

**Preklad textov prof. Eiichi Haginomoriho  
pre prácu s EMTP-ATP**

# OBSAH

## 1 Prechodné javy v energetických systémoch

### 1.1 Skraty

Analytické riešenie

Počiatkové rázové skratové prúdy v trojfázovom obvode

### 1.2 Magnetizačné prúdy pri zapínaní transformátorov

### 1.3 Magnetizačný prúd transformátora a geomagnetické poruchy

## 2 Vypínanie skratov

Vypínanie

Prerušenie prúdu

Zotavené napätie

### 2.1 Parametre charakterizujúce vypínanie skratového prúdu

### 2.2 Metóda injekcie prúdu pre riešenie zotaveného napätia pri vypínaní obvodu

### 2.3 Zotavené napätie v elektrických sieťach

### 2.4 Zotavené napätie v trojfázovom obvode

## 3 Vypínanie kapacitných prúdov

Úvod

### 3.1 Vypínanie kapacitných jednotiek

### 3.2 Kapacitné prúdy vzdušného vedenia

## 4 Prerušenie indukčného prúdu

## 5 Prenosové vedenia, káble a transformátory

### 5.1 Prenosové vedenia

p článok (nominal  $\pi$ )

transponovaný model (Clark)

netransponovaný model (K. C. Lee)

Frekvenčne závislé modely (J. Marti, Noda, Semlyen)

### 5.2 Káble

Multifázový otvorený káblový systém

Multifázový káblový systém uzatvorený v trubici

### 5.3 Transformátory

## 6 Prenos výkonu a stabilita napätia v energetických systémoch

### 6.1 Prenos energie

### 6.2 Stabilita napätia

## 7 Dynamická stabilita energetických systémov

### 7.1 Pravidlo plôch

### 7.2 Riešenie stability analýzou okamžitých hodnôt

## 8 Trojfázové výkonové meniče

### 8.1 Popis zapojenia

## 9 Indukčné stroje s frekvenčnými meničmi

### 9.1 Indukčný stroj napájaný meničom

## 10 Dynamický oblúk v energetických systémoch

### 10.1 Mayr a Cassie - modely oblúkov

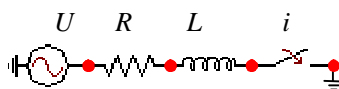
### 10.2 Vypínanie skratu na vedení

### 10.3 Prerušenie prúdu v nule

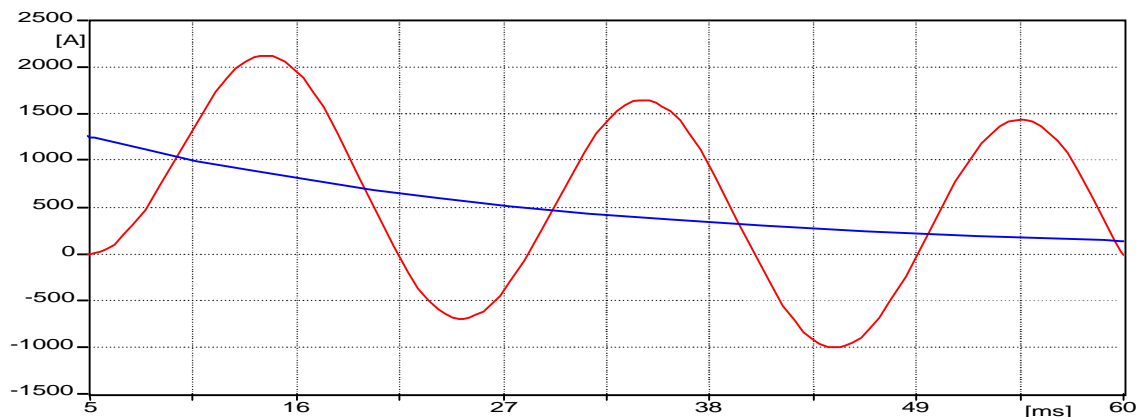
# 1 PRECHODNÉ JAVY V ENERGETICKÝCH SYSTÉMOCH

## 1.1 Skraty

### *Analytické riešenie*



Obr. 1.1 Obvod skratu



Obr. 1.2 Priebeh striedavej a jednosmernej zložky skratového prúdu

Pre prúd prechádzajúci obvodom podľa Obr. 1.1 platí:

$$i = I \cdot \left( \sin(\omega \cdot t + a - q) - e^{-\frac{R \cdot t}{L}} \cdot \sin(a - q) \right) \quad (1.1)$$

$$q = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right) \quad (1.2)$$

pričom  $\sin(a - q)$  je veľkosť jednosmernej zložky v čase  $t = 0$ . Skratový prúd je samozrejme sínusový. Prúd začína v nule, pretože je vďaka indukčnii spojitý. Jednosmerná zložka závisí od okamihu vzniku skratu. Výpočtom v EMTP je možné meniť tento okamih a príklad je uvedený na Obr. 1.2. Pre trojfázový obvod s netočivou reaktanciou  $X_{(0)}$  a súslednou reaktanciou  $X_{(1)}$ , videnou z miesta skratu pri fázovom napätí s amplitúdou  $E$ , je možné určiť pomocou metódy symetrických zložiek **počiatočný rázový skratový prúd**. Nasledujúce amplitúdy skratových prúdov sú získavané z rovnovážneho stavu. Počas prechodného časového intervalu má každá fáza prúdu zanikajúcu jednosmernú zložku a ich amplitúdy závisia od okamihu vzniku skratu.

### *Počiatočné rázové skratové prúdy v trojfázovom obvode*

#### **Trojfázový skrat**

$$I''_{k3} = \frac{E}{X_{(1)}} \quad (1.3)$$

### Dvojfázový skrat

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E}{2 \cdot X_{(1)}} \quad (1.4)$$

### Dvojfázový zemný skrat

$$I''_{k2v} = \frac{(a^2 - a) \cdot X_{(0)} - (1 - a^2) \cdot X_{(1)}}{2 \cdot X_{(0)} \cdot X_{(1)} + X_{(1)}^2} \cdot E \quad (1.5)$$

$$I''_{k2w} = \frac{(a - a^2) \cdot X_{(0)} - (1 - a) \cdot X_{(1)}}{2 \cdot X_{(0)} \cdot X_{(1)} + X_{(1)}^2} \cdot E \quad (1.6)$$

$$I''_{k2z} = \frac{-3 \cdot E \cdot X_{(1)}}{2 \cdot X_{(0)} \cdot X_{(1)} + X_{(1)}^2} \quad (1.7)$$

$$\text{kde } a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

### Jednofázový zemný skrat

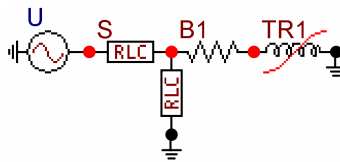
$$I''_{k1} = \frac{3 \cdot E}{X_{(0)} + 2 \cdot X_{(1)}} \quad (1.8)$$

Súčasný energetický systém obsahuje rôzne kapacitancie, ako napríklad vonkajšie prenosové vedenia, káble, energetické kondenzátory atď., ktoré predstavujú ďalšie možnosti výskytu prechodných javov. Ich veľkosť určuje frekvenciu a veľkosti zotavených napätí pri vypínaní skratov a hodnoty prechodných prepätí pri vzniku a prerušení zemného spojenia. Vypínanie veľkých kapacít môže vyvolať opakované prierazy a prepätia, ktoré dosahujú veľkosť až sedemnásobku menovitého napätia siete. Zapínanie nezaťažovaných vedení zasa môže vyvolať ferorezonančné javy, kedy v dôsledku prepätia vyvolaného kapacitnou záťažou dôjde k presýteniu transformátora a vzniknuté oscilácie majú dlhú dobu trvania.

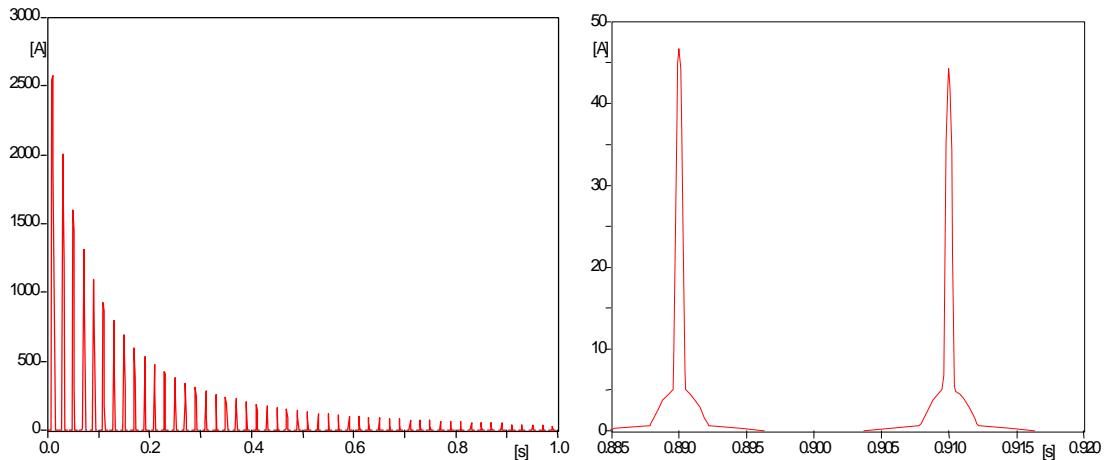
## 1.2 Magnetizačné prúdy pri zapínaní transformátorov

Obr. 1.3 uvádza výpočet skratového prúdu v reálnom energetickom systéme (rozsiahla sústava 550 kV).

Pri zapínaní veľkých transformátorov, dochádza k vzniku prechodných magnetizačných prúdov trvajúcich až niekoľko desiatok sekúnd. Pozorované amplitúdy dosiahli aj niekoľko tisíc ampérov. Dôsledkom magnetickej saturácie v jadre a zvyškového počiatočného toku, dochádza k zmene hodnoty prúdu v nasýtených oblastiach v závislosti od konštantného napájacieho napätia. Hodnoty pretekajúcich prúdov sú vysoké. Obrázok 1.3 ukazuje extrémny prípad s maximálnym rozdielom tokov. Zmena prúdu z pôvodných niekoľko ampérov na rádovo vyššie hodnoty vyvolá nárast strát. Analýza je v dôsledku nelinearity obťažná, preto sa odporúča číselný výpočet.



Obr. 1.3 Obvod pre určenie magnetizačného prúdu pri zapínaní transformátora

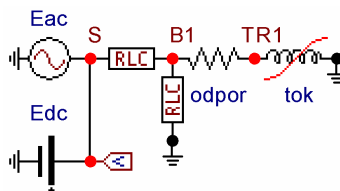


Obr. 1.4 Priebeh magnetizačného prúdu a jeho detail

### 1.3 Magnetizačný prúd transformátora a geomagnetické poruchy

Geomagnetické poruchy, ktoré sa objavujú asi tak každých 11 rokov, vyvolávajú dočasné jednosmerné napätia rôznej veľkosti pozdĺž prenosového vedenia a v prenosových vedeniach a koncových transformátoroch tečú jednosmerné prúdy. V ich dôsledku došlo v roku 1989 k rozpadu veľkej časti elektrického systému Kanady a USA, ktoré vyvolalo prehriatie transformátorov. Obr. 1.5 ukazuje schému pre riešenie tohto stavu, v ktorom jednosmerný zdroj zastupuje indukované jednosmerné napätie.

Prúd transformátorom (viď Obr. 1.6) narastá najprv pomaly, v čase 0,2 s dôjde k rýchlemu presýteniu a tento jednosmerný prúd sa ustáli a trvá, pokiaľ nie je transformátor odpojený. Ak ochrany poruchu nezistia, môže dôjsť k zničeniu transformátora.



Obr. 1.5 Obvod pre výpočet prúdu v transformátore pri vzniku geomagnetickej poruchy

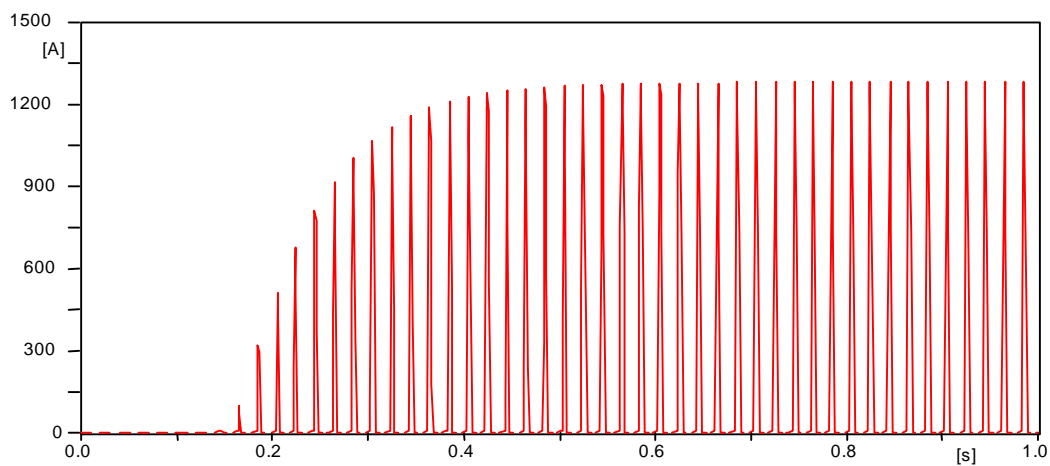
Podľa obrázka 1.5, ktorý je jednoduchou schémou pre výpočet, sa dajú zostaviť rovnice:

$$E_{ac} - E_{dc} = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.9)$$

$$E_{dc} \cdot (t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} R \cdot i \cdot dt \quad (1.10)$$

$$\frac{E_{dc}}{R} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{i}{t_2 - t_1} \cdot dt \quad (1.11)$$

Integráciou rovnice (1.9) jednej periódy pri počiatkových podmienkach takých, že integrály  $E_{ac}$  a  $dF/dt$  sú rovné nule, vznikne rovnica (1.10) a po prevedení konštanty  $R$  na druhú stranu vznikne rovnica (1.11). Ľavá strana rovnice odpovedá kvázi-jednosmernej zložke vytvorenej geomagneticou poruchou a pravá strana vyjadruje priemernú hodnotu prúdu za jednu periódu. Je možné konštatovať, že magnetizačné prúdy transformátora pri geomagnetickej poruche pretekajú transformátorom s priemernou hodnotou indukovanej jednosmernej zložky. Pri trvaní prúdov 10 až 20 minút a v dôsledku uzatvárania rozptylových tokov mimo jadra transformátorov (nastala saturácia), môže prehriatie transformátora vyvolať poruchu.



Obr. 1.6 Prúd transformátorom pri geomagnetickej poruche

## 2 VYPÍNANIE SKRATOV

### Vypínanie

Ide o priebeh prerušovania kontaktov vypínača, kedy pri oddelení kontaktov vzniká a zháša sa oblúk, prerušuje sa prúd a obnovuje napätie na kontaktoch vypínača.

### Prerušenie prúdu

Je dočasný zánik prúdu (vypnutie) a hodnota striedavého prúdu je nulová.

### Zotavené napätie

Transient Recovery Voltage (TRV) je zotavené napätie, ktoré sa objaví na kontaktoch vypínača po prerušení prúdu.

### 2.1 Parametre charakterizujúce vypínanie skratového prúdu

Vypínanie nastáva pri prechode prúdu nulou po rozpojení kontaktov vypínača v striedavom obvode. Úspešnosť alebo neúspešnosť vypnutia závisí od týchto parametrov:

- maximálna hodnota prúdu v danom obvode
- časová zmena prúdu pred prechodom prúdu nulou ( $di/dt$ )
- nárast zotaveného napätia medzi kontaktmi ( $du/dt$ )
- maximálna hodnota zotaveného napätia (TRV)
- energia zhášaného oblúka (tlak plynu medzi kontaktmi, tvar kontaktov, počet sériových prerušovacích dráh, atď.)

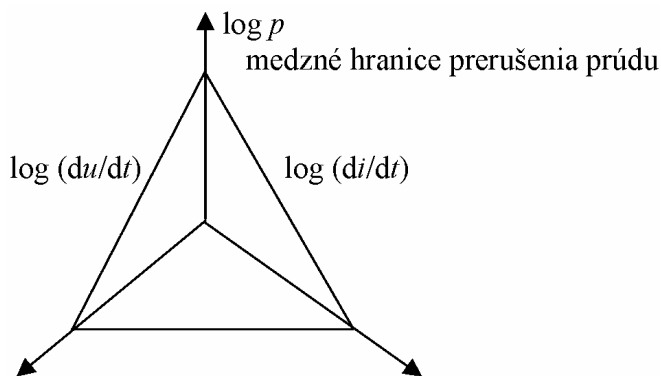
Pri vypínaní prevláda prúdová strmosť ( $di/dt$ ), nárast TRV ( $du/dt$ ) a tlak plynu medzi kontaktmi ( $p$ ). Autor stanovil experimentálne nasledujúcu rovnicu:

$$\frac{dv}{dt} = K \cdot p^a \left(\frac{di}{dt}\right)^b \quad (2.1)$$

Experimentálne získané hodnoty pre vypínače s SF<sub>6</sub> od dvoch výrobcov sú:

GCB  $a = 2,68,$       $b = -2,24$

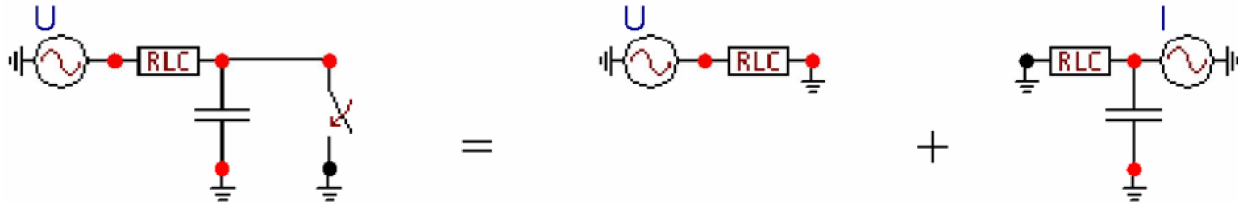
ABB  $a = 1,60,$       $b = -1,30$



Obr. 2.1 Medzná hranica prerušenia prúdu

## 2.2 Metóda injekcie prúdu pre riešenie zotaveného napätia pri vypínaní obvodu

Ako ukazuje Obr. 2.2, môže byť vypínací obvod nahradený podľa Theveninovej vety obvodom skratu a obvodom prúdového zdroja, ktorý do obvodu injektuje z prúdového zdroja opačný prúd. Pri zopnutí prúdového zdroja v okamihu odpojenia vypínača v pôvodnom obvode a pre nulový počiatočný prúd zdroja sú veličiny pôvodného obvodu dané superpozíciou veličín obvodu skratu a obvodu prúdového zdroja. Zotavené napätie (TRV) je tu priamo napätím na prúdovom zdroji.

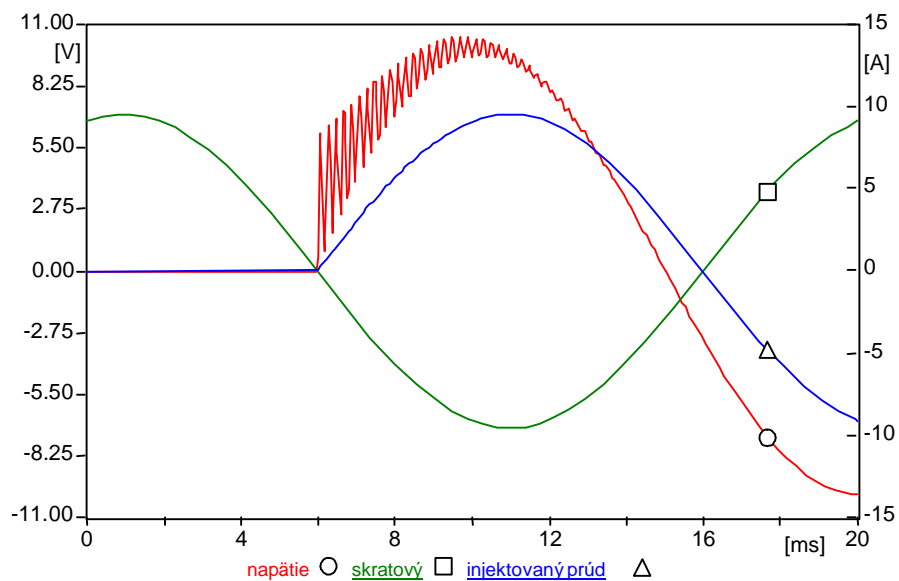


Obr. 2.2 Náhrada obvodu pre demonštráciu vzniku zotaveného napätia pomocou Theveninovej vety

V príklade je zdroj s frekvenciou 50 Hz, s amplitúdou napätia 10 V pripojený k sériovému rezistoru 1  $\Omega$  a indukčnosti 1 mH. Kapacita má veľkosť 1  $\mu\text{F}$ . Ustálený skratový prúd má amplitúdu:

$$\frac{10}{\sqrt{1+0,314^2}} = 9,54 \text{ A}$$

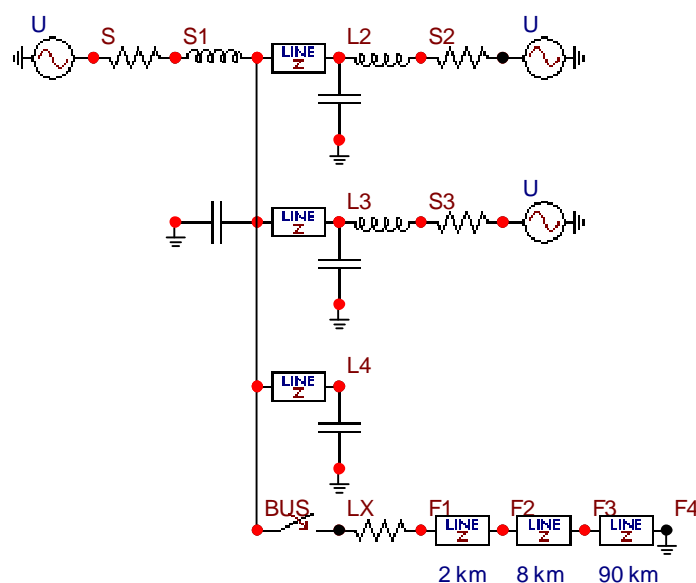
Prúd je pritom oneskorený za napätím o  $\arctan 0,314 = 17,43$  a nulou prejde v čase  $(90+17,43)/18 = 5,97$  ms. Vo výpočte bol zanedbaný malý prúd kondenzátorom. Takto definovaný prúdový zdroj potom umožňuje vypočítať zotavené napätie podľa Obr. 2.2 vpravo. Týmto spôsobom sa dajú analyzovať priebehy zotavených napätí v rôznych konfiguráciách elektrických sietí.



Obr. 2.3 Priebeh zotaveného napätia, skratového a injektovaného prúdu pre schému na Obr. 2.2

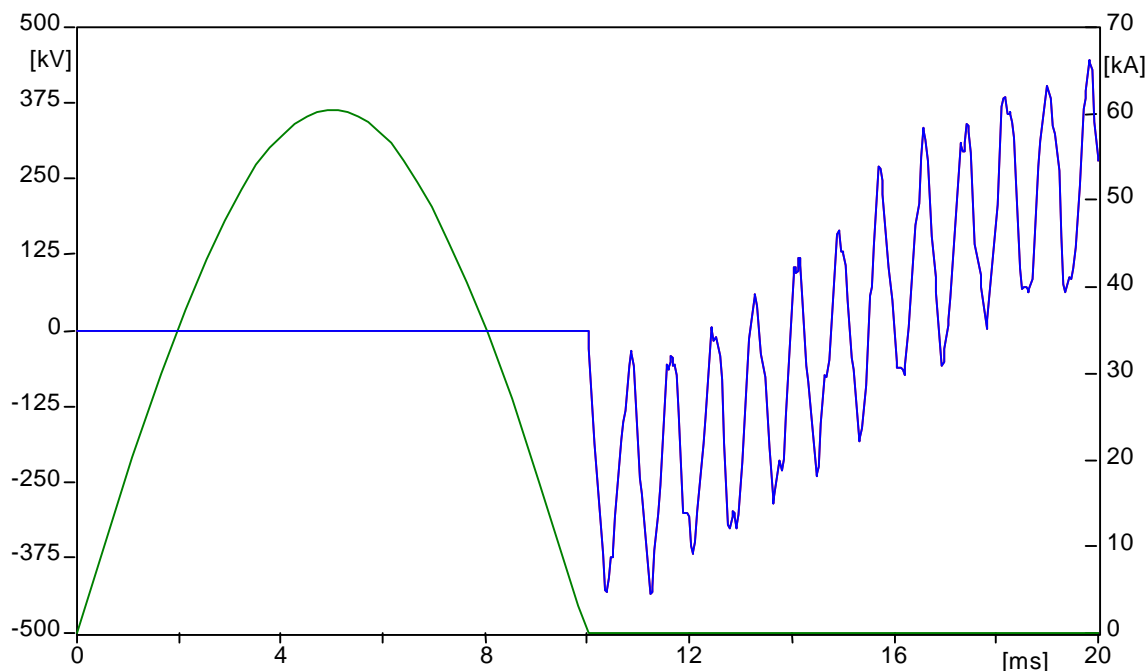


## 2.3 Zotavené napätie v elektrických sieťach

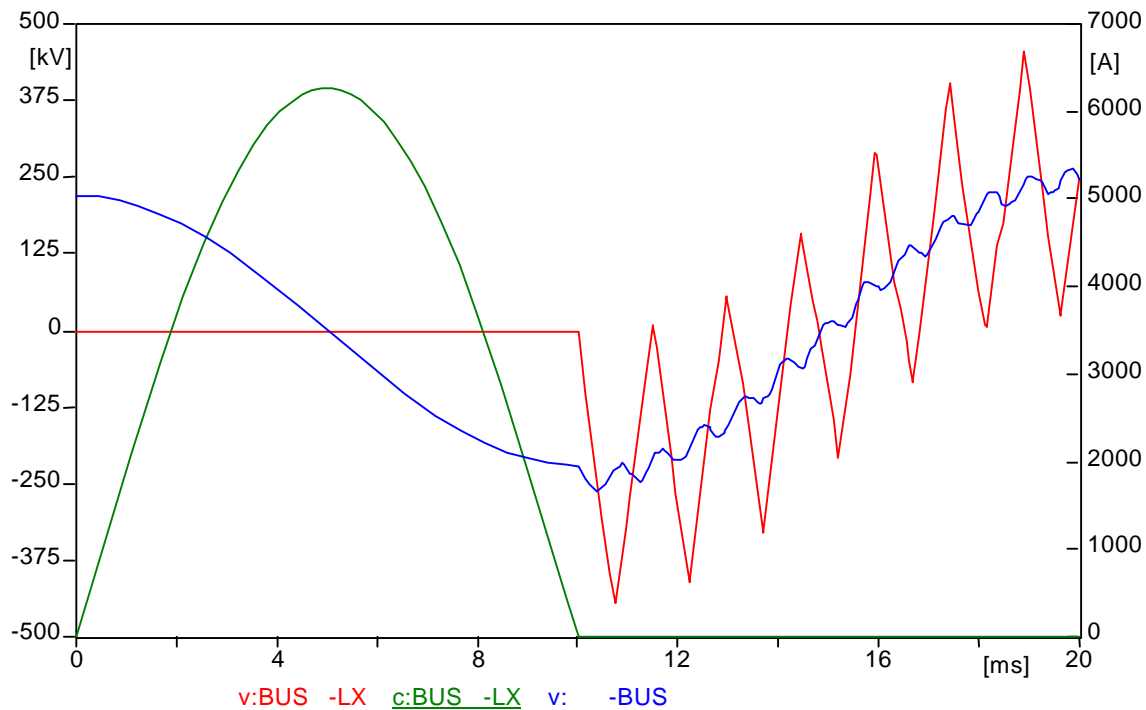


Obr. 2.4 Schéma pre demonštráciu zotaveného napätia v elektrických sieťach

Obrázok 2.4 ukazuje zjednodušenú schému elektrickej siete ako časť rozvodu. Pre skúmanie zotavených napätí sa takto vytvárajú zjednodušené schémy. Jednotlivé body riešia: F1 vypnutie skratu na prípojnici, F2 a F3 blízkeho skratu (2 a 8 km) a F4 vypnutie skratu vzdialeného 100 km. Na Obr. 2.5 je vykreslené zotavené napätie a prúd vypínačom po vypnutí skratu na prípojnici a na Obr. 2.6 obdobne po vypnutí vzdialeného skratu na konci vedenia. Zatiaľ, čo v prvom prípade je napätie na prípojnici totožné so zotaveným napätím, v druhom prípade sa napätie na prípojnici mení len málo. Pri vypnutí vzdialeného skratu sú oscilácie napätia dané dobou chodu v obvode s rozloženými parametrami.



Obr. 2.5 Priebeh prúdu pri skrate na prípojnici a zotavené napätie na vypínači



Obr. 2.6 Priebeh prúdu pri skrate v mieste F4, zotavené napätie na vypínači a napätie na prípojnici

## 2.4 Zotavené napätie v trojfázovom obvode

Pre trojfázové obvody je takisto aplikovaná metóda injekcie prúdu. Na riešenie trojfázového prechodného javu sa používa metóda symetrických zložiek. Stav popisujú rovnice:

$$\begin{bmatrix} e_{(0)} \\ e_{(1)} \\ e_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{(0)} \cdot Z_{(0)} \\ i_{(1)} \cdot Z_{(1)} \\ i_{(2)} \cdot Z_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{(0)} \\ i_{(1)} \\ i_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$a = \frac{1}{2} \cdot (-1 + j \cdot \sqrt{3}) \quad (2.4)$$

kde  $Z_{(0)}$ ,  $Z_{(1)}$ , a  $Z_{(2)}$  sú netočivá, súsledná a spätná zložka impedancie zdroja videné z miesta vypínača a  $e_{(0)}$ ,  $e_{(1)}$  a  $e_{(2)}$  sú súmerné zložky napätia na svorkách, odpovedajúce jednotlivým fázam vypínacieho obvodu. Pre väčšinu prípadov platí:

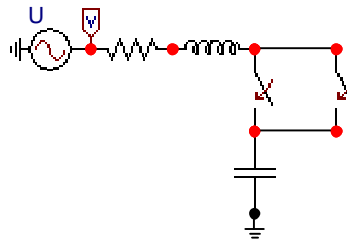
$$Z_{(1)} = Z_{(2)} \quad (2.5)$$

čo je charakteristické pre symetrické prenosové vedenia a transformátory. Podobne ako skratové prúdy, je možné počítat zotavené napätia v mieste prerušenia skratu.

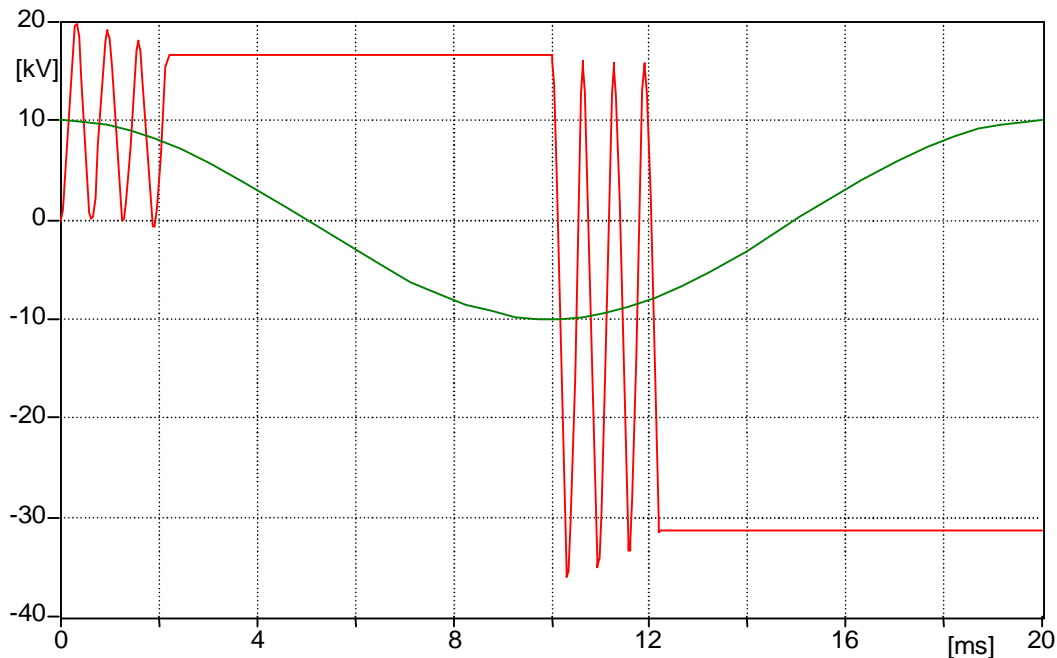
### 3 VYPÍNANIE KAPACITNÝCH PRÚDOV

#### Úvod

Nabíjacie prúdy pretekajú kapacitami obvodu a predbiehajú napätia o 90 stupňov. Pri odpojení kondenzátora tak na ňom zostáva napätie s veľkosťou maximálnej hodnoty napätia zdroja a nemení sa. Napätie druhého kontaktu vypínača sa naopak mení s frekvenciou siete. Najvyššia hodnota napätia na vypínači pritom dosiahne dvojnásobku maximálnej hodnoty napätia zdroja vid' Obr. 3.1. Pri takomto namáhaní môže dôjsť k opakovanému prierazu vo vypínači.



Obr. 3.1 Zjednodušená schéma vypínania kondenzátora s opakovaným prierazom vo vypínači



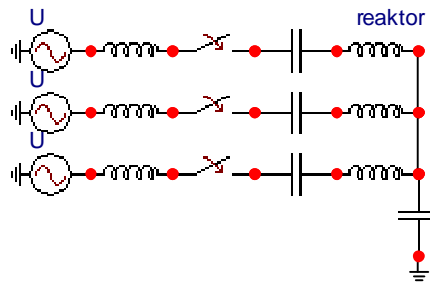
Obr. 3.2 Napätie na kondenzátore pri opakovanom prieraze vo vypínači spolu s napätím zdroja

Pri prieraze vo vypínači v čase 0 zakmitne napätie na kondenzátore s frekvenciou určenou kapacitou a indukčnosťou obvodu podľa Obr. 3.1 a po vypnutí kondenzátora na ňom zostáva napätie. V čase 10 ms, kedy napätie na kontaktoch vypínača dosahuje najväčšie hodnoty, nastáva opakovaný prieraz vo vypínači. Podobne by mohol nasledovať ďalší prieraz v čase 20 ms. Pri prvom prieraze môže napätie na kondenzátore dosiahnuť až dvojnásobku amplitúdy napätia zdroja a pri druhom prieraze až štvornásobku atď.

### 3.1 Vypínanie kapacitných jednotiek

Na kompenzáciu veľkých elektrických výkonov je inštalovaných mnoho kapacitných jednotiek. Typické napätie japonských systémov je 22, 33, 66, 77 a 154 kV s najväčšími hodnotami zdanlivého výkonu 120 MVA. V Japonsku majú všetky kapacitné jednotky zapojené cez sériový reaktor vid' Obr. 3.3. Hlavným účelom reaktora je potlačiť ráz prúdu pri zapínaní a tiež potlačenie vyšších harmonických prúdu. Štandardná hodnota reaktancie je 6 % menovitej kapacitnej reaktancie. Kapacita je potom samozrejme počítaná o 6 % väčšia. V zahraničí nebýva z ekonomických dôvodov sériový reaktor obvyklý.

Keďže je napätie na kondenzátore o 6 % väčšie, zostane na ňom väčšie aj po prerušení prúdu. Pri osciláciách je potom napätie až o dvojnásobok, teda o 12 %, väčšie. Na Obr. 3.3 je schéma neuzemnenej trojfázovej kapacitnej jednotky. Maximálna hodnota zotaveného napätia na vypínači je 2,5-násobok  $I_e$  je zrejme, že s ohľadom na veľkú energiu jednotiek vzniká pri ich vypínaní veľké nebezpečenstvo opakovaného prierazu. Vypínanie je pritom dosť časté, každý deň alebo aj niekoľkokrát denne.

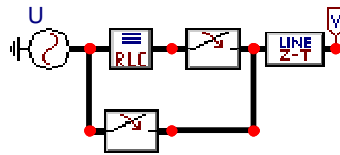


Obr. 3.3 Trojfázová kondenzátorová jednotka

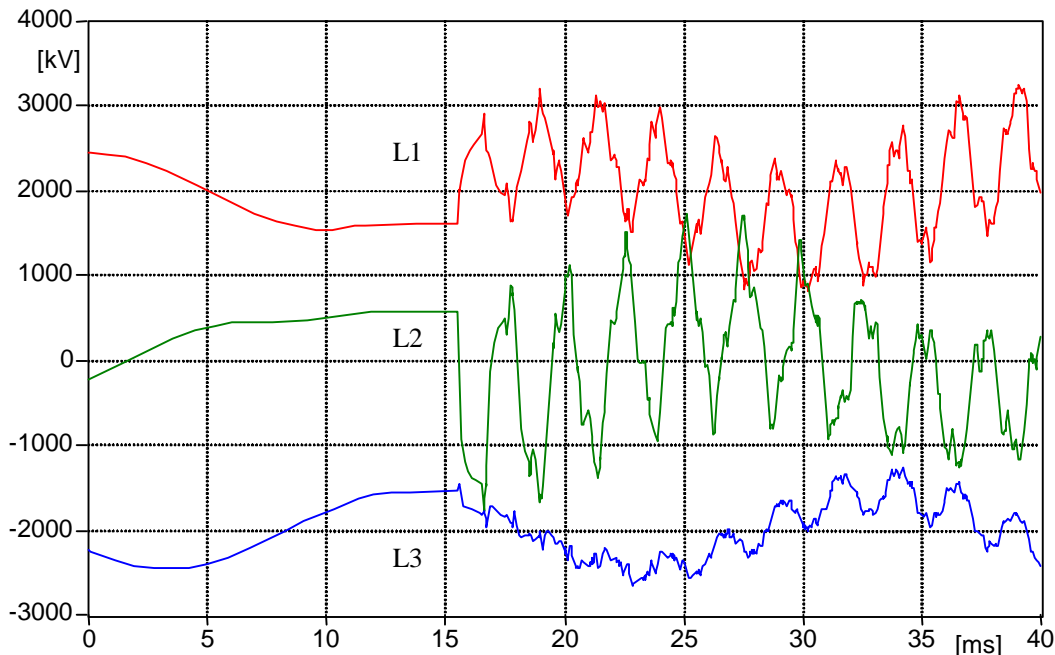
### 3.2 Kapacitné prúdy vzdušného vedenia

Kapacitné prúdy tečú vedením pomerne často. Pri vypínaní skratov apod. vznikajú prepätia, ktoré môžu viesť k opakovanému prierazu. Pri vypínačoch nad 66 kV sa preto požaduje odolnosť voči opakovaným prierazom.

Výpočet pre súčasné prenosové vedenia komplikujú indukčné a kapacitné väzby, skinefekt, frekvenčná závislosť parametrov atď. Príklad výpočtu je uskutočnený v sieti podľa Obr. 3.4. Ide o nezaťažené vedenie 550 kV dĺžky 150 km. V čase 5 ms bolo vedenie odpojené od zdroja a v čase 15 ms znova pripojené. Vrcholová hodnota napätia na konci vedenia dosahuje 1760 kV vo fáze L2, čo je 3,9-násobok napätia zdroja a je to spôsobené kapacitnou väzbou vedenia. Posunuté priebehy napätí sú uvedené na Obr. 3.5. To je príklad opätovného zapínania, kedy pri vzniku poruchy je vedenie najprv odpojené a po krátkej dobe automaticky znova pripojené. Na potlačenie prepätia vyskytujúceho sa pri opätovnom zapínaní sa využíva metóda vloženého odporu. V prípade rezistora 1 k $\Omega$  vloženého medzi kontakty 10 ms pred ich uzatvorením je prepätie veľmi dobre potlačené na 780 kV vo fáze L2, čo je 1,7-násobok napätia zdroja.



Obr. 3.4 Spínacie procesy na vedení naprázdno

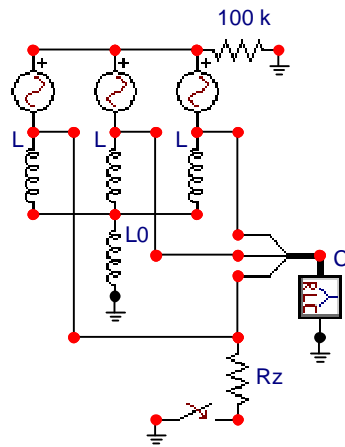


Obr. 3.5 Prepätie vznikajúce opätovným pripojením nabitého vedenia k zdroju

### ***Dodatok – Zhášanie oblúka pri jednofázovom spojení so zemou***

V trojvodičových prenosových sústavách dôjde k odpojeniu jednofázového zemného spojenia na oboch koncoch poškodenej fázy vedenia a po zhasnutí oblúka v mieste zemného spojenia sa fáza pomocou opätovného zapínania znovu pripojí. Takto vzniknuté prepätia môžu vyvolať sekundárny oblúk a jeho zhášanie je obťažné. Obmedzenie vzniku oblúka v mieste zemného spojenia sa preto rieši pomocou štyroch reaktorov. Správnym naladením reaktora spojeného so zemou je možné výrazne obmedziť prúd v mieste zemného spojenia. Situáciu ukazuje Obr. 3.6. Trojfázové vedenie je nezaťažené a jednopólavo zakreslené sú len jeho kapacity. Zemné spojenie vytvára spínač s odporom zeme  $R_z$ . Tri reaktory majú indukčnosť  $L$  a reaktor spojený so zemou má indukčnosť  $L_0$ . Výpočet potrebnej veľkosti oboch indukčností pri známej hodnote kapacity vedenia k zemi  $C$  je možné odvodiť úpravou obvodu, kedy sa spoločný reaktor  $L_0$  zaradí do série s každým reaktorom  $L$  a pritom bude mať veľkosť  $3 \cdot L_0$ . Zo vzťahu pre paralelnú rezonanciu pri danej sieťovej frekvencii  $w$  určuje potrebnú veľkosť indukčností reaktorov rovnica (3.1). Podľa konfigurácie siete sa zvolí minimálna hodnota reaktora  $L$  a reaktor  $L_0$  sa uskutoční ako premenný tak, aby bolo možné pri zmene konfigurácie siete nastaviť nulovú hodnotu zemného prúdu.

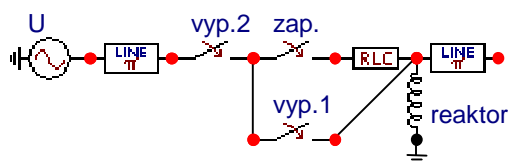
$$L + 3 \cdot L_0 = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} \quad (3.1)$$



Obr. 3.6 Obmedzenie prúdu pri zemnom spojení pomocou štyroch reaktorov

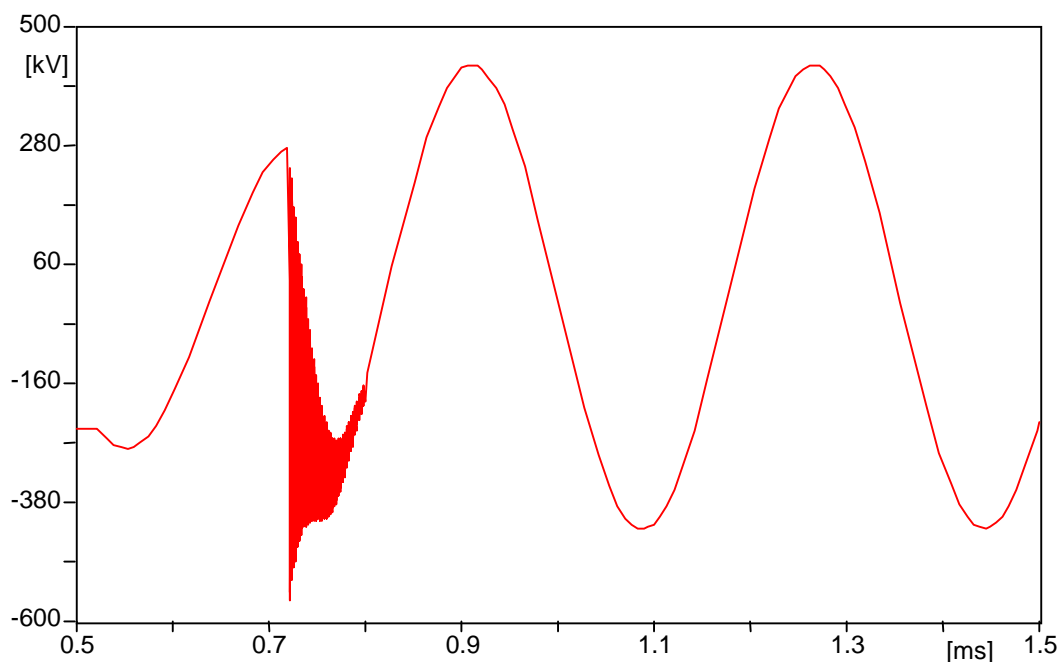
## 4 PRERUŠENIE INDUKČNÉHO PRÚDU

Relatívne malý indukčný prúd je prúd budičov, transformátora naprázdno, rozbehový prúd motora apod. Takýto prúd s amplitúdou niekoľkých jednotiek až stoviek ampérov je často prerušovaný ešte pred prechodom nulou. Akumulovaná energia magnetického poľa vytvorí na kapacitách obvodu prepätie. Typický jednofázový obvod na Obr. 4.1 znázorňuje vypnutie paralelného reaktora.



Obr. 4.1 Vypínanie jednofázového reaktora

Pri vzdialení kontaktov vypínača v okamihu, kedy sa prúd blíži nule, dôjde k vzájomnému pôsobeniu prvkov obvodu a oblúka, ktorý horí medzi kontaktmi vypínača. Prúd začne oscilovať a môže byť ľahko prerušený aj pred prechodom nulou. Frekvencia oscilácií je veľmi vysoká, až niekoľko stoviek kHz, a prerušenie prúdu sa preto javí ako okamžité. Obr. 4.2 ukazuje priebeh napätia na reaktore. Po vypnutí prvým vypínačom zostáva na reaktore záporné napätie. Po novom pripojení reaktora (v čase 0,72 ms) začne napätie oscilovať. To zodpovedá opakovanému prerazu vo vypínači. Amplitúda oscilácií pritom dosiahne v danom prípade 560 kV pri amplitúde napätia zdroja 245 kV. Po nasledovnom vypnutí druhým vypínačom (v čase 0,8 ms) vykazuje napätie na reaktore tlmené oscilácie nízkej frekvencie danej indukčnosťou reaktora a kapacitou vedenia ( $\pi$  článok na Obr. 4.1).



Obr. 4.2 Napätie na reaktore pri vypínaní

Zhasnutie oblúka vo vypínači nastane pri prúde 5 až 50 A pri vzduchových a SF<sub>6</sub> vypínačoch. Experimentálne a tiež analýzou bolo určené, že veľkosť prúdu prerušenia závisí od druhej mocniny kapacitancie pripojenej k vypínaču. Prepätie bude vyššie v prípade malej kapacity, väčšej indukčnosti a frekvencie oscilácií. V závislosti od veľkosti kapacity a indukčnosti začína pri hodnotách rádovo kHz. Škodlivé účinky prepätí sa preto dajú eliminovať použitím prepäťových ochrán. Veľkosť prepätia je možné vyjadriť zo zákona zachovania energie:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_c^2 + \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 \quad (4.1)$$

kde  $U$  je veľkosť prepätia,  $i_c$  hodnota prúdu prerušenia a  $U_0$  amplitúda napätia zdroja.

Keďže kontakty vypínača sú v okamihu prerušenia prúdu ešte blízko, môže nastať vplyvom prepätia opakovaný prieraz. Vyvolané oscilácie s frekvenciou stoviek kHz majú značne vyššie hodnoty napätia. Pri vysokej frekvencii nie je namáhanie izolácie vinutia cievky rovnomerné a hrozí nebezpečenstvo prierazu na vstupných závitoch. Problémy vysokej frekvencie neodstránia prepäťové ochrany a používa sa preto časová synchronizácia počas vzd'alovania kontaktov.



## 5 PRENOSOVÉ VEDENIA, KÁBLE A TRANSFORMÁTORY

Na simuláciu energetických systémov sa používajú rôzne metódy modelovania. EMTP, využívajúce niekoľko druhov metód, ktoré je možné aplikovať v podstate pre všetky elementy obvodov. Každá metóda je svojím spôsobom charakteristická a má určité využitie. Niektorá je charakteristická svojou presnosťou, ale potrebuje dlhší čas na číselný výpočet, iná nie je tak presná, čas výpočtu je kratší. Existuje metóda využiteľná v širokom spektre pôsobnosti a tiež metóda s obmedzeným rozsahom aplikácie, atď. Preto sa príslušné metódy využívajú v závislosti od účelu.

### 5.1 Prenosové vedenia

Jeden zo špeciálnych rysov EMTP je kvalitné spracovanie modelov prenosových vedení. Nasledujúce modely sú aplikované na súčasné viacfázové nadzemné prenosové vedenia.

#### Sústredené parametre

##### *p článok (nominal p)*

Vlastnosti:

- Vysoká spoľahlivosť
- Iba pre pomerne nízku frekvenciu alebo krátke vedenia
- Časový krok výpočtu nie je limitovaný
- Frekvenčne nezávislý (platí pre zadanú frekvenciu)

#### Rozložené parametre

##### *Transponovaný model (Clark)*

Vlastnosti:

- Efektívnosť číselného výpočtu
- Prakticky postačujúca presnosť väčšiny výpočtov prechodných javov v obmedzenom frekvenčnom rozsahu
- Časový krok výpočtu je limitovaný (musí byť kratší ako doba postupu vlny po vedení)
- Frekvenčne nezávislý (platí pre zadanú frekvenciu)
- Nevhodný pre riešenie nesymetrických stavov

##### *Netransponovaný model (K. C. Lee)*

Vlastnosti:

Rovnaké ako predošlé s výnimkou použitia pre nesymetrické stavy. Je užitočný všade tam, kde sa vyskytuje nesúmernosť vedenia.

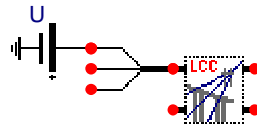
##### *Frekvenčne závislé modely (J. Marti, Noda, Semlyen)*

Vlastnosti:

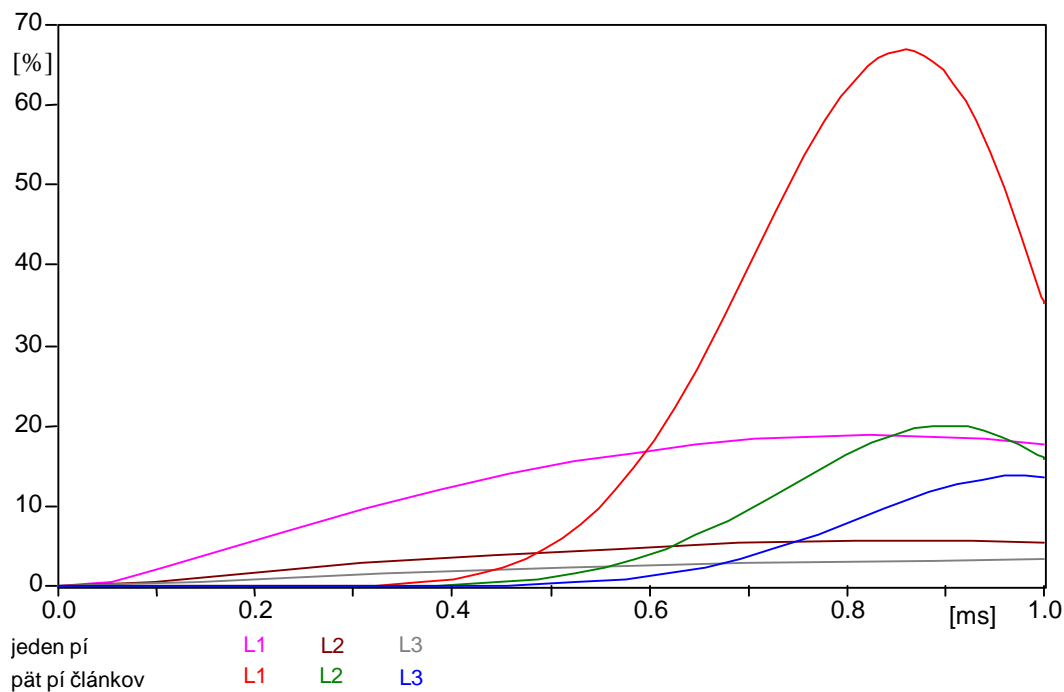
- Presnosť v širokom frekvenčnom rozsahu
- Relatívne efektívny číselný výpočet

- Časový krok výpočtu je limitovaný
- Pre veľmi nízke hodnoty frekvencií môže byť nepresný

V EMTP sú údaje spojené s týmito modelmi spolu s geometrickými parametrami prenosového vedenia zadané do procedúry LINE CONSTANTS. Spustením programu sa vygenerujú požadované elektrické parametre vedenia. Obrázok 5.1 ukazuje príklad, v ktorom sú porovnané jednotlivé modely vedení. Je modelované paralelné vedenie UVN 1100 kV dĺžky 210 km s ôsmimi vodičmi vo zväzku. Do jednej fázy na vedení je priložený jednotkový impulz s dobou trvania 0,1 ms a následne sa sleduje napätie na otvorenom konci vedenia v danej a susedných fázach. Obr. 5.2, 5.3 a 5.4. ukazujú priebehy napätí pre jeden a päť  $\pi$  článkov, frekvenčne nezávislého a závislého modelu s rozloženými parametrami



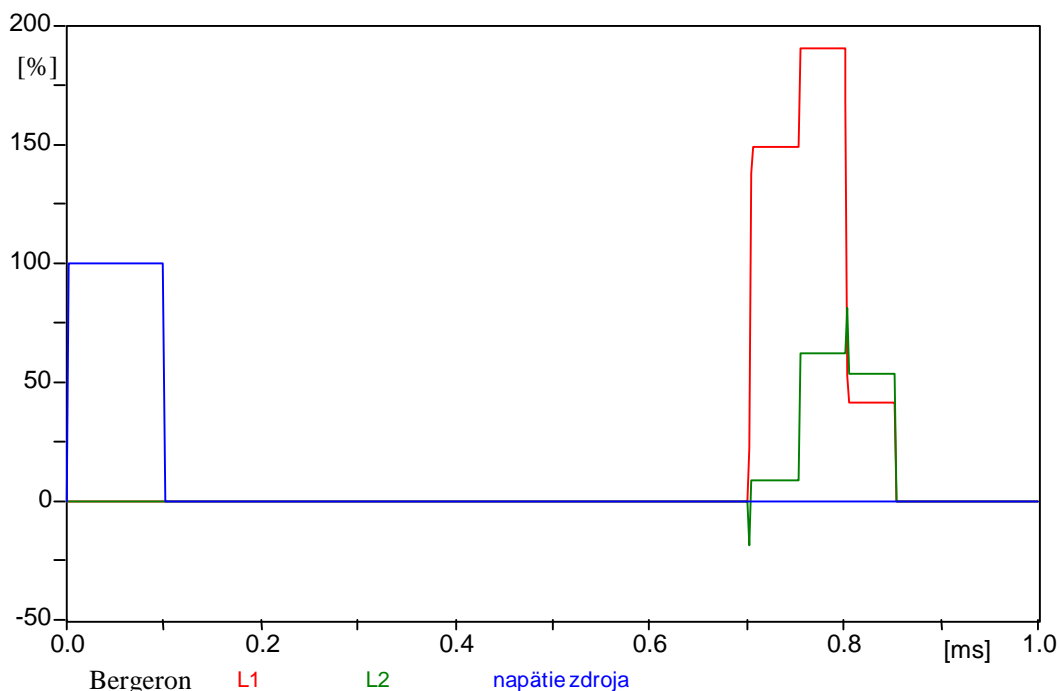
Obr. 5.1 Obvod na testovanie modelov vedení



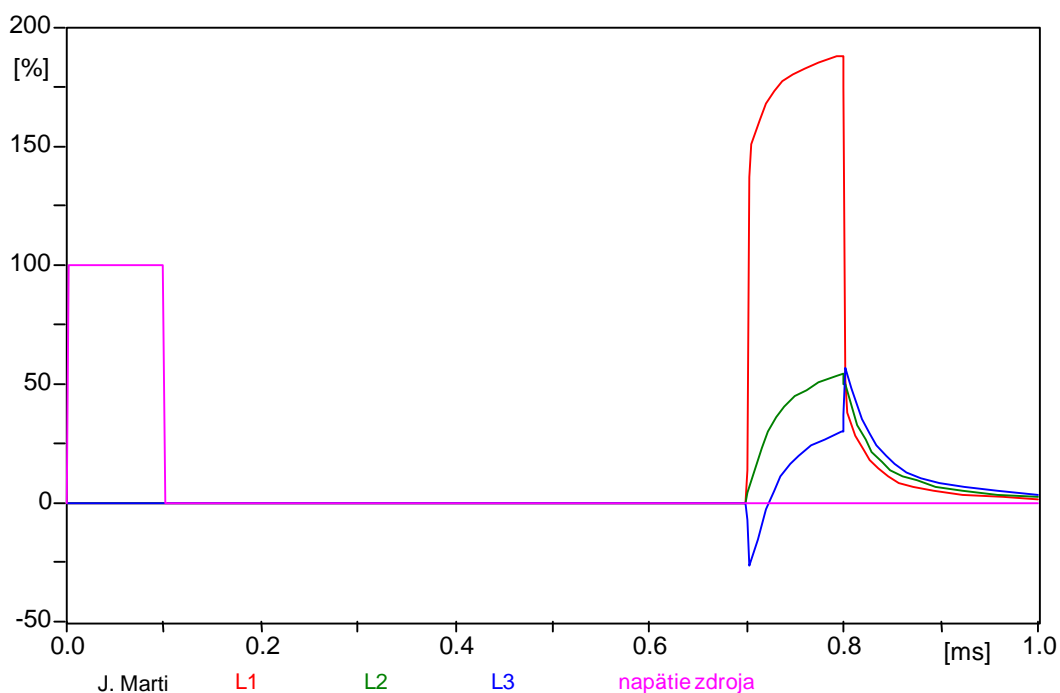
Obr. 5.2 Priebehy napätí na konci vedenia s modelom jedného a piatich  $\pi$  článkov

Použitie jedného  $\pi$  článku je pre tento prípad prechodného deja nevhodné, vedenie tvorené piatimi  $\pi$  článkami už lepšie odráža realitu. V každom prípade je nutné použiť model s rozloženými parametrami. V EMTP je model tvorený dvoma úsekmi modelu vedenia bez strát s odporami na oboch koncoch úsekov, ktoré zodpovedajú stratám na vedení.

Preto sa na Obr. 5.3 objavuje skoková zmena napätia na konci vedenia, v polovici časového intervalu napätia zdroja. Najpresnejší je v tomto prípade frekvenčne závislý model. Na Obr. 5.4 je model vedenia počítaný pre frekvencie od 1 Hz do 100 kHz pri základnej frekvencii 50 Hz a sú uvedené priebehy napätí troch fáz jedného z vedení.



Obr. 5.3 Frekvenčne nezávislý model vedenia s rozloženými parametrami



Obr. 5.4 Frekvenčne závislý model vedenia s rozloženými parametrami

## 5.2 Káble

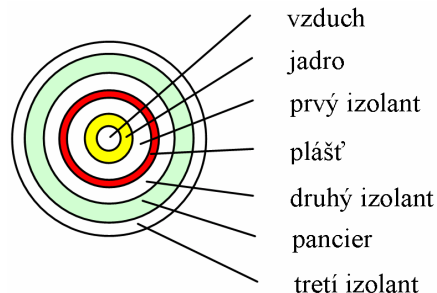
Elektromagnetické vlny sa šíria rôzne vo vnútri kábla (medzi jadrom a plášťom) a vonkajšom kábla, v dôsledku rozdielnych permitivít (vo vnútri  $150 \text{ m}/\mu\text{s}$ , vonku  $250$  až  $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ). Preto hlavne pre výpočet vysokofrekvenčných prechodných javov je potrebné správne zadať permitivitu aj vo vnútri kábla, aj vonku. Najjednoduchší model kábla je možné vytvoriť všeobecným prvkom s rozloženými parametrami, ten ale modeluje iba vnútro kábla. To sa dá použiť v prípade, že napätie plášťa je zanedbateľné (dokonale uzemnený kábel). Inak sa môže použiť kombinácia vonkajších a vnútorných väzieb, ako je tomu pri ideálnom

transformátore. Pre modelovanie káblov sa v EMTF používa predovšetkým procedúra CABLE CONSTANTS a CABLE PARAMETERS. Ide o nasledujúce typy káblov:

### ***Multifázový otvorený káblový systém***

Vlastnosti:

- Vhodné pre káble umiestnené vo vzduchu a v zemi
- Nákres kábla je na Obr. 5.5
- Je možné vynechať druhý izolant, pancier a tretí izolant
- Používa sa predovšetkým pre jednofázové káble v zemi

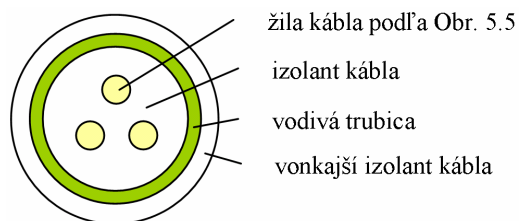


Obr. 5.5 Rez jednožilovým káblom

### ***Multifázový káblový systém uzatvorený v trubici***

Vlastnosti:

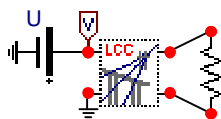
- Trubica môže byť i z materiálu s veľmi nízkou vodivosťou ako je napríklad betón
- Nákres kábla je na Obr. 5.6
- Používa sa pre viacfázové káble



Obr. 5.6 Rez trojžilovým káblom

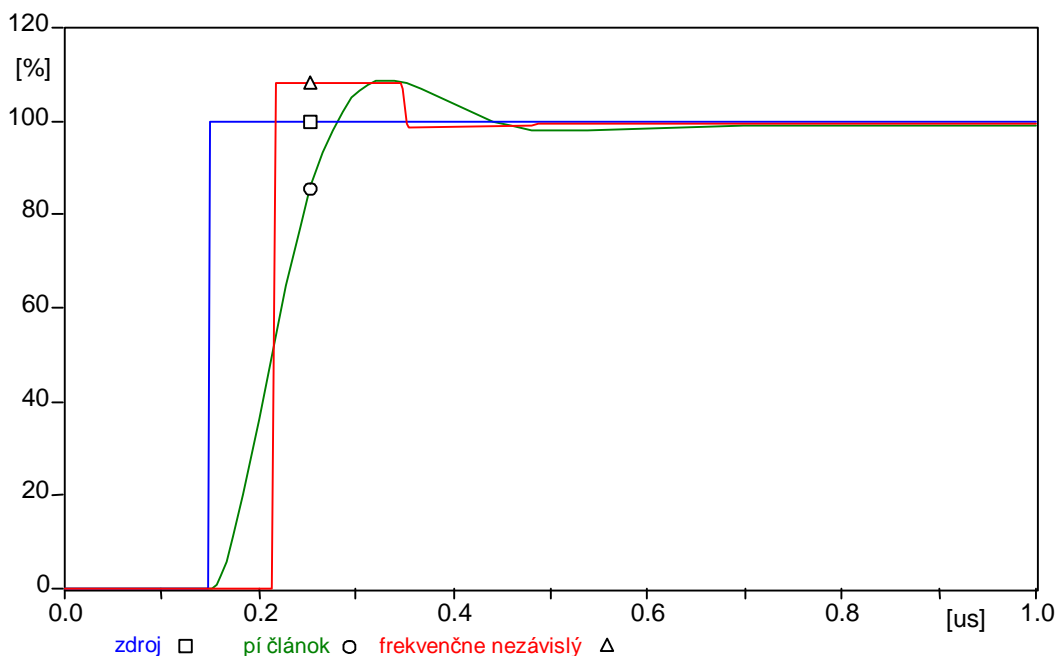
Pre oba typy káblov sa používajú rovnaké modely ako pre vonkajšie vedenia. Pri káblach je vyššia kapacita na svorkách. Plášte a pancier sa môžu rôzne uzemniť, je možné aj krížové prepojenie plášťov.

Ako príklad je uvedený nadzemný koaxiálny kábel s polomerom jadra 2,5 mm, plášť má polomery 10 a 11 mm a obal 12,5 mm. Relatívna permitivita izolantu je 4, dĺžka kábla 10 m a kábel je 0,1 m nad zemou. Kábel je na konci zaťažený odporom  $50 \Omega$  (to zodpovedá takmer impedančnému prispôsobeniu) a na jeho začiatok sa privádza jednotkový skok napätia, vid' Obr. 5.7.



Obr. 5.7 Porovnanie modelov koaxiálneho kábla

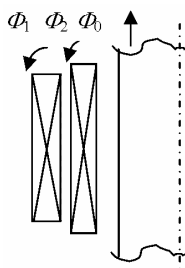
Na Obr. 5.8 sú znázornené priebehy napätia na zdroji a napätia na konci kábla s použitím modelu  $\pi$  článku a frekvenčne nezávislého modelu vedenia.



Obr. 5.8 Odozva na skok napätia v rôznych modeloch koaxiálneho kábla

Pre model  $\pi$  článku je nutné brať do úvahy, že v pozdĺžnych parametroch je udávaná reaktancia, a preto je potrebné kontrolovať nastavenie parametra  $X_{opt}$ . Pre zlepšenie prehľadnosti nie je na Obr. 5.8 uvedený priebeh pri frekvenčne závislých modeloch, ale aj tak sa príliš nelíši od priebehu nezávislého modelu, lebo preň bola volená vysoká frekvencia 5 MHz. Pre jednotlivé typy káblov a ich umiestnenie: **pozemný**, **nadzemný** a kábel umiestnený **v zemi** ponúka dialóg ATPDraw niekoľko modelov a je vecou praktických skúseností, ktorý z adekvátnych modelov (frekvenčne závislých) je vhodné v danom prípade použiť.

### 5.3 Transformátory



Obr. 5.9 Dvojvinutový transformátor

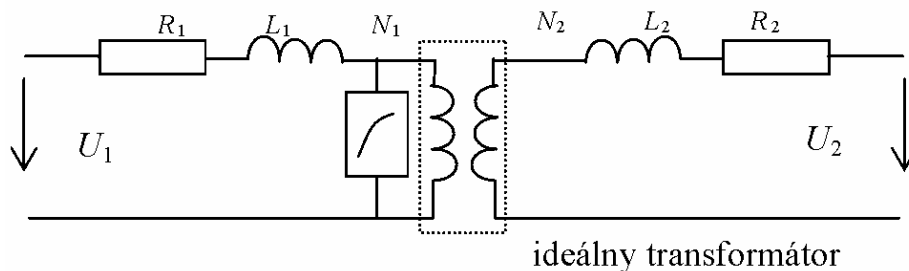
Na Obr. 5.9 je naznačený rez dvojvinuťovým transformátorom, pre ktorý platia rovnice:

$$u_1 = \frac{d}{dt}(\Phi_0 + \Phi_1) \cdot N_1 + i_1 \cdot R_1 \quad u_2 = \frac{d}{dt}(\Phi_0 + \Phi_2) \cdot N_2 + i_2 \cdot R_2 \quad (5.1)$$

kde  $F_0$ ,  $F_1$  a  $F_2$  sú toky spojované všeobecne s oboma vinutiami (primárne, sekundárne). Tok  $F_0$  sa uplatňuje predovšetkým vo vnútri železného jadra a určuje magnetizačnú charakteristiku. Tok  $F_0$  je spoločný v oboch rovniciach a z rovníc (5.1) vyplýva:

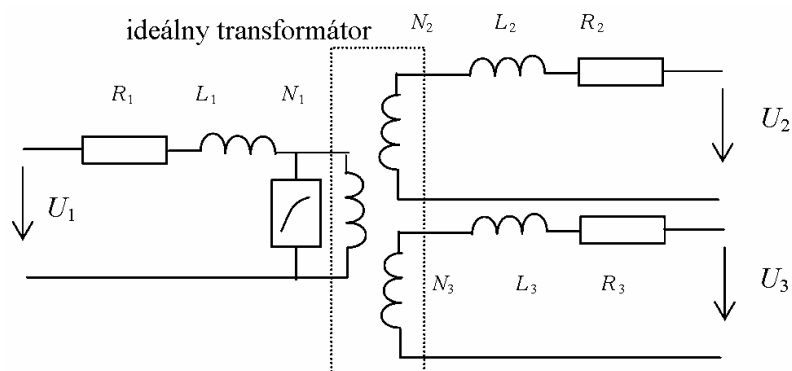
$$N_2 \cdot \left( u_1 - \frac{d}{dt} \Phi_1 - i_1 \cdot R_1 \right) = N_1 \cdot \left( u_2 - \frac{d}{dt} \Phi_2 - i_2 \cdot R_2 \right) \quad (5.2)$$

Táto rovnica zodpovedá náhradnej schéme s ideálnym transformátorom podľa Obr. 5.10. Obvod toku  $F_0$  (magnetizačného toku) môže byť pripojený na akúkoľvek stranu ideálneho transformátora. Rozptylovým tokom  $F_1$  a  $F_2$  zodpovedajú indukčnosti  $L_1$ ,  $L_2$  a  $R_1$ ,  $R_2$  sú odpory vinutí.



Obr. 5.10 Náhradná schéma dvojvinuťového transformátora

Model transformátora s tromi vinutiami je ukázaný na Obr. 5.11. Tento model zodpovedá predpokladu, že každé vinutie má svoj tok. V skutočnosti nemôže mať vinutie 1 a vinutie 2 celkom rovnaký tok, ako vinutie 2 a vinutie 3. Ale pre väčšinu prípadov je model dostatočne presný. Uvedené modely sú použiteľné do frekvencií niekoľko kHz. Pre vyššie frekvencie, nad 10 kHz, alebo v prípade atmosférického alebo spínacieho prepätia nie je rozloženie napätia v primárnom vinutí lineárne v dôsledku parazitných kapacít voči zemi a vo vnútri vinutia. Pre takéto prípady by malo byť prvé vinutie modelované vo viacerých sekciách. Každá sekcia má svoju vlastnú a vzájomnú indukčnosť k ostatným.

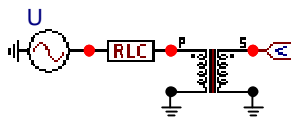


Obr. 5.11 Náhradná schéma trojvinuťového transformátora

Potom je celkové vinutie vrátane primárneho, sekundárneho, atď. reprezentované tzv. indukčnou maticou. Súčasne je potrebné poznať prevedenie kovového jadra. Pri vysokých frekvenciách už nedochádza takmer k žiadnemu prieniku toku dovnútra kovového jadra. Pre frekvenčný rozsah zodpovedajúci atmosférickým impulzom nahradí železné jadro vzduch. Indukčná matica má tvar ( $L$  sú vlastné a  $M$  vzájomné indukčnosti jednotlivých, v tomto prípade štyroch, cievok):

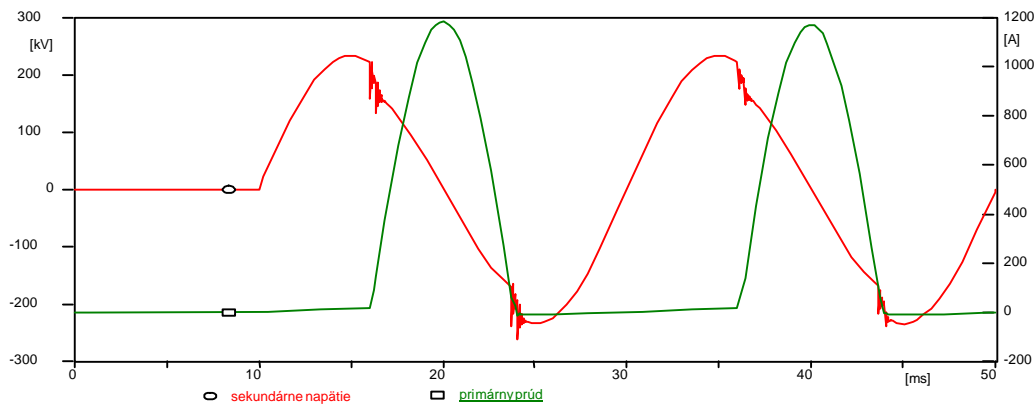
$$\begin{matrix} L_{11} & & & & \\ M_{12} & L_{22} & & & \\ M_{13} & M_{23} & L_{33} & & \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_{44} & \end{matrix} \quad (5.3)$$

Príklad pripojenia transformátora 550/300 kV k sieti na Obr. 5.12 uvažuje jednopólovú schému a v EMTP využíva procedúru SATURABLE TRANSFORMER, ktorou sa v ATPDraw zadávajú hodnoty prvkov náhradnej schémy vrátane charakteristiky naprázdno.



Obr. 5.12 Jednofázový dvojinuťový transformátor pripojený k sieti

V dôsledku saturácie danej magnetizačnou charakteristikou tečie v okamihu pripojenia transformátora k sieti do transformátora veľký magnetizačný jednosmerný prúd, ako ukazuje Obr. 5.13.



Obr. 5.13 Pripojenie transformátora k sieti a priebehy sekundárneho napätia a primárneho prúdu

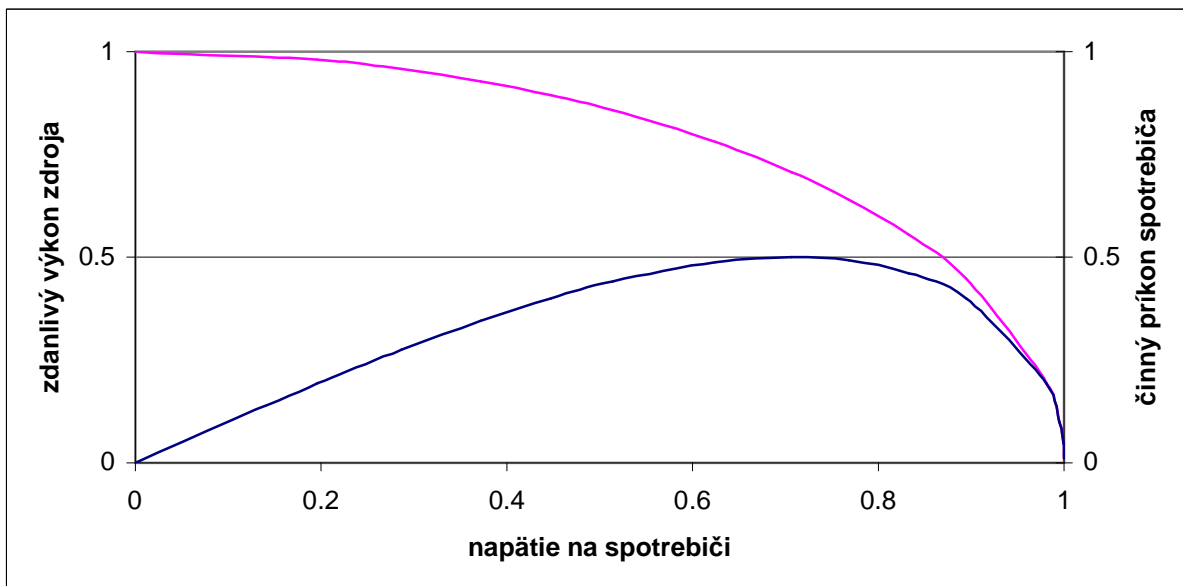
## 6 PRENOS VÝKONU A STABILITA NAPÄTIA V ENERGETICKÝCH SYSTÉMOCH

### 6.1 Prenos energie

Tok energie je v jednofázových obvodoch daný napätím zdroja a napätím na konci vedenia, ktoré je popísané reaktanciami a odporom. Všeobecne je prenášaný výkon daný rovnicou:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin \Theta \quad (6.1)$$

kde  $U_1$  a  $U_2$  sú napätia na začiatku a konci vedenia a  $\Theta$  je elektrický uhol medzi nimi,  $X$  je reaktancia prenosového vedenia. Najväčšia hodnota prenášaného výkonu sa dosiahne pre uhol  $\Theta = \pi/2$ . S rastom prenášaného výkonu sa uhol zvyšuje a s rastúcou záťažou tak klesá účinník. Obr. 6.1 ukazuje priebeh zdanlivého výkonu zdroja a činného príkonu spotrebiča prenosového systému v závislosti od napätia na spotrebiči, ktoré je určené zmenou ohmickej záťaže.



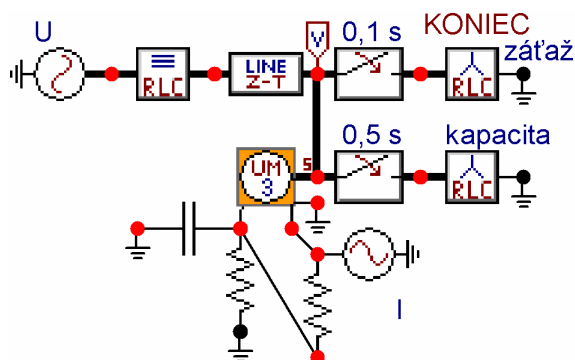
Obr. 6.1 Prenos výkonu od zdroja k spotrebiču

Z priebehov vyplýva, že činný príkon spotrebiča môže dosiahnuť najviac polovicu maximálneho výkonu zdroja v spojení s vedením. Napätie na spotrebiči má pritom rovnakú veľkosť ako napätie na reaktancii vedenia a je  $\sqrt{2}$ -krát menšie ako napätie zdroja. Pri prenose výkonu vzniká na vedení úbytok napätia, spravidla do 10 %, a na Obr. 6.1 sa dá pre hodnotu napätia 0,9 odčítať príkon spotrebiča a tiež zdanlivý výkon zdroja ako pomerná hodnota maximálneho výkonu zdroja. Na zvýšenie účinnosti prenosu sú nainštalované kompenzačné kondenzátory na strane spotrebiča a zdroja, ktorými sa zvyšuje účinník. Kompenzačné kondenzátory môžu byť pripojené paralelne alebo do série s vedením. Na strane spotrebiča kompenzujú kondenzátory induktívny charakter spotrebiča.



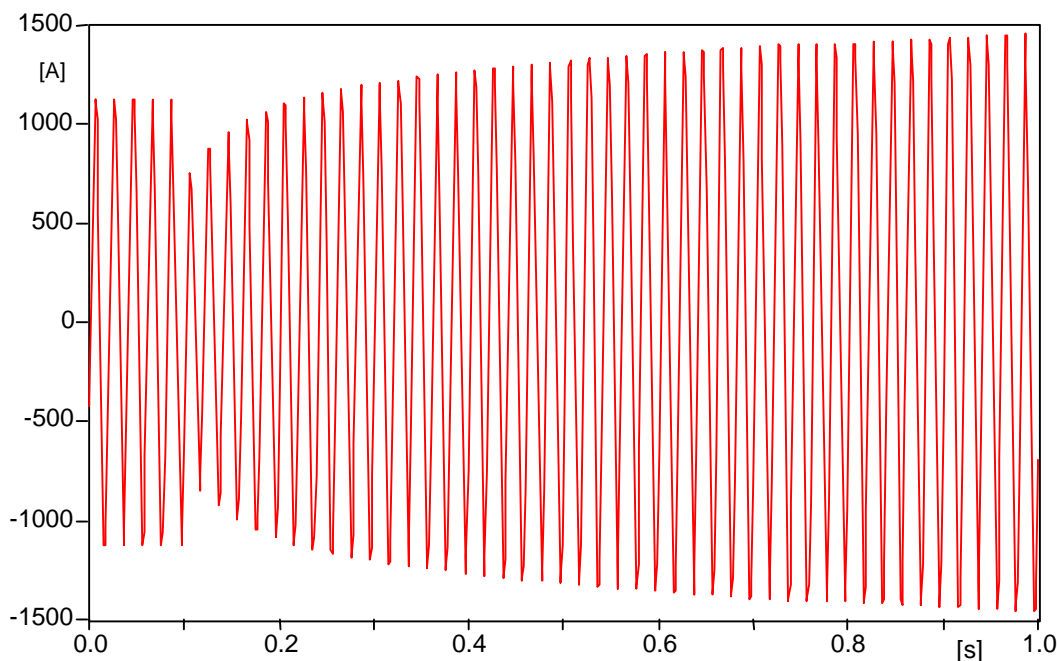
## 6.2 Stabilita napätia

Existujú dva druhy záťaže, obvod s konštantnou impedanciou a obvod s konštantným výkonom (energiou). K prvému druhu patria svietidlá a tepelné spotrebiče. K druhému patria indukčné motory, elektronické zariadenia, a iné. Pri niektorých z nich sa výkon zvyšuje postupne. Postupným zvyšovaním záťaže s konštantnou impedanciou dochádza k poklesu napätia na spotrebiči, ale napätie je stabilné. Prípád kombinovanej záťaže je uvedený na Obr. 6.2.



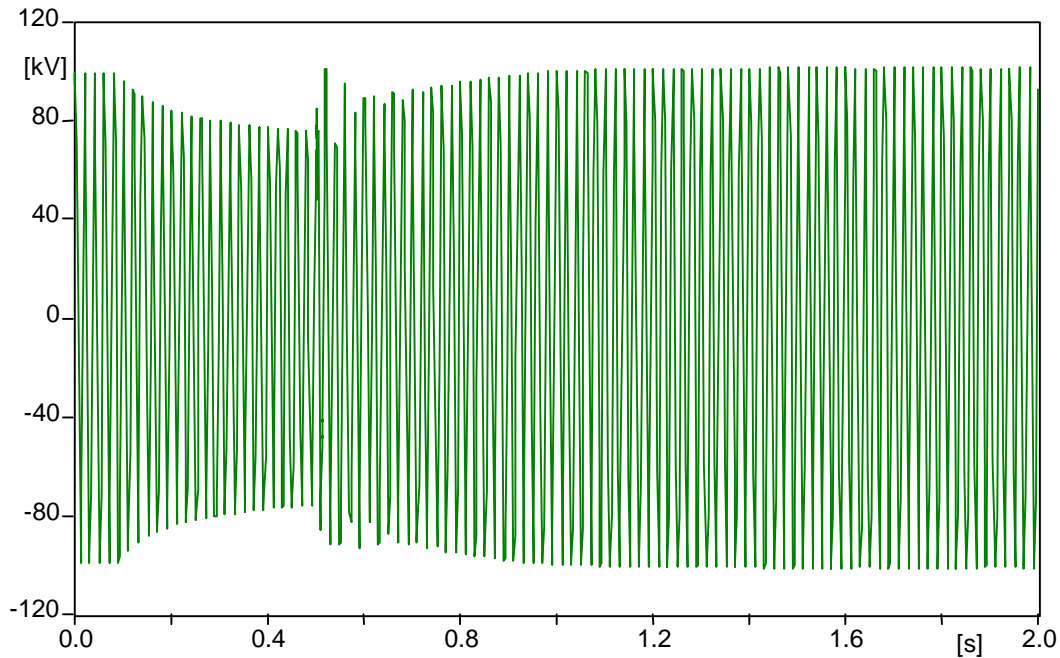
Obr. 6.2 Prípád prenosu s kombinovanou záťažou

Trvalo pripojenú záťaž predstavuje indukčný motor (ako obvod s konštantným výkonom) a následne je pripojená ohmická záťaž s charakterom konštantnej impedancie. Z priebehu prúdu do motora pred a po pripojení záťaže na Obr. 6.3, ktorý zachytáva stav obvodu bez pripojených kompenzačných kondenzátorov označených v Obr. 6.2 „kapacita“, je možné vidieť, že prúd najprv poklesne, ale potom ďalej narastá nad hodnotu pôvodného ustáleného prúdu. Od okamihu pripojenia záťaže v čase 0,1 s trvalo klesá napätie na spotrebiči a dochádza k porušeniu stability.



Obr. 6.3 Priebeh prúdu indukčným motorom bez kompenzácie

Na druhej strane Obr. 6.4 ukazuje priebeh napätia na motore pri zaradení kompenzačných kondenzátorov v čase 0,5 s. Klesajúce napätie najprv vzrastie a ďalej sa postupne ustáli. Konečná hodnota bude vplyvom kompenzácie o niečo vyššia. Automatické kompenzačné jednotky musia pri zmene záťaže vhodne reagovať, tak aby nedošlo k výpadku napätia zdroja vplyvom nestability. Pri indukčných motoroch ako spotrebičoch s konštantným výkonom dôjde pri poklese napätia k snahe udržať výkon a rastie prúd motora, čo môže viesť k prehriatiu stroja.



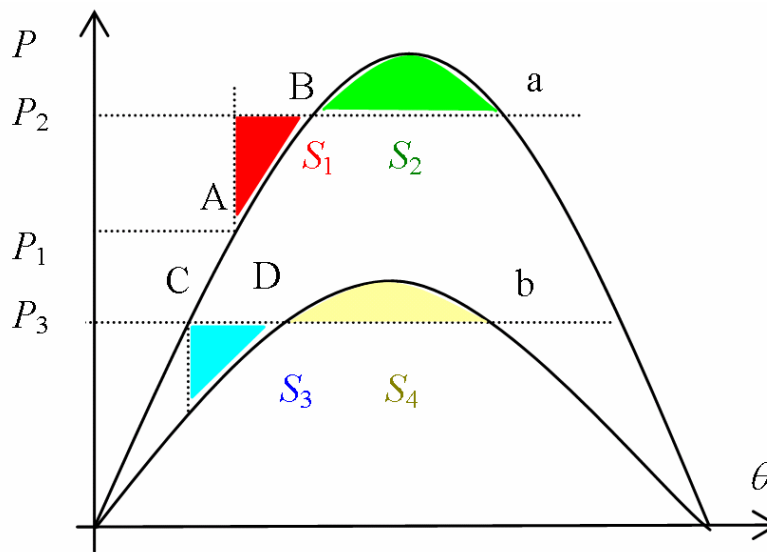
Obr. 6.4 Priebeh napätia na indukčnom motore s pripojením kompenzácie

## 7 DYNAMICKÁ STABILITA ENERGETICKÝCH SYSTÉMOV

Dynamická stabilita systému sa určuje v situácii vzniku náhlej poruchy. V striedavých systémoch je nutné, aby sa každý generátor otáčal s určitou rýchlosťou, aby bol udržiavaný primeraný záťažový uhol odpovedajúci výkonu. V dôsledku poruchy môže dôjsť ku kývaniu generátora a v extrémnom prípade môže porucha spôsobiť vypadnutie generátora zo synchronizmu. Kapitola 6 hodnotila situáciu z hľadiska statickej stability. Dynamická stabilita rieši prechodné deje s ohľadom na mechanickú zotrvačnosť stroja.

### 7.1 Pravidlo plôch

Prenášaný výkon, ako bolo uvedené v predchádzajúcej kapitole, je daný rovnicou (6.1). Na Obr. 7.1 je zobrazený priebeh prenášaného výkonu, odpovedajúci točivému momentu stroja, v závislosti od záťažového uhla jedného z generátorov prenosovej sústavy. Vyšrafované časti na obrázku predstavujú množstvo energie.



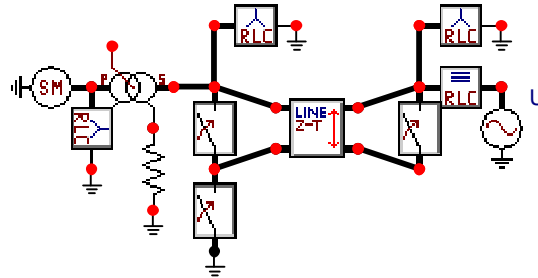
Obr. .1 Pravidlo plôch pri vyšetovaní dynamickej stability

Bod A na Obr. 7.1 zodpovedá prenášanému výkonu  $P_1$ . Po zvýšení mechanického momentu generátora dochádza k zvýšeniu výkonu na hodnotu  $P_2$ . Bod B predstavuje podmienky ustáleného stavu. Dochádza k zvýšeniu uhla, ktorý sprevádza zrýchlenie generátora. Zvyšovanie uhla má za následok vytvorenie nadbytku energie  $S_1$  a to vyvolá kolísanie uhla. Ak platí  $S_1 < S_2$ , môže byť energia v priebehu kolísania absorbovaná a systém sa ustáli. V opačnom prípade dôjde k nadmernému kolísaniu stroja. Druhý prípad ukazuje náhlu zmenu prenášaného výkonu a pritom sa z krivky a prejde na krivku b pri výkone  $P_3$ . Podobne ako v predchádzajúcom prípade dôjde k vzniku nadmerného množstva energie  $S_3$  pri prechode z bodu C do bodu D. Podmienka  $S_3 < S_4$  opäť predstavuje medzu stability systému.

Tak by mohli byť analyzované ďalšie prípady ako skraty, zmeny zaťaženia apod. Prenos výkonu je však vždy reprezentovaný parametrami ustáleného stavu. Stabilitu prenosu zaisťuje automatická regulácia napätia a regulácia výkonu (AVR – Automatic Voltage Regulator, PSS – Power System Stabilizer). Popis činnosti prostriedkov automatickej regulácie je zložitejší a je uvedený v pôvodnej publikácii v kapitole 7.2. Ich funkcia je založená na analýze fázorov veličín prenosovej sústavy.

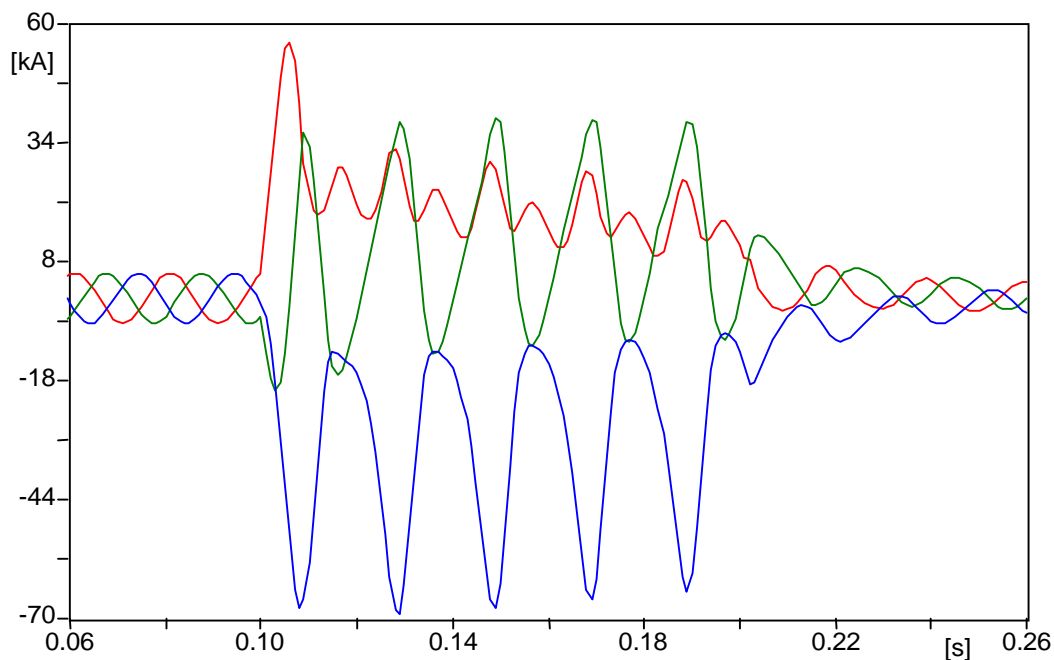
## 7.2 Riešenie stability analýzou okamžitých hodnôt

Obr. 7.2 predstavuje schému pre analýzu dynamickej stability pri vzniku skratu. Pre dvojpólový synchronný generátor 500 MVA je použitý model s Parkovou transformáciou. Generátor je do siete pripojený cez zvyšovací transformátor.

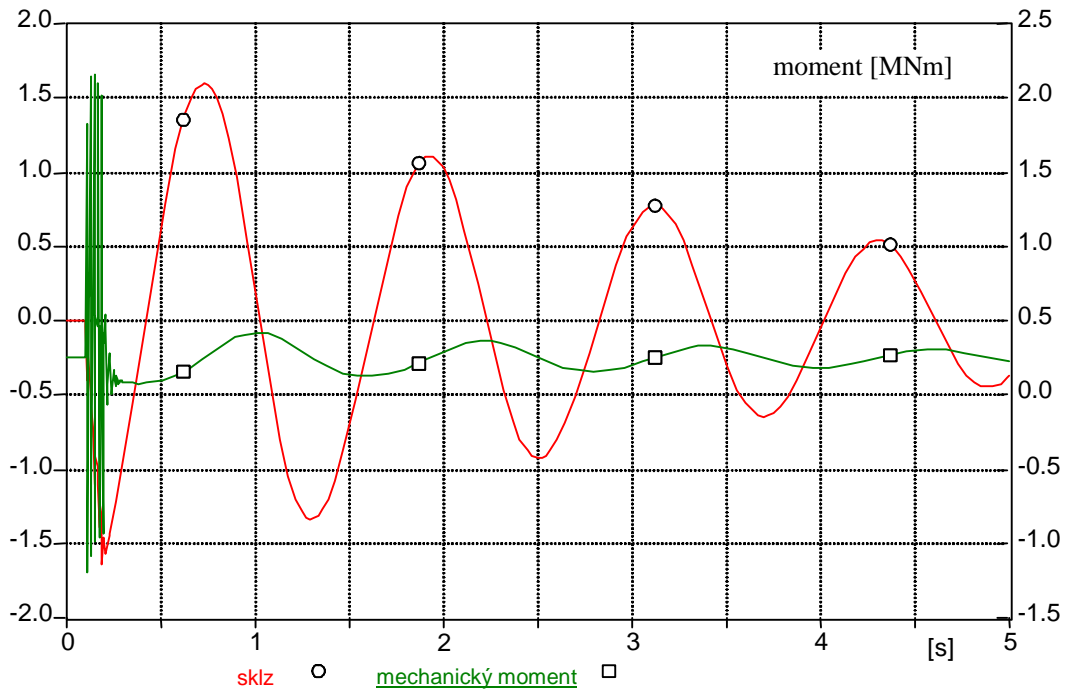


Obr. 7.2 Schéma siete na ukážku dynamickej stability

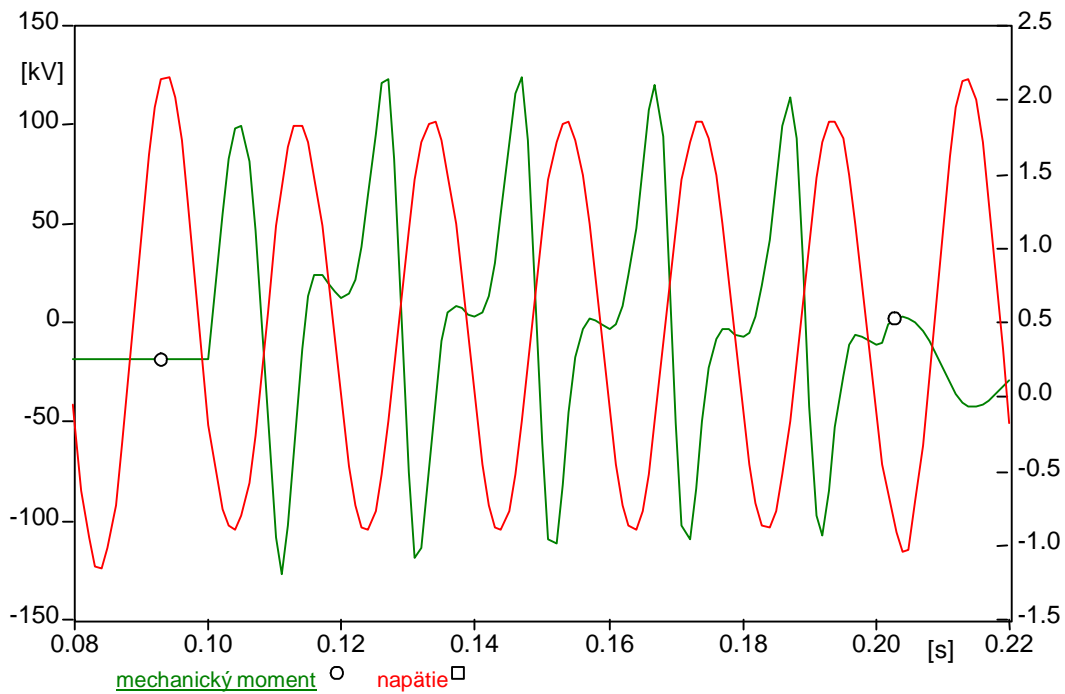
Podľa okamihu vzniku skratu sa mení veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu. Pri veľkej jednosmernej zložke má tiež točivý moment veľkú amplitúdu rozkmitu. Vyššie uvedená metóda využívajúca analýzu fázorov berie nulovú jednosmernú zložku a rieši tak len jeden špeciálny prípad. Analýza pomocou okamžitých hodnôt preto dáva presné riešenie, obzvlášť v oblasti krátkych časov prechodného deja. Synchronný generátor má konštantné budenie a dodáva výkon do siete paralelným vedením. V čase 0,1 s vznikne na jednom z vedení pri generátore trojfázový skrat a vedenie je na oboch koncoch odpojené v čase 0,2 s. Priebiehy sieťových prúdov z generátora v časovom úseku týchto zmien ukazuje Obr. 7.3. Pribeh mechanického momentu a záťažového uhla potom Obr. 7.4 a napätie v sieti spolu s momentom Obr. 7.5.



Obr. 7.3 Priebiehy prúdov s jednosmernou zložkou synchronného generátora pri skrate



Obr. 7.4 Priebeh sklzu a mechanického momentu generátora pri skrate



Obr. 7.5 Detail priebehu mechanického momentu a pokles napätia fázy C v sieti pri skrate

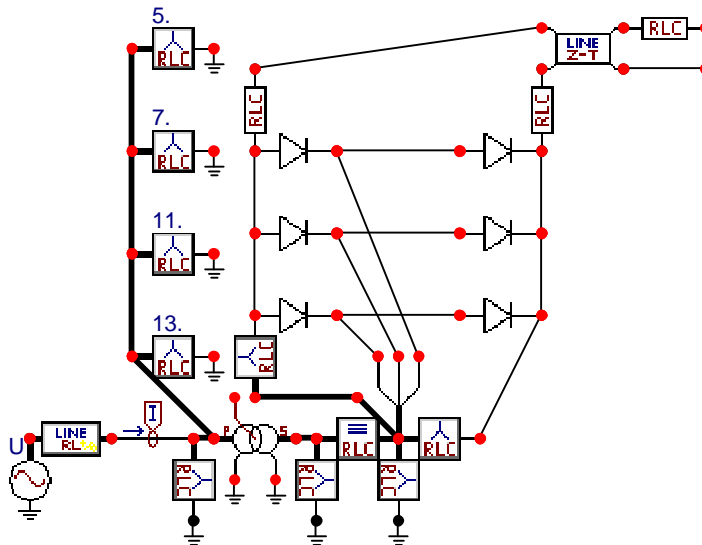
Skrat na vedeniach vyvolá zmeny záťažového momentu, ktoré majú frekvenciu siete a dôjde k zmene záťažového uhla. Po vypnutí skratu dochádza k tlmenému kývaniu rotora generátora, čo je zrejmé z priebehu sklzu na Obr. 7.4. Stabilita chodu generátora nebola v tomto prípade narušená.

## 8 TROJFÁZOVÉ VÝKONOVÉ MENIČE

Analýza obvodov výkonových meničov prináša v dôsledku opakovaného spínania a v dôsledku javov spojených so spínaním množstvo rôznych komplikácií, ktoré obmedzujú použitie matematických analýz. Našťastie v dnešnej dobe existujú výpočtové programy ako EMTP a PSPICE, ktoré umožňujú úspešne realizovať presné výpočty pri riešení problému. V tejto kapitole je popísaný princíp analýzy takého obvodu, a to na jednoduchom príklade trojfázového usmerňovača.

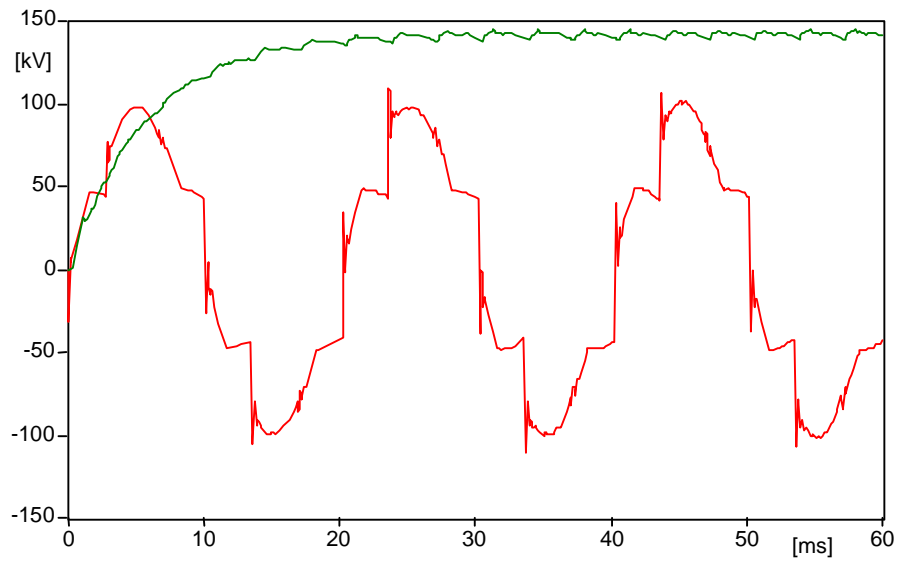
### 8.1 Popis zapojenia

Obr. 8.1 ukazuje schému, v ktorej sú k zdroju pripojené prídavné filtračné obvody (5., 7., 11. a 13. harmonická) a k jednotlivým diódam sú pripojené prepäťové ochrany. K transformátoru je pripojený striedavý trojfázový zdroj s vnútornou impedanciou a s napätím 287,5 kV. Na jednosmernú stranu zdroja je cez jednosmerné reaktory pripojené prenosové 100 km vedenie. Na koniec vedenia je pripojená záťaž.

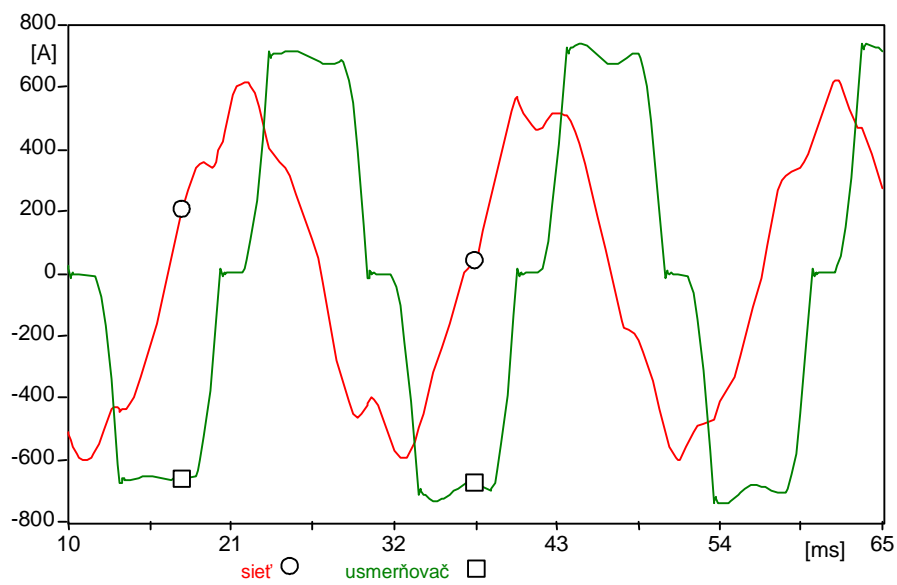


Obr. 8.1 Schéma trojfázového neriadeného usmerňovača s filtráciou vyšších harmonických sieťového prúdu

Pri použití tyristorov v riadenom usmerňovači by sa privedenie impulzu na riadiacu elektródu tyristora realizovalo riadiacim systémom TACS. Na sekundárnej strane transformátora je napätie 120 kV. Obr. 8.2 ukazuje jednosmerné napätie na záťaži a priebeh napätia fázy A na vstupe do usmerňovača. Na Obr. 8.3 je primárny prúd a prúd tečúci z fázy A do usmerňovača. Bez použitia filtra má sieťový prúd prakticky rovnaký priebeh ako prúd do usmerňovača. Vplyv filtra vyšších harmonických sa dá posúdiť z obsahu vyšších harmonických. S použitým filtrom je najvyššia úroveň pri 5. harmonickej 5 % vzhľadom k prvej harmonickej, zatiaľ čo bez filtra bola pri 5. harmonickej hodnota 16 % a pri 7. harmonickej 8 %. Na eliminovanie vplyvu vyšších harmonických sa okrem filtrácie používajú tiež viacfázové zapojenia usmerňovačov.



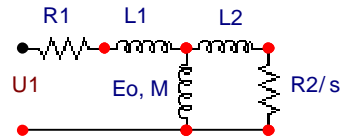
Obr. 8.2 Napätie na záťaži a priebeh napätia fázy A na vstupe do usmerňovača



Obr. 8.3 Priebeh prúdov fázy A – prúd siete a prúd do usmerňovača

## 9 INDUKČNÉ STROJE S FREKVENČNÝMI MENIČMI

Indukčné stroje s kotvou nakrátko majú malé rozmery, nízku cenu, vysokú rýchlosť, vysokú spoľahlivosť a malé nároky na údržbu. Použitie frekvenčných meničov dáva možnosť meniť tiež ich rýchlosť a tým rozšíriť oblasť ich použitia.



Obr. 9.1 Jednopolová náhradná schéma indukčného motora

Pre indukčný stroj platí rovnica:

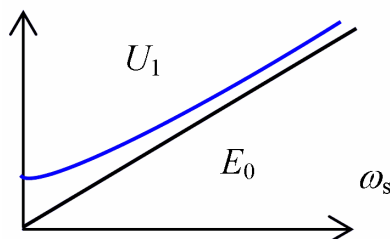
$$I_1 = \frac{E_0}{w_s \cdot M} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{R_2}{s \cdot w_s}\right)^2 + L_M^2}{\left(\frac{R_2}{s \cdot w_s}\right)^2 + L_2^2}} \quad (9.1)$$

kde  $s$  je sklz,  $w_s$  uhlová frekvencia zdroja a  $L_M = M + L_2$ , ako vyplýva z náhradnej schémy. Ďalej:

$$T = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{E_0}{w_s}\right)^2 \frac{\frac{R_2}{s \cdot w_s}}{\left(\frac{R_2}{s \cdot w_s}\right)^2 + L_2^2} \quad (9.2)$$

kde  $T$  je mechanický moment stroja v Nm a  $p$  počet pólových dvojíc vinutí stroja.

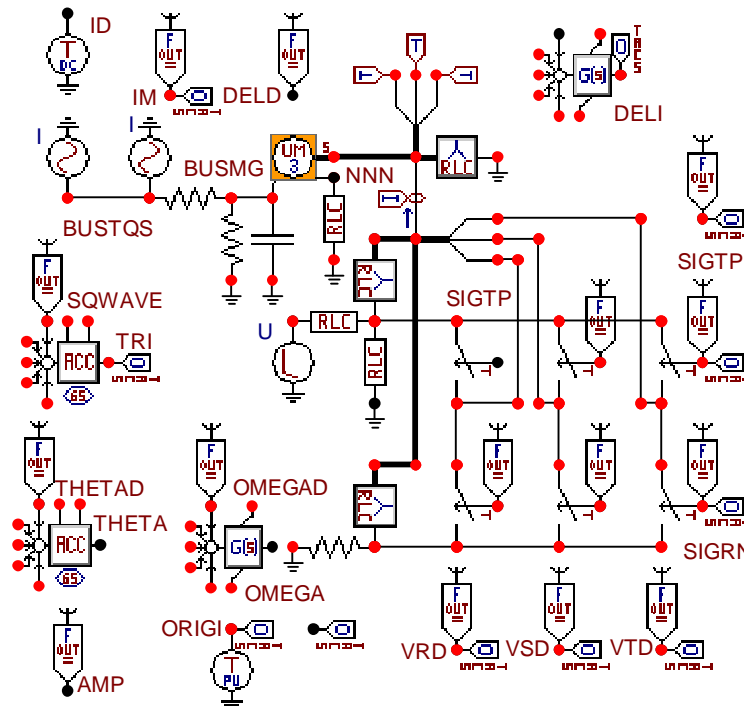
Pri konštantnom pomere  $E_0/w_s$  je pre ľubovoľnú frekvenciu zdroja konštantný prúd  $I_1$  a konštantný točivý moment  $T$  a je závislý len od sklzu stroja. Rovnice tiež ukazujú, že zmenou napätia a frekvencie zdroja je možné získať široký rozsah rýchlostí stroja. Pre nízke hodnoty frekvencie zdroja sú viac rozdielne hodnoty napätí  $U_1$  (napätie motora) a  $E_0$  a v prípade veľmi presného riadenia je nutné tento rozdiel rešpektovať (viď Obr. 9.2).



Obr. 9.2 Zmena svorkového a vnútorného napätia s frekvenciou zdroja



## 9.1 Indukčný stroj napájaný meničom



Obr. 9.3 Schéma asynchrónneho motora s frekvenčným meničom

Indukčný stroj napájaný meničom – invertorom (VVVF – variable voltage variable frequency) so šírkovou impulznou moduláciou (PWM – pulse width modulation) ukazuje Obr. 9.3. Asynchrónny motor predstavuje ikona UM3. Obvod s prúdovými zdrojmi medzi uzlami BUSTQS a BUSMG modeluje mechanickú záťaž motora a jeho napájanie zaisťuje menič tvorený šiestimi riadenými spínačmi, ktorý je napájaný z jednosmerného zdroja U. Ostatné ikony na obrázku tvoria riadiaci systém riešený pomocou TACS (Transient Analysis of Control Systems). Žiadaná hodnota prúdu  $ID = 220$  A (maximálna hodnota menovitého prúdu motora) je porovnávaná s hodnotou úmernou súčtu absolútnych hodnôt sieťových prúdov z meniča do motora  $IM$ . Stredná hodnota takého súčtu prúdov je pre súmernú trojfázovú sústavu 1.91. Relatívna odchýlka prúdov  $ID$  a  $IM$  je  $DELD$  integrovaná ako  $DELI$  určuje kruhovú frekvenciu vzťahom:

$$OMEGAD = 75 \cdot TIMEX(1 + DELI) \quad (9.3)$$

prítom  $TIMEX$  je aktuálny čas výpočtu. Obmedzením  $OMEGAD$  od 20 do 314 vznikne  $OMEGA$ . Pre amplitúdu riadiaceho signálu  $AMP$  platí:

$$AMP = 0,9 \cdot \frac{OMEGA}{2 \cdot p \cdot 50} \quad (9.4)$$

Integráciou (načítaním)  $OMEGA$  vzniká absolútny uhol  $THETA$  a východiskové signály pre riadenie spínačov jednotlivých fáz sú potom definované vzťahmi:

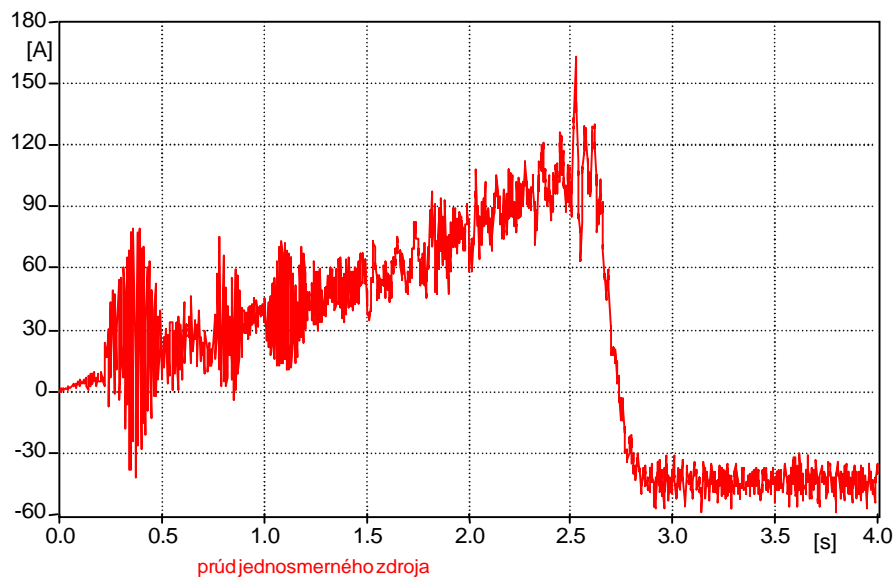
$$VRD = AMP \cdot \cos(THETA)$$

$$VSD = AMP \cdot \cos(THETA - 2,0944)$$

$$VTD = AMP \cdot \cos(THETA + 2,0944) \quad (9.5)$$

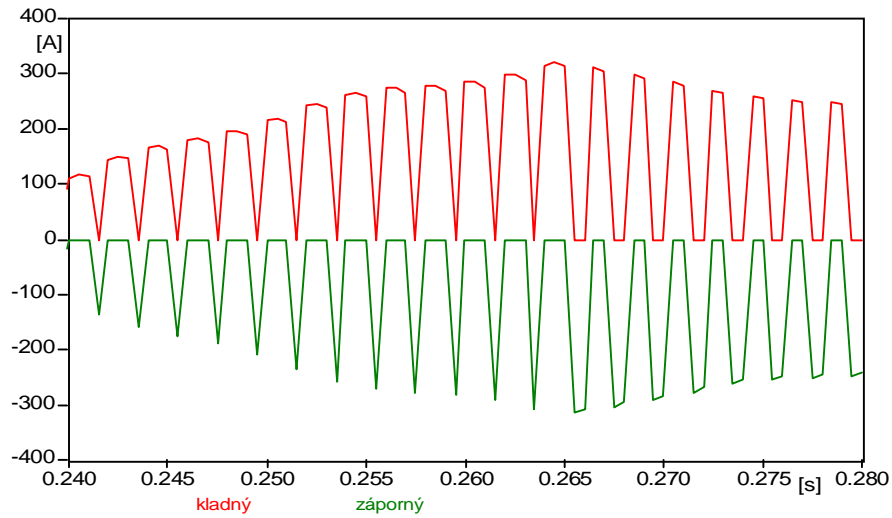
*ORIGI* je zdroj kladného lichobežníkového napätia s frekvenciou 500 Hz. Posunutím, násobením a načítaním je prevedený na pílovitý priebeh *TRI* s jednotkovou amplitúdou. Signály *SIGRP*, *SIGSP*, *SIGTP*, resp. *SIGRN*, *SIGSN*, *SIGTN* nadobúdajú logickú úroveň 1 a spínajú spínače na kladnom, resp. zápornom potenciáli jednosmerného zdroja, ak je príslušná hodnota signálov *VRD*, *VSD*, *VTD* väčšia, než hodnota *TRI* pílovitého napätia.

Rozbeh asynchrónneho motora a jeho prechod do generátorického chodu dokumentujú nasledujúce priebehy. Motor má menovité hodnoty: napätie 750 kV, výkon 200 kW a otáčky 2900 za minútu. Mechanický moment záťaže je po spustení nulový, v čase 0,2 s zaťažuje motor momentom 10 Nm (momentu v Nm odpovedá prúd v A) a v čase 1,5 s začína pôsobiť ďalší, opačný, moment s veľkosťou 350 Nm, tzn. výsledný moment je 340 Nm. Na Obr. 9.4 je zachytený prúd tečúci z jednosmerného zdroja do meniča. Prúd osciláciami narastá a po čase 2,5 s začína klesať až prejde do zápornej hodnoty, prúd je dodávaný do zdroja.

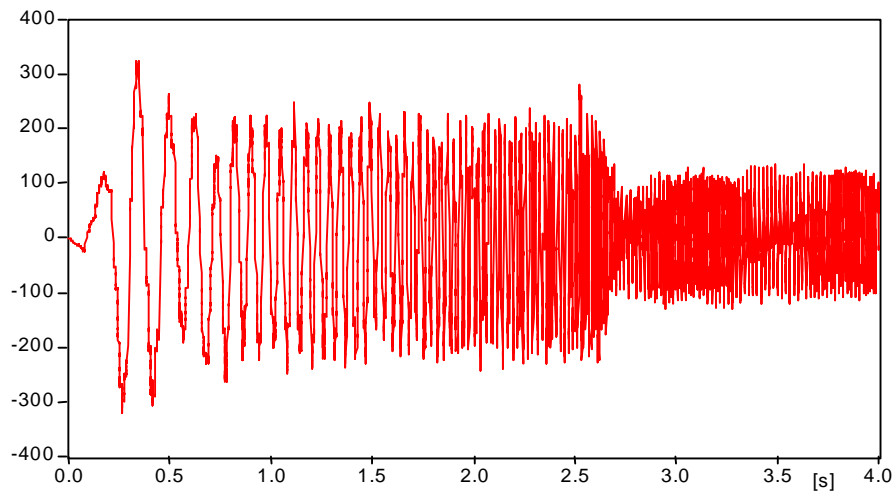


Obr. 9.4 Priebeh prúdu z napájacieho jednosmerného zdroja

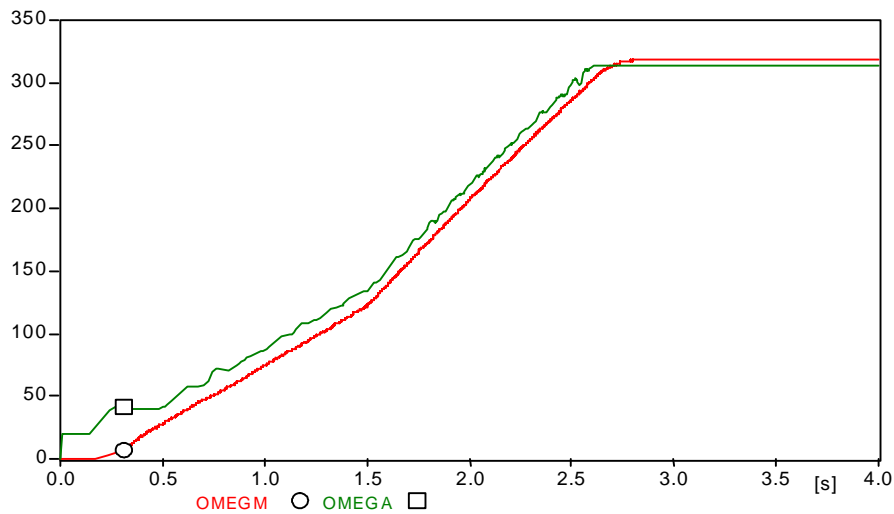
Funkciu meniča ukazuje Obr. 9.5. Ide o výsek priebehu prúdu od kladného a záporného pólu zdroja do fázy R. Celkový prúd fázy R do motora je pritom daný rozdielom týchto dvoch prúdov a znázorňuje ho Obr. 9.6. Spínanie príslušného spínača prebieha podľa vyššie uvedenej podmienky a impulzne – šírkovou moduláciou sa tak získa požadovaný priebeh prúdu. Frekvencia prúdu narastá až do frekvencie 50 Hz a jej zmena je určovaná požadovanou kruhovou frekvenciou *OMEGA*. Požadovanej *OMEGA* potom zodpovedá skutočná rýchlosť otáčania rotora motora *OMEGM*. Priebehy oboch kruhových frekvencií v rad/s ukazuje Obr. 9.7.



Obr. 9.5 Výšek priebehu prúdu z kladného a záporného pólu zdroja do fázy R



Obr. 9.6 Priebeh prúdu do fázy R motora



Obr. 9.7 Priebeh požadovaných a skutočných otáčok motora

## 10 DYNAMICKÝ OBLÚK V ENERGETICKÝCH SYSTÉMOCH

Vypínacia schopnosť súčasných vypínačov je závislá od parametrov oblúka, ktorý vzniká v priebehu vypínania prúdu medzi kontaktmi, tzv. spínací oblúk. Elektrický oblúk môže byť chápaný ako odpor, ktorého hodnota je premenlivá a je funkciou prúdu. Všeobecné oblúkové parametre sú vyjadrené diferenciálnymi rovnicami. Pri analýze obvodov pomocou EMTP je možné ľahko zahrnúť diferenciálne rovnice. Preto v prípade, keď ide o systém prevažne závislý od parametrov oblúka, je možné bez problémov urobiť jeho analýzu.

### 10.1 Mayr a Cassie – modely oblúkov

Pre modelovanie oblúka vo vypínačoch pomocou Mayr a Cassie modelov existuje široké uplatnenie.

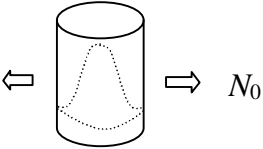
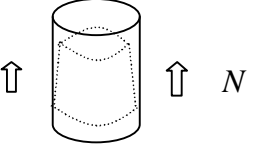
#### *Mayrov model*

Je vhodný pre malé hodnoty prúdov, rádovo do desiatok ampérov v SF<sub>6</sub> alebo tlakovzdušných vypínačoch. Je tiež použiteľný v prípade analýzy zvyškového prúdu, vzniknutého po prerušení prúdu (prechod nulou), po dobu niekoľkých μs v stave, ktorý je nazývaný „teplotný režim“. Vypínacia schopnosť môže byť najlepšie analyzovaná s použitím tohto modelu, pretože javy sa prevažne vzťahujú k určitému časovému intervalu. Model bol ďalej dopĺňovaný niektorými autormi.

#### *Cassieho model*

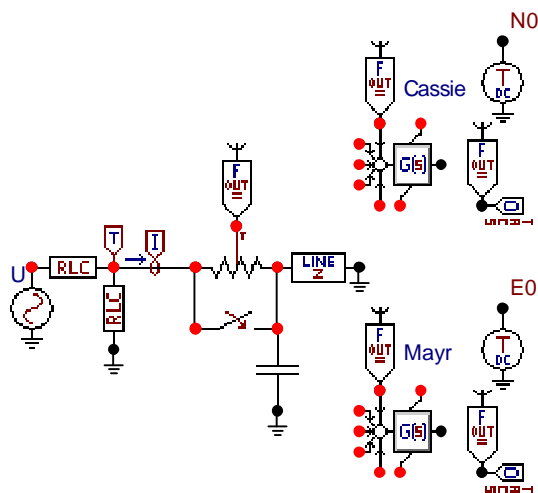
Je najlepšie využitelný pre veľké prúdy oblúka, v rozmedzí 100 A až 100 kA v SF<sub>6</sub> alebo v tlakovzdušných vypínačoch. Týmto modelom môže byť analyzované tlmenie v prechodnom deji pri vypínaní oblúka v obvode. Všeobecný prehľad a predstava týchto modelov je ukázaná v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 10.1 Porovnanie modelov oblúka

Model	Mayr	Cassie
vodivosť oblúka	so zmenou stupňa ionizácie $G \approx \exp(Q/Q_0)$	so zmenou priemeru oblúka $G \approx Q$
straty tepla	vedením $N = N_0$ (konštantné)	prúdením $N \approx Q$
dynamická charakteristika	$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{t} \cdot \left( \frac{u \cdot i}{N_0} - 1 \right)$	$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{t} \cdot \left( \frac{u^2}{E_0^2} - 1 \right)$
oblasť	malých prúdov	veľkých prúdov
princíp a priebeh vodivosti v stĺpci oblúka		

## 10.2 Vypínanie skratu na vedení

Typickou aplikáciou Mayrovho modelu oblúka, ktorý je najvhodnejší pre jav teplotného režimu vypínača, je vypínanie skratu na vedení (Short Line Fault). V dôsledku veľmi vysokej počiatkovej strmosti zotaveného napätia po prerušení prúdu, zostáva medzi kontaktmi určitá vodivosť výbojového priestoru, kde oblúk horí po dobu niekoľkých  $\mu\text{s}$ . Obr. 10.1 ukazuje schému pre výpočet SLF. Parametre vedenia pripojeného k vypínaču predstavujú bežné hodnoty pre nadzemné prenosové vedenie. Dĺžka vedenia 1,5 km zodpovedá miestu zemného skratu na vedení.



Obr. 10.1 Vypínanie skratu na vedení

Pre túto aplikáciu sú modely oblúkov Mayr a Cassie zapojené do série. Pri vypínaní poruchy skratovaného vedenia je dominantná iba časť Mayrovho modelu, čo sa dá overiť striedaním oboch modelov. Parametre výpočtu sú dané konštrukciou vypínača:  $N_0 = 280000 \text{ W}$ ,  $t = 1.0\text{E}-6 \text{ s}$ .

Pre Mayrov model platí pri označení:

$$G_0 = \frac{i^2}{N_0} \quad (10.1)$$

rovnica vyplývajúca z Tab. 10.1:

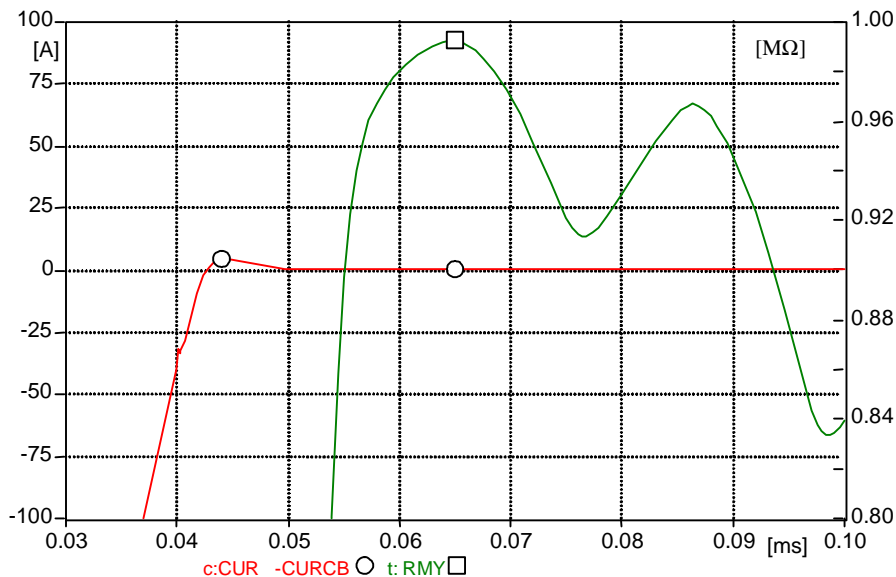
$$G = \frac{G_0}{1 + p \cdot t} \quad (10.2)$$

ktorá vychádza zo zjednodušeného vyjadrenia:

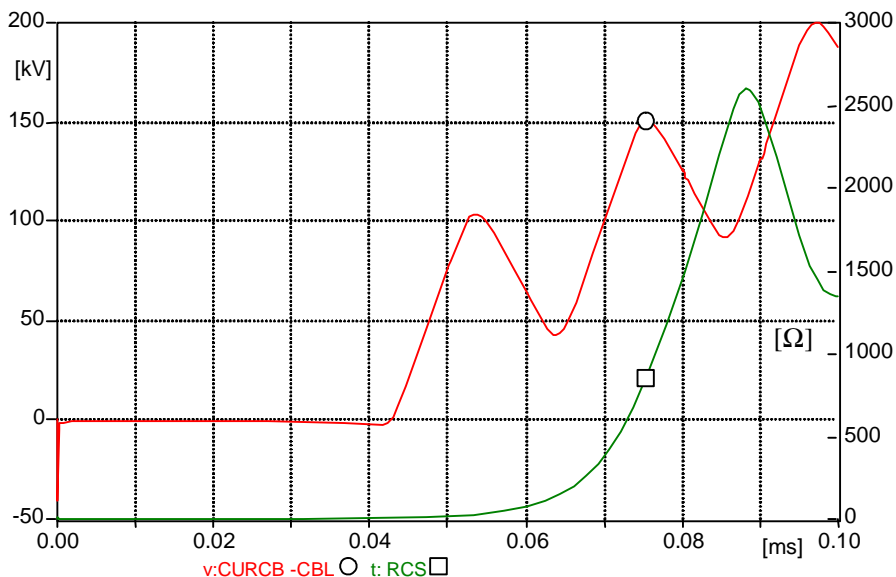
$$\frac{dG}{dt} = -\frac{G}{t} \quad (10.3)$$

Pre Cassieho model sa použije  $E_0 = 300 \text{ V}$ ,  $t = 3.0\text{E}-6 \text{ s}$  a rovnica (10.2) s rovnicou analogickou rovnici (10.1):

$$G_0 = \sqrt{\frac{i^2}{E_0^2}} \quad (10.4)$$



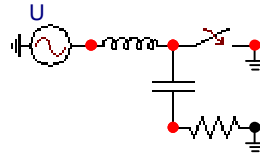
Obr. 10.2 Odpor oblúka podľa Mayra a prechod prúdu nulou s vyznačenou oblasťou zvyškovej vodivosti



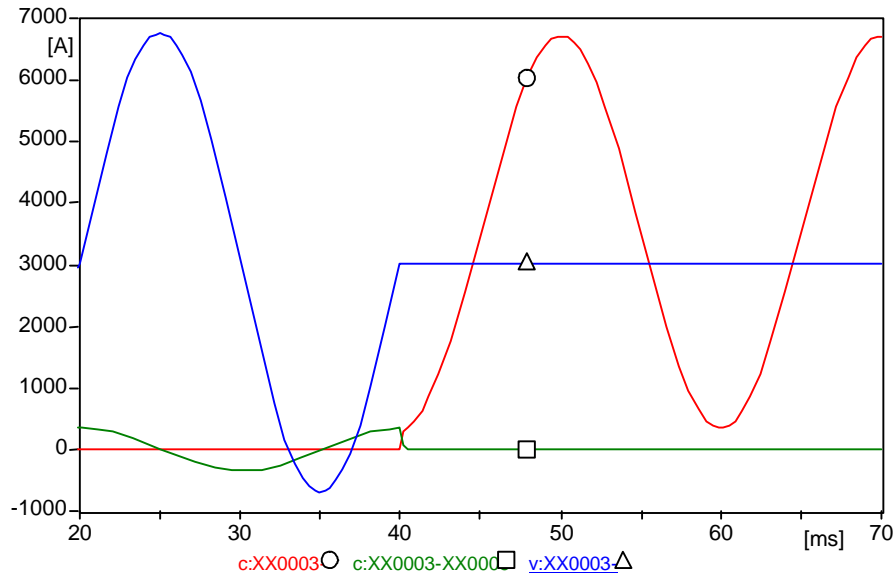
Obr. 10.3 Priebeh zotaveného napätia na vypínači a odpor oblúka podľa Cassie

### 10.3 Prerušenie prúdu v nule

Prerušenie striedavého prúdu nastane v okamihu prechodu prúdu nulou. V striedavom obvode s nabíjajúcim prúdom môžu byť amplitúdy jednosmernej zložky skratových prúdov vyššie než striedavé zložky. Je to vtedy, keď elektrický skrat vznikne v čase špičkovej hodnoty priebehu nabíjacieho prúdu, potom je začiatok priebehu skratového prúdu v rovnakom zmysle ako hodnota nabíjacieho prúdu. Schému pre tento prípad ukazuje Obr. 10.4 a príslušné časové priebehy Obr. 10.5.



Obr. 10.4 Schéma pre ukážku zvýšenia jednosmernej zložky skratového prúdu danú nabíjacím prúdom

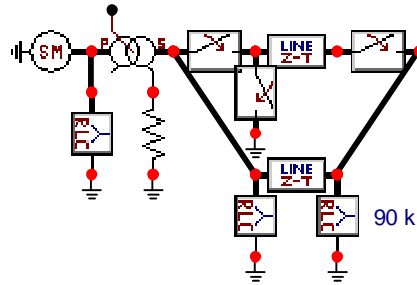


Obr. 10.5 Priebehy napätia, nabíjacieho a skratového prúdu

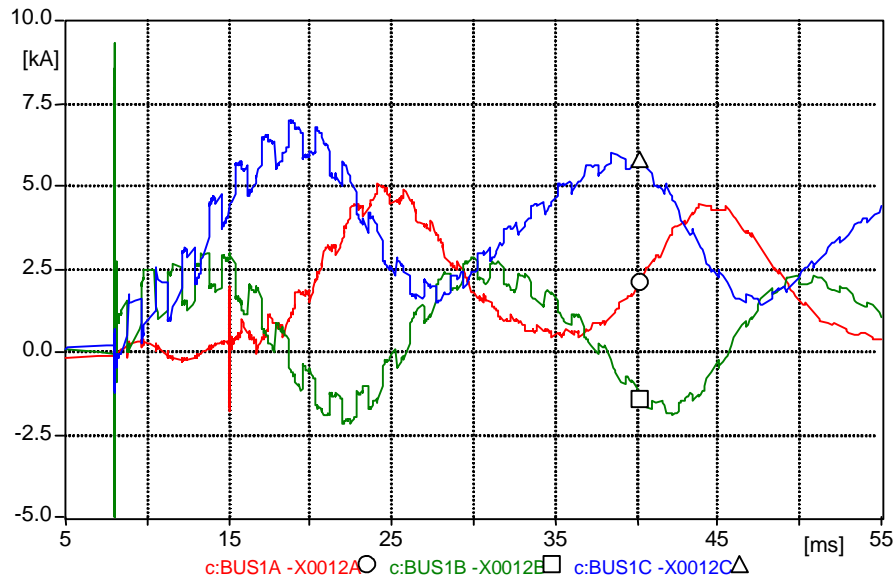
Vďaka pomaly klesajúcej jednosmernej zložke prejde skratový prúd nulou s oneskorením. Keďže skratové impedancie synchronného generátora sú časovo premenlivé, pri skrate blízko generátora je prvý prechod nulou ešte oveľa viac oneskorený, v istých prípadoch i viac než o 0,1 s. Vypnutie poruchy je teda oneskorené a vypínacia schopnosť vypínača sa pre tento dlhý časový interval znižuje. Situácia je vážna pre dnešné systémy s dlhšou časovou konštantou úbytku jednosmernej zložky. Našťastie, súčasné SF<sub>6</sub> a tlakovzdušné vypínače sú odolné proti elektrickému oblúku v priebehu vypínania prúdu. Navyše horenie oblúka vo vypínači pomáha pri tlmení jednosmernej zložky. Pritom sa stále znižujú straty v energetických systémoch v dôsledku rastu prenášaných výkonov a používania nízkostratových zariadení. Spoľahlivosť systému zvyšuje použitie menšieho počtu vypínačov, napríklad jeden vypínač na hladine 550 kV. Preto je nutná následná dôkladná kontrola systému.

V príklade podľa schémy na Obr. 10.6 je 500 MVA generátor pripojený na stranu nízkeho napätia a prenosové vedenie je pripojené na stranu vysokého napätia transformátora. V okamihu skratu tečie vedením skratový prúd.

Na Obr. 10.7 sú vykreslené časové priebehy skratového prúdu všetkých troch fáz. Analogicky s Obr. 10.5 je tu tiež oneskorený prechod prúdu nulou vo fáze A a ešte viac vo fáze C. Oscilácie namodulované na základnej harmonickej súvisia s odrazmi vln na vedeniach.



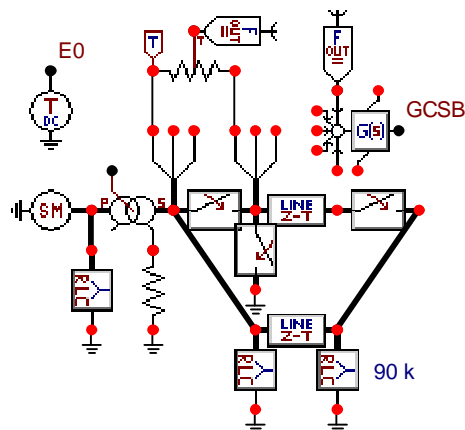
Obr. 10.6 Model prenosovej sústavy s paralelným vedením pri vzniku skratu



Obr. 10.7 Priebeh skratového prúdu podľa Obr. 10.6

Prerušením prúdu vypínačmi na strane vysokého napätia dôjde k odpojeniu jedného z paralelných vedení. Kvôli jednoduchosti je iba do fázy C vložený Cassieho model oblúka. Je zvolené:  $E_0 = 10 \text{ kV}$  a  $t = 2 \mu\text{s}$ .

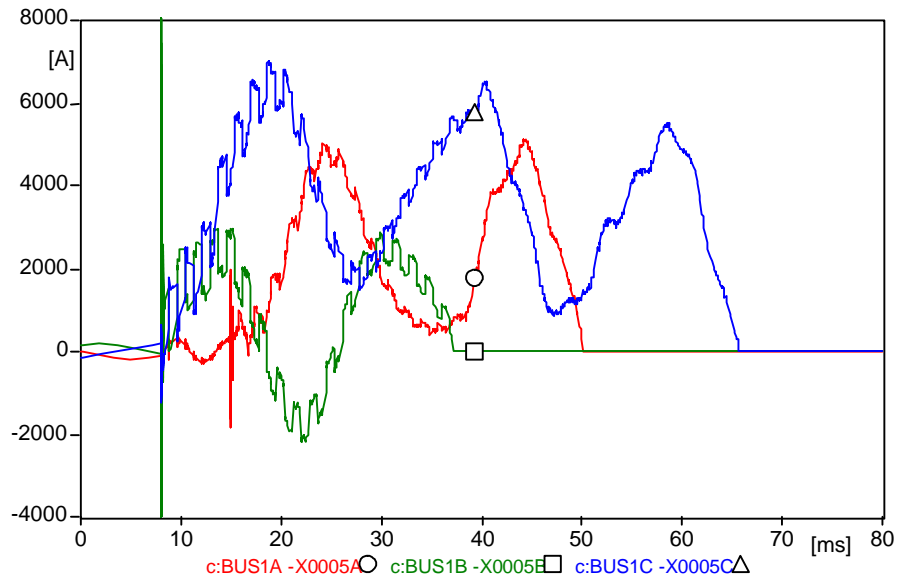
Pre model sú opäť použité rovnice (10.4) a (10.2). Schému modelu ukazuje Obr. 10.8.



Obr. 10.8 Model prenosovej sústavy s paralelným vedením a vypnutie skratu s Cassieho modelom oblúka



Zatiaľ, čo v prípade vypínania ideálnym vypínačom nastane prechod prúdu nulou za viac než 100 ms prúd tak nemôže byť prerušený (viď Obr. 10.7). Pri rešpektovaní odporu oblúka pri rozpojených kontaktoch vypínača klesne prúd rýchlo na nulu a je prerušený. Sú teda bezpečne prerušené aj skratové prúdy (viď Obr. 10.9). Preto pri výpočtoch spínacích dejov v súčasných energetických systémoch musia byť známe zodpovedajúce parametre vypínačov, aby mohli byť použité modely oblúka.



Obr. 10.9 Vypnutie skratovaného vedenia pri uvážení Cassieho modelu oblúka