

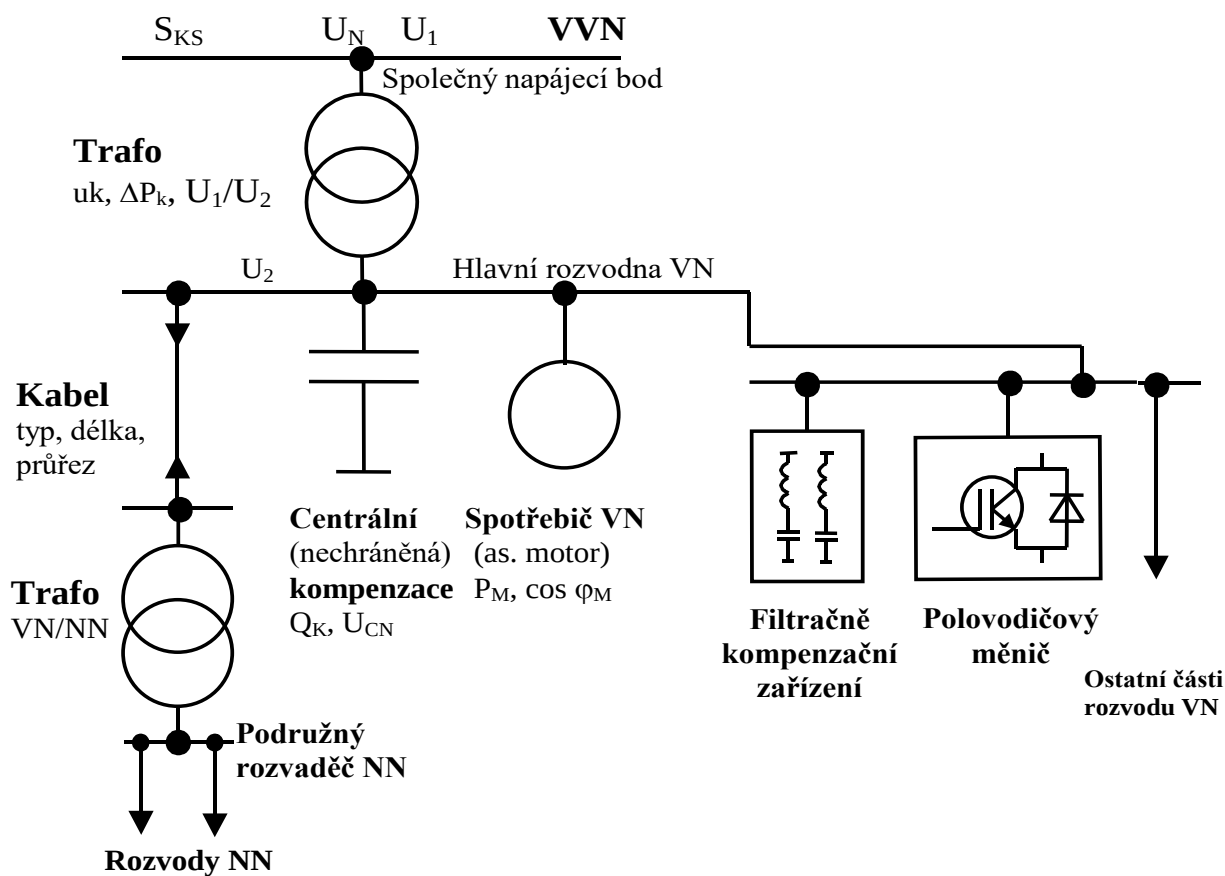


ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

8 IMPEDANCE SÍTĚ, HARMONICKÁ NAPĚTÍ

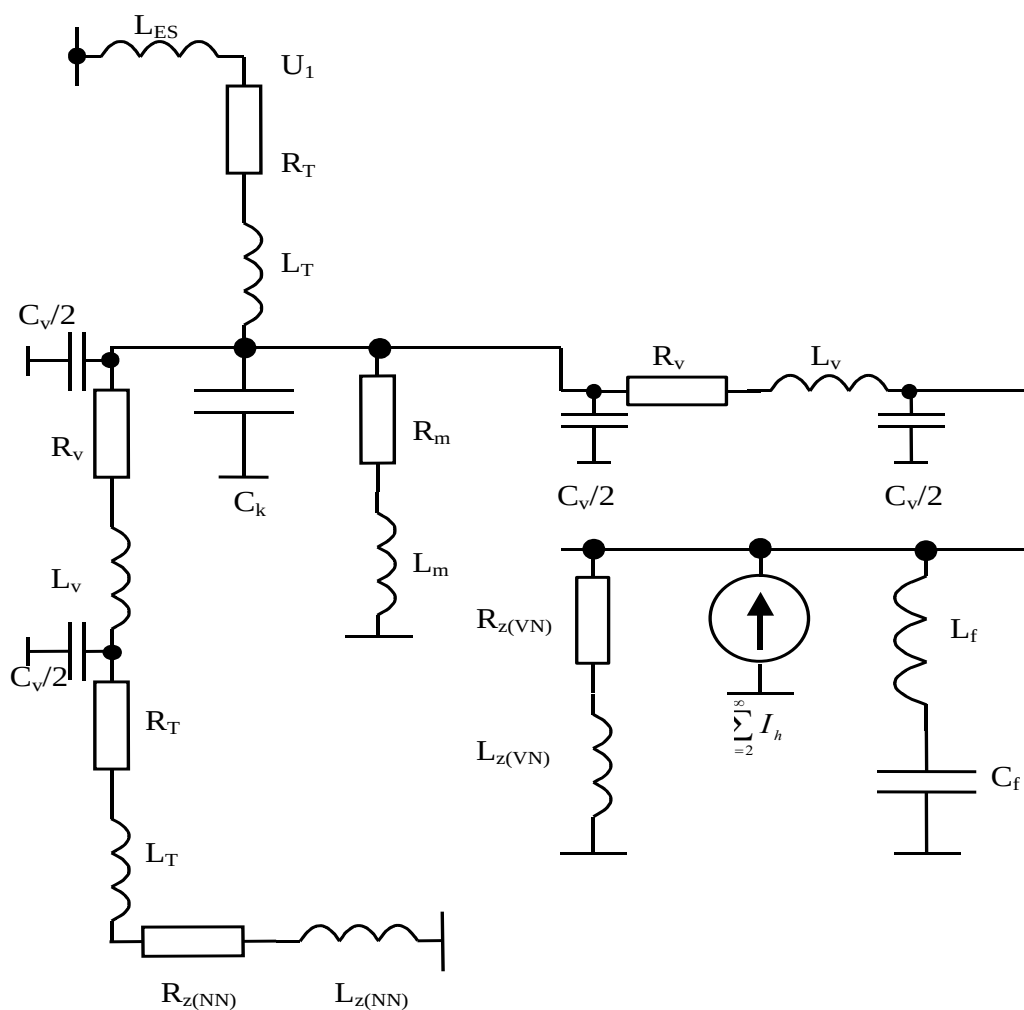
Pro vyšetřování vlivu polovodičového měniče na napájecí síť, vlivu filtrace a možnosti vzniku rezonance je třeba znát základní vlastnosti napájecí sítě. Zjednodušený pohled na možné schéma rozvodu el. energie je na obrázku 1.



obr. 1 – Základní schéma, představující možný rozvod s polovodičovým měničem

Na první (základní) sběrnici (například VVN) je zdroj velkého výkonu, takže můžeme předpokládat sinusové napětí první (základní) harmonické s konstantní amplitudou. Na sběrnici VN je toto napětí již zkresleno vlivem zátěží (nelineárních). Kromě toho jsou připojeny (přes trafo) mnohé rozvody NN. V systému též je centrální (nechráněná) kompenzace účinníku.

Pro poznání vlastností sledovaného rozvodu je vhodné provádět výpočet impedance sítě. S ohledem na působení polovodičových měničů a další nelineárních spotřebičů je třeba výpočty provádět jako funkci frekvence. Dle normy se tyto výpočty provádějí do řádu harmonické $h=40$. Modelové schéma pro výpočty impedance sítě, které odpovídá rozvodu z obrázku 1 je na obrázku 2.



obr. 2 – Modelové schéma pro výpočet impedance sítě

Impedance přívodní sítě L_{ES} je reprezentována napájecím vedením. Hlavní transformátor je obvykle modelován jako RL článek, obdobně i podružné transformátory velkých výkonů. Impedance na VN i NN straně mají obvykle induktivně odporový charakter, jejich účinník první harmonické $\cos \varphi_1$ navíc závisí na tom, zda je či není provedena individuální kompenzace. V případě malých zátěží může převládat vliv připojených kapacit, jako jsou např. trvale připojené kondenzátory, kapacity kabelových vedení ap. Na rozvaděči VN je dále připojen polovodičový měnič, který je zdrojem harmonických proudů vyšších řádů – na obrázku je znázorněn zdroj proudů. Současně ale odebírá první harmonickou proudů, která může být odebírána s proměnným účinníkem. Použitá filtračně - kompenzační jednotka je znázorněna filtrem $L_f C_f$.

Náhradní model pro výpočet impedance sítě

Stanovení impedance (zejména) závodové sítě je velmi složitou problematikou. V podstatě se jedné o tyto okruhy problémů:

- a) Tvorba náhradních modelů jednotlivých prvků el. soustavy.
- b) Zjednodušení daného modelu sítě, aniž by došlo k výrazným odchylkám ve výsledcích od modelu přesného.
- c) Použití výpočtové metody pro zjištění impedance v určených místech závodu.

Pro tvorbu náhradních schémat použijeme dále popsané modely. Obvykle se jedná o běžně používané vztahy. Jediný problém je s hodnotami impedance jednotlivých spotřebičů pro harmonické vyšších řádů. Obecně totiž platí, že např. $X_L = 2\pi f L$, ale dále je indukčnost funkcí frekvence. Totéž platí o ostatní prvky rozvodu. Proto jsou uvedeny i korekční koeficienty pro vyšší frekvence. Pro přesné výpočty (např. pro venkovní sítě) je pak nutné mít k dispozici naměřené hodnoty.

Při běžných výpočtech, zejména v závodových sítích je problém opačný – vzhledem ke složitosti a proměnlivosti sítě (množství momentálně připojených spotřebičů a

jejich výkon) je nutné provést takové zjednodušení, aby výsledek nejvíce odpovídal provozním podmínkám, ale současně aby model sítě byl snadno zhotovitelný a výsledky přehledné. Vlastní výpočet pak závisí na použitém programu.

Napájecí síť

Pokud nejsou k dispozici přesná a statisticky vyhodnocená měření harmonických napětí je v považována nadřazená soustava jako síť se zdrojem první harmonické napětí. Soustava se obvykle modeluje pouze jako indukčnost. Impedance se určí snadno ze zkratového výkonu sítě v příslušném místě:

$$Z_s = \frac{1,1 \cdot U_N^2}{S_K}$$

Pokud budeme požadovat i rozdělení na činnost a induktivní část, pak vyjdeme z účinníku nakrátko, kde se doporučuje uvažovat $\cos \varphi_k = 0,114$. Korekce pro vyšší frekvence se zde neprovádí.

Transformátory

Silové transformátory sloužící k napájení sítí odběratelů lze modelovat buď zjednodušeně pomocí RL modelu nebo jako plný model, vycházející ze známého náhradního schématu (viz. obrázek 3). Pro výpočet potřebujeme znát jmenovitý výkon a napětí transformátoru (S_T , U_T), ztráty transformátoru nakrátko (ΔP_k) a napětí nakrátko (u_k). Pak platí:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T}$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_T^2}{S_T^2}$$

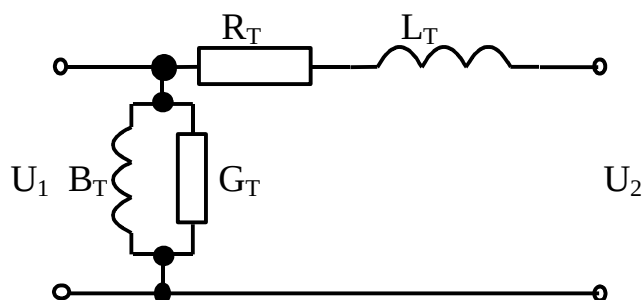
V případě složitějšího modelu zohledňujeme impedanci v příčné větvi, kterou protéká proud naprázdno. Vzhledem k induktivnímu charakteru této impedance je účinník odběru nezátíženého transformátoru velmi nízký. Indukčnost v příčné větvi spočítáme z magnetizačního proudu transformátoru (i_0), případný vliv ztrát v železe určíme z příkonu naprázdno (ΔP_0):

$$B_T = \frac{i_0}{100} \cdot \frac{S_T}{U_T^2}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_T^2}$$

Je-li v soustavě použit transformátor s trojím vinutím (je-li jedno kompenzační, pak jej neuvažujeme), je třeba počítat impedance v řazení do hvězdy.

Korekční koeficient pro vyšší frekvence se pohybuje $k_{vf} = (0.8 - 1)$.



obr. 3 – Náhradní schéma transformátoru pro výpočty impedance

1.1.1. Reaktory

Výpočet prvků náhradního schématu reaktoru se mnoho neliší od výpočtu transformátoru. Protože u reaktoru můžeme uvažovat $X_R \gg R_R$, můžeme psát:

$$X_R = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_R^2}{S_R}$$

Korekce pro vyšší frekvence se zde neprovádí.

Kondenzátorové baterie

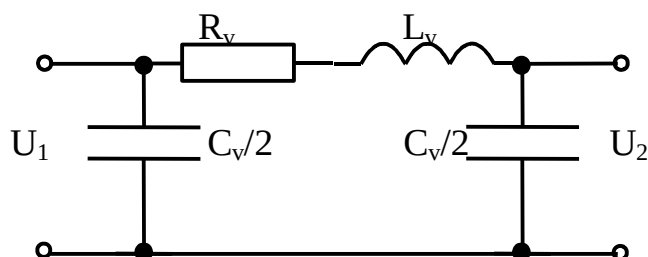
Kondenzátory, určené pro kompenzaci jalového výkonu jak na straně NN, tak na VN jsou velmi častým prvkem rozvodů. Při výpočtech impedance je nelze nikdy zanedbávat. V této části je probrán pouze případ samostatných kondenzátorových baterií. Obvykle je známý instalovaný výkon baterie. Pak platí:

$$X_K = \frac{U_V^2}{Q_{KB}}$$

Korekce pro vyšší frekvence se neprovádí.

Venkovní a kabelová vedení

Nejčastěji se provádí náhrada pomocí π - článku. U krátkých venkovních vedení stačí používat pouze modely pomocí sériového RL spojení.



obr. 4 – Modelové schéma kabelového, popř. venkovního vedení

Pro výpočet jednotlivých komponent vyjdeme z hodnot r_k , x_k a c_k , což jsou parametry, vztažené na 1 km délky vedení. Důležitou roli zde hraje rovněž počet kabelů, které jsou položeny paralelně. Platí:

$$X_v = x_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2$$

$$R_v = r_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)$$

$$C_v = c_k \cdot l \cdot p \cdot \left(\frac{U}{U_v} \right)^2$$

V uvedených vztazích je l délka modelovaného vedení a p je počet paralelních větví. Vedení či kabel má základní parametry (na kilometr) vztaženy pro napětí U , pro které je vyrobeno. Protože se ale model provádí pro vztažné napětí U_v , je třeba provést ve výpočtu přepočty. Korekce pro vyšší frekvence se obvykle neprovádí. Přesné náhradní schéma obsahuje ještě činné odpory, ekvivalentní příčnému svodu. Tyto odpory však výsledky v celkové konfiguraci téměř neovlivní.

Asynchronní motory

Asynchronní elektromotory jsou nejrozšířenějším spotřebičem elektrické energie. Zejména v průmyslových sítích tvoří více než $\frac{3}{4}$ všech instalovaných zařízení. Dominantní zastoupení pak mají motory s kotvou nakrátko.

Při výpočtu jednotlivých parametrů motoru vycházíme z hodnot nakrátko. Zdůvodnění najdeme např. u skluzu. Pro skluz základní harmonické s_1 platí:

$$s_1 = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

a pro skluz harmonických vyšších řádů:

$$s_h = \frac{h \mp (1 - s_1)}{h}$$

Znaménko + platí pro harmonické řádu 7, 13, 19, ..., tj. takové, které mají smysl otáčení shodný se základní harmonickou, znaménko – pro ostatní charakteristické harmonické. Protože skluz s_1 je malý (0.05-0.1), rovnice 3.12 se upraví na tvar:

$$s_h = \frac{h \mp 1}{h}$$

Dosazením za h vyšších řádů dostáváme, že s_h se blíží 1. Motor se jeví tedy pro vyšší harmonické jako zabrzděný. Náhradní schéma proto stanovíme z parametrů nakrátko. Základní vztah má tvar:

$$Z_{AM} = \frac{U_v^2}{P_{AM}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi_K \cdot \frac{1}{i_r}$$

Zde i_r je poměrný rozběhový proud, η je účinnost motoru a účinník je pro chod nakrátko. V praxi se obvykle používá náhrada pomocí RL prvků. Protože je účinník nakrátko motoru velmi nízký, můžeme psát, že $X_{AM} = Z_{AM}$. Pro činnou složku se objevují obvykle empirické vztahy:

$$R_{AM} = (0.05 - 0.1) \cdot X_{AM}$$

Korekční koeficienty pro vyšší harmonické jsou :

$$k_{vf} = 0.78 \text{ pro asynchronní motory s kotvou nakrátko}$$

$$k_{vf} = 0.88 \text{ pro asynchronní motory s kotvou vinutou.}$$

Uvedené vztahy a koeficienty jsou určitým způsobem nepřesné. Nejsou v nich zahrnuty vztahy, ke kterým v asynchronním motoru dochází např. vlivem skinefektu,

vlivem změny parametrů oteplením vinutí atd. Přesnějších výsledků bychom dosáhli z křivek, naměřených pro konkrétní motory či dané typové, výkonové a napětové řady.

Synchronní motory

Pro reaktanci stroje platí:

$$X_{SM} = x_d'' \cdot \frac{U_V^2}{S_{SM}}$$

kde x_d'' je poměrná subtranzientní reaktance motoru. Pro určení hodnot činného odporu platí podobně jako pro asynchronní motory:

$$R_{SM} = (0.08 - 0.1) \cdot X_{SM}$$

Korekční koeficienty pro vyšší harmonické jsou:

$k_{vf} = 0.71$ pro synchronní motory s vyniklými póly

$k_{vf} = 0.88$ pro asynchronní motory s hladkým rotorem.

Zátěže nižších napětových hladin

V praxi modelovaná síť je obvykle velmi rozsáhlá. Proto se provádí modelování jenom určité části rozvodu, kde nás zajímá impedance sítě a šíření harmonických proudů. V případě, že provádíme výpočty na vyšších napětových hladinách, může docházet k tomu, že je zapotřebí modelovat soustavy nižších napětových hladin. Takový model musí být co nejjednodušší, ale současně musí zahrnovat nejdůležitější parametry soustavy, které mají na průběh impedance na sledované napětové hladině nejvyšší vliv.

Odběry NN s připojenými asynchronními motory bez kompenzace NN

Vychází se ze znalosti (velmi často odhadu)

- výkonového využití napájecích transformátorů - k_{VT}
- výkonového využití skutečně připojených motorů - k_{VM}
- účinníku motorů nakrátko – $\cos \varphi_k$

Pak střední výpočtový výkon připojených motorů:

$$S_{AM} = S_{TR} \frac{k_{VT}}{k_{VM}}$$

Z toho pak vyplývají hodnoty v náhradním schématu:

$$X_{AM} = \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{VM}}{k_{VT}} \cdot \frac{U_V^2}{S_{TR}} \cdot \cos \varphi_K$$

$$R_{AM} = R_{AM} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_K$$

Jinou možností, bez nutnosti odhadovat mnohdy neznámé koeficienty je:

$$X_{AM} = (0.098 - 0.115) \cdot \frac{U_V^2}{S_{AM}}$$

$$R_{AM} = 0.15 X_{AM}$$

b) Odběry NN s připojenými asynchronními motory s kompenzací NN

V případě, že motorické odběry budou kompenzovány, změní se hodnota:

$$S_{AM} = \frac{k_{VT}}{k_{VM}} \cdot S_{TR} \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_M}$$

kde $\cos \varphi_M$ je účinník motoru bez kompenzace a $\cos \varphi$ je účinník s kompenzací. Pro výkon kondenzátorové baterie (pokud není udán) a jeho reaktanci platí:

$$Q_K = k_{VT} \cdot S_{TR} \cdot \cos \varphi \cdot (\operatorname{tg} \varphi_M - \operatorname{tg} \varphi)$$

$$X_C = \frac{U_V^2}{Q_K}$$

Odběry NN bez připojených asynchronních motorů

Jedná se o odběry ostatních pasivních spotřebičů – světlo, činné odpory atd. Náhradní reaktance se v tomto případě stanoví dle vztahů:

$$R_S = \frac{U_V^2}{k_{VT} S_{TR}} \cdot \cos \varphi_S$$

$$X_S = R_S \cdot \operatorname{ctg} \varphi_S$$

Pokud je k transformátoru zapojena smíšená zátěž, provede se odhad poměru připojených výkonů motorických a světelných odběrů.

Pravidla pro tvoření celkových modelů

Jedná se především o tvorbu modelů impedance závodových sítí. Zde je velmi složité určení, kolik zařízení pro model uvažovat. Dále je nutné vyhodnotit stavy sítě, při kterých dochází buď ke vzniku nebezpečných hodnot harmonických napětí, nebo stavy, kdy dochází ke vzniku rezonance soustavy. Proto je časté, že se v současné době s pomocí výpočetní techniky dělá velké množství výpočtů a provádí se citlivostní analýza. Následující pravidla je tedy nutné brát jako doporučující a vždy je nutné brát ohled na místní a časové podmínky. Velkou roli rovněž hraje zkušenost.

a) Transformátory a reaktory - v závodových sítích mohou být transformátory:

I. VN/VN (VVN/VN) - jedná se o hlavní transformátory. Vždy uvažovat.

II. VN/NN - při modelech VN uvažujeme jen velké výkony, při modelech NN pak uvažujeme vždy.

III. Reaktor je nutné uvažovat vždy.

b) Motory VN - motory na VN jsou obvykle na takových výkonů, že jejich vliv je vysoký. To platí jak pro asynchronní, tak i pro synchronní motory. Pokud bude na společné sběrnici více motorů, lze je modelovat jako jediný motor s výkonem rovným součtu výkonů všech motorů.

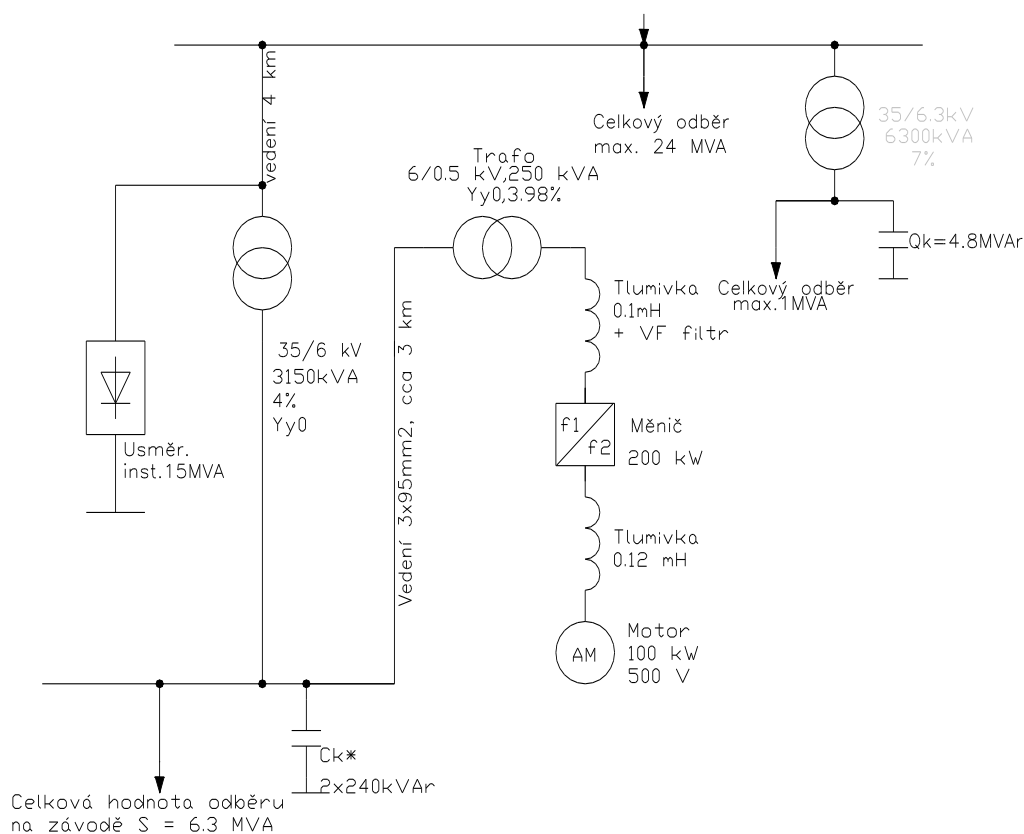
c) Venkovní a kabelové vedení VN - nejčastěji se provádí náhrada ve tvaru π článku. Kabely VN mezi jednotlivými rozvodnami (nad 100 m délky) je nutné vždy uvažovat. Kapacita se modeluje vždy, svodový odpor pouze u dlouhých vedení VN. U venkovních vedení kapacitu modelujeme nad 500 m. Pokud se provádí modely vedení nad 4 km, je obvykle vhodné dělit model na více π - článků. V opačných případech je nutné provádět model s pomocí rozložených parametrů.

d) Kondenzátory - je nutné vždy modelovat. Pozor v případě automatických kompenzačních stanic - zde je nutné výkon stanice (a tím kapacitu kondenzátoru) přizpůsobit uvažovanému výkonu modelovaných spotřebičů s induktivním charakterem.

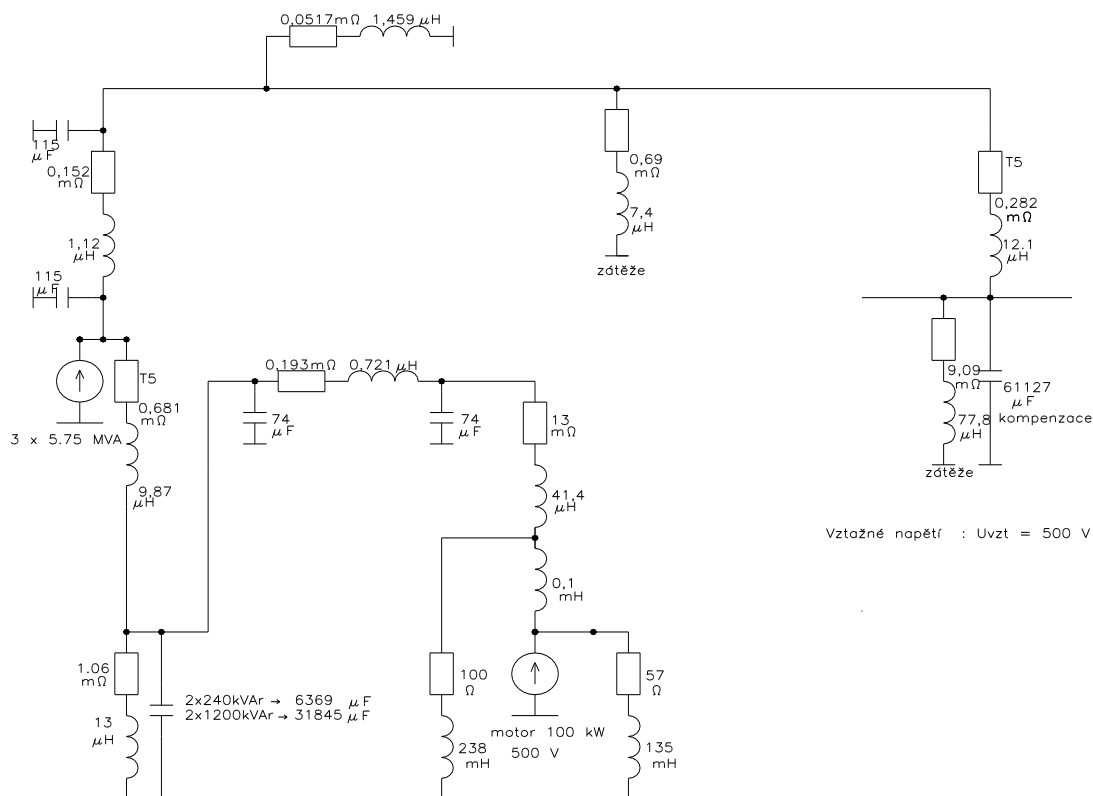
e) Zátěže NN - pokud se provádí model VN, stačí zátěž NN modelovat jedinou kombinací $R + jX_L$, případně doplněnou paralelní kapacitou. Pokud se provádí model NN, je možné zjednodušení provádět vždy o jeden stupeň transformace níž nebo

g) Zdroje vyšších harmonických proudů - modelujeme v případě, že potřebujeme provádět výpočty vyšších harmonických napětí.

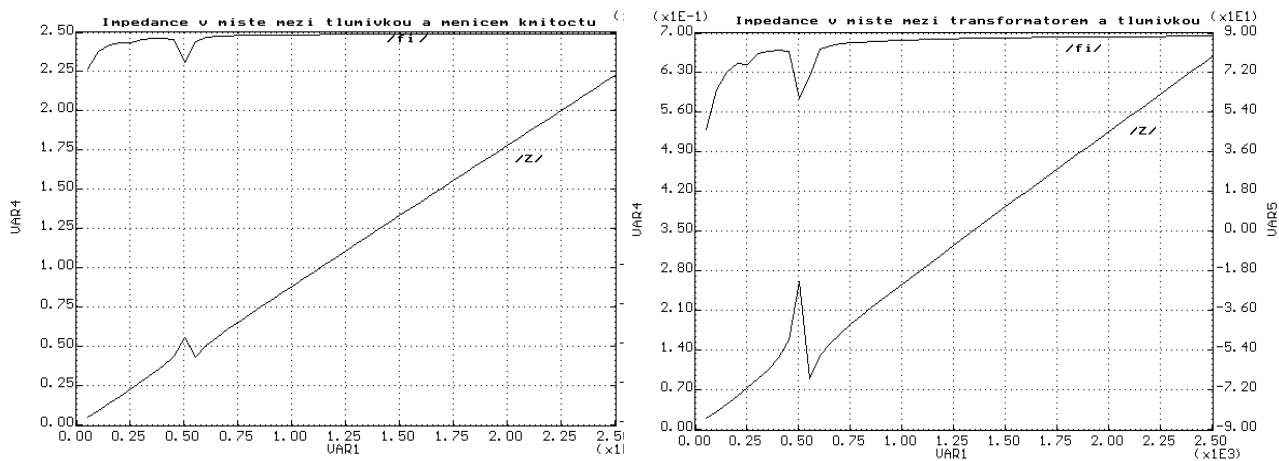
Ukázka skutečného stavu je prezentována na obrázku 5. Instalovaný měnič je vzdálen od nejbližšího zdroje energie přes 3 km. Proto musí být přívodní vedení na napětí 6 kV. Transformátor na 500 V má $u_k = 3.98 \%$. Mezi transformátorem a měničem je instalována tlumivka o velikosti 0.1 mH. Na sekundáru transformátoru nejsou prakticky připojeny žádné spotřebiče, a proto všechny harmonické proudy tečou do nadřazené soustavy.



11



Náhradní schéma rozvodů pro výpočet impedance a harmonický



Vypočítaná impedance na straně měniče (a) a na výstupu transformátoru (b)

Z obrázků vyplývá, že na vstupních svorkách měniče má rozhodující vliv na

impedanci tlumivka. Soustava v tomto místě není ovlivněna “okolními” vlivy. Tlumivka, která je zde pro omezení harmonických proudů současně zvyšuje napětí vyšších harmonických na vstupu měniče. To může vést k velkému zkreslení napětí, a proto jsou napájecí obvody měniče připojeny na výstup transformátoru.

Harmonická napětí

Uvažujeme-li polovodičový měnič jako proudový zdroj vyšších harmonických proudů, znamená to, že je do sítě dodáván konstantní proud a napětí stoupá úměrně s impedancí zátěže. Můžeme tedy psát:

$$\overline{U}_h = \overline{Z}_h \cdot \overline{I}_h$$

Napětí harmonických vyšších řádů se potom skládá s napětím první harmonické (z napět'ových zdrojů) a způsobuje zkreslení křivky napětí. Celkové napětí pak již neprochází nulou v okamžiku, kdy jí prochází první harmonická a rovněž dosahuje hodnot, které mohou být rozdílné od hodnot jmenovitých. Na velikost a tvar zkreslení má vliv jak velikost napět'ové harmonické, tak i její fázová poloha, která je dána polohou harmonického proudu.