

kde $\omega_h \cdot L_s = \frac{U^2}{S_T} \cdot u_k \cdot \frac{f}{f_{50}}$ a $\omega_h \cdot C = \frac{Q_C}{U^2} \cdot \frac{f}{f_{50}}$. Z těchto rovnic vyplývá vztah pro rezonanční frekvenci tohoto obvodu: $f_r = f_{50} \cdot \sqrt{\frac{S_T}{Q_C \cdot u_k}}$. Při této frekvenci je reaktance obou prvků téměř nulová.



Obr. 4.3-3 Náhradní schéma při sériové rezonanci

Zátěž lze v tomto případě zanedbat, protože při průchodu vyšších harmonických reaktance X_{LZ} stoupne a reaktance X_C klesne. Vlivem těchto změn reaktancí poteče proud jen přes kapacitu.

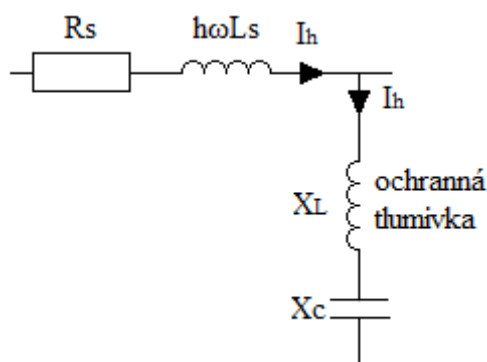


Obr. 4.3-4 Zjednodušené náhradní schéma při sériovou rezonanci

Pokud je rezonanční frekvence shodná nebo velmi blízká frekvenci některé harmonické složky napětí sítě, představuje sériové spojení indukčnosti a kapacity pro tuto

harmonickou impedanci blíží se k nule. Z toho vyplývá, že kondenzátorem prochází velký proud příslušné harmonické I_h (tzv. odsávání vyšší harmonické) a dochází tak k přetěžování kondenzátoru. Vlivem přetížení dochází k dodatečnému oteplení, které může kondenzátor poškodit či zničit. Takovýto stav je nepřijatelný a kondenzátor se musí blokovat. Další rezonanční frekvence, které bychom se měli vyhnout je frekvence signálu HDO ($216\frac{2}{3}$ Hz). Protože odsávání signálu HDO by vedlo ke snížení úrovně napětí signálu a tím ke špatné funkci.

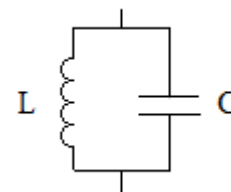
Zamezení odsávání vyšších harmonických ze sítě se provádí vložením ochranné tlumivky do rezonančního obvodu před kondenzátor *Obr. 4.3-5*. Zařazením tlumivky tzv. rozladíme (de-tuning) rezonanční frekvenci a posuneme ji tak, aby nebyla v blízkosti jednotlivých harmonických či u frekvence HDO.



Obr. 4.3-5 Zařazení ochranné tlumivky

Výhodou ochranné tlumivky je ochrana proti odsávání vyšších harmonických a omezení přechodových jevů při spínání jednotlivých kompenzačních stupňů. Nevýhodou je snížení celkového kompenzačního výkonu a dražší pořizovací náklady. Z těchto nevýhod vyplývá, že volíme menší tlumivku (nízké rezonanční frekvence), která nebude tolik snižovat kompenzační výkon a zároveň bude levnější. Za těchto předpokladů bude rezonanční frekvence L a C 189 Hz při deformačním činiteli 7 %.

Pokud i u chráněné kompenzace dochází k odsávání signálu HDO, je možné ji dovybavit tzv. hradícím členem, který pracuje na principu paralelní rezonance. Hradící člen je naladěn tak, aby při frekvenci HDO došlo k rezonanci a tím ke zvýšení jeho impedance na maximum, což zabrání odsávání frekvence HDO.



Obr. 4.3-6 Hradící člen

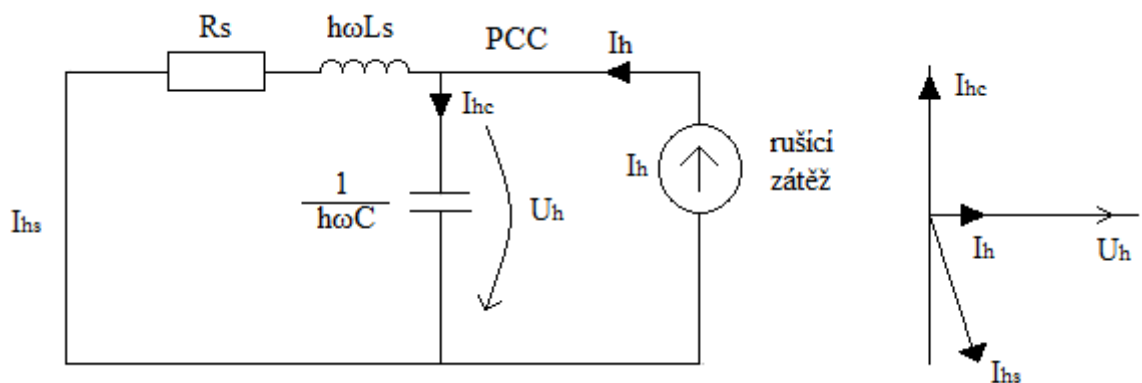
b) Paralelní rezonance

Paralelní rezonance nastává mezi reaktancí sítě a kapacitou nebo zátěží (kompenzační kondenzátory aj.). Z pohledu zátěže rezonance nastane při rovnosti admitancí indukčnosti a

$$\text{kapacity } \omega_h \cdot C = \frac{1}{\omega_h \cdot L}$$

kde $\omega_h \cdot L_s = \frac{U^2}{S_k} \cdot \frac{f}{f_{50}}$ a $\omega_h \cdot C = \frac{Q_C}{U^2} \cdot \frac{f}{f_{50}}$. Z těchto rovnic vyplývá vztah pro

rezonanční frekvenci tohoto obvodu: $f_r = f_{50} \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}}$. Při této frekvenci je reaktance obou prvků téměř nekonečná.



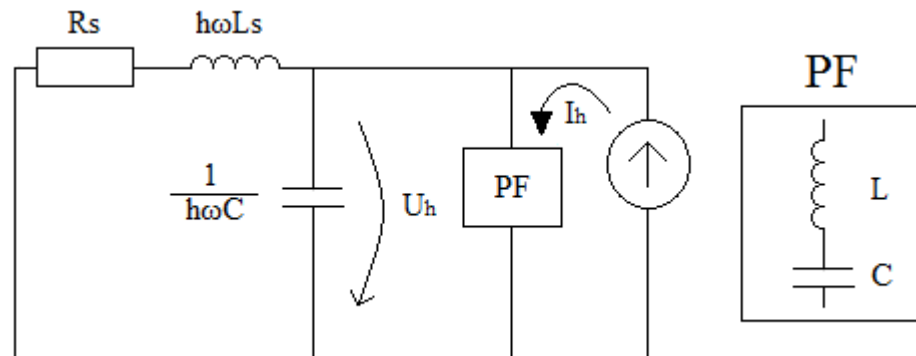
Obr. 4.3-7 Náhradní schéma při paralelní rezonanci

Pokud nastane v obvodu rezonance, dosahuje impedance sítě maximálních hodnot. Jestliže frekvence harmonického proudu dodávaného rušící zátěží bude shodná s rezonanční frekvencí, může podle vztahu $U_h = Z_h \cdot I_h$ toto napětí dané harmonické dosahuje velmi vysokých hodnot a tím výrazně deformovat napětí v místě připojení PCC. Tato deformace napětí se dále přenáší na ostatní připojená zařízení. Jak je zřejmé z obrázku Obr. 4.3-7, kondenzátorem protéká větší proud I_{hc} než je proud dodávaný zátěží I_h , což je způsobeno paralelní rezonancí. Vlivem zvýšeného proudu je kondenzátor přetěžován.

První možností omezení proudu přes kondenzátor je přidání ochranné tlumivky. Kdy při dodržení podmínky $f_{LC} < f_{\text{rušící zátěže}}$ nedochází k paralelní rezonanci s reaktancí sítě a tím dochází k redukci proudu tekoucího přes kondenzátor.

Druhou možností je přidání pasivního filtru do obvodu Obr. 4.3-8, který umožní, pro určitou harmonickou, průchod většiny proudu přes sebe. Tím ochrání kompenzační kondenzátor před nadměrným průchodem proudu. Pasivní filtr pracuje na principu sériové rezonance. Při rezonanci dochází ke snížení impedance téměř k nule, čímž se PF chová

jako zkrat a většina proudu z rušivé zátěže se uzavře přes něj.



Obr. 4.3-8 Zařazení pasivního filtru do obvodu

4.4 Opatření eliminující vyšší harmonické

Vyšší harmonické v síti způsobují řadu problémů, proto je nutné je omezit či eliminovat. Jelikož harmonické zkreslení napětí pochází od odběratelů připojených do napájecí sítě, musí samotní odběratelé zajistit, aby úroveň zkreslení, které způsobují provozem zařízení, nepřesahovala hodnotu dovoleného rušení v dané síti. Za tímto účelem máme několik metod:

1) Správná volba projektu

- a. Připojíme rušící zařízení do místa s velkým zkratovým výkonem S_k (nízká impedance sítě). Tím omezíme deformaci napětí způsobenou pronikajícími harmonickými proudy.
- b. Oddělíme rušivou a pasivní zátěž pomocí dvou transformátorů. Jeden napájí rušivou zátěž a druhý napájí pasivní zátěž.
- c. Využijeme znalosti, do jaké složkové soustavy (1, 2, 0) vyšší harmonické přispívají. Obecně lze zapsat vztah pro určení složkové soustavy takto:

$$I_h: \quad I_{Bh} = I_{Ah} \cdot e^{-j \cdot h \cdot 120}, \quad I_{Ch} = I_{Ah} \cdot e^{+j \cdot h \cdot 120}$$

Kde h označuje řád harmonické

Z tohoto obecného vztahu lze vypočítat, do jaké složkové soustavy přispívají jednotlivé vyšší harmonické.

Například:

$$\mathbf{I}_1: \quad I_A = I_A, I_B = I_A \cdot e^{-j120}, I_C = I_A \cdot e^{+j120}$$

Zde vidíme, že základní harmonická přispívá k sousledné složce.

$$\mathbf{I}_3: \quad I_{A3} = I_{A3}, I_{B3} = I_{A3} \cdot e^{-j0}, I_{C3} = I_{A3} \cdot e^{+j0}$$

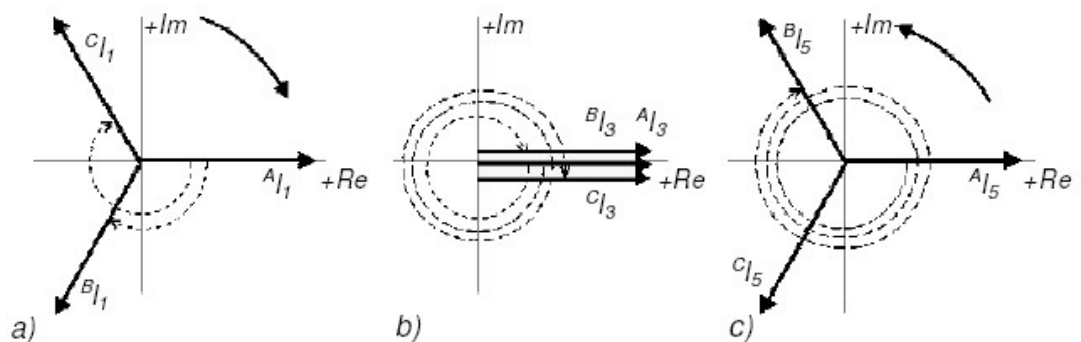
Jak zde můžeme vidět, 3. harmonická přispívá do netočivé složkové soustavy.

$$\mathbf{I}_5: \quad I_{A5} = I_{A5}, I_{B5} = I_{A5} \cdot e^{-j240}, I_{C5} = I_{A5} \cdot e^{+j240}$$

U 5. harmonické lze vidět, že fáze B a C jsou prohozené. Z toho lze vyvodit, že tato harmonická přispívá ke zpětné složce

Pro další liché harmonické se tyto kombinace stále opakují.

($\mathbf{I}_7 \rightarrow$ sousledná složka, $\mathbf{I}_9 \rightarrow$ netočivá složka, $\mathbf{I}_{11} \rightarrow$ zpětná složka)



Obr. 4.4-1 Posloupnosti příspěvků jednotlivých harmonických do složkových soustav[9]

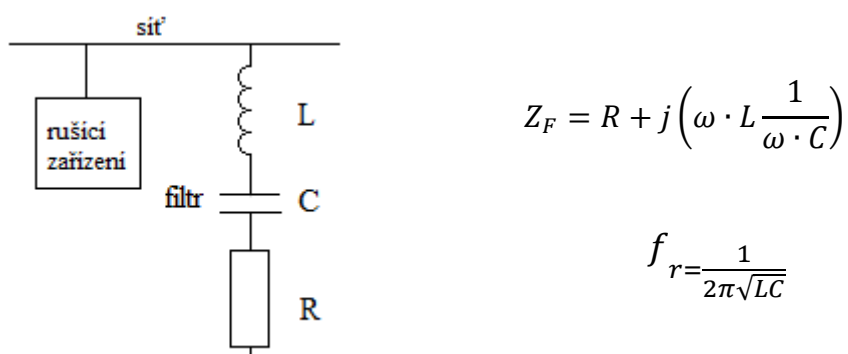
2) Izolační transformátory

Pokud máme transformátor zapojený D/Yn, dochází v něm k přirozené filtraci 3. harmonické, která se v něm uzavírá a tím se eliminuje. Nevýhodou však je přetěžování primárního vinutí vlivem filtrace.

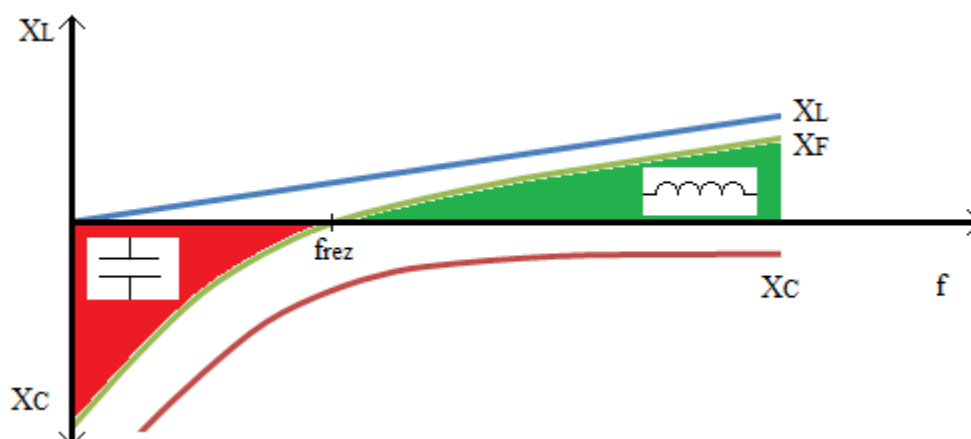
3) Pasivní filtry

Pasivní filtry rezonují na frekvenci, která je shodná s frekvencí vybrané harmonické. Pro tuto harmonickou má filtr téměř nulovou impedanci a představuje pro něj zkrat, jímž harmonický proud prochází z rušící zátěže. Tím se ve větší míře eliminuje průnik rušivých proudů do sítě. Malou nevýhodou však je, že přes filtr prochází i proudy generované jinými rušícími zařízeními, které jsou připojené do stejné sítě. Tím může docházet k nadměrnému proudovému přetěžování filtru.

Při rezonanční frekvenci $f = f_r$ má filtr čistě odporový charakter, pro $f < f_r$ převažuje kapacitní reaktance a pro $f > f_r$ převažuje induktivní reaktance. Filtr tedy slouží i k potlačení rezonančních jevů při frekvenci $f > f_r$, pokud $f < f_r$ má filtr kapacitní charakter a může dojít k paralelní rezonanci s reaktancí sítě. (Obr. 4.4-3)



Obr. 4.4-2 Zapojení pasivního filtru



Obr. 4.4-3 Průběh charakteru pasivního filtru při změně frekvence

Rezonanční filtr odlehčuje síť od filtrované harmonické, a také dodává jalový výkon pro kompenzaci, protože při základní harmonické představuje kapacitní charakter zátěže. S tím je třeba počítat při návrhu kompenzace účinníku.

Pokud budeme chtít odfiltrovat více konkrétních harmonických, je možno spojovat filtry paralelně, čímž nám vznikne filtračně kompenzační zařízení.

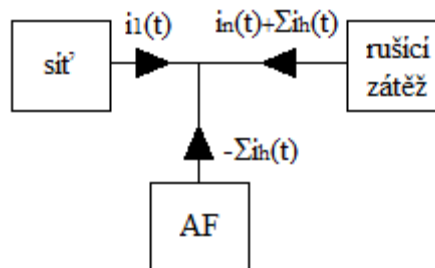
Pokud budeme chtít filtrovat harmonické nad určitý řád harmonické, použijeme hornofrekvenční propust.

4) Aktivní filtry

Na rozdíl od pasivních filtrů dokáží aktivní filtry flexibilně reagovat na průběh vyšších harmonických. K tomuto slouží řízené střídače s pulsně šířkovou modulací (PWM), které jsou schopny vytvořit jakýkoliv průběh.

I. Aktivní filtry zapojené paralelně

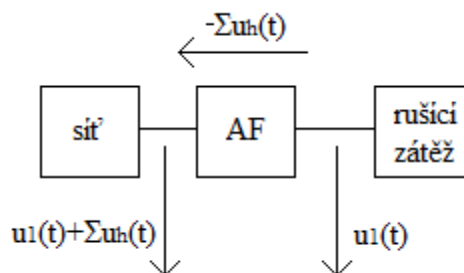
Slouží jako proudový zdroj harmonických proudů, které chceme odfiltrovat. Tyto proudy jsou injektovány v protifázi do sítě, kde dochází k součtu těchto proudů. Výsledný proud se zdá jako by zde žádné nelineární prvky nepůsobily.



Obr. 4.4-4 Aktivní filtr zapojený paralelně

II. Aktivní filtry zapojené sériově

Představují zdroj napětí, který generuje nežádoucí harmonická napětí v protifázi. Tato napětí se odečtou od rušivého harmonického síťového napětí, které se poté pro zátěž chová jako bez zkreslení. Tento způsob korekce napětí je nutný pro citlivá zařízení.



Obr. 4.4-5 Aktivní filtr zapojený sériově

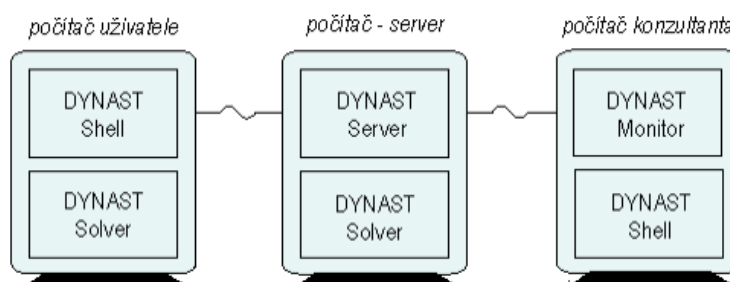
Aktivní filtr funguje jako izolační člen pro vyšší harmonické, zaručuje oddělení harmonických složek zdroje od zátěže, a tím odstraňuje nebezpečí rezonance a chrání tak i eventuálně zapojené kompenzační kondenzátory a pasivní filtry. Aktivní filtry je možno používat v kombinaci s pasivními filtry [6]

5 Modelování sítě v programu DYNAST

5.1 Simulační systém DYNAST

Je volně dostupný program, vyvinutý na pražské univerzitě ČVUT, který umožňuje snadné a efektivní modelování, simulaci a animaci chování fyzikálních soustav. Jeho hlavní předností je snadné zadávání navrženého modelu. Uživatel zde může komunikovat s programem pomocí grafických dialogů, které znázorňují reálnou konfiguraci soustav, či pomocí úloh v textové podobě. Dále je program schopen si sám formulovat potřebné rovnice pro simulaci určené soustavy. Výhodou z hlediska komunikace je oboustranná interakce mezi učitelem a studentem při řešení úloh či spolupráce studentů po Internetu.

Konfigurace systému



Obr. 5.1-1 Konfigurace systému DYNAST [10]

Jak naznačuje obrázek, DYNAST je distribuovaný systém sestávající z programů instalovaných na geograficky 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 ke zpracování místním nebo vzdáleným řešičem **DYNAST Solver** a k zobrazení průběhu výsledků po jejich obdržení z řešiče. [10]

Soubor programů **DYNAST Server** je určen pro obsluhu počítačů propojených Internetem nebo lokální sítí (např. ve školní učebně). 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 v případě, že učitel sdílí se svými studenty tutéž počítačovou učebnu, nebo když více studentů pracuje na společném projektu. [10]

Tento program je volně stažitelný z internetu a lze jej nainstalovat do běžného počítače. V základní nabídce Lite Solver je možnost řešit až 8 úloh a Student Solver, umožňující řešit až 16 úloh. Další podrobnosti o programu, instalaci, návodům a experimentům lze nalézt na adrese:

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

5.2 Tvorba modelu soustavy 22 kV

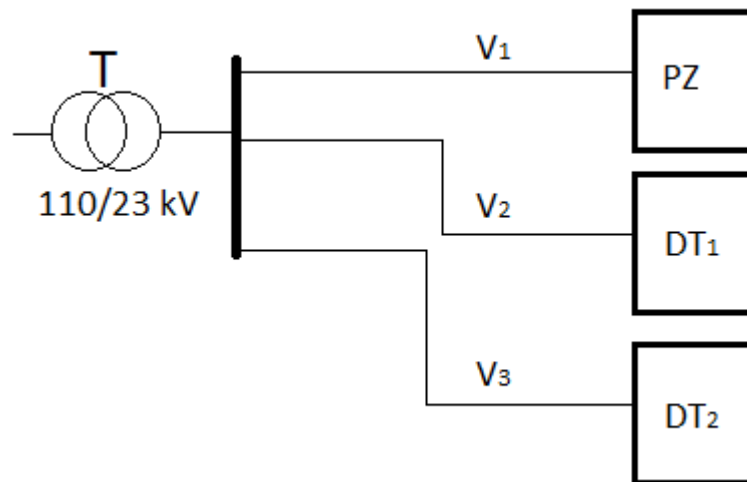
Při tvorbě modelu složitých sítí je vhodné postupně kontrolovat správnost jednotlivých částí celku a rušivou zátěž namodelovat až po zkontrolování správné funkčnosti sítě. Tímto způsobem lze snadno vytvořit model bez zbytečné ztráty času při hledání chyb. Dále je nutné brát na vědomí, že program DYNAST pracuje s hodnotami fázového napětí. Pokud tedy zadáváme zdroj napětí, tak musí být zadán takto:

$$E_1 = 400k \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{kde } \sqrt{2} \text{ představuje převod efektivní hodnoty na amplitudu napětí}$$
$$\sqrt{3} \text{ představuje převod sdružené hodnoty na fázovou hodnotu}$$

napětí

Ovšem pokud odečítáme hodnoty napětí z charakteristiky vytvořené v programu, pak

nesmíme zapomenout, že získáme hodnotu fázovou a velikost její amplitudy.



Obr. 5.2-1 *1f* blokové schéma sítě 22 kV

Jako model soustavy jsem si zvolil síť, kterou tvoří transformátor, snižující napětí z distribuční sítě 110 kV na hodnotu 23 kV. Hodnota 23 kV je zde zadána záměrně z důvodu kompenzace úbytků napětí, vznikajících na vedeních při přenosu energie. Na tuto napěťovou hladinu jsou připojeni tři spotřebitelé přes venkovní vedení V_1 , V_2 , V_3 . Jako spotřebitel je zde zastoupen průmyslový závod (PZ). Ten vykonává funkci rušivé zátěže a dodává do sítě vyšší harmonické, které jsou sledovány a vyhodnocovány. Dále jsou zde dva distribuční transformátory, které reprezentují obecné spotřebitele jako transformátory 22/0,4 kV pro napájení malých měst či veřejná osvětlení atd.

Takto navrženou síť začneme modelovat v programu DYNAST. Nejprve si musíme definovat, popsat a vypočítat jednotlivé bloky, jež jsou zde použity pro tvorbu náhradního schématu.

Zdroj:

Zdroj je modelován jako ideální zdroj střídavého trojfázového symetrického napětí, který dodává napětí 400 kV.

Transformátor:

Model bude znázorněn jako tři jednofázové jednotky. Pro realističtější funkci transformátoru uvažíme i význam sycení magnetického obvodu. Parametry použité transformátoru jsou:

převod	S_{NT} (MVA)	u_k (%)	i_0 (%)	ΔP_k (kW)	ΔP_0 (kW)
110/22 kV	25	9,5	2	63	24

Výpočet prvků pro náhradní schéma:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 0,0488 \quad \rightarrow \quad R_1 = \frac{R_T}{2} = 0,0244 \Omega$$

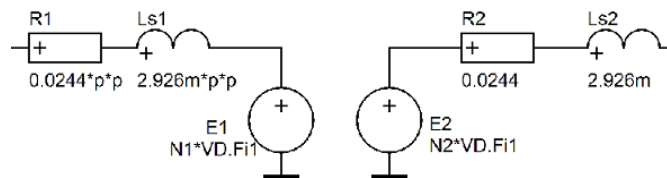
$$Z_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 1,83296 \Omega$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R_T^2} = 1,8386 \quad \rightarrow \quad L = \frac{X/2}{\omega} = 2,926 \text{ mH}$$

$$Y_0 = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = 0,00103 \text{ s}$$

$$G_{FE} = \frac{\Delta P_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = 49,6 \mu\text{s}$$

$$X_\mu = \left(\sqrt{Y_0^2 - G_{FE}^2} \right)^{-1} = 0,72 \Omega \quad L_h = \frac{X_\mu}{\omega} = 3,09 \text{ H}$$



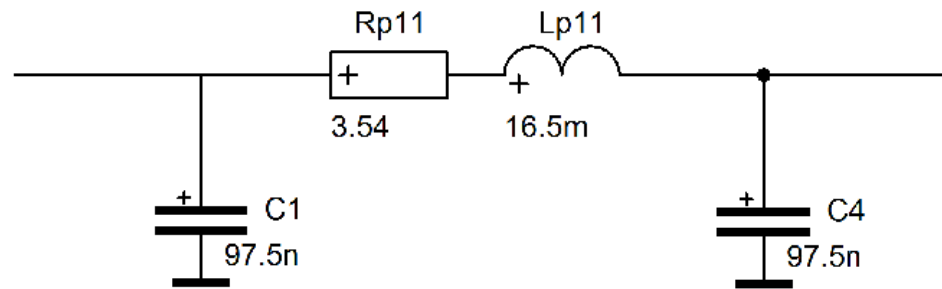
Obr. 5.2-2 If model transformátoru 110/22 kV

Vedení:

Vedení zde je reprezentováno dvojbranem ve tvaru π -článku.

Parametry vedení jsou: $R = 0,236 \Omega/\text{km}$, $X_L = 0,35 \Omega/\text{km}$, $C/2 = 6,5 \text{ nF}/\text{km}$

	l (km)	R (Ω)	L (mH)	C/2 (nF)
V ₁	15	3,54	16,5	97,5
V ₂	20	4,72	22	130
V ₃	20	4,72	22	130



Obr. 5.2-3 If model vedení

Spotřebiče:

Spotřebiče jsou v modelu reprezentovány sériovým spojením odporu a cívky. Dále předpokládáme, že všechny spotřebiče jsou symetrické. Pro zjištění velikosti prvků náhradního schématu vyhodnotíme z těchto rovnic:

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

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

PZ: $S_N = 7 \text{ MVA}; \cos\varphi = 0,88$

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{22000^2}{7 \cdot 10^6} = 69,14 \, \Omega$$

$$R = Z \cdot \cos\varphi = 69,14 \cdot 0,88 = 60,8 \, \Omega$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 69,14 \cdot 0,475 = 32,8 \, \Omega$$

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{32,8}{2\pi f} = 104,5 \text{ mH}$$

DT₁: $S_N = 5 \text{ MVA}; \cos\varphi = 0,75$

$$Z = \frac{U^2}{S} = 96,8 \, \Omega$$

$$R = Z \cdot \cos\varphi = 72,6 \, \Omega$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 64,03 \, \Omega$$

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{64,03}{2\pi f} = 203,8 \text{ mH}$$

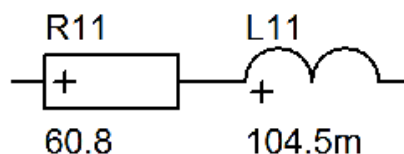
DT₂: $S_N = 5 \text{ MVA}; \cos\varphi = 0,95$

$$Z = \frac{U^2}{S} = 96,8 \, \Omega$$

$$R = Z \cdot \cos\varphi = 89,06 \, \Omega$$

$$X = Z \cdot \sin\varphi = 37,94 \, \Omega$$

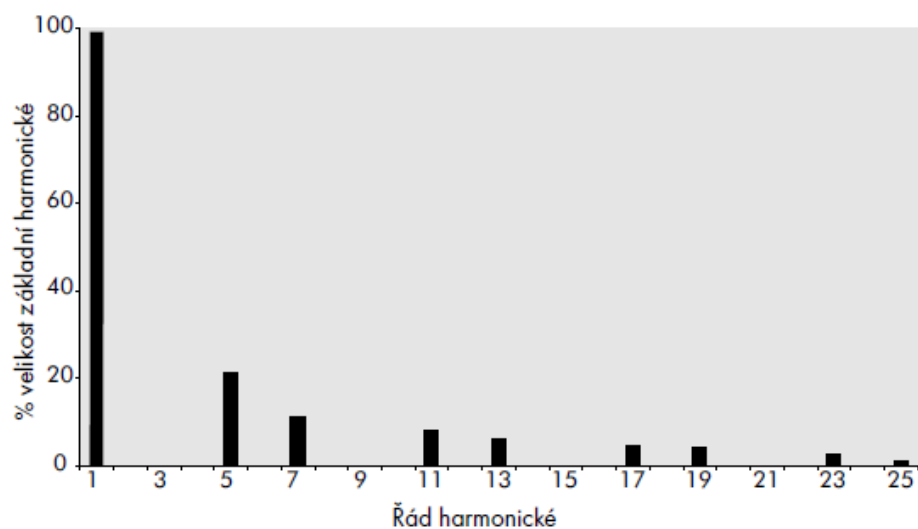
$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{37,94}{2\pi f} = 120,76 \text{ mH}$$



Obr. 5.2-4 If model spotřebiče

Rušivá zátěž (zdroj vyšších harmonických):

Rušivá zátěž či nelineární spotřebič se je v programu DYNAST modelován přidáním proudových zdrojů k pasivním zátěžím. Tyto proudové zdroje generují vyšší harmonické, které se šíří po síti. Pro správné nastavení zdroje, je nutné znát prvky nelineární zátěže, abychom mohli určit, které harmonické budou generovat. Toto zjistíme spektrální analýzou. Například pro trojfázový šesti-pulsní usměrňovač, který uvažujeme pro model, vypadá spektrální analýza takto:

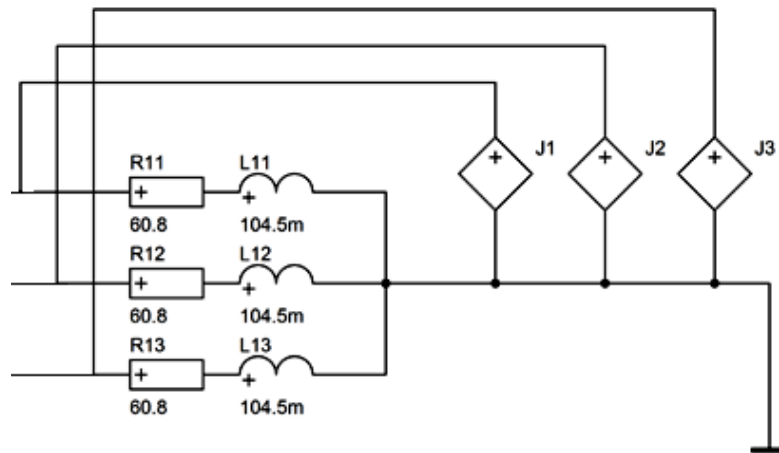


Obr. 5.2-5 Spektrum harmonických typického šesti-pulsního můstku [7]

Jak můžete vidět, provoz tohoto zařízení vnáší do sítě nelinearity. Ze spektrální analýzy šesti pulsního můstku je patrné, že odebírá proud, kde převládá 1. harmonická. Dále obsahují 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25. harmonickou, které dosahují maximálně cca 21 % základní harmonické. Velikost amplitudy 1. harmonické odhadneme podle předpokládaného příkonu zařízení. Velikost amplitudy je ve všech třech fázích stejná akorát fázově posunuta o 120°.

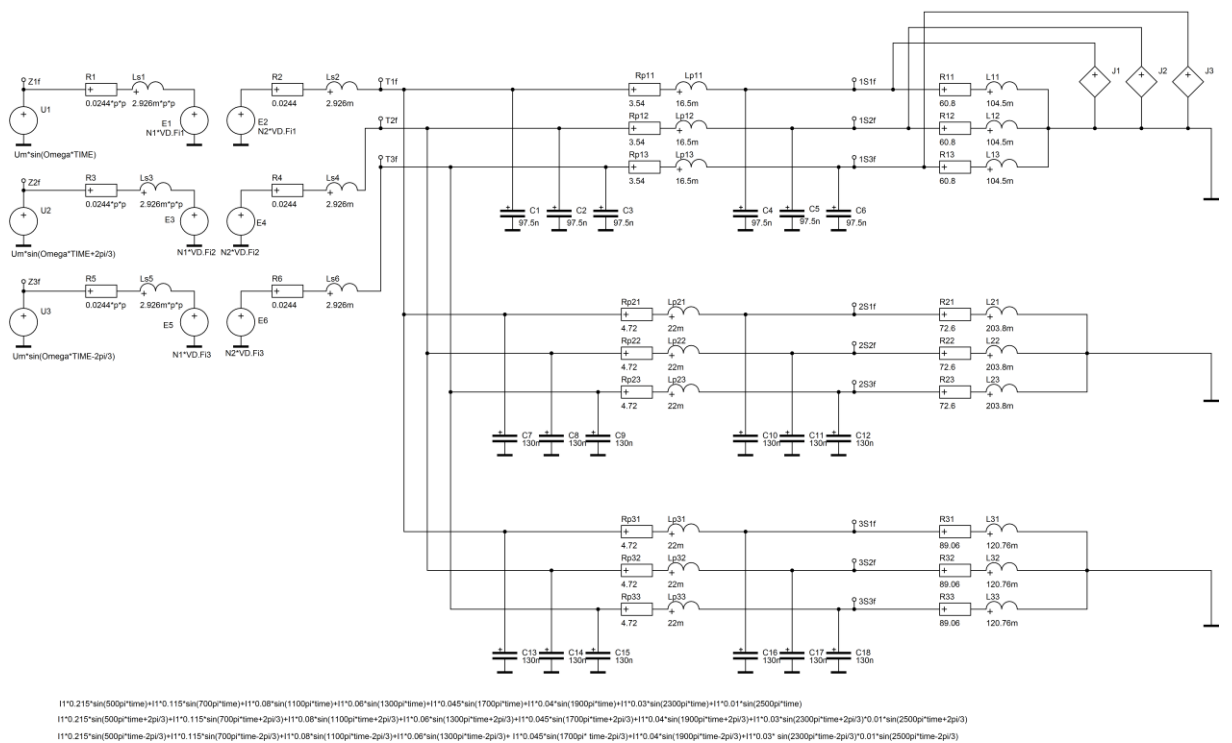
Příklad 1f zdroje rušení:

$$J_1 = I_1 * 0.215 * \sin(500\pi * \text{time}) + I_1 * 0.115 * \sin(700\pi * \text{time}) + I_1 * 0.08 * \sin(1100\pi * \text{time}) + I_1 * 0.06 * \sin(1300\pi * \text{time}) + I_1 * 0.045 * \sin(1700\pi * \text{time}) + I_1 * 0.04 * \sin(1900\pi * \text{time}) + I_1 * 0.03 * \sin(2300\pi * \text{time}) + I_1 * 0.01 * \sin(2500\pi * \text{time})$$



Obr. 5.2-6 Model nelineární zátěže pro šesti-pulsní můstek

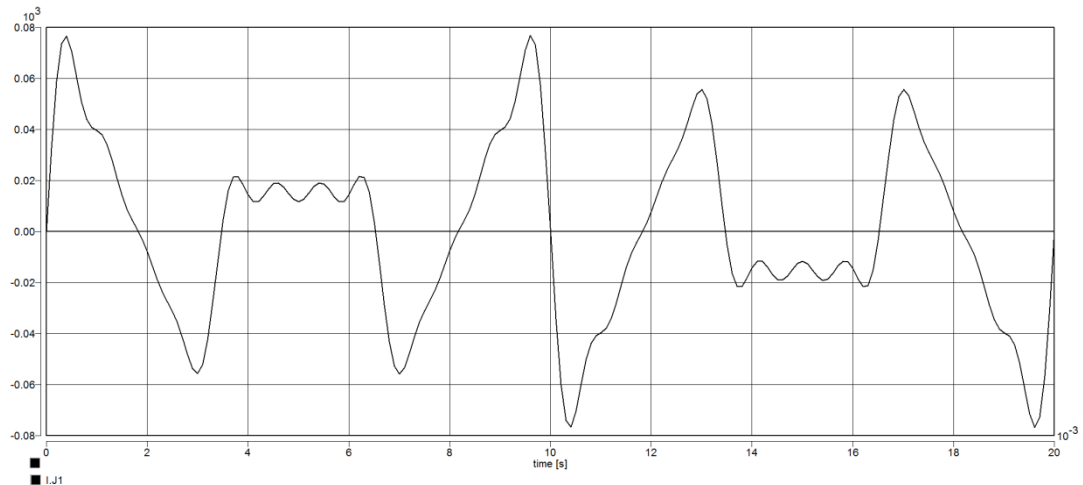
Celkový model zkoumané sítě:



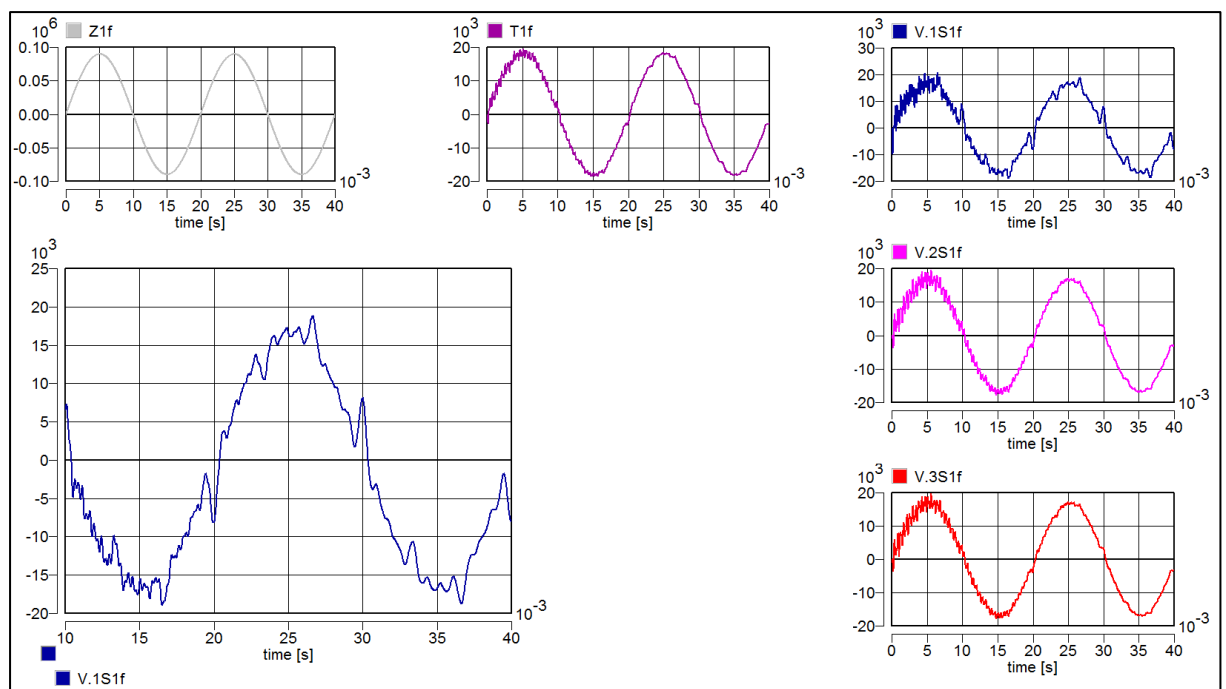
Obr. 5.2-7 Model sítě 22 kV v programu DYNAST

5.3 Napěťové a proudové poměry v síti 22 kV

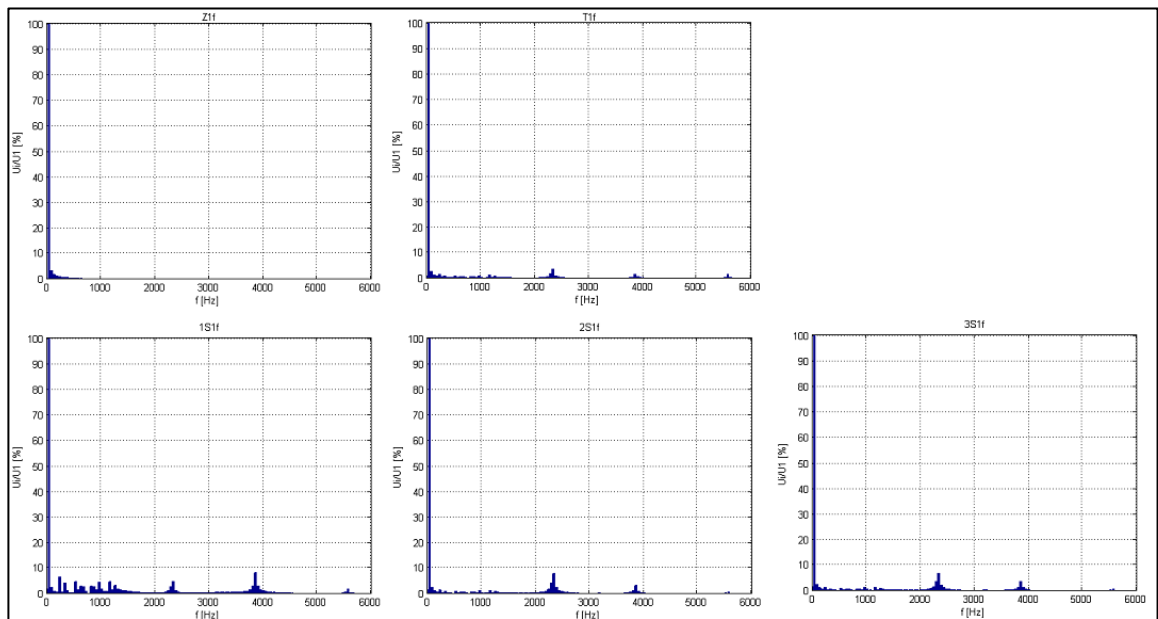
V této kapitole se podíváme, jak ovlivní nelineární spotřebič (zdroj proudu vyšších harmonických) napěťové a proudové poměry v namodelované soustavě. Nejprve se však podíváme na proudovou charakteristiku nelineární zátěže:



Obr. 5.3-1 Proudová charakteristika nelineární zátěže

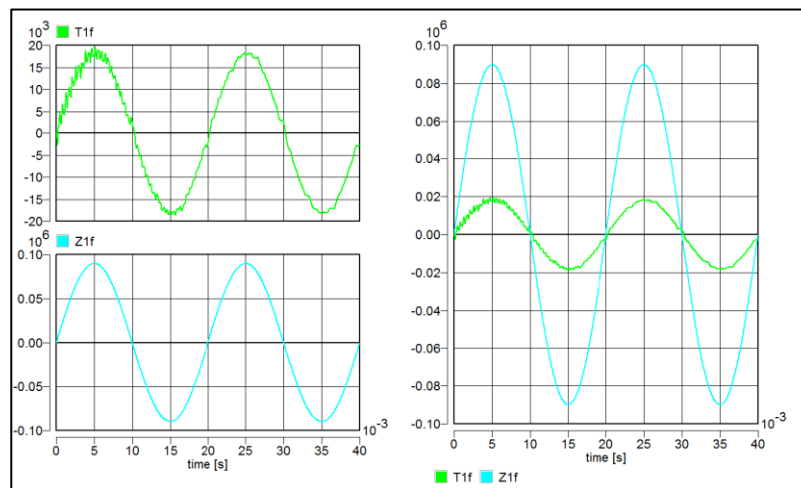


Obr. 5.3-2 Napěťové charakteristiky soustavy a detail napětí v odběru s nelineární zátěží

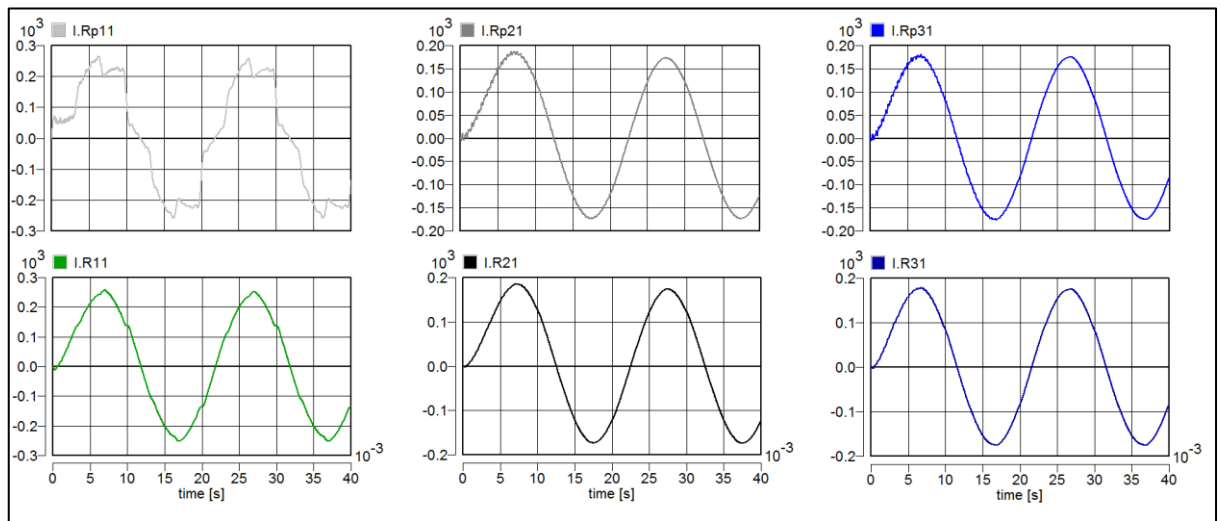


Obr. 5.3-3 Spektrální analýza napětí soustavy

Z Obr. 5.3-2 lze vidět, že napětí před průmyslovým závodem je zdeformované důsledkem nelineární zátěže. Tato deformace napětí se dále šíří po síti, kde může ovlivňovat připojené přístroje. V našem případě je vliv vyšších harmonických patrný hlavně u napětí před průmyslovým závodem, avšak i zde, převládá výrazně 1. harmonická nad ostatními, jak je patrné z frekvenční analýzy na Obr. 5.3-3. Dále se tato deformace šíří po síti snižována parametry vedení. Napětí na DT_1 , DT_2 a za transformátorem se blíží k čistě sinusovému průběhu (zakmitání na začátku průběhu je způsobeno přechodovým dějem při zapnutí soustavy). Tento vliv vedení je pro nás příznivý. Před transformátorem na hladině 110 kV je průběh napětí již téměř čistě sinusový, kdy vyšší harmonické byly omezeny parametry vedení, transformátoru a zkratovým výkonem sítě 110 kV.

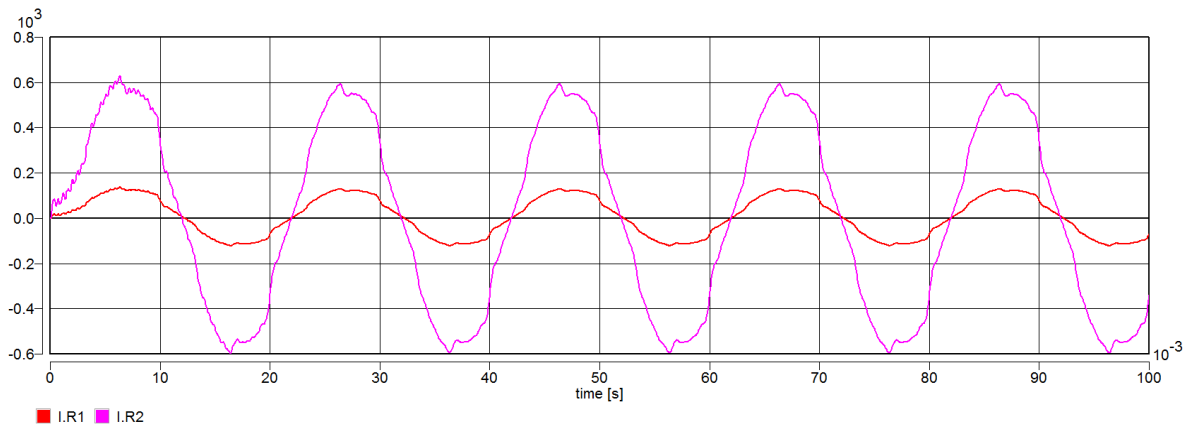


Obr. 5.3-4 Napětí transformátoru



Obr. 5.3-5 Proudý tekoucí vedením a proudý odebírané spotřebiči

Jak je patrné z charakteristik, deformace proudu je největší u průmyslového závodu, kde je nelineární zátěž. Tento proud s obsahem vyšších harmonických se tlumí díky indukčností vedení a k dalším spotřebičům se dostává téměř sinusový. Proud, který vstupuje do transformátoru na straně nižšího napětí, obsahuje ještě vyšší harmonické. Proud na straně vyššího napětí je díky velké indukčnosti transformátoru vyhlazenější a tím i příznivější.



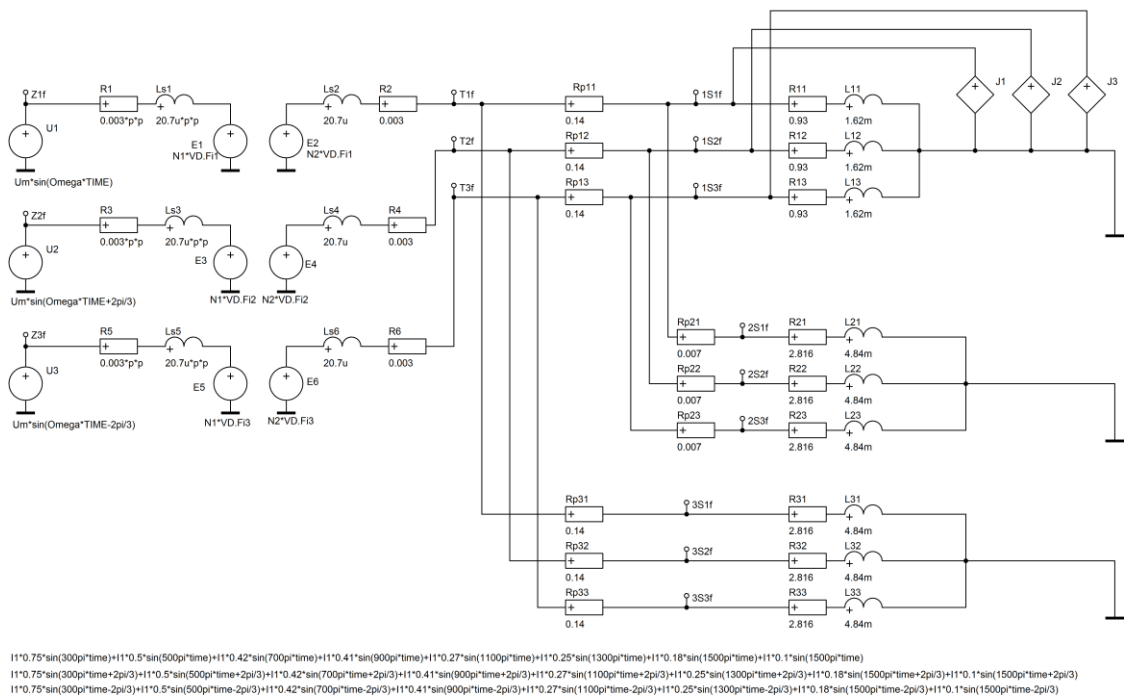
Obr. 5.3-6 Proudý na vstupu a výstupu z transformátoru

Dalším významným zdrojem deformací napětí a proudu může být připojení fotovoltaické elektrárny do sítě.

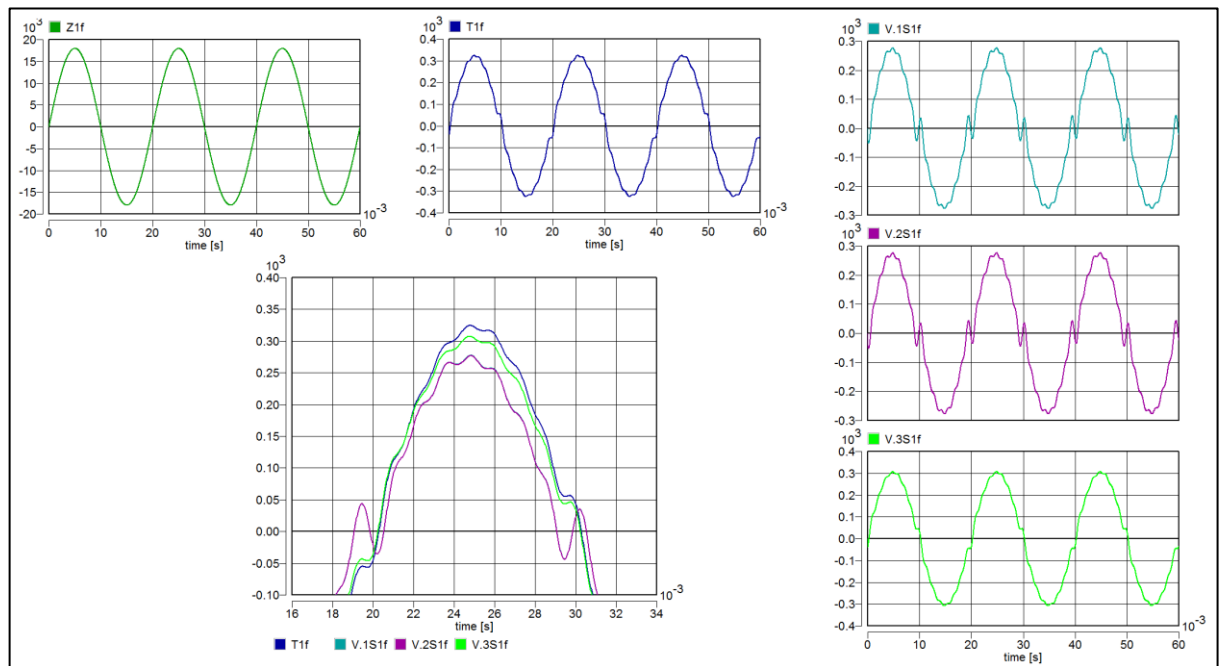
5.4 Vliv nelineárního spotřebiče na hladině 0,4 kV na síť 22 kV

Zdrojem vyšších harmonických složek proudů a napětí do venkovní sítě 22 kV nemusí být pouze nelineární spotřebič zapojený přímo na hladinu 22 kV, ale mohou to být i deformace napětí a proudů ze sítě 400 V, které se přenesou přes transformátor. Jednotlivé spotřebiče na této hladině mají pouze zlomek přenášeného výkonu sítě 400 V, ale pokud se tyto spotřebiče koncentrují ve větším množství na stejném místě, pak zde může docházet k problémům. Pro příklad to jsou větší koncentrace spínaných zdrojů počítačů v serverovnách a ve firmách s velkým počtem počítačů. Dále to mohou být elektronické předřadníky kompaktních svítidel např. v hotelích, kde dříve byly obyčejné wolframové žárovky. Tento příklad sítě 400V s elektronickým předřadníkem jako nelineární zátěží si zde uvedeme. Spektrum harmonických typického kompaktního svítidla viz. Obr. 4.2-3.

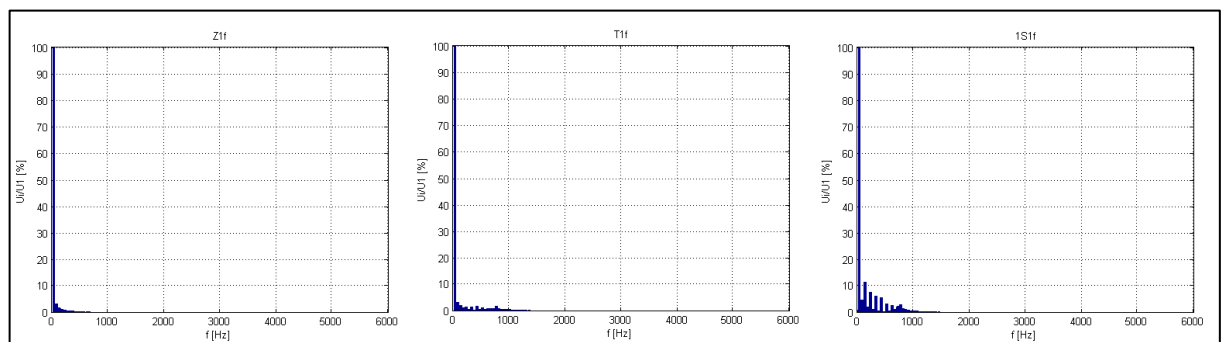
Model sítě je sestaven ze zdroje napětí 22 kV, transformátorem 22/0,4 kV s parametry: $S_{nt} = 400 \text{ kVA}$, $u_{k\%} = 4$, $i_{0\%} = 5$, $\Delta P_k = 6 \text{ kW}$, $\Delta P_0 = 0,93 \text{ kW}$, $U_n = 400 \text{ V}$. Jako vedení zde je použit kabel CYKY 3x95 mm², který přivede proud ke třem odběrům. První odběr o $S_1 = 150 \text{ kVA}$ je modelován jako nelineární zátěž, druhý a třetí odběr bude obecný každý o výkonu $S_{2,3} = 50 \text{ kVA}$, přičemž odběr č. 2 je jen ve velmi malé vzdálenosti od zdroje rušení.



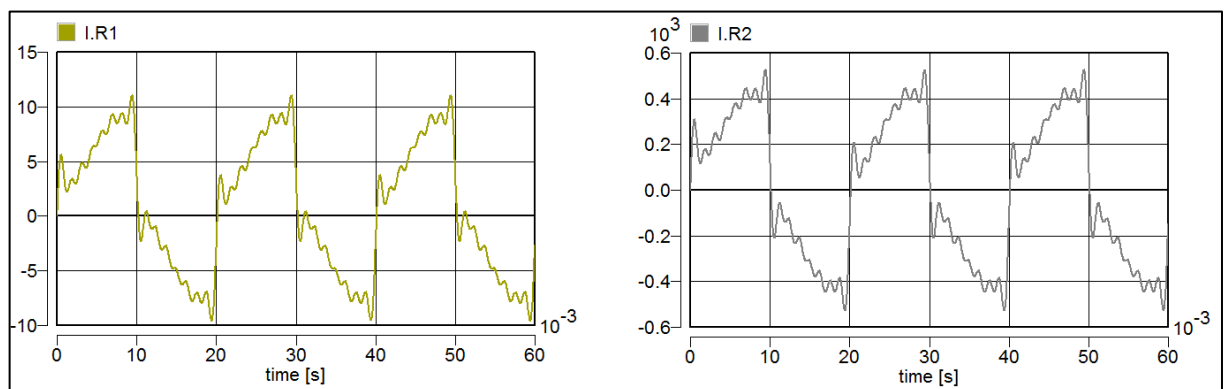
Obr. 5.4-1 Model sítě 400 V s kompaktními svítilny jako zdrojem vyšších harmonických



Obr. 5.4-2 Napěťové poměry v soustavě 400 V



Obr. 5.4-3 Spektrální analýza napětí



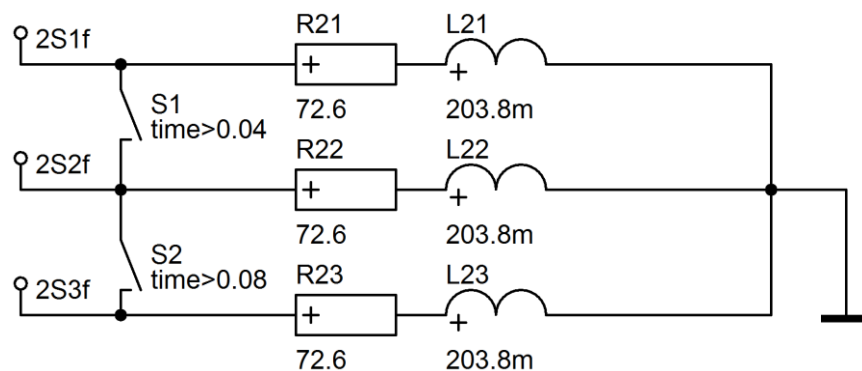
Obr. 5.4-4 Primární a sekundární proud transformátorem 22/0,4 kV

Jak lze z předchozích charakteristik vidět, vliv sítě 400 V, který je zdrojem vyšších harmonických, na hladinu 22 kV je téměř zanedbatelný. Vliv nelineární zátěže je omezen převážně na vedení, které napájí nelineární zátěž. Na tomto vedení dochází k drobné deformaci průběhu napětí a k deformaci proudu. Proud s obsahem vyšších harmonických se přenáší přes transformátor jen v omezené míře vlivem přechodu do vyšší napěťové hladiny. U ostatních odběrů se dá téměř zanedbat. Vliv deformace napětí se přenáší převážně na odběr č. 2, který je ve vzdálenosti 100 m od odběru č. 1 a tím i odpor vedení je nízký. Na odběru č. 3 se tato deformace napětí téměř neprojeví.

Jak je zřejmé, účinek vyšších harmonických na hladinu 22 kV by byl patrný jen v případě, že by transformátor napájel pouze zdroj nelinearit. Pokud jsou připojena do soustavy k nelineárnímu spotřebiči další vedení a odběrová místa, tak se zde vliv vyšších harmonických omezí. Z toho plyne, že velikost vyšších harmonických v soustavě závisí na její rozsáhlosti.

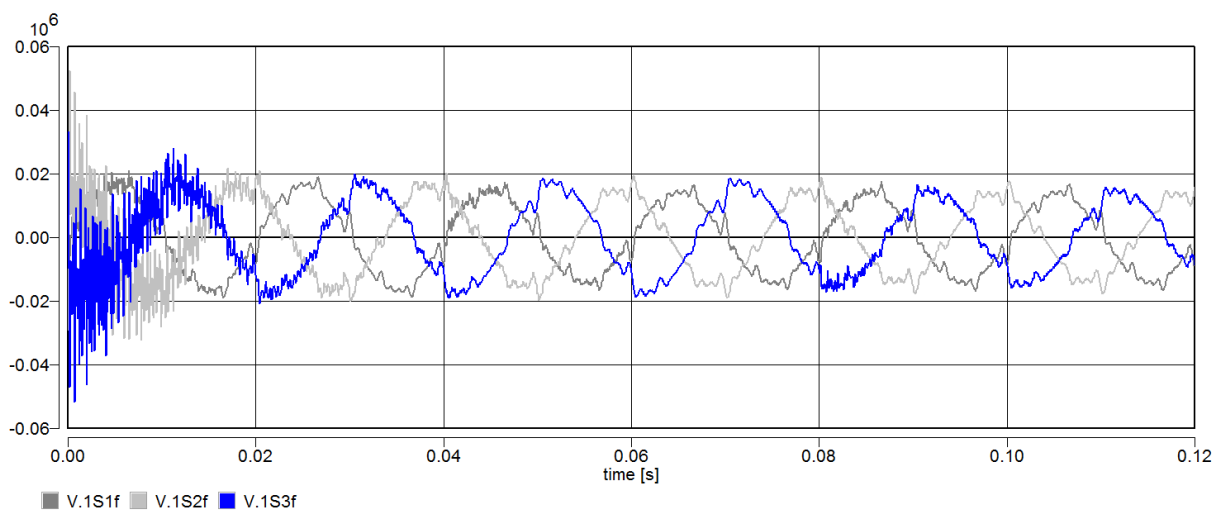
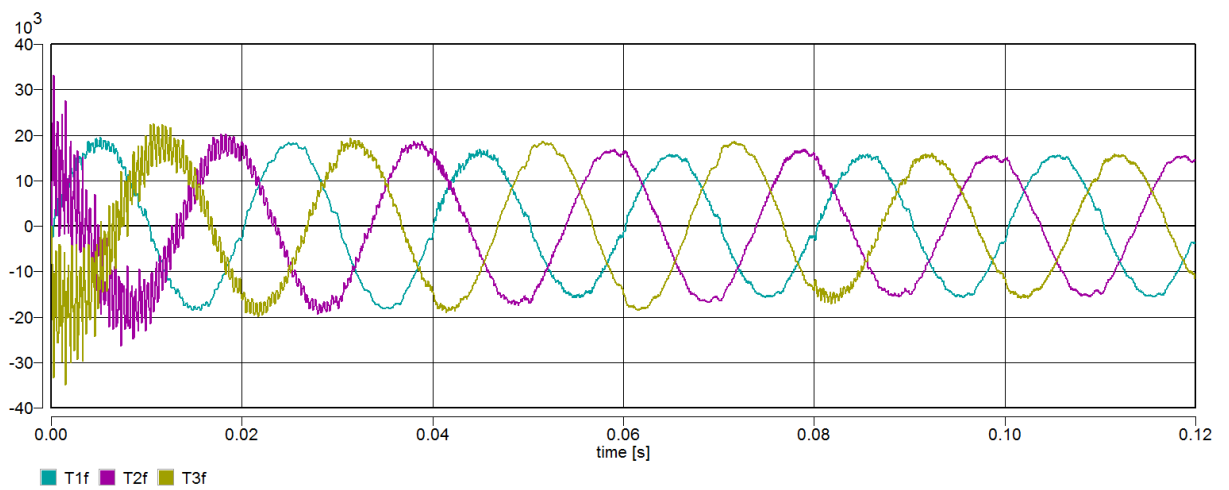
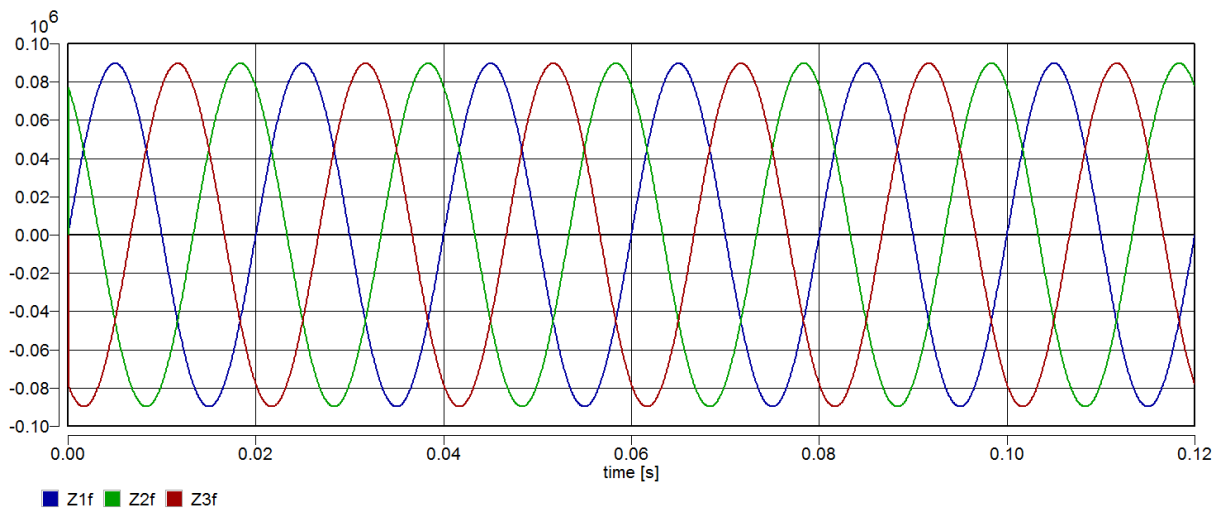
5.5 Proudové a napěťové poměry při 2f a 3f zkratu

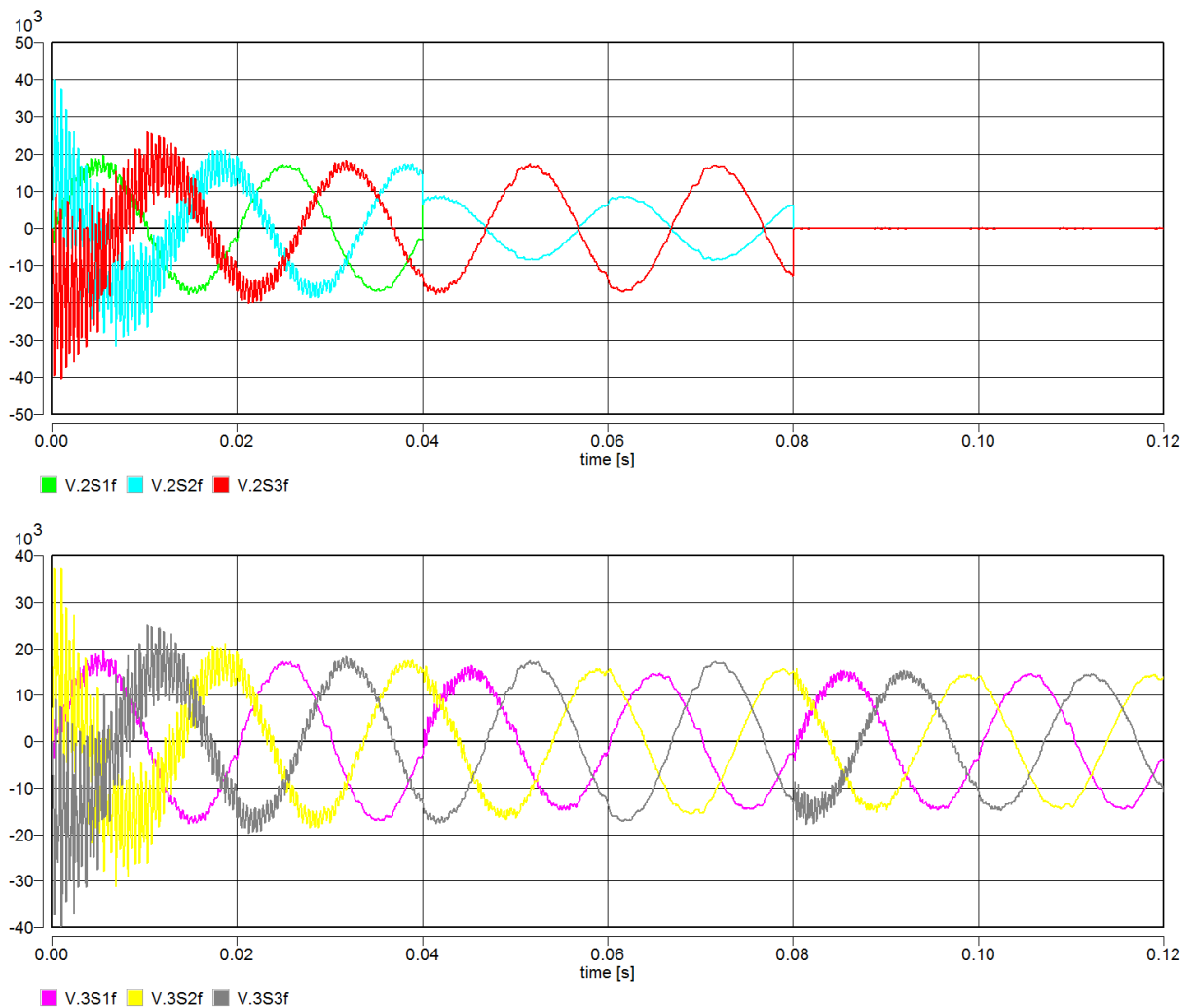
Napěťové a proudové poměry při zkratu v soustavě namodelujeme pro stejné uspořádání a konfiguraci prvků jako v kapitole 5.3 pro napěťovou hladinu 22 kV. Zkrat vytvoříme u odběru č. 2 pomocí dvou dokonalých spínačů, které budou nastaveny na sepnutí v čase 0,04 s pro model dvoufázového zkratu a 0,08 s pro model trojfázového souměrného zkratu. Tím docílíme vizuálního porovnání stavů při normálním provozu, dvoufázovém a třífázovém zkratu v jedné charakteristice. Toto uspořádání je pro nás výhodné z hlediska přehledné vizuální ukázky těchto tří stavů a jejich zhodnocení.



Obr. 5.5-1 Model 2f a 3f zkratu vytvořeného dokonalými spínači

5.5.1 Napětové poměry

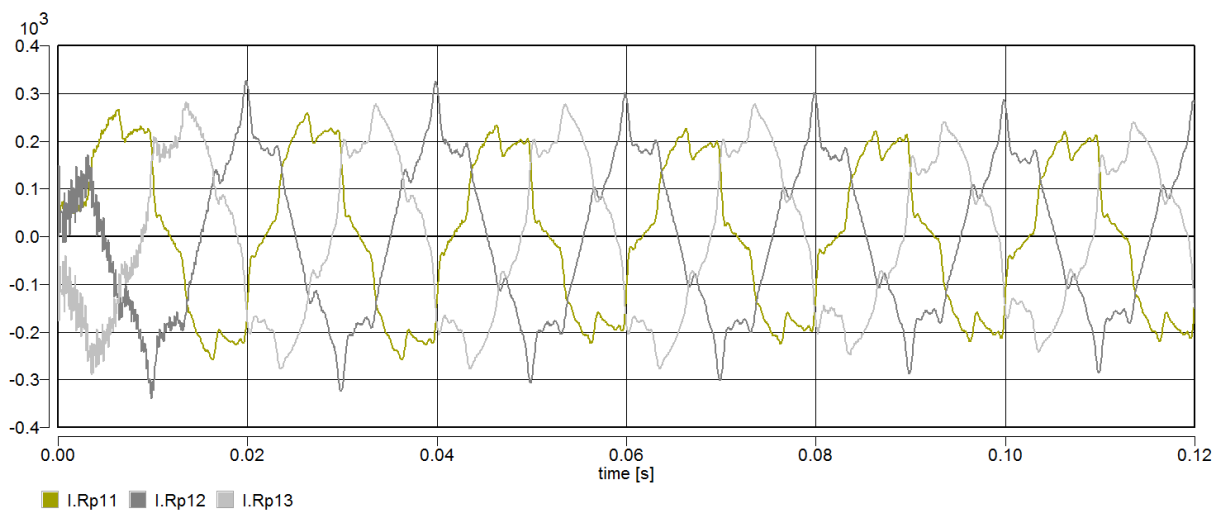
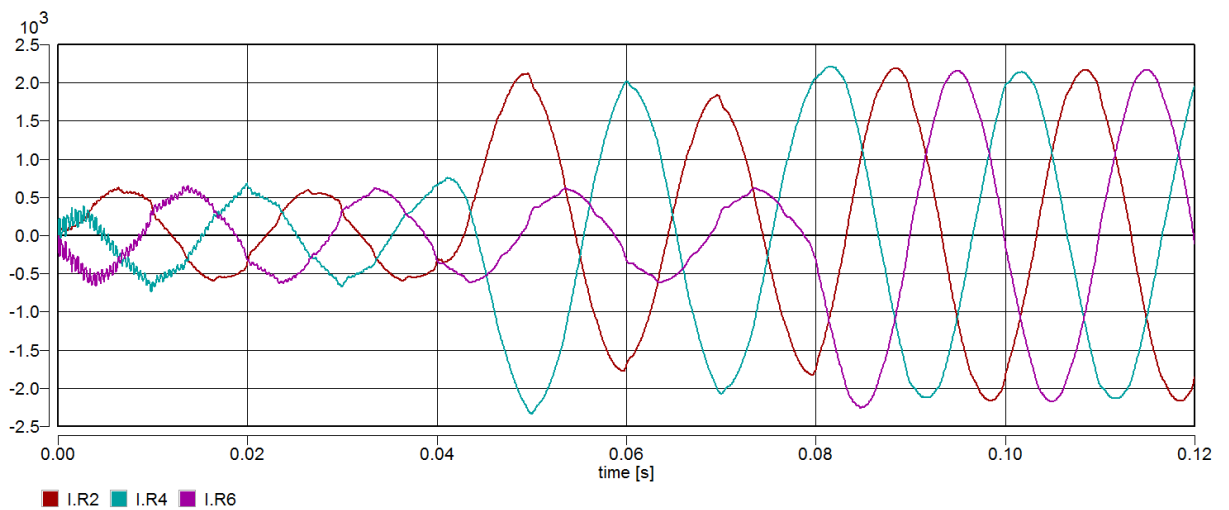
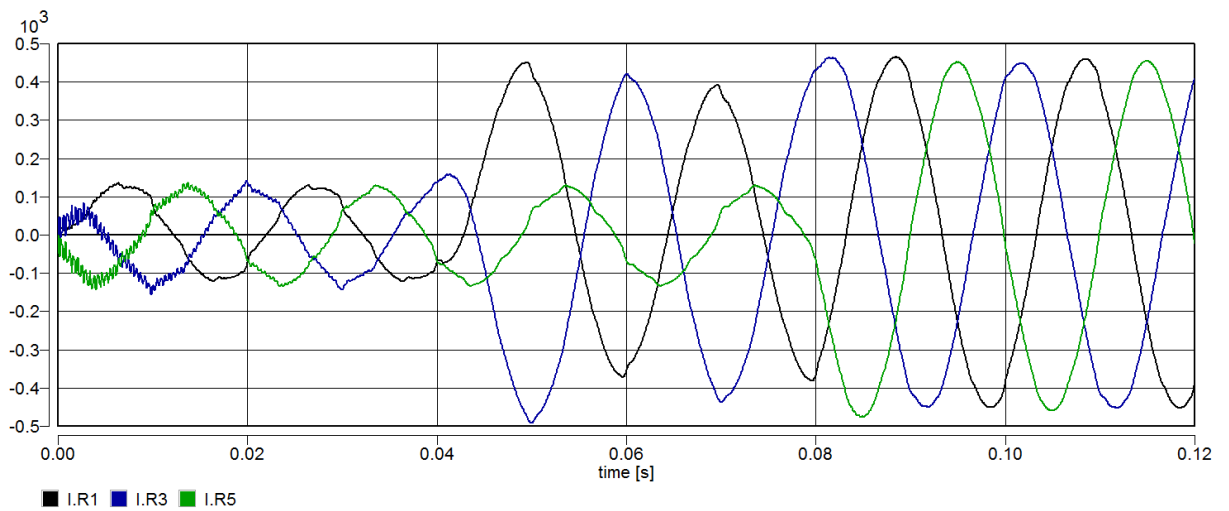


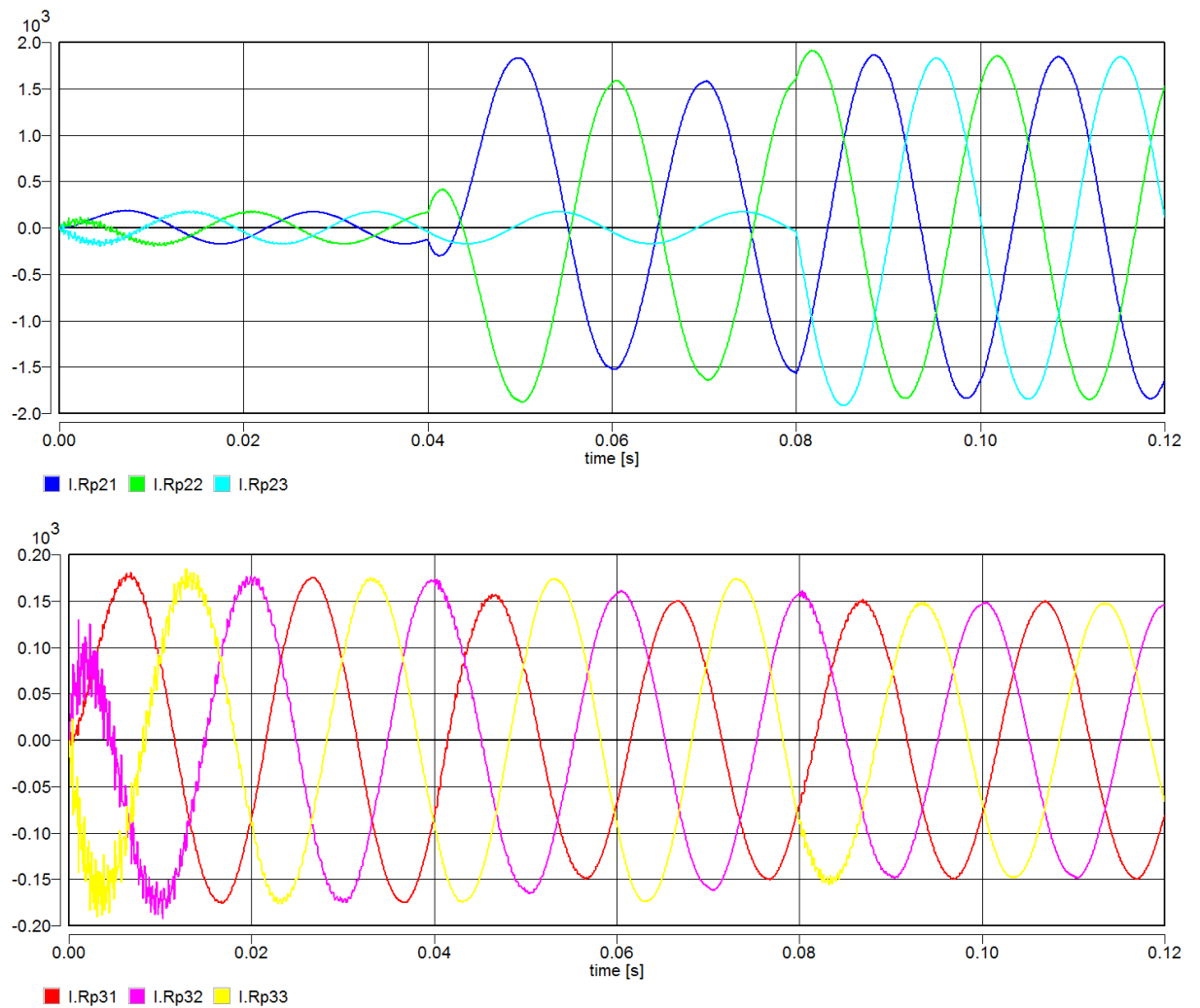


Obr. 5.5-2 Napěťové poměry v soustavě 22 kV za provozu a při 2f a 3f zkratu

Jak je vidět z první charakteristiky napětí na hladině 110 kV se vůbec nezmění, jelikož máme modelovaný dokonalý tvrdý zdroj. Napětí za transformátorem na straně 22 kV se mírně změní v důsledku výskytu poruchy. Při dvoufázovém zkratu dochází na poškozených fázích ke snížení napětí zatímco třetí nepoškozená fáze si drží původní napětí. U trojfázového zkratu dochází ke snížení napětí ve všech třech fázích stejnoměrně jelikož je symetrický na rozdíl od dvoufázového. To samé lze říci o odběrech 1 a 3. Charakteristika u odběru č. 2 ukazuje, že při dvoufázovém zkratu dochází ke snížení fázového napětí téměř na polovinu původní hodnoty a také ke sjednocení fázového posunu na obou poškozených fázích. Třetí fáze je opět beze změn. Při trojfázovém zkratu klesne napětí ve všech fázích na nulu.

5.5.2 Proudové poměry





Obr. 5.5-3 Proudové poměry v soustavě 22 kV za provozu a při 2f a 3f zkratu

Jak je vidět z proudových charakteristik u odběru 1 a 3 nedochází k téměř žádné změně proudových poměrů. To naznačuje, že tyto odběry nejsou poruchou zasaženy a zkratový proud teče vedením V_2 rovnou přes transformátor. To je vidět na charakteristikách před a za transformátorem kdy proud při 2f zkratu dosahuje u dvou porušených fází trojnásobku původní hodnoty. U trojfázového 3,5 násobku provozního proudu ve všech fázích. Nejhorší stav nastává na vedení u odběru 2, kdy při 2f zkratu dosahuje hodnota zkratového proudu porušených fází téměř 9,3 násobku proudu předchozího. Avšak nejhorší je trojfázový zkrat, u kterého dosahuje poruchový proud až 10,8 násobku hodnoty před poruchou.

6 Závěr

V první části této diplomové práce jsem popsal elektrizační soustavu, z níž jsem se zaměřil především na elektrizační síť. Tu jsem poté analyzoval podle jejího účelu v přenosu elektrické energie (přenosová, distribuční), provozovaných hladin napětí (vvn, vn, nn) a rozdělení z hlediska uzemnění uzlu sítě (uzemněná, izolovaná, neúčinně uzemněná). Dále jsem se zaměřil na popis elektrického vedení a jevů, které na něm mohou nastat. Patří sem například Ferrantiho jev, při němž dochází ke zvýšení napětí na konci vedení oproti napětí na začátku nebo přenos přirozeného výkonu po, při kterém dochází k nulovým ztrátám na vedení.

Zásadní částí této práce jsou vyšší harmonické, které se v dnešní moderní době stále častěji vyskytují v elektrických soustavách zásluhou nelineárních spotřebičů, které odebírají při sinusovém průběhu napájení nesinusový proud. Hlavní zdroje vyšších harmonických jsou elektronické součástky, elektrické pece či spínané napájecí zdroje. Ovšem tyto vyšší harmonické přinášejí nežádoucí problémy. Lze říci, že provoz sítě s obsahem vyšších harmonických je nákladnější, jelikož zde dochází ke zvýšení přídavných ztrát a ovlivnění zařízení, která jsou připojena do sítě, jako jsou transformátory či elektrické motory. Nejvíce jsou však ovlivněny spotřebiče, které jsou připojeny v blízkosti nelineární zátěže, jelikož zde nedochází k útlumu vyšších harmonických parametry vedení. Proto je nutné tyto harmonické složky utlumit či eliminovat pomocí filtrů nebo izolačních transformátorů.

Poslední část této práce je zaměřena na vytvoření funkčního modelu elektrické soustavy na hladině 22 kV se zdrojem vyšších harmonických, na kterém jsem provedl simulaci a zjišťoval vliv vyšších harmonických na proudové a napět'ové poměry v soustavě. Poté jsem na tomto modelu vytvořil dvoufázový a trojfázový zkrat u jednoho z odběrů a sledoval, jak se změní proudové a napět'ové poměry v soustavě.

7 Literatura

- [1] Pero, Martin, *Analýza podélných a příčných poruch v přenosových a distribučních elektrizačních soustavách*, Plzeň 2011, Bakalářská práce, Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Ing. Jan Veleba
- [2] Toman, Petr; Drápela, Jiří; Mišák, Stanislav; Orságová, Jaroslava; Paar, Martin; Topolánek, David, *Provoz distribučních soustav*, Praha: ČVUT 2011
- [3] Elektroenergetika I., WWW.VPICHA.CZ, dostupné dne 10. 4. 2011
- [4] Mertlová, Jiřina; Hejtmánková, Pavla; Tajtl, Tomáš, *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*, Plzeň: ZČU 2004.
- [5] Mertlová, Jiřina; Kocmich, Martin, *Elektrické stanice a vedení*, Plzeň: ZČU 1994
- [6] Tesařová, M.; Štroblová, M., *Průmyslová elektroenergetika*, Plzeň: ZČU 2000
- [7] *Kvalita elektrické energie*, dostupné dne 3.12.2012 z <http://www.medportal.cz/elektricke-vedeni/kvalitaelektricke-energie/harmonicke/>
- [8] Miloslava TESAŘOVA, *Přednášky z předmětu Průmyslová energetika (KEE/PE)*
- [9] Měření výkonů a odebíraných proudů silových zařízení http://www.kee.zcu.cz/files/laboratore/Uloha2-vykony_a_harmonicke.pdf
- [10] *Softwarový systém DYNAST.*, dostupné dne 2.4.2013 z: <http://virtual.cvut.cz/dynastcz/>
- [11] Artur R. Bergen, Vijay Vittal: *Power systems analysis*, Upper Saddle River, New Jersey, 2000
- [12] Mertlová, J.: *Přenos a rozvod el. energie*, ZCU Plzeň
- [13] Ibler, Z. a kol.: *Energetika*, BEN, Praha, 2002
- [14] William D. Stevenson: *Elements of power system analysis*, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1982
- [15] Kolcun, M., Mühlbacher, J., Haller, R.: *Mathematical analysis of electrical networks*, BEN, Praha, 2004

Použité programy: DYNAST, MATLAB

8 Příloha

Model sítě 22 kV

Purpose

Model sítě 22 kV

Description

Model sítě se zdrojem vyšších harmonických

Solution

System parameters

$\Omega = 100\pi$
 $N_1 = 110000$
 $N_2 = 23000$
 $L_h = 3.09$
 $P = 110/23$
 $U_m = 110k \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$
 $I_1 = 180$

Data

*: Model sítě 22kV

*SYSTEM;

sysvar Fi1,Fi2,Fi3;

$\Omega=100\pi$;

$N1=110000$;

$N2=23000$;

$Lh=3.09$;

$p=110/23$;

$Rm=N2*N2/Lh$;

$um=110k*\sqrt{2}/\sqrt{3}$;

$MGODPOR1=Rm*EXP(ABS(Fi1))$;

$0=Fi1-(N1*I.E1+N2*I.E2)/MGODPOR1$;

$MGODPOR2=Rm*EXP(ABS(Fi2))$;

$$O = Fi2 - (N1 * I.E3 + N2 * I.E4) / MGODPOR2;$$

$$MGODPOR3 = Rm * EXP(ABS(Fi3));$$

$$O = Fi3 - (N1 * I.E5 + N2 * I.E6) / MGODPOR3;$$

$$R1 \text{ Z1f-1} = 0.0244 * p * p;$$

$$Ls1 \text{ 1-2} = 2.926m * p * p;$$

$$R2 \text{ 3-4} = 0.0244;$$

$$Ls2 \text{ 4-T1f} = 2.926m;$$

$$C1 \text{ T1f} = 97.5n;$$

$$C2 \text{ T2f} = 97.5n;$$

$$R3 \text{ Z2f-10} = 0.0244 * p * p;$$

$$E1 \text{ 2} = N1 * VD.Fi1;$$

$$E2 \text{ 3} = N2 * VD.Fi1;$$

$$Rm21 = MGODPOR1;$$

$$Rm22 = MGODPOR2;$$

$$Rm23 = MGODPOR3;$$

$$U1 > E \text{ Z1f} = Um * \sin(\Omega * TIME);$$

$$U2 > E \text{ Z2f} = Um * \sin(\Omega * TIME + 2\pi/3);$$

$$E3 \text{ 6} = N1 * VD.Fi2;$$

$$E4 \text{ 7} = N2 * VD.Fi2;$$

$$U3 > E \text{ Z3f} = Um * \sin(\Omega * TIME - 2\pi/3);$$

$$E5 \text{ 8} = N1 * VD.Fi3;$$

$$E6 \text{ 9} = N2 * VD.Fi3;$$

$$R5 \text{ Z3f-11} = 0.0244 * p * p;$$

$$R4 \text{ 7-12} = 0.0244;$$

$$R6 \text{ 9-13} = 0.0244;$$

$$Ls4 \text{ 12-T2f} = 2.926m;$$

$$Ls6 \text{ 13-T3f} = 2.926m;$$

$$Ls3 \text{ 10-6} = 2.926m * p * p;$$

$$Ls5 \text{ 11-8} = 2.926m * p * p;$$

$$C3 \text{ T3f} = 97.5n;$$

$$C4 \text{ 1S1f} = 97.5n;$$

$$C5 \text{ 1S2f} = 97.5n;$$

$$C6 \text{ 1S3f} = 97.5n;$$

$$I1=180;$$

$$J1 \ 1S1f = I1*0.215*\sin(500\pi*time)+I1*0.115*\sin(700\pi*time)+I1*0.08*\sin(1100\pi*time)+ \\ I1*0.06*\sin(1300\pi*time)+ I1*0.045*\sin(1700\pi*time)+I1*0.04*\sin(1900\pi*time)+ \\ I1* 0.03*\sin(2300\pi*time)+I1*0.01*\sin(2500\pi*time);$$

$$J2 \ 1S2f = I1*0.215*\sin(500\pi*time+2\pi/3)+I1*0.115*\sin(700\pi*time+2\pi/3)+ \\ I1*0.08*\sin(1100\pi*time+2\pi/3)+I1*0.06*\sin(1300\pi*time+2\pi/3)+ \\ I1*0.045*\sin(1700\pi*time+2\pi/3)+I1*0.04*\sin(1900\pi*time+2\pi/3)+ \\ I1*0.03*\sin(2300\pi*time+2\pi/3)*0.01*\sin(2500\pi*time+2\pi/3);$$

$$J3 \ 1S3f = I1*0.215*\sin(500\pi*time-2\pi/3)+I1*0.115*\sin(700\pi*time-2\pi/3)+ \\ I1*0.08*\sin(1100\pi*time-2\pi/3)+I1*0.06* \sin(1300\pi*time-2\pi/3)+ \\ I1*0.045*\sin(1700\pi* time-2\pi/3)+ I1*0.04*\sin(1900\pi*time-2\pi/3)+ \\ I1*0.03* \sin(2300\pi* time-2\pi/3)*0.01*\sin(2500\pi*time-2\pi/3);$$

$$Lp11 \ 5-1S1f = 16.5m;$$

$$Rp11 \ T1f-5 = 3.54;$$

$$Rp12 \ T2f-14 = 3.54;$$

$$Rp13 \ T3f-15 = 3.54;$$

$$Lp12 \ 14-1S2f = 16.5m;$$

$$Lp13 \ 15-1S3f = 16.5m;$$

$$Rp31 \ T1f-19 = 4.72;$$

$$Rp32 \ T2f-20 = 4.72;$$

$$Rp33 \ T3f-21 = 4.72;$$

$$R11 \ 1S1f-16 = 60.8;$$

$$R12 \ 1S2f-17 = 60.8;$$

$$Lp31 \ 19-3S1f = 22m;$$

$$Lp32 \ 20-3S2f = 22m;$$

$$Lp33 \ 21-3S3f = 22m;$$

$$L13 \ 18 = 104.5m;$$

$$C7 \ T1f = 130n;$$

$$C8 \ T2f = 130n;$$

$$C9 \ T3f = 130n;$$

$$C10 \ 2S1f = 130n;$$

$$C11 \ 2S2f = 130n;$$

$$C12 \ 2S3f = 130n;$$

$$L11 \ 16 = 104.5m;$$

L12 17 = 104.5m;
R13 1S3f-18 = 60.8;
R21 2S1f-22 = 72.6;
R22 2S2f-23 = 72.6;
R23 2S3f-24 = 72.6;
L21 22 = 203.8m;
L22 23 = 203.8m;
L23 24 = 203.8m;
L32 25 = 120.76m;
L31 26 = 120.76m;
L33 27 = 120.76m;
R31 3S1f-26 = 89.06;
R32 3S2f-25 = 89.06;
R33 3S3f-27 = 89.06;
C13 T1f = 130n;
C14 T2f = 130n;
C15 T3f = 130n;
C16 3S1f = 130n;
C17 3S2f = 130n;
C18 3S3f = 130n;
Rp21 T1f-28 = 4.72;
Rp22 T2f-29 = 4.72;
Rp23 T3f-30 = 4.72;
Lp21 28-2S1f = 22m;
Lp22 29-2S2f = 22m;
Lp23 30-2S3f = 22m;
**TR;*
TR 0 0.12;
PRINT(2000) Z1f, Z2f, Z3f, T1f, T2f, T3f, V.1S1f, V.1S2f,
V.1S3f, V.2S1f, V.2S2f, V.2S3f, V.3S1f, V.3S2f, V.3S3f,
I.R1, I.R3, I.R5, I.R2, I.R4, I.R6, I.Rp11, I.Rp12,
I.Rp13, I.Rp21, I.Rp22, I.Rp23, I.Rp31, I.Rp32, I.Rp33;
RUN;
**END;*

Model

