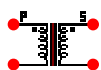


6. Transformátory

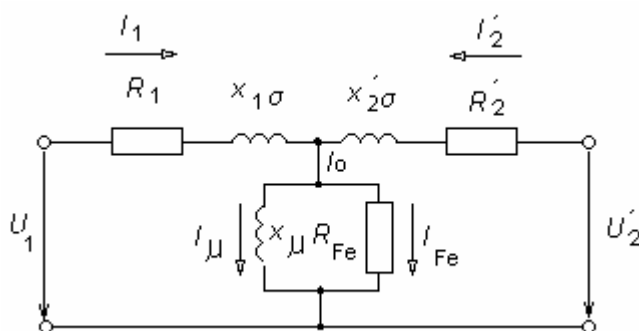
Jak již bylo uvedeno kapitole Obvodové prvky, je možno programem ATP modelovat různé druhy transformátorů. Lze přímo zadávat model ideálního 1fázového, nebo model 1fázového a 3fázových transformátorů dvou nebo 3vinut'ových s danou magnetizační charakteristikou (SATURABLE TRANSFORMER). Přitom se zadávají hodnoty T článku náhradního schématu transformátoru. Další možnost zadávání poskytuje procedura BCTRAN, která potřebná data vygeneruje ze štítkových hodnot transformátoru. Úvod této kapitoly bude opět věnován podrobnějšímu náhledu na zadávání parametrů jednotlivých modelů.

6.1 Nastavení parametrů modelů

6.1.1 Saturable 1 phase



Jedná se o model 1fázového transformátoru s uvažováním saturace. Dialogové okno zadávání obsahuje dvě složky, a to **Attributes** a **Charakteristic**. V **Attributes** se nastaví parametry transformátoru v souladu s náhradním schématem na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Náhradní schéma transformátoru

Zadává se:

I_0 - proud naprázdno (A)

F_0 - magnetický tok ve stavu naprázdno (Wb-závit)

R_{mag} - náhradní odpor ztrát v magnetickém obvodu (Ω) (R_{Fe} v Obr. 6.1)

R_p - odpor primárního vinutí obvodu (Ω) (R_1 v Obr. 6.1)

L_p - indukčnost primárního vinutí (mH), resp. reaktance (Ω)

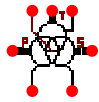
V_{tp} - efektivní hodnota primárního napětí (kV) (U_1 v Obr. 6.1)

R_s - odpor sekundárního vinutí obvodu (Ω)

L_s - indukčnost sekundárního vinutí (mH), resp. reaktance (Ω)

Magnetizační charakteristika transformátoru se zadává volbou **Charakteristic**, jako závislost magnetického toku (resp. magnetické indukce) na proudu.

6.1.2 Saturable 3 phases



Obecný model 3fázového transformátoru s uvažováním saturace. Pro 2 resp. 3vinuťový transformátor se v dialogovém okně **Attributes** označí položka **3-wind**. Pro každé vinutí včetně terciárního je možno zvolit zapojení (Y, D-lag, D-lead, Y180). Ostatní parametry jsou stejné, jako v předchozím případě, R_m je R_{mag} .

6.1.3 # Sat. Y/Y 3-leg



3fázový transformátor v zapojení Yy s uvažováním saturace. Jedná se o třísloupcový jádrový transformátor s vysokou homopolární reluktancí. V důsledku uzavírání homopolárního toku přes vzduch a konstrukci transformátorů je proud naprázdno nulové složky větší a nemůže být zanedbán.

f - frekvence během měření (Hz)

S_o - jmenovitý výkon transformátoru (V·A)

V_h - jmenovité fázové napětí na straně vyššího napětí (V)

V_l - jmenovité fázové napětí na straně nižšího napětí (V)

Další hodnoty se získají ze čtyř měření:

1. Měření naprázdno ze strany nn při jmenovitém napětí na vn.

P_{ed} - ztráty naprázdno (W)

I_{ed} - proud naprázdno (A)

U_{ed} - napětí naprázdno (V)

2. Měření nakrátko ze strany vn při jmenovitém proudu.

P_{sd} - jsou ztráty nakrátko (W)

I_{sd} - zkratový proud (A)

U_{sd} - napětí nakrátko (V)

3. Homopolární zapojení. Fáze nn strany spojen a proti uzlu transformátoru připojen zdroj s takovým napětím, aby na vn straně bylo ve stavu naprázdno napětí jmenovité.

P_{eh} - ztráty naprázdno (W)

I_{eh} - proud naprázdno (A)

U_{eh} - napětí naprázdno (V)

4. Homopolární zapojení. Fáze nn strany spojen a proti uzlu transformátoru připojen zdroj s takovým napětím, aby na vn straně ve stavu nakrátko tekla jmenovitý proud.

P_{sh} - jsou ztráty nakrátko (W)

I_{sh} - zkratový proud (A)

U_{sh} - napětí nakrátko (V)



6.1.4 BCTRAN

Verze ATPDraw 3.6 umožňuje vygenerovat parametry transformátoru pomocí procedury BCTRAN, na základě zadávání štítkových hodnot transformátoru. Ve složce **Structure** se zadá počet fází (1 nebo 3) v **Number of phases**, počet vinutí (1 nebo 2) v **Number windigs** a typ jádra v **Type of core**. Pro jednotlivé typy platí: **Triplex** – tři jednofázové transformátory, **Shell core** – plášťový transformátor, **3 až 5 legged stacked core** a **5-legged wound core** jádrové transformátory. Dále se zadá frekvence v Hz pomocí **Test frequency** a typ výstupní matice **LR** nebo **AR Output**.

Parametry, týkající se štítkových hodnot transformátoru a způsob zapojení se nastaví ve složce **Ratings**. V **L-L Voltage** (kV) se zadávají hodnoty napětí na primární straně vyššího napětí **HV**, na sekundární straně nižšího napětí **LV** a u 3vinutového jádra také napětí terciárního vinutí **TV**. Jmenovitý výkon transformátoru se zadá v **Power** (MV·A) a hodinový úhel ve stupních v **Phase shift**.

Složka **Factory tests** obsahuje data získané z měření naprázdno **Open circuit** a z měření nakrátko **Short circuit**. V případě měření naprázdno se určí, na které straně bylo prováděno měření **Performed at** a kam bylo připojeno napětí **Connect at**. Dále se ve složce **Open circuit** zadají data sousledných složek **positive sequence** a pokud jsou dosažitelné i nulových složek **zero sequence**, kde znamená: **Volt** (%) napětí, při kterém byl měřen proud naprázdno **Curr** (%) a **Loss** (kW) jsou ztráty naprázdno transformátoru. Podobně se zadají data z měření nakrátko **Short circuit**, kde je: **Imp** (%) impedance, resp. napětí nakrátko, **Pow** (MVA) jmenovitý výkon a **Loss** jsou ztráty nakrátko (kW).

6.2 Provoz transformátorů

6.2.1 Zapínací proud transformátorů

Značný proud může protékat vinutím nejen při zkratech nebo velkých přetíženích, ale také po připojení nezátíženého transformátoru v určitém okamžiku na síť. Pro bezeztrátový transformátor se proud odebíraný transformátorem opoždí za napětím o úhel $\pi/2$ a v okamžiku připojení transformátoru je nulový. Následující průběh zapínacího proudu bude záviset na hodnotě napětí v okamžiku připojení:

1. Připojení při maximální hodnotě napětí. Pro transformátor bez remanentní indukce bude indukční tok začínat nulovou hodnotou a přechodný děj nenastane, transformátorem poteče proud naprázdno.
2. Připojení při nulové hodnotě napětí. Indukční tok bude mít stejnosměrnou složku, která u menších transformátorů zaniká po desítkách period a u větších transformátorů po několika tisících periodách.
3. Další zvětšení, popřípadě zmenšení hodnoty magnetického toku, může být způsobeno remanentním magnetismem obvodu, který nebyl v předchozích případech uvažován. Velikost tohoto zvětšení je také závislá na uspořádání magnetického obvodu (u přeplátovaných plechů je zvětšení dost výrazné).

Matematicky lze popsat jednotlivé děje nelineárními diferenciálními rovnicemi prvního řádu.

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\varphi(i)}{dt} \quad (6.1)$$

kde závislost $\varphi(i)$ je nelineární. Linearizace tohoto členu je provedena tak, že se za proud dosadí:

$$i = N_1 \frac{\varphi}{L_{11}} \quad (6.2)$$

kde L_{11} je celková indukčnost vstupního vinutí. Po linearizaci má rovnice tvar:

$$R_1 N_1 \frac{\varphi}{L_{11}} + N_1 \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad (6.3)$$

kde ψ určuje okamžitou hodnotu napětí v okamžiku připojení. Vyřešením této rovnice platí pro okamžitou hodnotu celkového magnetického toku:

$$\varphi = \phi_{1M} \sin(\omega \cdot t + \psi + \psi_0) - \phi_{1M} \sin(\psi - \psi_0) e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (6.4)$$

kde je:

$$\phi_{1M} = \frac{\sqrt{2} U_1}{Z_{11}} \quad (6.5)$$

maximální hodnota magnetického toku a τ_0 časová konstanta charakterizující tlumení aperiodické složky.

$$\tau_0 = \frac{L_{11}}{R_1} \quad (6.6)$$

Pro chod naprázdno platí:

$$\psi_0 = \arctg \frac{X_{11}}{R_1} \approx 90^\circ \quad (6.7)$$

a výsledná hodnota celkového magnetického toku bude:

$$\varphi = \phi_{1M} \cos(\omega \cdot t + \psi) - \phi_{1M} \cos(\psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (6.8)$$

První člen tohoto výrazu představuje aperiodickou složku, druhý člen je ustálený sinusový magnetický tok. Magnetický tok bude mít největší hodnotu pro $\psi = k \cdot \pi$ (k je přirozené číslo) tedy v okamžiku, kdy napětí prochází nulou. Naopak aperiodická složka nevznikne, dojde-li k zapnutí v okamžiku, kdy hodnota napětí dosahuje svého maxima. Při uvážení remanence dojde podle polarity k další změně magnetického toku.

Pro případ připojení transformátoru v nule napětí může dosáhnout hodnota indukce velikosti:

$$B_{\max} = B_0 + 2B = 0,95 + 2 \cdot 1,65 = 4,25 \text{ T} \quad (6.9)$$

Kde B_0 je indukce remanentního magnetismu a B hodnota indukce u plechů válcovaných za studena. Jelikož má indukce nasycení hodnotu asi 2 T, dojde k přesycení jádra a tok se uzavírá okolím. Proud protékající obvodem je pak omezen odporem vinutí a rozptylovou reaktancí obvodu a může dosahovat vysokých hodnot. Pro maximální hodnotu zapínacího proudu platí:

$$I_{z.\max} = \frac{\sqrt{2}U_1}{X_p} \quad (6.10)$$

kde X_p představuje reaktanci kruhové cívky bez železa o výšce vinutí l , která se určí ze vztahu:

$$X_p = 2\pi f \cdot N_1^2 \mu_0 \frac{S}{l} \quad (6.11)$$

$S = \pi \cdot D^2/4$ je střední průřez pro střední průměr cívky D . Intenzita magnetického pole při zapínání mívá hodnotu:

$$H_{\max} = (6 \div 9) \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (6.12)$$

což představuje 800 až 1200násobek intenzity 800 A/m, která odpovídá indukci 1,65 T v jádře v ustáleném stavu. Jelikož proud naprázdno tvoří 0,5 % jmenovitého proudu, pak velikost maximální hodnoty zapínacího proudu dosáhne hodnoty:

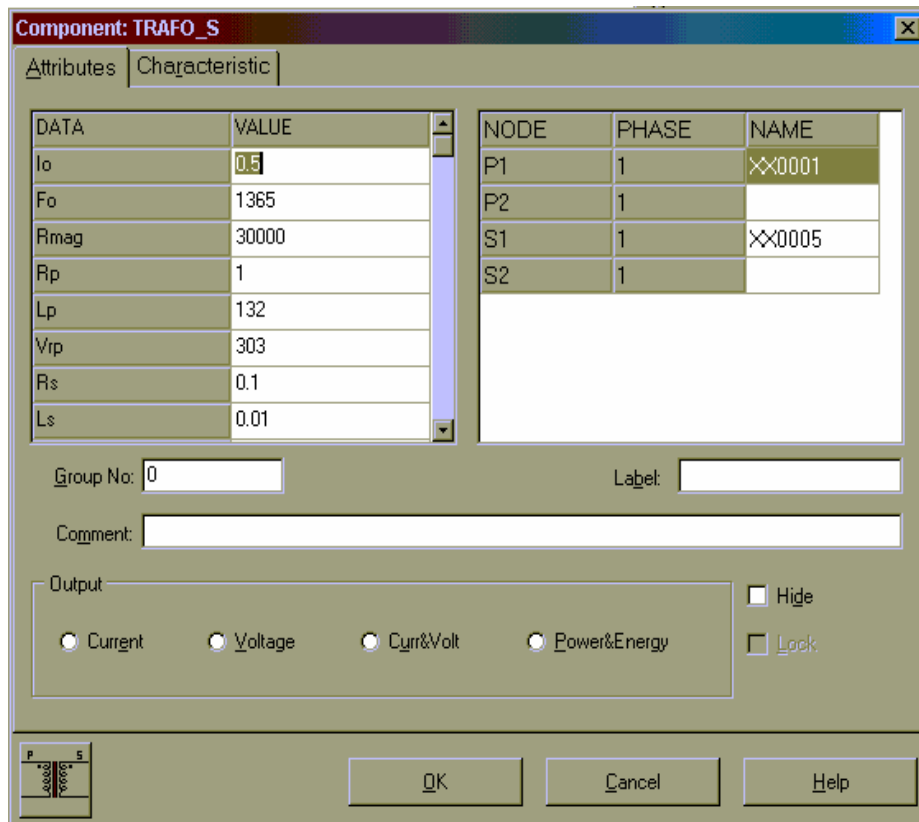
$$I_{z.\max} = 0,005 \cdot I_n \cdot (800 \div 1200) = (4 \div 6)I_n \quad (6.13)$$

Vzorec pro maximální hodnotu zapínacího proudu byl odvozen při zanedbání činného odporu vinutí. Jinak tento odpor tlumí stejnosměrnou složku magnetického toku, a tím snižuje největší možné hodnoty zapínacího proudu.

Řešení programem ATP

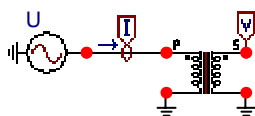
Při analyzování problému byl použit model jednofázového transformátoru 500/300 kV, který byl v ATPDraw zadán jako SATURABLE TRANSFORMER včetně magnetizační charakteristiky:

I (A)	0,5	5	10	100	5000
Ψ (Wb-závit)	1365	1771	1898	2425	4744



Obr. 6.2 Zadávání hodnot náhradního schématu transformátoru v ATPDraw

Transformátor je připojen ke generátoru o amplitudě $U_m = 430$ kV a frekvenci 50 Hz.

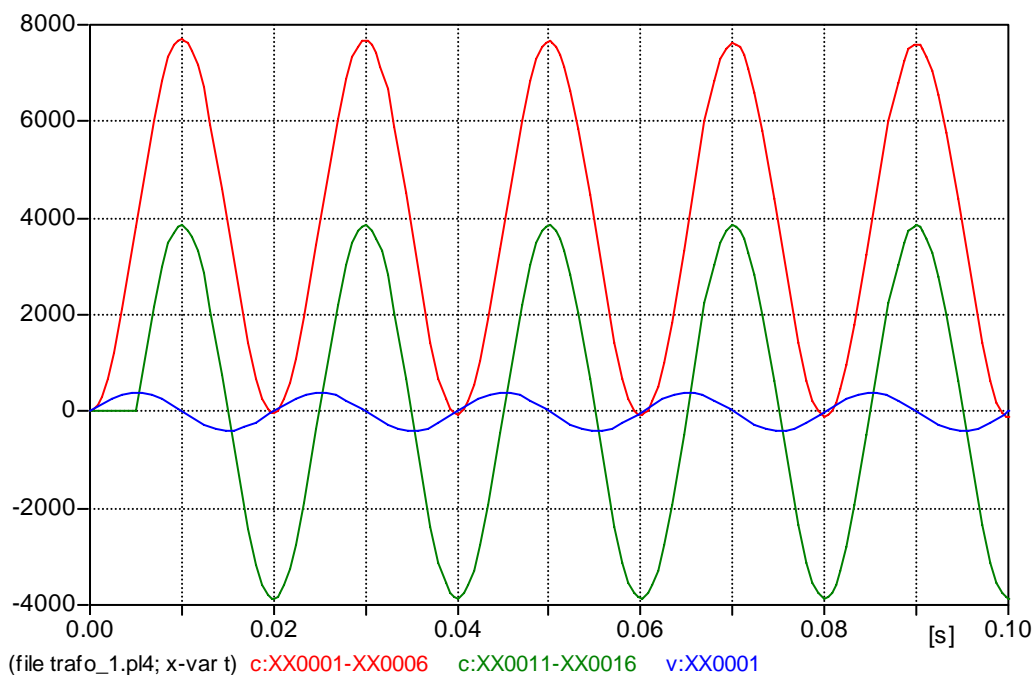


Obr. 6.3 Schéma zapojení transformátoru

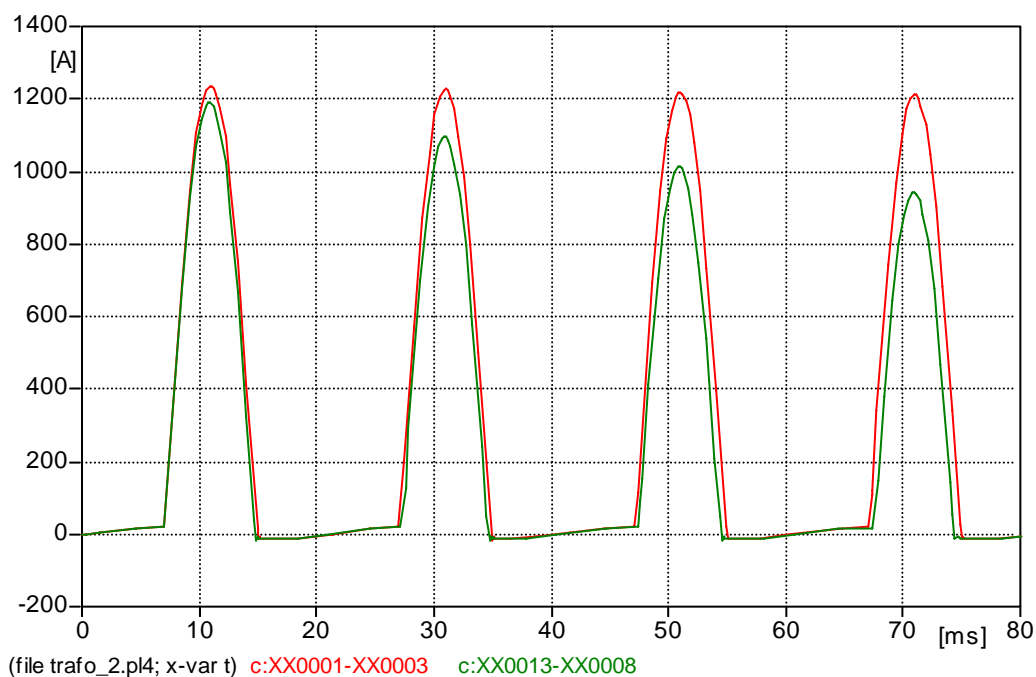
Na Obr. 6.4 je uveden příklad průběhu proudu, který odpovídá prvému a druhému případu úvodní části kapitoly. Průběh proudu c:XX0001-XX0006 odpovídá připojení při nulovém napětí, průběh proudu c:XX0011-XX0016 odpovídá připojení při maximální hodnotě napětí. Průběh napětí generátoru je sledován pomocí napěťové sondy (XX0001 – zem).

Obr. 6.5 ukazuje průběh zapínacího proudu transformátoru:

- při zanedbání činného odporu vinutí (hodnota $R_p = 0.001 \Omega$) průběh (XX0001-XX0003)
- při tlumení stejnosměrné složky respektováním činného odporu vinutí a vnitřního odporu zdroje (celkem 10Ω) průběh (XX0013-XX0008).

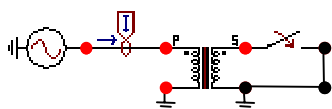


Obr. 6.4 Závislost zapínacího proudu na okamžiku připojení



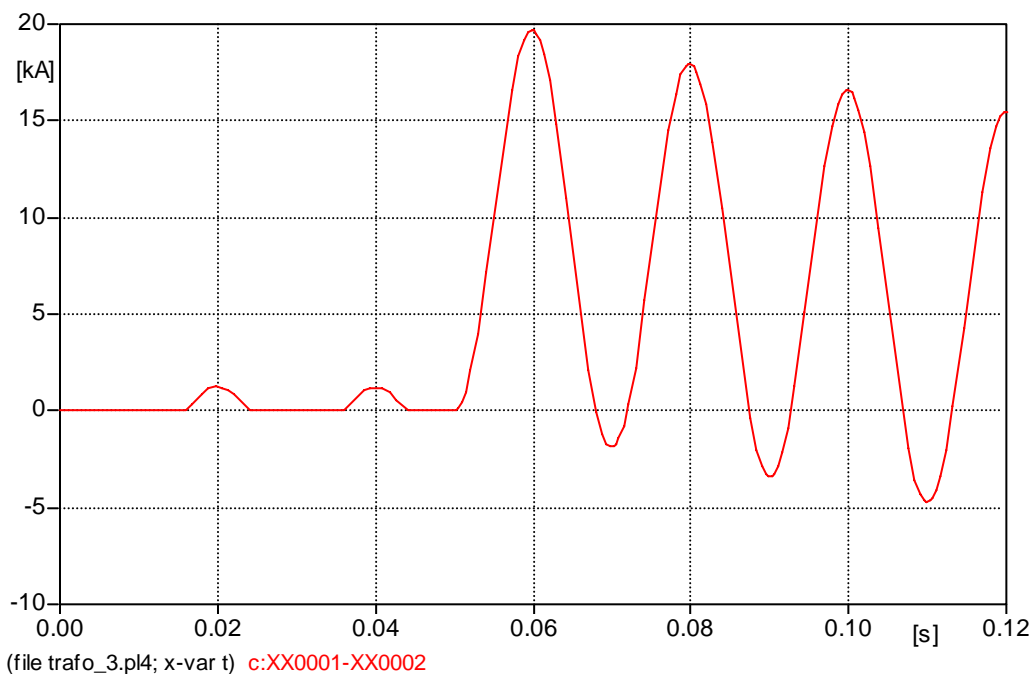
Obr. 6.5 Průběh zapínacího proudu s tlumením a bez tlumení stejnosměrné složky

Obr. 6.7 porovnává velikost zapínacího a zkratového proudu podle zapojení na Obr. 6.6. Přitom pro časové konstanty platí: $\tau_0 \gg \tau_k$ protože $L_{11} \gg L_{1K}$. Zdroj byl připojen v čase 10 ms a zkrat nastal v čase 50 ms. Je zřejmé, že tlumení aperiodické složky zkratového proudu je rychlejší z důvodu podstatně menší hodnoty časové konstanty τ_k .



Obr. 6.6 Schéma zapojení pro porovnání zkratového a zapínacího proudu

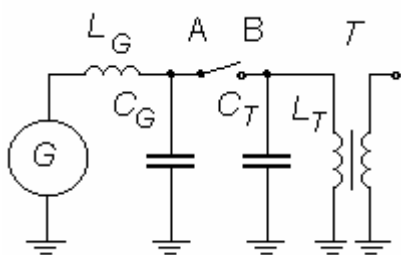
Zapínací proud není nebezpečný svými dynamickými ani tepelnými účinky, může však způsobit chybné odpojení transformátoru v důsledku přesycení jádra. Nadměrný zapínací proud je možno omezit velikostí dovolené indukce v jádře. Zkratový proud už nebezpečný je a o jeho vypnutí rozhoduje nastavení zkratových ochran transformátoru.



Obr. 6.7 Porovnání velikosti zkratového a zapínacího proudu

6.6.2 Vypínání malých indukčních proudů

Vypínání malých indukčních proudů nastává při vypínání transformátorů naprázdno nebo zatížených tlumivkami, při vypínání nezatížených motorů nebo proudů kompenzačních tlumivek v přenosech vvn a zvn. Když se vypínají takové proudy vypínači s účinným zhášedlem, dochází k přerušení proudu před průchodem nulou. Vznikají tím přepětí dosahující násobku jmenovitého napětí, která ohrožují izolaci sítě. Jako příklad je uveden přechodný děj při vypínání transformátoru naprázdno podle schématu na Obr. 6.8. Mohou opět nastat dva mezní případy. Buď dojde k vypnutí při průchodu proudu nulou, anebo při určité hodnotě proudu v obvodu.



Obr. 6.8 Schéma zapojení při vypínání transformátoru naprázdno

Vypnutí v nule proudu

Uhasnutím oblouku nastává rozpojení obou obvodů a napětí na každém kontaktu vypínače probíhá již odlišně. Kontakt A sleduje napětí generátoru u_G , kapacita C_T , která je nabita na plné napětí generátoru U_{GM} , se začne vybíjet přes indukčnost L_T a odpojený obvod se rozkmitá kmitočtem f_T . Pro kmitočet f_T platí vztah:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T \cdot C_T}} \quad (6.14)$$

Průběh napětí na kontaktu B je dán tímto kmitočtem. Kmity jsou tlumené, neboť odpor obvodu nikdy nemůže být nulový. Zotavené napětí na vypínači je dáno rozdílem napětí na jeho kontaktech.

Vypnutí s nenulovým proudem

Energie v indukčnosti L_T již není nulová, ale má velikost:

$$W_L = \frac{1}{2} L_T \cdot I_{\text{usek}}^2 \quad (6.15)$$

kde I_{usek} je velikost proudu v okamžiku jeho přerušení (useknutí). Kapacita C_T , která je v okamžiku useknutí proudu nabita na napětí zdroje, se začne nabíjet touto energií. Napětí na kapacitě se zvýší o hodnotu U_P , která vyplývá z rovnosti energie magnetické a elektrické:

$$\frac{1}{2} L_T \cdot I_{\text{usek}}^2 = \frac{1}{2} C_T \cdot U_P^2 \quad (6.16)$$

A pro hodnotu přírůstku napětí pak platí:

$$U_P = I_{\text{usek}} \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \quad (6.17)$$

Poněvadž kapacita C_T byla v okamžiku useknutí proudu nabita na hodnotu napětí zdroje $U_{G\text{usek}}$, narůstá napětí na kontaktu B až na vrcholovou hodnotu $U_{BM} = U_{G\text{usek}} + U_P$. Energie v indukčnosti L_T bude největší, dojde-li k useknutí proudu v jeho maximu. Pak platí:

$$I_{\text{usek}} = \frac{U_{\text{GM}}}{\omega \cdot L_{\text{T}}} \quad (6.18)$$

V tomto případě dosáhne vrchol napětí na kapacitě nejvyšší hodnoty:

$$U_{\text{PM}} = \frac{U_{\text{GM}}}{\omega \cdot L_{\text{T}}} \sqrt{\frac{L_{\text{T}}}{C_{\text{T}}}} \quad (6.19)$$

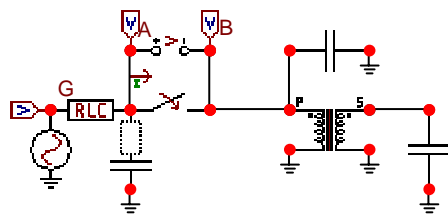
Po dosazení z (6.14) je výsledný tvar U_{PM} :

$$U_{\text{PM}} = U_{\text{GM}} \frac{f_{\text{T}}}{f} \quad (6.20)$$

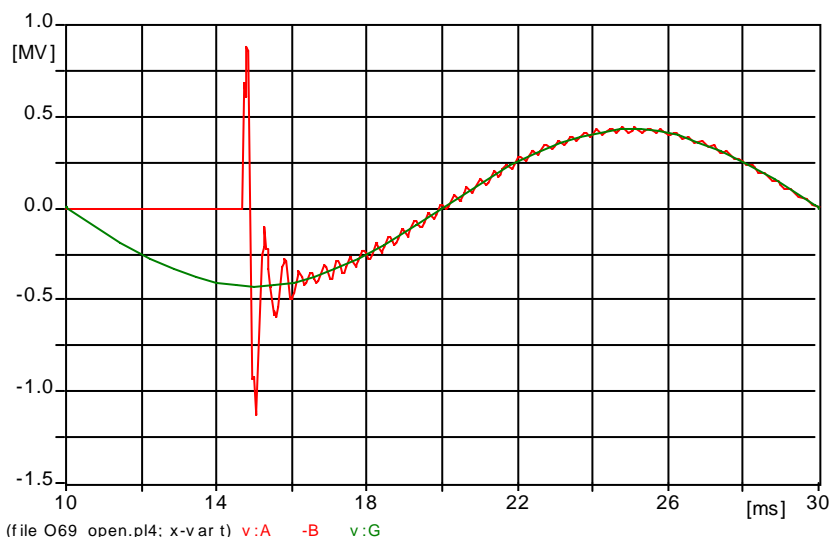
Kmitočet f_{T} obvodů vysokonapěťových motorů a transformátorů naprázdno se pohybuje nejčastěji v rozmezí 300 až 600 Hz. Z toho vyplývá, že první špička napětí mezi kontakty může dosáhnout velikosti 6 až 12 U_{GM} .

Řešení programem ATP

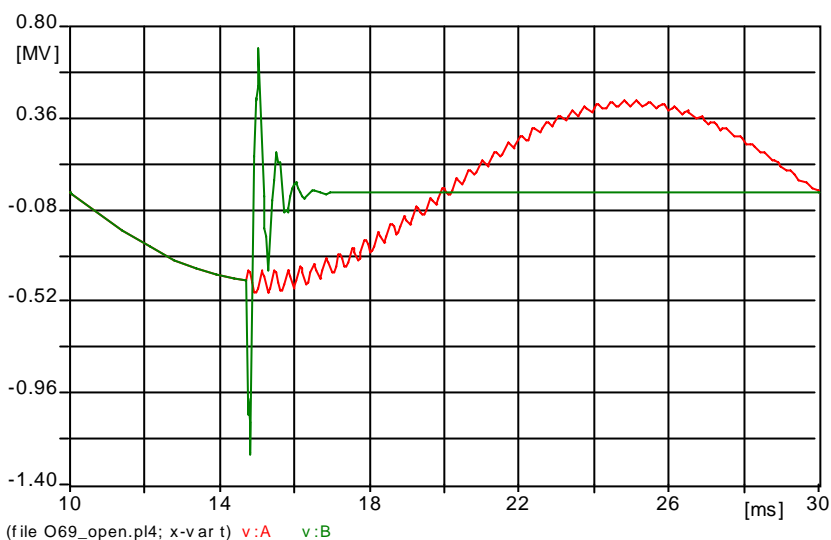
Na Obr. 6.9 je nakresleno schéma v ATPDraw, odpovídající případu vypínání transformátoru naprázdno. Je zde použit model jednofázového transformátoru z odstavce 6.1.1. Transformátor je připojen ke generátoru o napětí s amplitudou 430 kV a frekvencí 50 Hz. Vedení je realizováno pomocí RLC článku o parametrech $R = 0,5 \Omega$, $L = 35 \text{ mH}$. Kapacita generátoru je respektována a její hodnota je $C_{\text{G}} = 0,1 \mu\text{F}$ (faktor sériové rezistance je $K_{\text{s}} = 0,15$). Jsou také respektovány kapacity primárního ($C = 3 \text{ nF}$) a sekundárního ($C = 10 \text{ nF}$) vinutí transformátoru proti zemi. Jestliže je transformátor vypínán jako nezatížený, pohybují se hodnoty proudu v lineární části magnetizační charakteristiky. Proto stačí v dialogovém okně parametrů transformátoru zadat pouze maximální hodnotu magnetizační křivky, $I = 5000 \text{ A}$ a Fluxlinked (magnetický tok) = 4744 Wb. Magnetizační křivka transformátoru je tím považována za lineární. V případě odpojení transformátoru je hodnota proudu omezena impedancí obvodu. V důsledku toho je hodnota proudu v lineární části magnetizační křivky. Toto je druhý důvod, proč je možné v případě vypínání transformátoru naprázdno považovat magnetizační křivku za lineární. Čas vypnutí je na vypínači nastaven na 10 ms, což je okamžik před přirozeným průchodem proudu nulou. Je to také čas, kdy proud dosáhne své maximální hodnoty. Jedná se tedy o nejnepříznivější případ. Obr. 6.10 ukazuje průběh zotaveného napětí na kontaktech (A – B) spolu s napětím generátoru (G). Průběhy napětí na jednom a druhém kontaktu jsou zachyceny na Obr. 6.11



Obr. 6.9 Schéma zapojení při vypínání transformátoru naprázdno



Obr. 6.10 Průběh napětí na kontaktech při vypínání ve srovnání s napětím generátoru



Obr. 6.11 Průběhy napětí na kontaktech podle Obr. 6.8

6.6.3 Vypínání malých indukčních proudů ve 3fázovém obvodu

V předchozím odstavci byly sledovány vypínací procesy u 1fázového transformátoru. V zásadě budou obdobné i v obvodech 3fázových, zde se však průběhy komplikují tím, že se jednotlivé fáze mezi sebou ovlivňují.

Vzájemný vliv fází závisí na způsobu provozu uzlu transformátoru a sítě a na konstrukci transformátoru.

Řešení programem ATP

Na Obr. 6.12 je pomocí ATPDraw nakresleno schéma 3fázového obvodu pro vypínání malých indukčních proudů. Transformátor 110/22 kV je připojen ke 3fázovému generátoru, který je modelován ideálním zdrojem napětí s amplitudou 89,8 kV a frekvencí 50 Hz. Spojení je realizováno sériovým RLC , kde jednotlivé fáze mají tyto parametry: $R = 0,5 \Omega$, $L = 35 \text{ mH}$. Parametry kapacit jsou stejné jako v předchozím případě, pouze jsou zde modelovány rovněž 3fázovým RLC prvkem. Čas vypnutí je 10 ms, kdy se jedná o okamžik před přirozeným průchodem proudu nulou, proud v tomto okamžiku dosahuje své maximální hodnoty, jedná se tedy o

nejnepříznivější případ z hlediska napěťového namáhání. Transformátor je modelován pomocí procedury BCTAN viz. odstavec 6.1.4. Jedná se o transformátor 110/22 kV v zapojení Dyn. Ostatní parametry viz. následující tabulky.

Tab. 6.1 Struktura transformátoru (**Structure**)

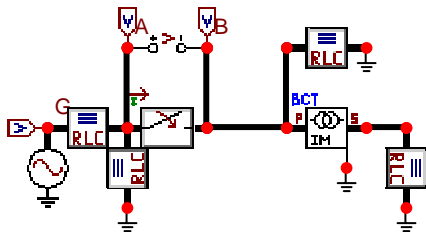
Počet fází (Number of phases)	Počet vinutí (Number windigs)	Typ jádra (Type of core)	Testovací frekvence (Hz) (Test frequency)
3	2	Plášťové jádro	50

Tab. 6.2 Šítkové hodnoty transformátoru (**Ratings**)

Primární napětí (kV) (HV)	Sekundární napětí(kV) (LV)	Jmenovitý výkon (MVA) (Power)	Zapojení (Connections)	Fázový posun (°) (Phase shift)
63,5	12,5	40	Yyn	30

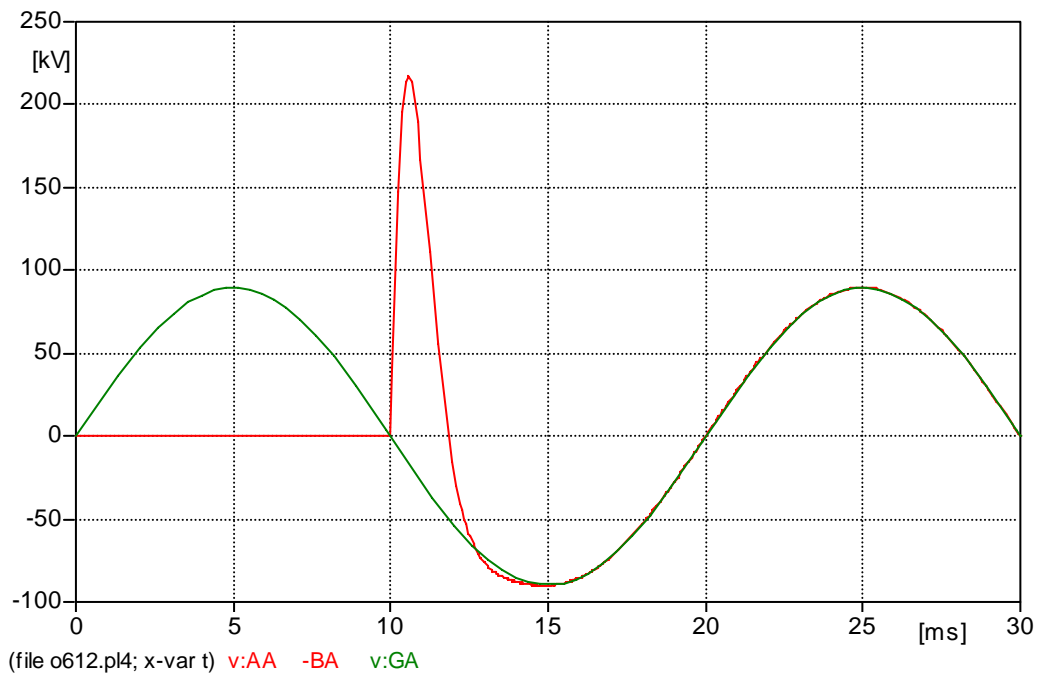
Tab. 6.3 Hodnoty získané z měření naprázdno a nakrátko (**Factory tests**)

Napětí nakrátko (%) (Imp)	Ztráty nakrátko (kW) (Loss)	Proud naprázdno (%) (Curr)	Ztráty naprázdno (kW) (Loss)
11,5	25,6	0,4	40

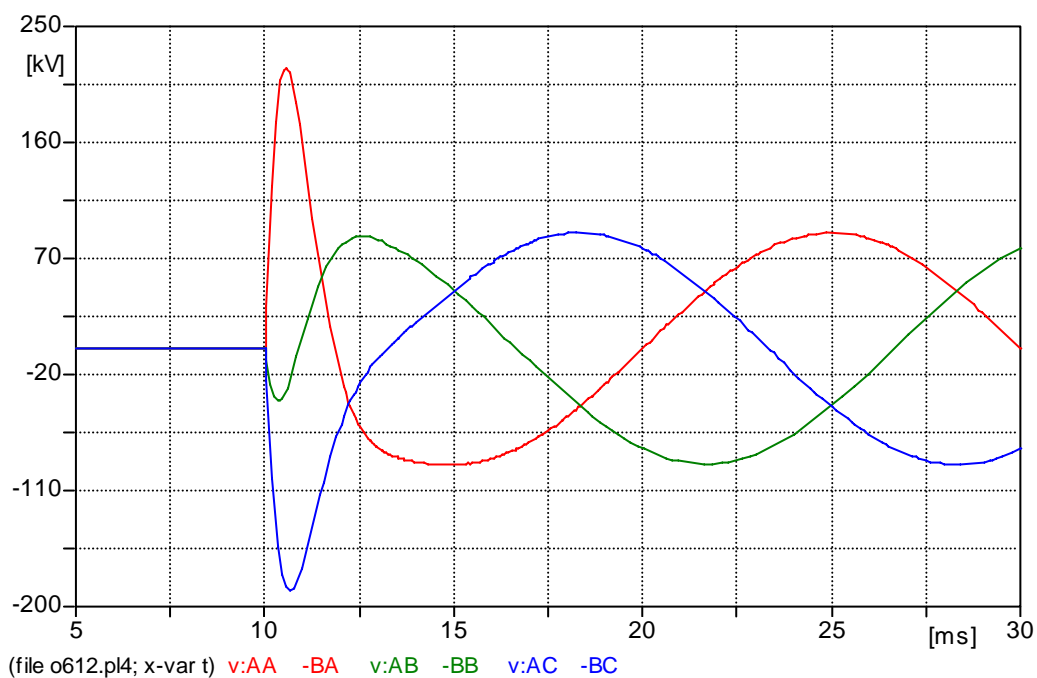


Obr. 6.12 Schéma zapojení při vypínání 3fázového transformátoru naprázdno

Obr. 6.13 ukazuje průběh napětí mezi kontakty vypínače fáze A (AA-BA) v porovnání s napětím generátoru (GA). Průběh napětí na kontaktech všech fázích vypínače je zobrazen na Obr. 6.14.



Obr. 6.13 Průběh napětí na kontaktech fáze A při vypínání ve srovnání s napětím generátoru



Obr. 6.14 Průběh napětí na kontaktech jednotlivých fází