

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zkratky na troleji

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav HORNÍK**
Osobní číslo: **E09N0265P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Zkratky na troleji**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Možná zapojení vozidel s asynchronními trakčními motory a výběr zapojení pro analýzu.
2. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě.
3. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě.
4. Zhodnocení rizik a možností ochran na vozidle.

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **dle doporučení vedoucího**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Danzer, CSc.**
ŠKODA Transportation,s.r.o., Plzeň

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Danzer, CSc.**
ŠKODA Transportation,s.r.o., Plzeň

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

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


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Danzerovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možnými druhy zapojení s asynchronním motorem pro připojení do stejnosměrné a střídavé napájecí soustavy. Jsou zde rozvedeny možné typy zkratů a možnosti protizkratové a nadproudové ochrany, dále pak simulace zkratu na stejnosměrném napájecím systému.

Klíčová slova

Zkrat, stejnosměrné napětí, střídavé napětí, trolej, hlavní vypínač, pojistka, simulace zkratu.

Abstract

This diploma work discusses the possible types of involvement with an asynchronous motor for connection to the DC and AC power supply. There are also detail the possible types of faults and the possibility of short circuit and overcurrent protection. There is a simulation of short circuit on the DC power system.

Key words

Short-circuit, DC voltage, AC voltage, trolley, main switch, fuse, short-circuit simulation.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod..... | 2 |
| 2. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze stejnosměrné napájecí soustavy | 3 |
| 2.1 Zapojení s proudovým střídačem | 3 |
| 2.2 Zapojení s napěťovými střídači | 4 |
| 2.2.1 Základní zapojení s napěťovým střídačem..... | 4 |
| 2.2.2 Tříbodové zapojení..... | 5 |
| 2.2.3 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr | 6 |
| 2.2.4 Zapojení s dvojitou hvězdou | 7 |
| 3. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze střídavé napájecí soustavy | 8 |
| 3.1 Proudové napájení střídačů | 8 |
| 3.2 Napěťové napájení střídače | 9 |
| 3.2.1 Zapojení s pulzním usměrňovačem..... | 10 |
| 4. Místa možného výskytu zkratu | 11 |
| 5. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě 3kV | 12 |
| 5.1 Základní údaje pro simulaci zkratu na stejnosměrné troleji..... | 12 |
| 5.1.1 Zvolený obvod pro simulaci..... | 12 |
| 5.1.2 Hodnoty a parametry pro simulaci v režimu tahu i rekuperace | 13 |
| 6. Teoretický rozbor simulovaného zapojení..... | 15 |
| 6.1 Vstupní filtr | 15 |
| 6.2 Napěťový střídač | 16 |
| 6.3 Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru..... | 19 |
| 6.3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru | 19 |
| 6.3.2 Vztahy pro řízení motoru (stavové rovnice) | 19 |
| 7. Průběhy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV | 21 |
| 7.1 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu tah | 21 |
| 7.2 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu rekuperace..... | 23 |
| 8. Výpočet maximální hodnoty proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení 3 kV..... | 25 |
| 9. Zkrat na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě | 28 |
| 9.1 Zkraty mimo vozidlo v jeho blízkosti na střídavých systémech 15 kV, 16,7 Hz a 25 kV, 50 Hz. | 28 |
| 9.2 Možnosti vypínání střídavého zkratu | 28 |
| 10. Možnosti ochrany proti zkratu na stejnosměrných systémech..... | 29 |
| 10.1 Možnosti vypínání stejnosměrného zkratu..... | 29 |
| 10.2 Protizkratová ochrana..... | 29 |
| 11. Nadproudová ochrana | 33 |
| 11.1 Hlavní vypínač | 33 |
| 11.1.1 GSX II | 34 |
| 11.2 Pojistky..... | 35 |
| 11.2.1 SS pojistky: | 35 |
| 11.2.2 St pojistky:..... | 35 |
| 12. Závěr..... | 36 |
| Seznam použité literatury..... | 37 |
| Přílohy | 38 |

1. Úvod

Tato práce přibližuje problematiku určitých typů zkratu (posuzováno bude jen zemní spojení trolej-kolej), které se mohou vyskytovat na trakčním vedení stejnosměrné troleje 600 V – 3 kV. Dále bude rozebrána problematika na střídavé troleji 25 kV/50 Hz a 15 kV/16²/₃ Hz. V našem případě půjde o trolej napájenou 3 kV stejnosměrně a napájecí soustavou 25 kV/50 Hz střídavě.

V první části jsou přiblíženy základní zapojení s asynchronními motory pro připojení na stejnosměrnou napájecí soustavu. Půjde o zapojení s proudovým a napětovým střídačem. Dále práce ukazuje zapojení pro střídavou napájecí soustavu, kdy je střídač napájen z proudového nebo napětového meziobvodu.

Dalším bodem práce je rozebrání místa možného zkratu, např. zkrat na troleji, v napětovém meziobvodu a mezifázový zkrat. Jeden typ zkratu si vybereme a podrobíme ho analýze. Z této teoretické analýzy pak vytvoříme simulaci zkratu na troleji při připojení motoru, který bude v režimu tah a rekuperace (brzda). Vše budeme simulovat pro stejnosměrnou napájecí soustavu 3 kV a pro střídavou napájecí soustavu 25 kV/50 Hz.

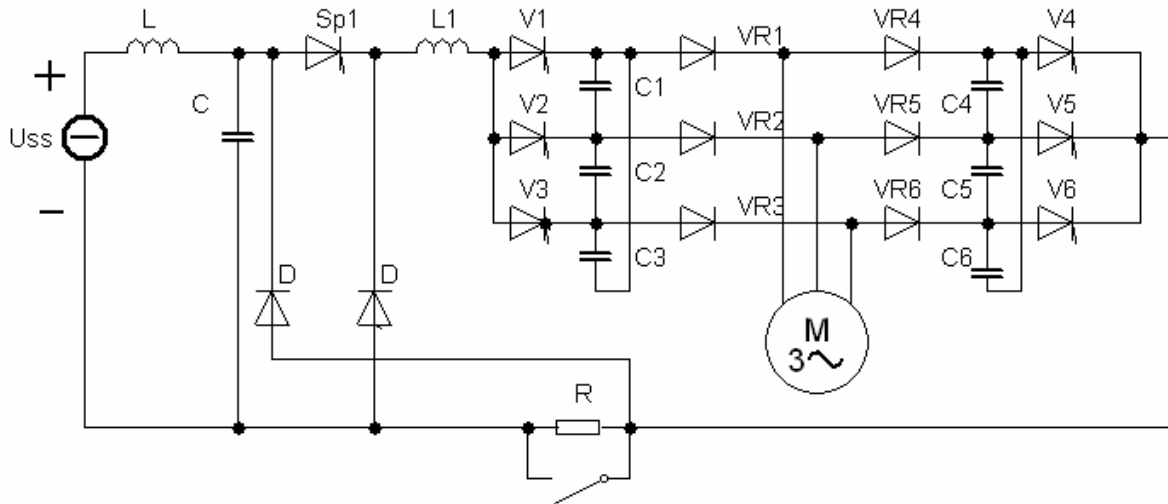
Dotkneme se teoreticky možnosti výpočtu zkratu na trolejovém vedení 3 kV, kdy půjde o maximální hodnotu proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení.

Dále se budeme zabývat výpočtem a nastavením protizkratové ochrany na trakční napájecí soustavě 3 kV.

Poslední část je věnována možnostem ochrany proti nadproudu a zkratu na stejnosměrné napájecí soustavě.

2. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze stejnosměrné napájecí soustavy

2.1 Zapojení s proudovým střídačem

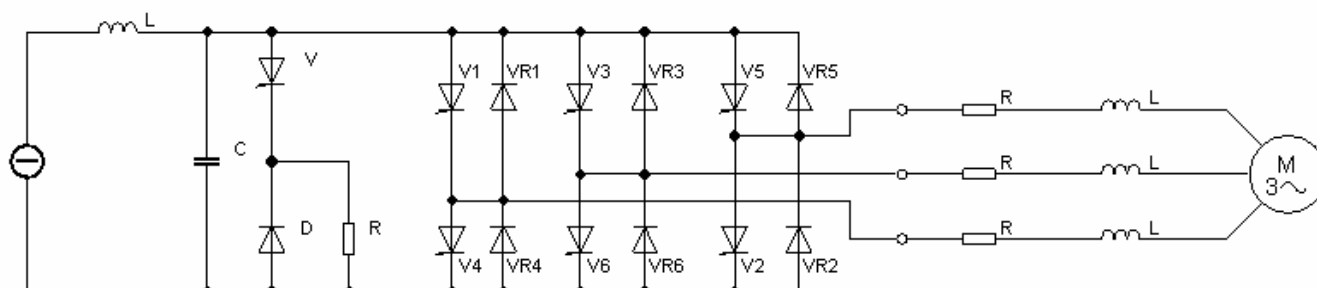


Obr.1 Zapojení s proudovým střídačem

Především se nabízí možnost využít toto v zapojení s mezifázovou komutací pouze středně rychlých tyristorů, bez zhášecích obvodů. Jednoduché řízení s oddělenými regulátory proudu (v proudovém zdroji, pulzními měniči nebo řízenými usměrňovači) a kmitočtu (ve střídači). Široké možnosti využití zapojení. Dnes se pro nová vozidla nepoužívá.

2.2 Zapojení s napět'ovými střídači

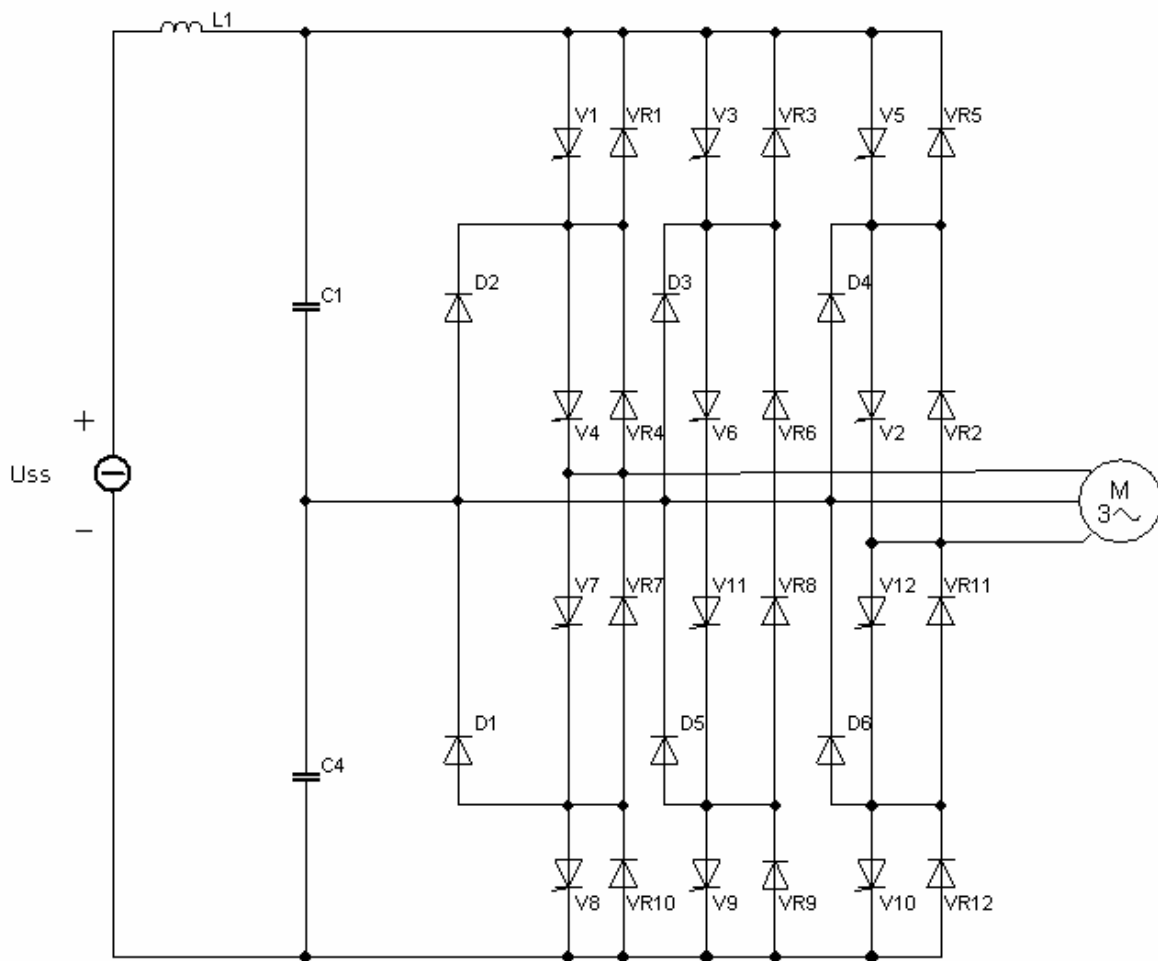
2.2.1 Základní zapojení s napět'ovým střídačem



Obr.2 Zapojení s napět'ovým střídačem

Toto zapojení představuje v současné době standard. Vzhledem k výkonům se realizuje buď s GTO tyristory nebo dnes již převážně s IGBT tranzistory. Při brzdění jde vždy o rekuperaci a záleží pouze na okolnostech, zda a kdy se v motorech vyrobená energie vrátí do sítě a kdy je mařena v brzdovém odporu. Pro řízení brzdy je (na rozdíl od proudového střídače) nutno použít (brzdový) pulzní měnič pro řízení efektivní velikosti brzdového odporu.

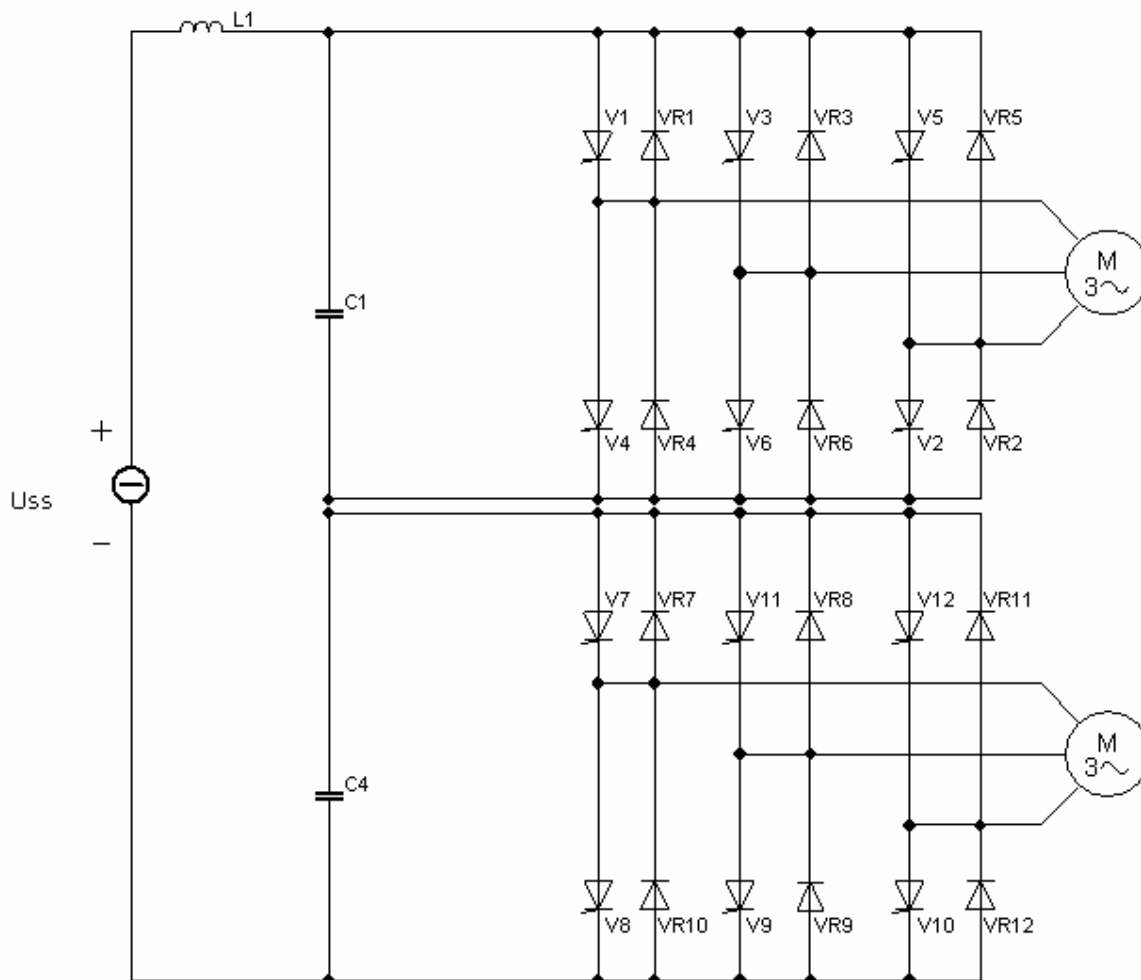
2.2.2 Třibodové zapojení



Obr.3 Třibodové zapojení

Tento způsob zapojení umožňuje řešit bez problémů sériové zapojení polovodičových součástek střídače a samotné zapojení lze přímo připojit na napájecí síť 3 kVss. Výstupní napětí může kromě hodnoty $+U_d$ a $-U_d$ nabývat také hodnoty 0, čímž se zlepší aproximace napětí a zmenší se za jinak stejných okolností odchylky proudu motoru od sinusovky.

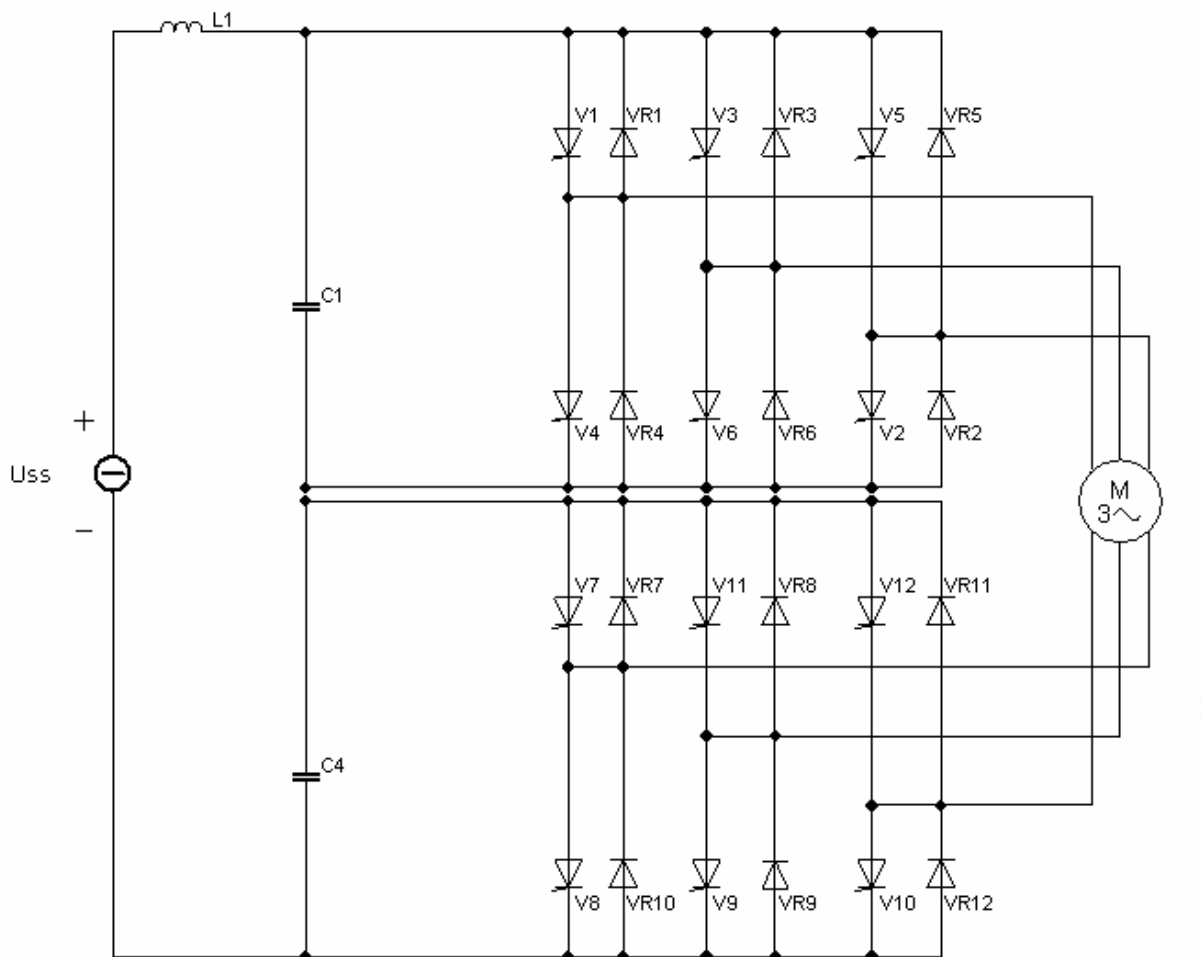
2.2.3 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr



Obr.4 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr

Objevuje se jen u vozidel na 3 kV_{ss}. Je důležité zajistit stabilní rozdělení napětí na měniče a motory. Při sériovém spojení napěťových střídačů je nezbytné regulací zajistit, aby vstupní napětí se na oba kondenzátory dělilo alespoň přibližně rovnoměrně. Malý rozdíl ve výkonu motorů (tzn. v odběru proudu z jednoho z kondenzátorů) vede k rychlému růstu napětí na jednom z měničů na úkor druhého. Přes to se toto zapojení používá.

2.2.4 Zapojení s dvojitou hvězdou

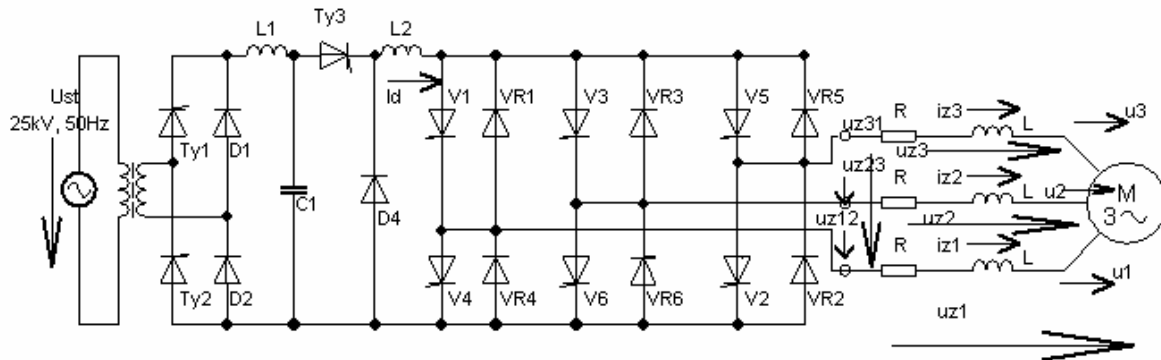


Obr.5 Zapojení s dvojitou hvězdou

Problém rozdělení napětí na vstupním filtru se automaticky řeší prostřednictvím magnetické vazby mezi „horním“ a „dolním“ systémem vinutí. Tato vinutí jsou (na rozdíl od proudové varianty) provedena co nejlépe ve všech parametrech (osy vinutí, reaktance), protože jsou vázána společným hlavním magnetickým tokem tvořícím v podstatě transformátor, který umožňuje „přelévání“ výkonu mezi oběma systémy vinutí tak, aby napětí na nich byla stejná. To se přitom děje samočinně, přesně, rychle a naprosto spolehlivě.

3. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze střídavé napájecí soustavy

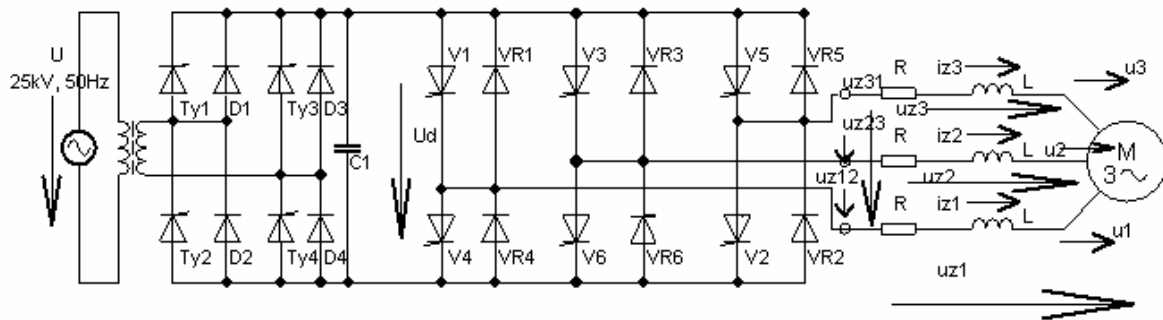
3.1 Proudové napájení střídačů



Obr.6 Proudově napájený střídač

Pro vytvoření proudového meziobvodu lze i při napájení ze střídavé sítě použít zapojení pro plynulou regulaci napětí (ve skutečnosti proudu). Prakticky to znamená použití řízených usměrňovačů s vyhlazovací tlumivkou. Ve speciálních případech (například u dvousystémových vozidel) lze uvažovat i o diodovém usměrňovači s následným LC filtrem a pulzním měničem. Zatím se nikde nepoužívá.

3.2 Napět'ové napájení střídače

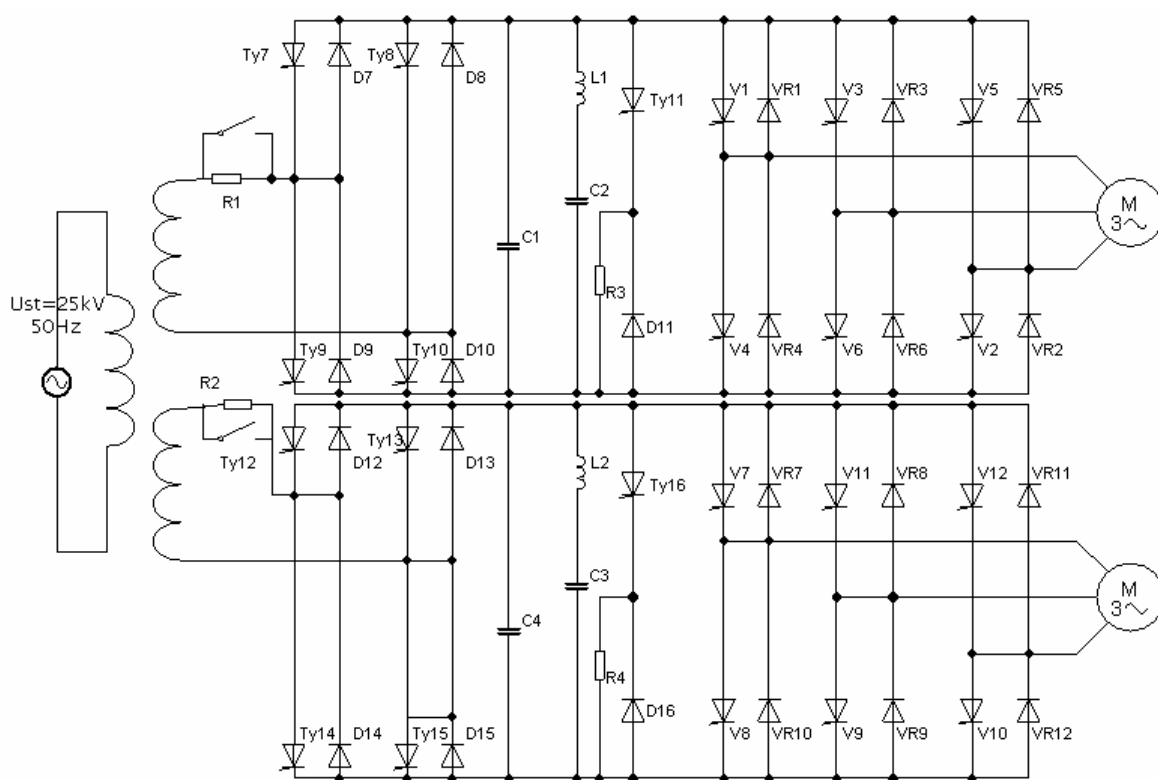


Obr.7 Napět'ově napájený střídač

Pro vytvoření napět'ového meziobvodu je nejjednodušším řešením diodový usměrňovač s LC filtrem. Pro stabilizaci napětí meziobvodu lze použít řízený usměrňovač nebo diodový a řízený můstek v sérii. Cenou za stabilizaci je zhoršení energetických vlastností vzhledem k síti - po většinu doby bude řízený usměrňovač regulován a bude pracovat se zhoršeným účinníkem v porovnání s diodovým usměrňovačem.

3.2.1 Zapojení s pulzním usměrňovačem

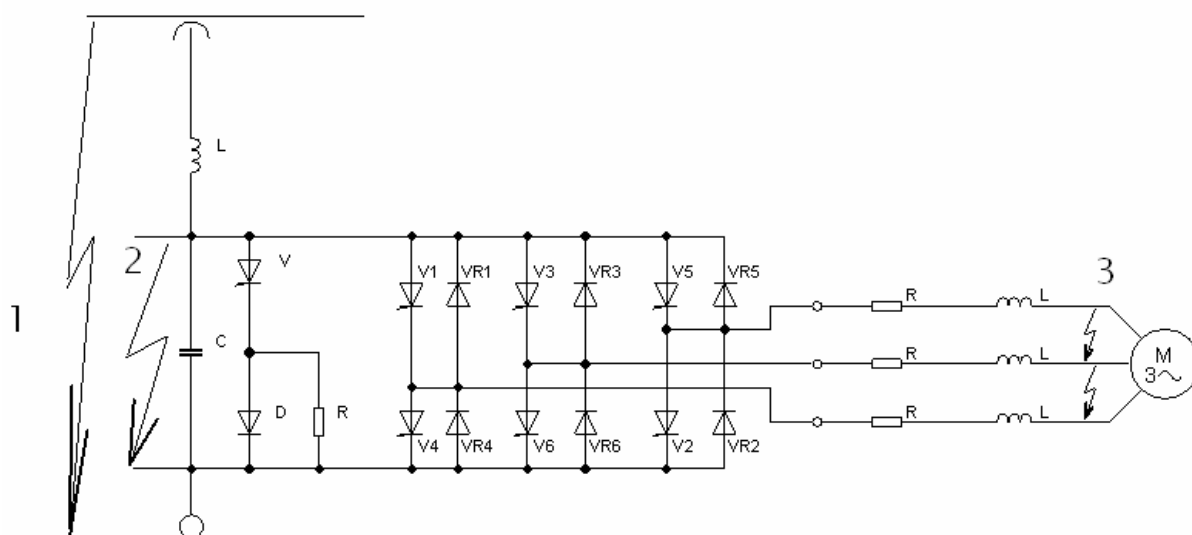
Použití více paralelně zapojených sekundárních vinutí umožňuje přesazené řízení, které podobně jako u pulzních měničů významně zmenšuje velikost „zvlnění“, v daném případě obsah vyšších harmonických v primárním proudu a v troleji. Nabízí se možnost efektivního řešení rekuperačního brzdění, které u střídavých vozidel prakticky vytlačilo brzdění odporové.



Obr.8 Zapojení s pulzním usměrňovačem

4. Místa možného výskytu zkratu

Bereme v úvahu univerzální zapojení, nikoliv plně funkční zapojení.



Obr.9 Zapojení pro možná místa zkratu

- 1) Při zkratu mimo vozidlo se kondenzátor vybíjí přes tlumivku do oblasti vzniku zkratu, je možné použít oddělovací diodu od místa zkratu.
- 2) Nastane-li zkrat v meziobvodu, pak je napájen z motoru při elektrickém brzdění, které nelze vypnout, ale je potřeba co nejdříve je odbudit pomocí řídicích impulsů. Zkrat může být také napájen z trakčního vedení, které by mělo být vypnutelné hlavním vypínačem. Především je ale zkrat napájen z kondenzátoru v meziobvodu.
- 3) Dále zmiňme zkrat v mezifázi výstupního napětí střídače (zkratování sdruženého napětí střídače).

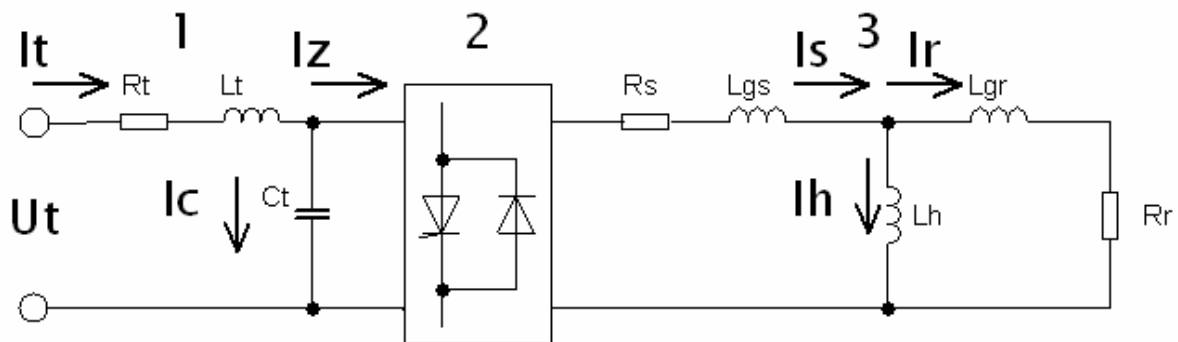
5. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě 3kV

Analýza zkratu je důležitá z hlediska nastavení ochran: nastavení rychlosti vypnutí vypínače (rychlovypínače) na vozidle a v napájecí měničce, za jakou dobu dosáhne proud maxima a za jak dlouho je schopen vypínač zasáhnout a vypnout zkratový proud.

5.1 Základní údaje pro simulaci zkratu na stejnosměrné troleji

5.1.1 Zvolený obvod pro simulaci

Vyděme ze standardního uspořádání pohonu s asynchronním motorem na vozidle se stejnosměrnou trakcí. Stejnosměrná trolej připojená přes filtr k meziobvodu a napět'ovému střídači, který řídí pomocí pulsně šířkové modulace asynchronní motor.



Obr.10 Simulované zapojení pro zkrat na stejnosměrné troleji

5.1.2 Hodnoty a parametry pro simulaci v režimu tahu i rekuperace

- ideální spínací součástky
- obvod s konstantní indukčností a odporem v troleji v závislosti na jízdě vozidla
- R_s satorový odpor
- R_r rotorový odpor
- $L_{\sigma s}$ rozptylová indukčnost satorového vinutí
- $L_{\sigma r}$ rozptylová indukčnost rotorového vinutí
- L_h vzájemná indukčnost satoru a rotoru
- rezistor R_t představuje odpor troleje
- indukčnost L_t představuje součet indukčností troleje
- C_t je trakční kapacita
- U_t trakční napájení

Parametry náhradního schématu

Asynchronní motor: 1ML 4949 K/6 (1100W)

$$R_s = 0,0178 \Omega$$

$$R_r = 0,0112 \Omega$$

$$L_{\sigma s} = 0,556 \text{ mH}$$

$$L_{\sigma r} = 0,424 \text{ mH}$$

$$L_h = 14,534 \text{ mH}$$

Hodnoty trakčního vedení

$$R_t = 0,02 \Omega$$

$$L_t = 0,004 \text{ H}$$

$$C_t = 0,01 \text{ F}$$

$$U_t = 3 \text{ kV}$$

Hodnoty pro simulaci zkratu

$$f_{\text{pila}} = 1000 \text{ Hz}$$

$$f_s = 50 \text{ Hz}$$

$$T_f = 0,5$$

$$f_r = 0,5 \text{ Hz} \quad (\text{pro tah})$$

$$f_r = -0,5 \text{ Hz} \quad (\text{pro rekuperaci})$$

Zkrat nastane v čase

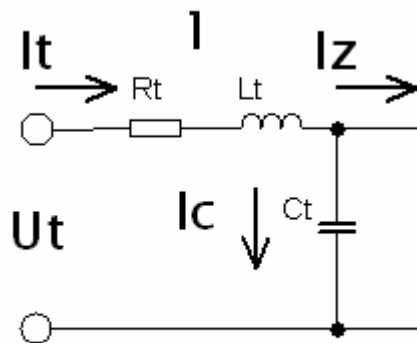
$$t = 0,2 \text{ s}$$

6. Teoretický rozbor simulovaného zapojení

Simulovaný obvod rozdělíme do tří základních částí podle funkčnosti:

1. Vstupní filtr
2. Napěťový střídač
3. Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru

6.1 Vstupní filtr

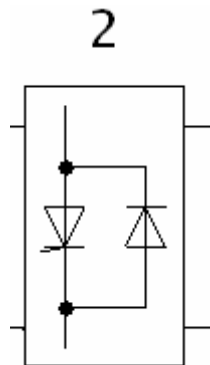


Obr. 11 Vstupní filtr

Matematický popis vstupního filtru

$$\begin{aligned} I_t &= I_c + I_z \Rightarrow I_c = I_t - I_z \\ U_t &= R \cdot I \cdot \frac{dI_t}{dt} + U_c \\ r.1 \quad U_c &= \frac{1}{C} \int_0^t I_c \cdot dt \Rightarrow \frac{dU_c}{dt} = I_c / C \\ \frac{dI_t}{dt} &= \frac{1}{L} (U_t - R \cdot I_t - U_c) \end{aligned}$$

6.2 Napěťový střídač



Obr.12 Napěťový střídač

Použijme třífázový můstkový napěťový střídač. Jako zdroj napětí je uvažován zdroj konstantního napětí U_t . Odebíraný výkon je $P = U_t \cdot I_z$. Se smyslem přenosu středního výkonu se mění smysl I_z .

$$\begin{array}{ll} P > 0 & I_z > 0 \text{ střídačový chod} \\ P < 0 & I_z < 0 \text{ usměrňovačový chod} \end{array}$$

Stejnoseměrná strana střídače musí umožňovat průchod proudu v obou směrech. Při kladném proudu I_z umožňují průchod vypínatelné součástky, při záporném I_z zajišťují vedení proudu zpětné diody, které jsou antiparalelně zapojeny k vypínatelným součástkám. Umožňují tak usměrňovačový chod i odběr jalového výkonu zátěží. V tomto případě je zdrojem napětí měnič, kde jsou pouze neřízené usměrňovače, které neumožňují rekuperaci do střídavé sítě. Brzdou energii vozidla může odebírat pouze jiné vozidlo nebo může být mařena v odporcích. Pro simulaci použijeme pulsně šířkovou modulaci, jež je založena na principu koincidence nosného signálu (vysokofrekvenčního) s nízkofrekvenčním modulačním signálem.

V závislosti na stavu sepnutí vypínatelných součástek (IGBT) lze určit napětí na zátěži. Ze stavu sepnutí lze odvodit i napětí na výstupu střídače vzhledem k pomyslnému střednímu vývodu „0“ stejnosměrného zdroje. Jde o tzv. fázová napětí střídače (U_{10} , U_{20} , U_{30}),

ale nejsou shodná s fázovými napětími (u_{z1}, u_{z2}, u_{z3}) zátěže. Pokud je střídavý vývod střídače připojen k napětí U_c (napětí na C_t) přes V1 nebo VR1, bude $U_{10} = \frac{U_c}{2}$. Pokud bude připojen přes V4 nebo VR4, pak počítáme $U_{10} = -\frac{U_c}{2}$. Záleží na tom, s jakým pólem vstupního filtru (kladnému nebo zápornému) připojíme spínací součástku. Z tohoto postupu vyplývá r.2.

$$\begin{aligned} \text{r.2} \quad \text{V3 nebo VR3} \dots U_{20} &= \frac{U_c}{2} \\ \text{V6 nebo VR6} \dots U_{20} &= -\frac{U_c}{2} \\ \text{V5 nebo VR5} \dots U_{30} &= \frac{U_c}{2} \\ \text{V2 nebo VR5} \dots U_{30} &= -\frac{U_c}{2} \end{aligned}$$

Sdružená napětí střídače pro hvězdu (Y) budou r.3.

$$\begin{aligned} \text{r.3} \quad u_{z12} &= U_{10} - U_{20} \\ u_{z23} &= U_{20} - U_{30} \\ u_{z31} &= U_{30} - U_{10} \end{aligned}$$

Sdružená napětí pro trojúhelník (D), jsou rovna fázovému napětí zátěže r.4.

$$\text{r.4} \quad u_{z12} = u_{z1}$$

Při zátěži do hvězdy bude platit r.5 pro vztah mezi sdruženým a fázovým napětím zátěže

$$\begin{aligned} \text{r.5} \quad u_{z12} &= u_{z1} - u_{z2} \\ u_{z23} &= u_{z2} - u_{z3} \\ u_{z31} &= u_{z3} - u_{z1}, \end{aligned}$$

přičemž je zachován poměr r.6 mezi fázovými napětími zátěže

$$\text{r.6} \quad u_{Z1} + u_{Z2} + u_{Z3} = 0$$

Pak dále platí r.7 pro symetrické zátěže indukovaného fázového napětí střídavého stroje:

$$\text{r.7} \quad u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

$$\text{r.8} \quad i_{Z1} + i_{Z2} + i_{Z3} = 0$$

Pomocí r.5 a r.6 lze napsat r.9, které jsou pro fázová napětí střídače na zátěži:

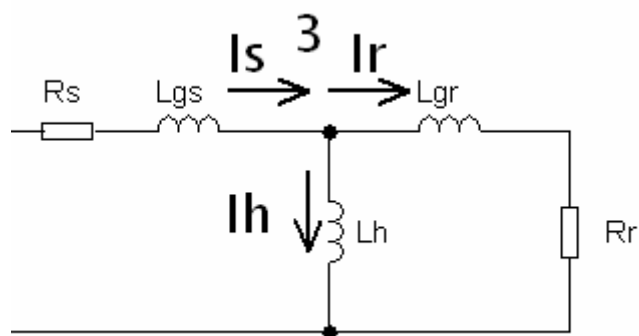
$$\begin{aligned} \text{r.9} \quad u_{Z1} &= \frac{1}{3} (u_{Z12} - u_{Z31}) \\ u_{Z2} &= \frac{1}{3} (u_{Z23} - u_{Z12}) \\ u_{Z3} &= \frac{1}{3} (u_{Z31} - u_{Z23}) \end{aligned}$$

Při požadavku maximálního výstupního napětí střídače je amplituda modulačního signálu zvětšena až na velikost amplitudy nosného signálu. Amplituda první harmonické fázového napětí střídače může dosáhnout maximální hodnoty $U_c/2$ a amplituda 1. harmonické sdruženého napětí:

$$\text{r.10} \quad U_{z12m(1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_c = 0,866 \cdot U_c$$

6.3 Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru

6.3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru



Obr. 13 Náhradní schéma asynchronního motoru

6.3.2 Vztahy pro řízení motoru (stavové rovnice)

r.11

$$\alpha = \frac{R_s + R_r \cdot \frac{L_h^2}{L_r}}{\lambda}$$

$$\beta = \frac{R_r \cdot \frac{L_h}{L_r}}{\lambda}$$

$$\gamma = \frac{L_h}{L_r} \cdot p_p$$

$$\delta = \frac{1}{\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{k_p \cdot p_p}{J} \cdot \frac{L_h}{L_r}$$

$$\lambda = L_{s\sigma} + L_{r\sigma} + L_{r\sigma} \cdot \frac{L_h}{L_r}$$

Výpočet vstupního statorového proudu v „x“ a „y“ souřadnicích:

$$\begin{aligned} \text{r.12} \quad \frac{di_{sx}}{dt} &= -\alpha \cdot i_{sx} + \beta \cdot \Psi_{rx} + \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sx} \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -\alpha \cdot i_{sy} - \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} + \beta \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sy} \end{aligned}$$

Výpočet rotorového magnetického toku pro „x“ a „y“ souřadnice:

$$\begin{aligned} \text{r.13} \quad \frac{d\Psi_{rx}}{dt} &= R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sx} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{rx} - p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} &= R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sy} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{ry} + p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} \end{aligned}$$

Výpočet mechanických otáček:

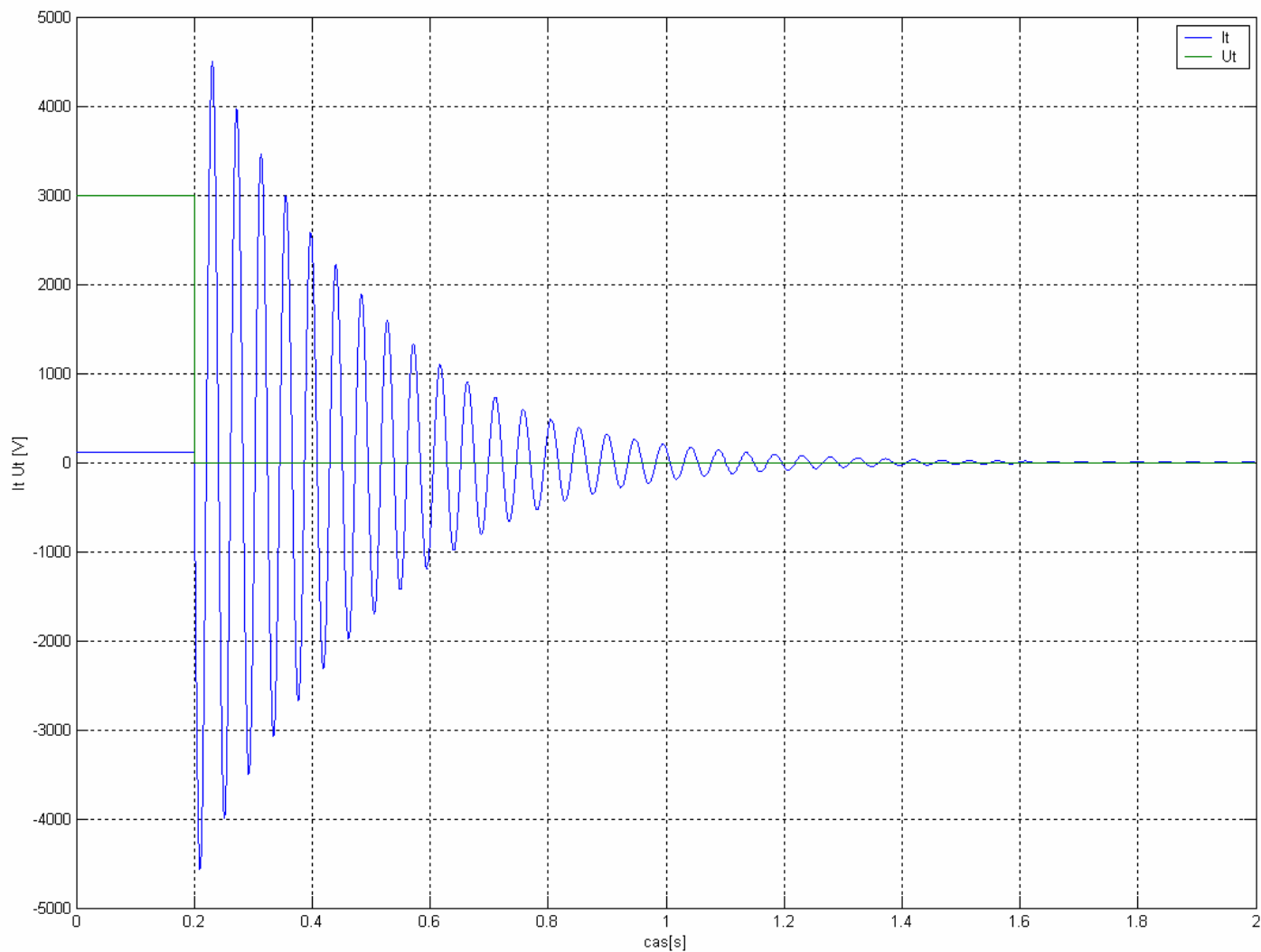
$$\text{r.14} \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \varepsilon \cdot \Psi_{rx} \cdot i_{sy} - \varepsilon \cdot \Psi_{ry} \cdot i_{sx} - \frac{1}{J} \cdot M_z$$

Výpočet mechanických otáček pro simulaci:

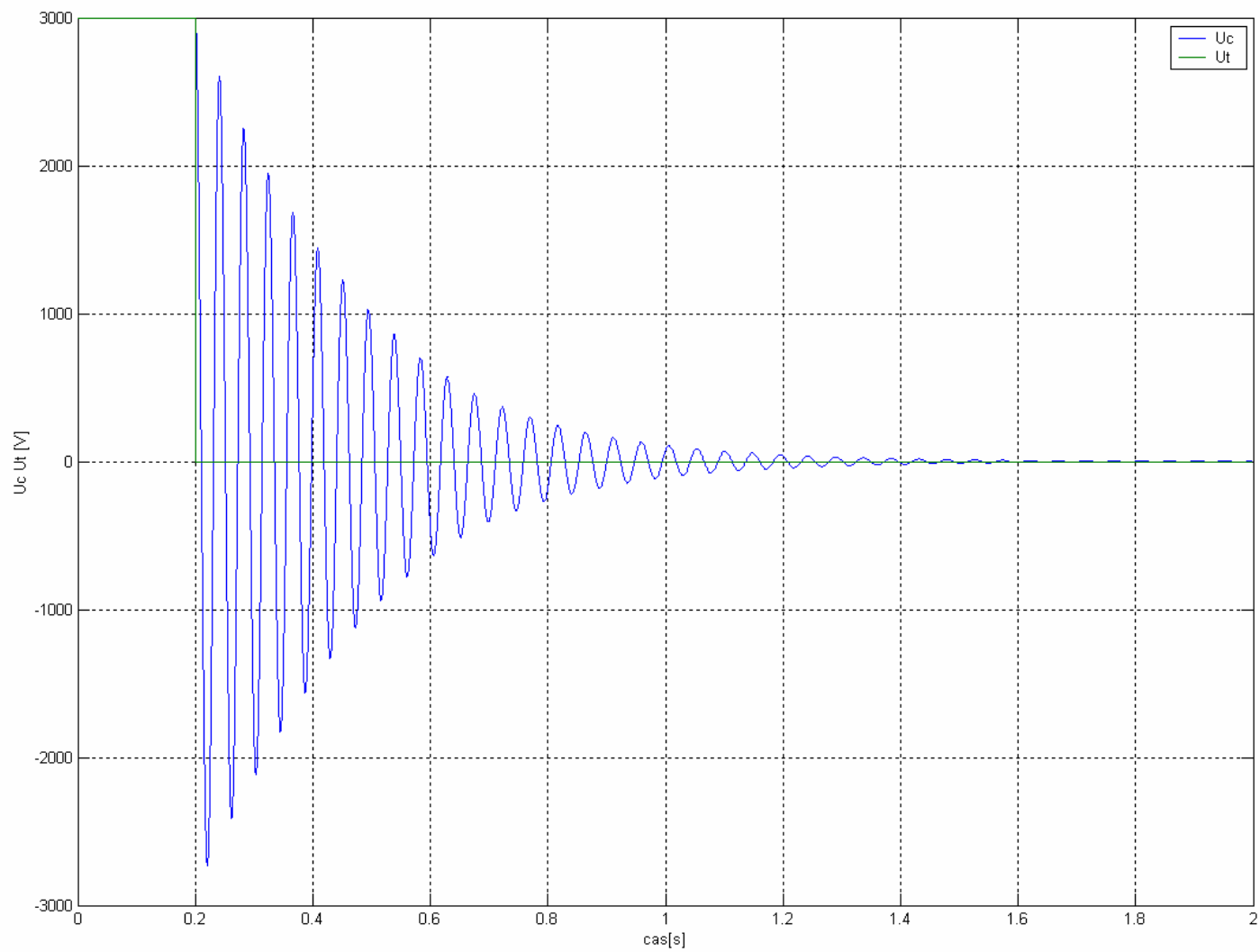
$$\begin{aligned} \text{r.15} \quad \omega &= \omega_s - 2 \cdot \pi \cdot f_r \\ \omega_s &= 2 \cdot \pi \cdot f_s \end{aligned}$$

7. Průběhy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV

7.1 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu tah

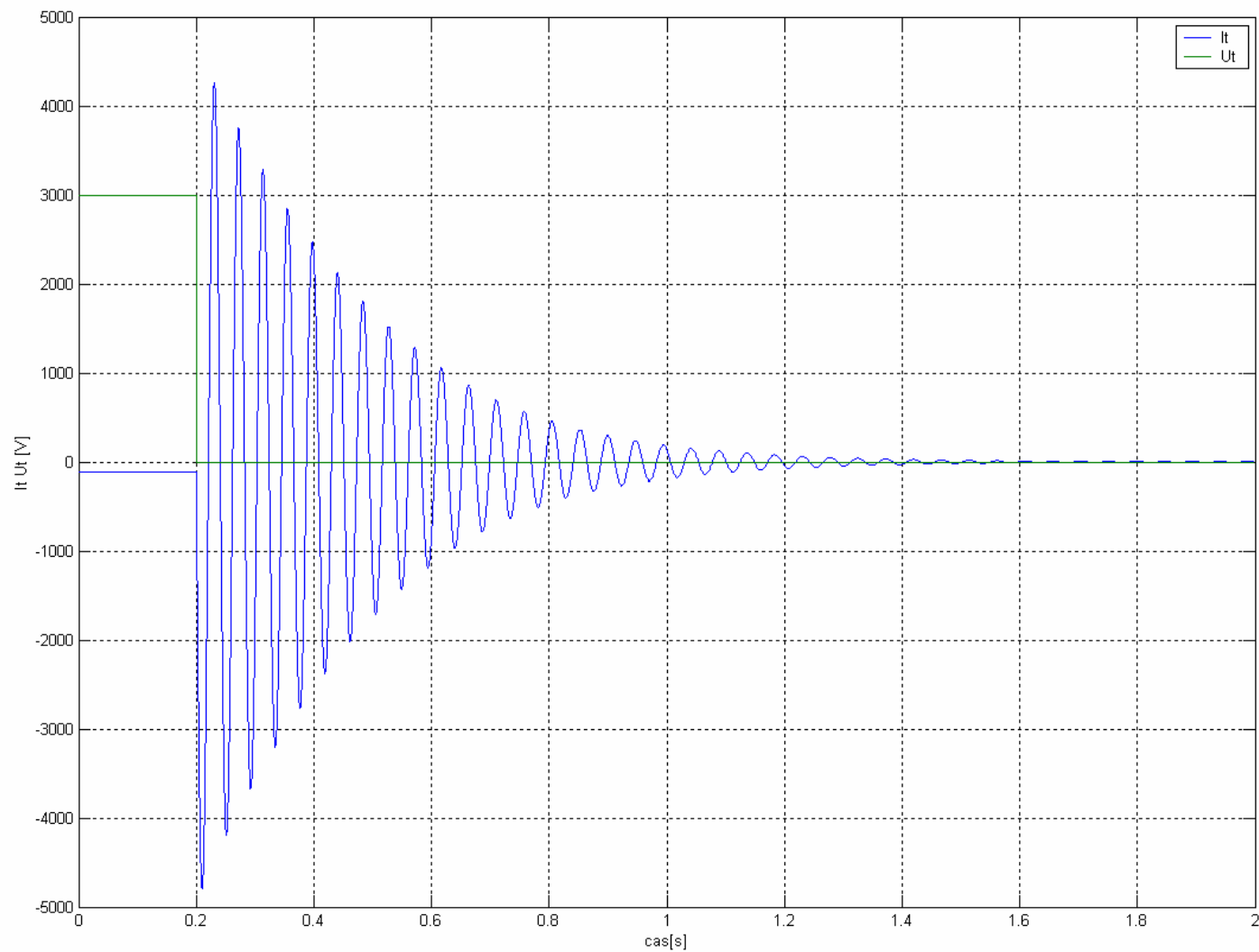


Graf.1 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu tah, napětí a proud v troleji

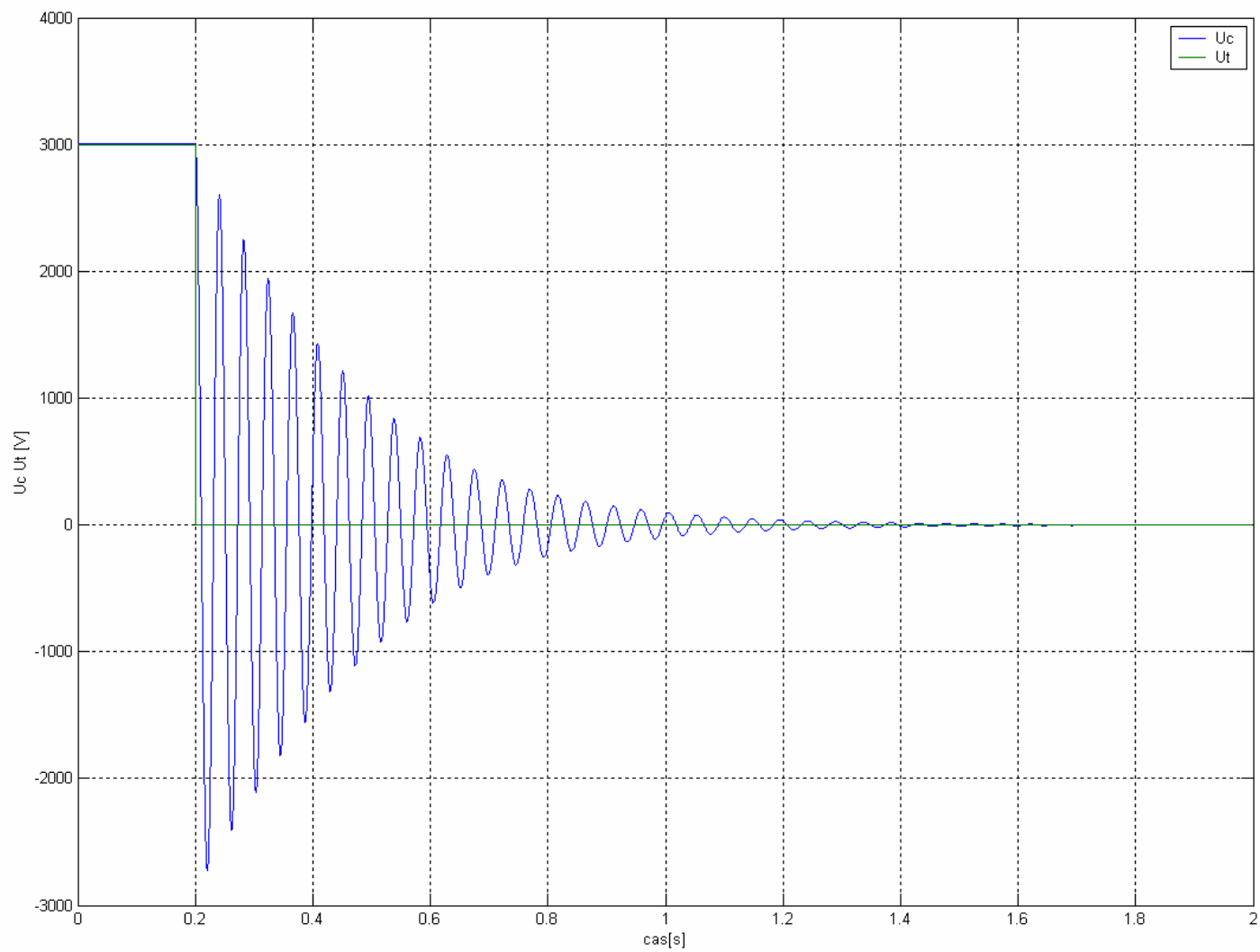


Graf.2 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu tah, napětí v troleji a na vstupním filtru

7.2 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu rekuperace



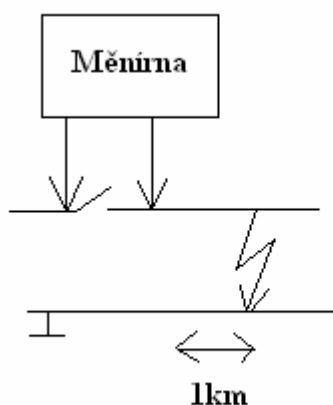
Graf.3 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu rekuperace, napětí a proud v troleji



Graf.4 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu rekuperace, napětí v troleji a na vstupním filtru

8. Výpočet maximální hodnoty proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení 3 kV

Tato kapitola informuje o riziku, co by se mohlo stát, když bude protizkratová ochrana špatně nastavena a nebo když nezareaguje žádná ochrana. Jedná se čistě o proudový poměr na troleji. Použijeme zjednodušené schéma měnírna a jednokolejná trať. Zkrat vznikne ve vzdálenosti 1km od měnírny a v tomto obvodu bude indukčnost vedení přibližně 1mH/km (indukčnost rozvodu v měnírně, indukčnost transformátoru).



Obr.14 Orientační schéma měnírna – trolej – kolej - zkrat

Elektrické hodnoty tohoto obvodu:

Ohmický odpor 1km vedení včetně zpětného vedení kolejemi činí pro průřez trakčního drátu 150 mm^2 a pro průřez nosného lana 120 mm^2 přibližně $0,09 \Omega$. Ohmický odpor rozvodu v měnírně a přívodech nese hodnotu přibližně $0,01 \Omega$. Celkově činí odpor $0,1\Omega$. Indukčnost zkratového obvodu je dána indukčností měnírny $1,8 \text{ mH}$ a indukčností 1km vedení 1mH . Z tohoto vyplývá, že celková indukčnost bude mít hodnotu $2,8 \text{ mH}$. Je třeba určit velikost stejnosměrného napětí napájecího obvodu ve zkratu. Závisí to jednak na výkonu primární sítě 110kV , jednak na reaktanci převodových regulačních transformátorů $110 \text{ kV} / 23 \text{ kV}$.

Vliv má rovněž i počet usměrňovacích jednotek, které jsou zapojeny. Budeme-li uvažovat zapojení tří usměrňovacích jednotek, pak indukčnost měnírny ponese hodnotu 1,8 mH. Budeme-li předpokládat, že napájecí síť 110 kV, jež napájí měnírnu, bude tvrdá, pak bude napětí činit 3 kV.

Obecný tvar rovnice pro obvod stejnosměrného proudu:

$$\text{r.16} \quad U = R \cdot I + L \cdot \frac{di}{dt}$$

Po integraci a za předpokladu, že zkrat vznikne za nezatíženého stavu, volíme hodnoty pro $t = 0$, $I = 0$. Po dosažení dostáváme rovnici pro změnu proudu:

$$\text{r.17} \quad J = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Výpočet maximálního možného zkratu při $L = 2,8$ mH:

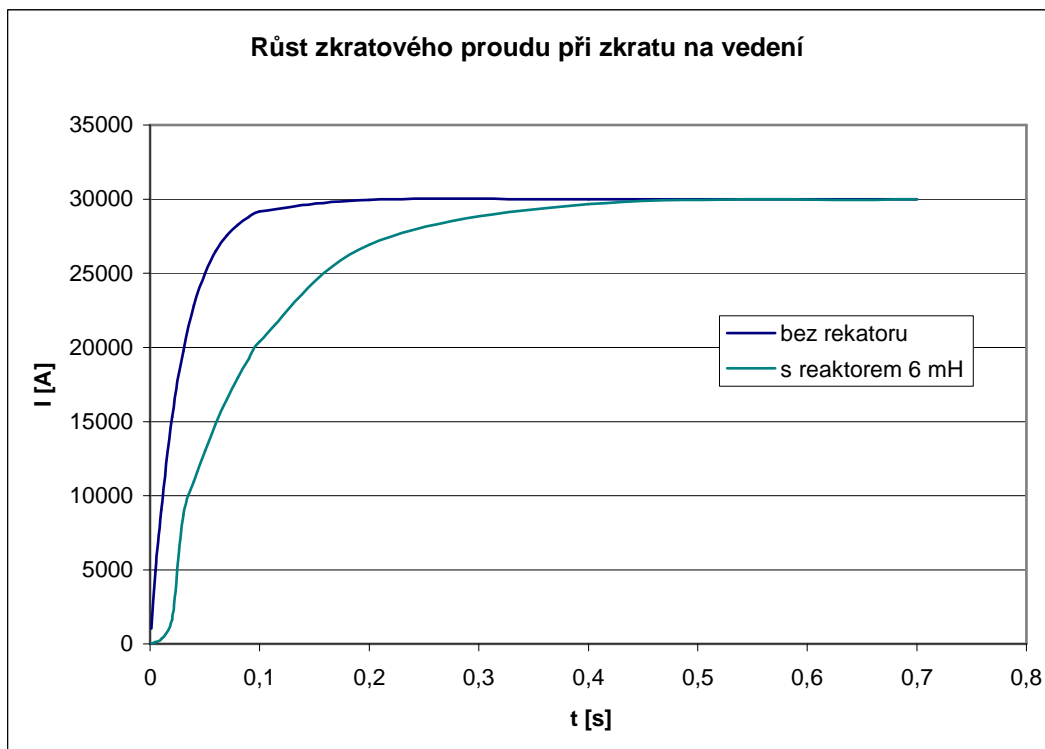
$$J = \frac{3000}{0,1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,1}{0,0028}t} \right)$$

Výpočet maximálního možného zkratu při přídavné indukčnosti $L = 8,8$ mH:

$$J = \frac{3000}{0,1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,1}{0,0088}t} \right)$$

Průběh každé náhlé změny v obvodu proudu tvoří indukčnost obvodu. Stoupání zkratového proudu je velmi strmé a za 100 ms přesahuje hodnotu 27 kA. Kdyby byl obvod jištěn běžným způsobem - pomocí relé, které působí na vypínač, muselo by být nastaveno na hodnotu 2,5 kA. Tato hodnota je brána jako maximální zatížení napáječe vzhledem k rozjezdovým proudům lokomotiv. Pokud při tomto proudu relé přitáhne a rozpojí vypínač, pak čas od dosažení nastavené hodnoty 2,5 kA až do počátku oddálení doteků vypnutí činí 50 ms.

Indukčnosti v obvodu prodlužují čas na úplné vypnutí zkratového proudu (dlouhé trolejové vedení) oproti zkratu s nepatrnou indukčností (zkrat těsně před měničnou). Doba na vypnutí zkratu by se neměla extra zkracovat, protože vzniká větší riziko přepětí. Při použití normálního vypínače by nastalo vypnutí zkratového proudu až po značně delší době, až trojnásobně větší a s maximálním proudem dvakrát větším. To by mohlo mít za následek, že by se proud už nemuselo podařit přerušit a zařízení by shořelo.



Graf.5 Nárůst I_t při zkratu na vedení s a bez přídavné indukčnosti

9. Zkrat na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě

9.1 Zkraty mimo vozidlo v jeho blízkosti na střídavých systémech 15 kV, 16,7 Hz a 25 kV, 50 Hz.

V režimu tah i rekuperační brzda se zkrat mimo vozidlo projeví z hlediska vozidla jako ztráta (hluboký pokles) napětí. Jedná se o poměrně častou provozní událost a zařízení blokuje činnost pulzních usměrňovačů již v okamžiku, kdy trolejové napětí poklesne pod nastavenou dolní hranici, tj. 12 kV respektive 17,5 kV. Vozidlo se na zkratovém proudu nepodílí, zkrat vypne napájecí stanice. Vozidlo pokračuje výběhem. Stejný průběh má i ztráta napětí při výběhu nebo odporovém brzdění.

Také při rekuperačním brzdění probíhají jevy, jak bylo již popsáno. Proud rekuperačního brzdění klesá asi za 1s činností řídicích obvodů. Brzdný účinek může být nahrazen odporovou brzdou.

Tyto zkraty tedy nemají jiný (nebezpečný) účinek na vozidlo a popsané jevy zajišťují řídicí obvody ve velmi krátkých časech.

9.2 Možnosti vypínání střídavého zkratu

U vypínačů střídavého proudu nastává každou půlperiodu dobrý stav pro vypnutí, kdy proud prochází nulou, a tím se oblouk mezi místy zkratu velmi silně ochladí. Čím delší doba ochlazení je, tím existuje výraznější možnost uhašení oblouku.

10. Možnosti ochrany proti zkratu na stejnosměrných systémech

10.1 Možnosti vypínání stejnosměrného zkratu

Při vypínání zkratu napájeného stejnosměrným napětím o velkých výkonech se používá speciálních vypínačů, na které jsou kladeny velké požadavky na zhášecí komory vypínačů. Oblouk se musí co nejvíce natáhnout a ochladit. Součástka musí být vyrobena z vysokotepečně odolného materiálu, aby mohl být zajištěn přímý styk s obloukem. Kvůli spolehlivosti (životnosti) vypínače, je potřeba, aby se proud přerušil dříve, než dosáhne maximální ustálené hodnoty dané napětím napájecí stanice a ohmickým odporem vedení. To znamená, že kdyby nezareagovala žádná ochrana, proud může dosáhnout podle vztahu r.17 až 30 kA. To už je však destruktivní proud pro vypínač se zhášecí komorou. Důležitá je rychlost funkce vypínače.

10.2 Protizkratová ochrana

K tomuto tématu je možno zahrnout všechny zkraty, které se vyskytují téměř ve všech částech trakčního zařízení. Jsou způsobeny průrazy v místech nedokonalé izolace zařízení nebo náhodnými příčinami, jako je přetížení drátu, průjezd poškozeného vozu (může jej způsobit utržená střecha nebo plachta). Při zkratu na trakčním vedení v těsné blízkosti měničny je zkratový proud zprvu omezen indukčností zkratového obvodu, později odpory vinutí transformátoru, kabelů, přípojníc a vnitřním odporem zdroje.

Rychlost vzrůstu zkratového proudu je velmi svižná (1500 kA / do 50 ms). Z toho vyplývá, že i jeho vypnutí musí být rovněž rychlé a musí nastat dříve, než dosáhne příliš vysoké hodnoty, jež by mohla mít za následek nefunkčnost vypínače.

Protizkratová ochrana musí působit při zkratu v kterémkoliv místě trakční sítě tak, aby byl chráněný úsek odpojen od všech zdrojů napájení. Vypnutí zkratového proudu není lehkou úlohou, protože maximální provozní proud na konci trakčního vedení může mít vyšší hodnotu než zkratový proud.

Nejběžnější protizkratovou ochranou je prostá pozornost při zvýšení proudu nad určitou mez. Proto se udává podmínka pro zkratový proud - na nejvzdálenějším místě trakční sítě musí mít větší hodnotu než maximální provozní proud.

$$\text{r.18} \quad I_{k \min} = I_{knast} + 300$$

$I_{k \min}$ – minimální zkratový proud nutný pro spolehlivou činnost nadproudové ochrany

I_{nast} – nastavení na článku nadproudové ochrany

300 – rezerva v nastavení ochrany respektující neúplný obloukový zkrat a nepřesnost v činnosti nadproudového relé

$$\text{r.19} \quad I_{nast} = I_p + 200$$

200 – rezerva pro možnost nižšího napětí v napájecí síti a kvůli nahodilému překročení maxima

I_p – maximální provozní proud napáječe

Občas však nelze splnit předchozí podmínky, pak trakční zařízení není chráněno v celém úseku a nadproudovou ochranu lze zaručit jen na určitém úseku trakčního vedení.

$$\text{r.20} \quad l_0 = \frac{0,8 \cdot U_0}{r_t \cdot I_{k \min}}$$

l_0 – délka chráněného úseku

U_0 – napětí naprázdno

R_t - měrný odpor trakčního vedení a kolejí

Požítí nadproudové ochrany na naší trakční síti

Trakční vedení s trolejovým vodičem Cu – 150 mm² a nosným lanem – 120 mm²:

$R_t = 0,09 \Omega/\text{km}$; $I_p = 2300 \text{ A}$;

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot U_0}{r_t \cdot I_{k \min}}$$

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot 3000}{0,09 \cdot (2300 + 500)} = 9,52[\text{km}]$$

Nastavení nadproudové ochrany bude:

$$I_{\text{nast}} = 2300 + 200 = 2500 [\text{A}]$$

Pro trakční vedení zesílené lanem Al-Fe 240 mm² je $r_t = 0,06 \Omega/\text{km}$

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot 3000}{0,06 \cdot (2300 + 500)} = 14,28[\text{km}]$$

Z těchto výsledků je zřejmé, že ochrana vůbec nebude postačující, protože vzdálenost mezi měnírnami je 20 km. Pro použití nadproudových ochrany lze zvětšit vzdálenost použití vzájemnou vazbou napájecích vypínačů napájecích trakční úsek z obou stran, dále příčným propojením trakčního vedení a u více kolejných tratí pomocí spínacích stanic. Využitím spínacích stanic se zvětší hodnota minimálních zkratových proudů a zatěžovací proudy se lépe rozdělí na větší počet napájení, sníží se jejich nastavení nadproudových ochrany. Správná funkce protizkratových ochrany je dána Tab.1. Na traťových úsecích, kde je malá rezerva v nastavení nadproudových ochrany, se provádí občas zkratové zkoušky, protože opotřeбенý trolejový vodič zvětšuje odpor trolejového vedení.

| | | Normální provoz | | | Jedna měřirna úplně vyřazena | | |
|--|--|----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | bez spínacích stanic | s jednou spínací stanicí | se dvěma spínacími stanicemi | bez spínacích stanic | s jednou spínací stanicí | se dvěma spínacími stanicemi |
| Trolej Cu-150mm, Nosné lano Cu - 120mm, Zesílené vedení AlFe - 240mm | Minimální zkratový proud | 2500 | 3750 | 5000 | 1250 | 3125 | 4380 |
| | Nejvyšší nastavené nadproudové ochrany | 2200 | 3450 | 4700 | 950 | 2825 | 4080 |
| | Maximální špičkový proud pro napájení | 2000 | 3250 | 4500 | 750 | 2625 | 3880 |
| Trolej Cu-150mm, Nosné lano Cu - 120mm | Minimální zkratový proud | 1666 | 2500 | 3333 | 833 | 2083 | 2920 |
| | Nejvyšší nastavené nadproudové ochrany | 1366 | 2200 | 3133 | 533 | 1783 | 2620 |
| | Maximální špičkový proud pro napájení | 1166 | 2000 | 2933 | 333 | 1583 | 2420 |

Tab.1 Minimální zkratové proudy, nejvyšší proudové nastavení protizkratových ochran a maximální špičkové proudy napáječů dvojkolejně tratě při vzdálenosti měření 17,6 km

11. Nadproudová ochrana

Tento typ ochrany je určen k ochraně trakčních motorů. Technicky je nadproudová ochrana zajišťována proudovým rozpínacím relé. Vypínací proud hlavního vypínače je vyšší, než maximální proud elektromotoru, a proto musí být tato ochrana provedena samostatně. Maximální proud trakčního motoru daleko převyšuje hodnotu trvalého proudu, čehož se využívá při rozjezdu lokomotivy, kdy je jen díky tomu možné vyvinout daleko vyšší výkon, než je udávaný trvalý výkon (samozřejmě ale musí nastat výborné adhezní podmínky). Např. na strojích 150 a 350 činí hodnota trvalého proudu elektromotoru 715 A, ale mezní hodnota, kdy již začne nadproudová ochrana, je nastavena na 1 250 A při sérii a 1 150 A při sérioparalelním zapojení.

11.1 Hlavní vypínač

Hlavní vypínač (HV) chrání lokomotivu jako celek. Je součástí vysokonapěťové výzbroje, musí být tedy umístěn v kobce. V trakčním obvodu je HV řazen za sběračem a odpojovačem. Účelem HV je co nejrychlejším rozepnutím ochránit lokomotivu před vysokými zkratovými proudy, tj. co nejrychleji přerušit napájení (to samozřejmě není možné provést stažením sběračů, neboť by došlo ke vzniku elektrického oblouku), dále také prostě "zapnutí" a "vypnutí" lokomotivy. V sepnuté poloze je hlavní vypínač udržován elektromagneticky tzv. přídržným obvodem, při přerušení proudu přídržného elektromagnetu se hlavní vypínač automaticky rozepne. Pokyn k jeho rozepnutí vydá buďto některá z ochrany (skluzová, nadproudová ochrana hlavního vypínače) nebo strojvedoucí ze stanoviště. Vzhledově hlavní vypínač připomíná část kontroléru, neboť vidět můžeme hlavně jeho zhášecí komoru. Hlavní vypínač je tvořen dvěma rovnoběžnými azbestovými deskami, mezi nimiž se nachází zhášecí komora. Při rozepnutí vypínače vznikne elektrický oblouk, který je bezpečně vyfouknut mezi tyto dvě desky do zhášecí komory. Tam je oblouk přitahován díky magnetickému tahu vznikajícímu díky přidavným cívkám, do nichž je při vypínání veden proud. Hlavní charakteristikou HV je vypínací proud, tj. proud, při kterém dojde k rozepnutí hlavního vypínače (vlastní nadproudová ochrana). Tato hodnota se opět liší podle typu HV a řady lokomotivy (např. 1 600 A - řada 140; 2 800 A - řada 150). Stav hlavního vypínače je indikován na stanovišti strojvedoucího otočným ukazatelem. Za zmínku stojí také poměrně nové nařízení, že zhášecí komory nesmí být vyrobeny z azbestu. Jsou tedy nahrazovány novými komorami, které mají oproti azbestovým bohužel daleko nižší životnost.

Účel hlavního vypínače na střídavých elektrických lokomotivách je stejný; od stejnosměrného vypínače se ale podstatně liší konstrukcí - jedná se o tlakovzdušný hlavní vypínač. Střídavý hlavní vypínač bývá obvykle umístěn na střeše lokomotivy, zatímco jeho pohon najdeme pod stropem strojovny. Vypínač je uložen na keramických izolátorech. Skládá se ze vzduchojemu, zhášecí komory, vypínače a kontaktní hlavice. V okamžiku, kdy je v hlavním vypínači nulový proud a napětí, zhasíná i elektrický oblouk.

Mezi kontakty však zůstává plazma (vysoce ionizovaný vzduch - v tomto případě elektrickým proudem), díky čemuž by byl oblouk znovu obnoven. Tomu je zabráněno vyfouknutím stlačeného vzduchu ze vzduchojemu (charakteristický zvuk střídavého hlavního vypínače). Stlačený vzduch vyfoukne oblouk i ionizovaný vzduch do zhášecí komory, kontaktní hlavice se otočí, spojí se zkratovačem a obvod je přerušen.

11.1.1 GSX II

Jedná se o první komerčně dostupný jednofázový vakuový vypínač, jenž je určen pro napájení železničních vozidel. Používá kombinace bezúdržbového vakuového zhášedla, magnetický pohon a elektronické ovládání. Rodina GSX obsahuje vhodný rozsah vakuového vypínače určený ke krytí jednofázové aplikace pro napájení železničních systémů:

| | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|----|
| - Jmenovitá frekvence: | 16,7 | Hz | nebo | 50/60 | Hz | |
| - Jmenovité napětí: | od | 17,5 | kV | až | 27,5 | kV |
| - Atmosférické impulzní napětí: | od | 125 | kV | až | 200 | kV |
| - Jmenovitý zkratový proud: | od | 25 | kA | až | 31,5 | kA |

11.2 Pojistky

11.2.1 SS pojistky:

Tavné vložky pro trakční aplikace jsou používány k ochraně trakčních rozvodů a trakčních proměnlivých zásob elektrického proudu proti účinku přetížení větším než $2 \times I$ a proti zkratu napětí 1,9 kV DC a 4kV DC (typu WBT).

11.2.2 St pojistky:

Pojistkové tavné vložky typu CMF jsou konstruovány pro aplikace v motorových obvodech. Zkouší se podle normy ČSN EN 60282-1 (IEC 60282-1) a normy ČSN EN 60644 (IEC 60644). IEC 644 platí pro pojistkové tavné vložky použité pro motory spuštěné s přímým připojením do střídavých proudových soustav. Vysokonapěťové pojistky použité v motorových obvodech musí mít schopnost snášet bez poškození opakované proudové nárazy související se spuštěním motoru. Ačkoliv se pojistka pro motorové obvody normálně provozuje při ustáleném proudu, který je mnohem nižší než proud jmenovitý, jsou CMF pojistky vzhledem k nízkým výkonovým ztrátám vhodné zvláště do kompaktních stykačových oddílů.

Dělají se pro jmenovité napětí 3.6 - 12 kV a jmenovitý proud 63 – 315 A.

12. Závěr

Tato práce shrnuje problematiku základního zapojení pro připojení asynchronního motoru na stejnosměrnou (600 V – 3 kV) a střídavou (15 kV / 16^{2/3} Hz a 25 kV / 50 Hz) napájecí soustavu. Na univerzálním zapojení jsou ukázány tři základní typy zkratů (poruch).

Program pro simulaci zkratu při připojení asynchronního motoru je napsán v programovacím jazyku C a grafy byly vygenerovány z programu MATLAB. Z této simulace jsme použili výstupy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV v režimech tah a rekuperační brzdění (kap.7). Z grafů je zřejmé, že maximální hodnota I_t dosažená po zkratu nabývá hodnoty 4,4 kA v režimu tah a -4,7 kA v režimu rekuperační brzdění. Tyto nadproudy by měl zvládnout vypnout rychlo vypínač a vypnutí tohoto nadproudu by mělo být okolo 20 ms. V obou případech tento zkrat dozní (utlumí se) za 1,4s od vzniku. Program pro simulaci zkratu je uveden v příloze.

Dále jsme vypočítali maximální možný proud při zkratu na stejnosměrné 3 kV napájecí troleji. Bez přídavné indukčnosti dosáhne proud maxima 30 kA za 150 ms a s přídavnou indukčností dosáhne proud maxima 30 kA za 450 ms. Toto maximum je opravdu destruktivní a je uváděno jen pro přehled, jaké hodnoty a za jakých podmínek může dosáhnout hodnot.

Kapitola č. 10 teoreticky nastiňuje, jaký vliv má zkrat na střídavém napájecím systému. Vozidlo se na zkratovém proudu nepodílí, zkrat vypne napájecí stanice. Toto téma není po domluvě s vedoucím práce dále rozváděno.

Možnosti ochrany při zkratu na stejnosměrném napájecím systému jsou vypočítány v kapitole č. 10, tím určena účinnost nadproudové ochrany při použití na Českých napájecích systémech. Nastavení nadproudové ochrany bude na $I_{nast} = 2500$ [A], která pro trakční vedení zesílené lanem Al-Fe 240 mm² je $r_t = 0,06$ Ω/km je na vzdálenost 14,28 km nepostačující. Pro použití nadproudových ochran lze zvětšit vzdálenost použitím vzájemnou vazbou napájecích vypínačů napájecích trakční úsek z obou stran, dále příčným propojením trakčního vedení a u více kolejných tratí pomocí spínacích stanic. Poslední část této práce rozvádí nadproudové ochrany - hlavní vypínač a pojistky.

Seznam použité literatury

- [1] Kůs, V.: *Elektrické pohony a výkonová elektronika*, vyd. ZČU, Plzeň 2006
- [2] Danzer, J.: *Elektrická trakce IV.*, vyd. ZČU, Plzeň 2001
- [3] Vondrášek, F.: *Měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3*, vyd. ZČU, Plzeň 2003
- [4] Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*, vyd. ZČU, Plzeň 2004
- [5] Gert, R.: *Provozní přepětí v elektrizačních soustavách*, SNTL, Praha 1964
- [6] Duchoň, M., Ibl, J., Křivánek, J.: *Dráhové měničny*, vyd. Dopravy a spojů, Praha 1962
- [7] Fejt, J.: *Pevná trakční zařízení*, vyd. Dopravy a spojů, Praha 1966
- [8] *Možnosti ochrany proti přepětí a zkratu na systémech stejnosměrného a střídavé systému* dostupné z www: <<http://www.abb.cz/ProductGuide/>>

Přílohy

Program v jazyce C

```
#include <stdlib.h>
#include <fstream.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>

int pom=0;
float PI=3.1415927;
double h=1e-6;
double t=0,tp=1.8,eps=0;
float JM=0,A=0,B=0,C=0,D=0;
float Ufm=0,Usx=0,Usy=0;

//float      Rs=0.015,Rr=0.0082,Lqs=0.0001786,Lqr=0.000139,Lh=0.00375,Lr=Lh+Lqr;
//120kW
float      Rs=0.0178,Rr=0.0112,Lqs=0.000556,Lqr=0.000424,Lh=0.014534,Lr=Lh+Lqr;
//hodnoty pro asynchronni motor 1100kW
float Tf=0.5; //filtr napeti
float Ct=0.01,Lt=0.004,Rt=0.02,dIt=0,dUc=0;           //nastaveni pro trolej
float fpila=1000,iz=0,Ps=0,It=0;
float fs=50;           //statorova frekvence
float fr=0.5; //tah
//float fr=-0.5; //brzda
float
Isx=0,dIsx=0,Isy=0,dIsy=0,Frax=0,dFrax=0,Fry=0,dFry=0,Is=0,Qs=0,Qr=0,Q=0,M=0,Fr=0;
//Q – mech rychlost , F- mag tok
int Udc=3000;//napajeni
int dupila=1,upilapom=0;
```

```

double upila=0,pilastupnu=0;
float Kfr=0;
float uc=Udc,Ucf=Udc,dUcf=0,U3=0,Urm=0;
float Ur[3],U0[3],Us[3],isf[3],tkoin[3],Isf[3]; //pro 3faze

void motor(double Usa,double Usb,double Usc){
    Lr=Lh+Lqr; //mat model pomoci stavovych rovnici
    JM=Lqs+Lqr*Lh/Lr;
    A=(Rs+Rr*Lh*Lh/(Lr*Lr))/JM;
    B=(Rr*Lh/(Lr*Lr))/JM;
    C=(Lh/Lr)/JM;
    D=1/JM;

    Usx=((2*Usa)-Usb-Usc)/3;
    Usy=(Usb-Usc)/sqrt(3);

    dIsx=-A*Isx+B*FrX+C*Q*Fry+D*Usx;
    dIsy=-A*Isy-C*Q*FrX+B*Fry+D*Usy;
    dFrX=Rr*Lh*Isx/Lr-Rr/Lr*FrX-Q*Fry;
    dFry=Rr*Lh*Isy/Lr+Q*FrX-Rr/Lr*Fry;
    dIt=1/Lt*(Udc-Rt*It-uc);
    dUc=1/Ct*(It-iz);
    dUcf=1/Tf*(uc-Ucf);

    Ucf=Ucf+dUcf*h;
    Isx=Isx+dIsx*h;
    Isy=Isy+dIsy*h;
    //Is=sqrt(Isx*Isx+Isy*Isy);
    FrX=FrX+dFrX*h;
    Fry=Fry+dFry*h;
    Fr=sqrt(FrX*FrX+Fry*Fry);
    if (Fr<0.01){Fr=0.01;}
    It=It+dIt*h;

```

```

uc=uc+dUc*h;

Isf[0]=Isx;
Isf[1]=-0.5*Isx+sqrt(3)/2*Isy;
Isf[2]=-0.5*Isx-sqrt(3)/2*Isy;
//M=2*3/2*Lh/Lr*(Frx*Isy-Fry*Isx);
Ps=3/2*(Usx*Isx+Usy*Isy);
iz=Ps/uc;    // linearita
}
int main (){

FILE *fw;

fw = fopen("zkratDCtah.txt", "w");
// fw = fopen("zkratDCbrzda.txt", "w");
while(t<=2+tp){
    if(t>2){Udc=0;}
    Qs=2*PI*fs;
    eps=eps+Qs*h;
    Q=Qs-2*PI*fr;

    pilastupnu=round(1/fpila/2/h);
    fpila=1/(pilastupnu*2*h);

    Ufm=2*230*sqrt(2)*fs/50; // U/f = konst.
    Urm=Ufm/Ucf*1.74; // 2/1.15=0.74...modulace s 3. har.

if(Urm>=(0.99*(pilastupnu/2))/(pilastupnu/2)){Urm=(0.99*(pilastupnu/2))/(pilastupnu/2);
}

    U3=0.15*sin(3*eps);

    upila=upila+dupila;    //jednoduchá symetrická pila
    if((upila>=pilastupnu/2)||upila<=-pilastupnu/2){

```

```

for(int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    Ur[ifaz]=round((pilastupnu/2)*Urm*(1.15*sin(eps-(ifaz)*2*PI/3)+U3));
}
dupila=dupila*(-1);
}

// linearita
for (int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    U0[ifaz]=Ur[ifaz]/(pilastupnu/2)*uc/2;
}

//-----konec koincidenci, vypocet Usa,b,c-----

for(int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    Us[ifaz]==((3*U0[ifaz])-U0[0]-U0[1]-U0[2])/3;}

motor(Us[0],Us[1],Us[2]);
pom++;
if ((pom>100)&&(t>1.8)){
    pom=0;
    fprintf(fw, " %f", (t-1.8));    //generovani hodnot pro grafy
    fprintf(fw, "; %f", It);
    //fprintf(fw, "; %f", uc);
    fprintf(fw, "; %d", Udc);
    fprintf(fw, "; %f\n", uc);

}

t=t+h;
} // end casoveho whilu
fclose(fw);
return(0);
}

```

Program pro MATLAB na vygenerování grafů

```
data = load('zkratDCtah.txt' , '-ascii');
```

```
%data = load('zkratDCbrzda.txt' , '-ascii');
```

```
figure(1)
```

```
plot (data(:,1),[data(:,2) data(:,3)]); grid on;
```

```
xlabel('cas[s]');ylabel('It Ut [V]'); legend('It','Ut'); %title ('Zkrat na stejnosmerne troleji v  
case t=0,2s v rezimu rekuperace, napeti a proud v troleji');
```

```
figure(2)
```

```
plot(data(:,1),[data(:,4) data(:,3)]); grid on;
```

```
xlabel('cas[s]');ylabel('Uc Ut [V]'); legend('Uc','Ut'); %title ('Zkrat na stejnosmerne troleji  
v case t=0,2s v rezimu rekuperace, napeti v troleji a napeti na vstupnim kondenzatoru');
```


ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zkratky na troleji

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav HORNÍK**
Osobní číslo: **E09N0265P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Zkratky na troleji**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Možná zapojení vozidel s asynchronními trakčními motory a výběr zapojení pro analýzu.
2. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě.
3. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě.
4. Zhodnocení rizik a možností ochran na vozidle.

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **dle doporučení vedoucího**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Danzer, CSc.**
ŠKODA Transportation,s.r.o., Plzeň

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Danzer, CSc.**
ŠKODA Transportation,s.r.o., Plzeň

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

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


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Danzerovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možnými druhy zapojení s asynchronním motorem pro připojení do stejnosměrné a střídavé napájecí soustavy. Jsou zde rozvedeny možné typy zkratů a možnosti protizkratové a nadproudové ochrany, dále pak simulace zkratu na stejnosměrném napájecím systému.

Klíčová slova

Zkrat, stejnosměrné napětí, střídavé napětí, trolej, hlavní vypínač, pojistka, simulace zkratu.

Abstract

This diploma work discusses the possible types of involvement with an asynchronous motor for connection to the DC and AC power supply. There are also detail the possible types of faults and the possibility of short circuit and overcurrent protection. There is a simulation of short circuit on the DC power system.

Key words

Short-circuit, DC voltage, AC voltage, trolley, main switch, fuse, short-circuit simulation.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod..... | 2 |
| 2. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze stejnosměrné napájecí soustavy | 3 |
| 2.1 Zapojení s proudovým střídačem | 3 |
| 2.2 Zapojení s napěťovými střídači | 4 |
| 2.2.1 Základní zapojení s napěťovým střídačem..... | 4 |
| 2.2.2 Tříbodové zapojení..... | 5 |
| 2.2.3 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr | 6 |
| 2.2.4 Zapojení s dvojitou hvězdou | 7 |
| 3. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze střídavé napájecí soustavy | 8 |
| 3.1 Proudové napájení střídačů | 8 |
| 3.2 Napěťové napájení střídače | 9 |
| 3.2.1 Zapojení s pulzním usměrňovačem..... | 10 |
| 4. Místa možného výskytu zkratu | 11 |
| 5. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě 3kV | 12 |
| 5.1 Základní údaje pro simulaci zkratu na stejnosměrné troleji..... | 12 |
| 5.1.1 Zvolený obvod pro simulaci..... | 12 |
| 5.1.2 Hodnoty a parametry pro simulaci v režimu tahu i rekuperace | 13 |
| 6. Teoretický rozbor simulovaného zapojení..... | 15 |
| 6.1 Vstupní filtr | 15 |
| 6.2 Napěťový střídač | 16 |
| 6.3 Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru..... | 19 |
| 6.3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru | 19 |
| 6.3.2 Vztahy pro řízení motoru (stavové rovnice) | 19 |
| 7. Průběhy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV | 21 |
| 7.1 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu tah | 21 |
| 7.2 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu rekuperace..... | 23 |
| 8. Výpočet maximální hodnoty proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení 3 kV..... | 25 |
| 9. Zkrat na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě | 28 |
| 9.1 Zkraty mimo vozidlo v jeho blízkosti na střídavých systémech 15 kV, 16,7 Hz a 25 kV, 50 Hz. | 28 |
| 9.2 Možnosti vypínání střídavého zkratu | 28 |
| 10. Možnosti ochrany proti zkratu na stejnosměrných systémech..... | 29 |
| 10.1 Možnosti vypínání stejnosměrného zkratu..... | 29 |
| 10.2 Protizkratová ochrana..... | 29 |
| 11. Nadproudová ochrana | 33 |
| 11.1 Hlavní vypínač | 33 |
| 11.1.1 GSX II | 34 |
| 11.2 Pojistky..... | 35 |
| 11.2.1 SS pojistky: | 35 |
| 11.2.2 St pojistky:..... | 35 |
| 12. Závěr..... | 36 |
| Seznam použité literatury..... | 37 |
| Přílohy | 38 |

1. Úvod

Tato práce přibližuje problematiku určitých typů zkratu (posuzováno bude jen zemní spojení trolej-kolej), které se mohou vyskytovat na trakčním vedení stejnosměrné troleje 600 V – 3 kV. Dále bude rozebrána problematika na střídavé troleji 25 kV/50 Hz a 15 kV/16²/₃ Hz. V našem případě půjde o trolej napájenou 3 kV stejnosměrně a napájecí soustavou 25 kV/50 Hz střídavě.

V první části jsou přiblíženy základní zapojení s asynchronními motory pro připojení na stejnosměrnou napájecí soustavu. Půjde o zapojení s proudovým a napět'ovým střídačem. Dále práce ukazuje zapojení pro střídavou napájecí soustavu, kdy je střídač napájen z proudového nebo napět'ového meziobvodu.

Dalším bodem práce je rozebrání místa možného zkratu, např. zkrat na troleji, v napět'ovém meziobvodu a mezifázový zkrat. Jeden typ zkratu si vybereme a podrobíme ho analýze. Z této teoretické analýzy pak vytvoříme simulaci zkratu na troleji při připojení motoru, který bude v režimu tah a rekuperace (brzda). Vše budeme simulovat pro stejnosměrnou napájecí soustavu 3 kV a pro střídavou napájecí soustavu 25 kV/50 Hz.

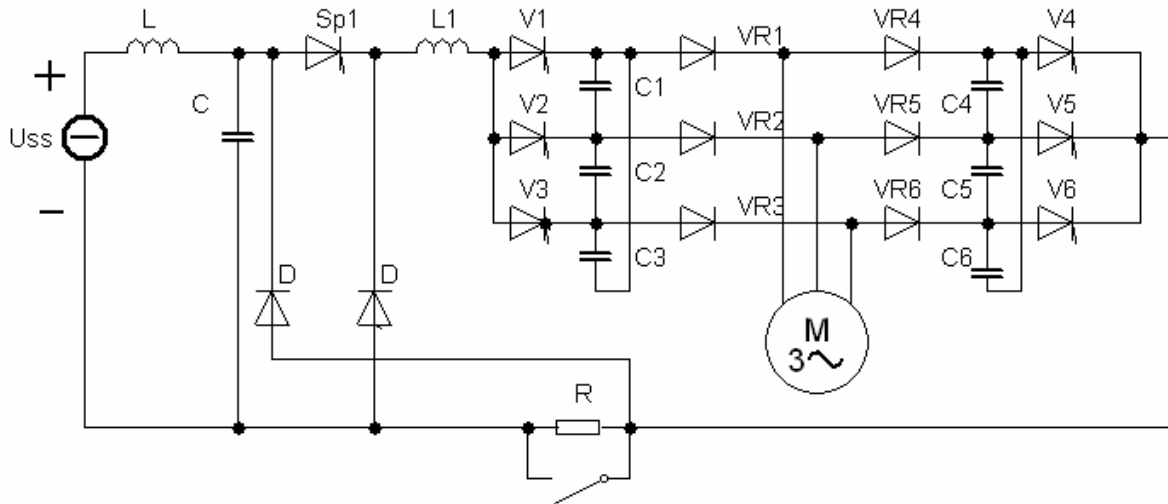
Dotkneme se teoreticky možnosti výpočtu zkratu na trolejovém vedení 3 kV, kdy půjde o maximální hodnotu proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení.

Dále se budeme zabývat výpočtem a nastavením protizkratové ochrany na trakční napájecí soustavě 3 kV.

Poslední část je věnována možnostem ochrany proti nadproudu a zkratu na stejnosměrné napájecí soustavě.

2. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze stejnosměrné napájecí soustavy

2.1 Zapojení s proudovým střídačem

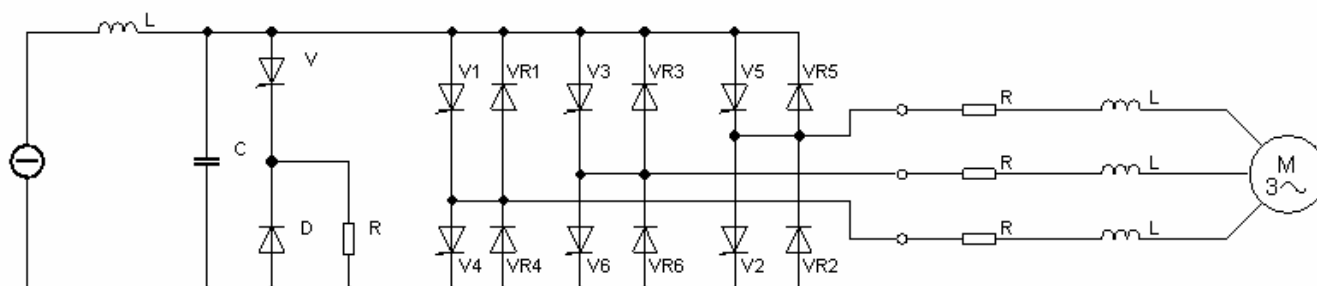


Obr.1 Zapojení s proudovým střídačem

Především se nabízí možnost využít toto v zapojení s mezifázovou komutací pouze středně rychlých tyristorů, bez zhášecích obvodů. Jednoduché řízení s oddělenými regulátory proudu (v proudovém zdroji, pulzními měniči nebo řízenými usměrňovači) a kmitočtu (ve střídači). Široké možnosti využití zapojení. Dnes se pro nová vozidla nepoužívá.

2.2 Zapojení s napět'ovými střídači

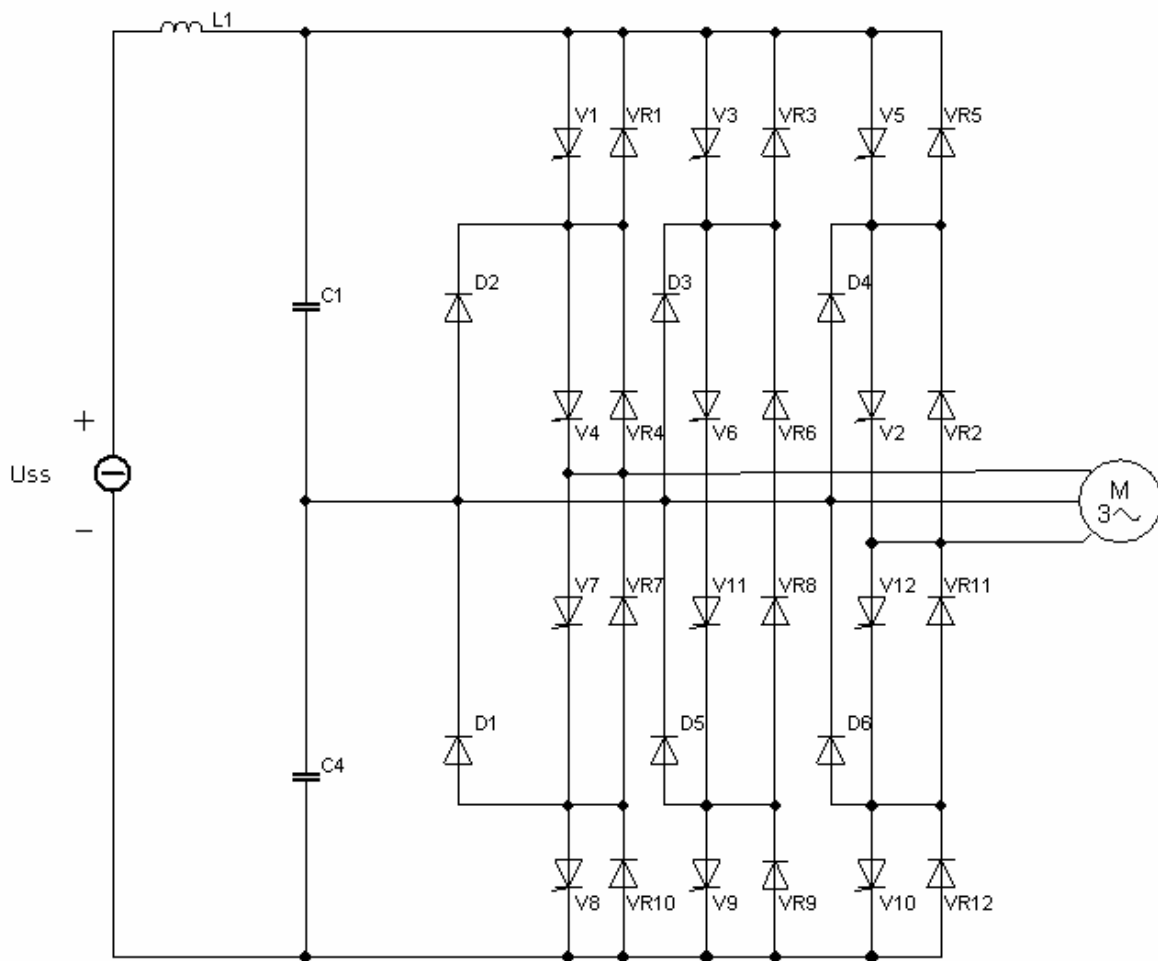
2.2.1 Základní zapojení s napět'ovým střídačem



Obr.2 Zapojení s napět'ovým střídačem

Toto zapojení představuje v současné době standard. Vzhledem k výkonům se realizuje buď s GTO tyristory nebo dnes již převážně s IGBT tranzistory. Při brzdění jde vždy o rekuperaci a záleží pouze na okolnostech, zda a kdy se v motorech vyrobená energie vrátí do sítě a kdy je mařena v brzdovém odporu. Pro řízení brzdy je (na rozdíl od proudového střídače) nutno použít (brzdový) pulzní měnič pro řízení efektivní velikosti brzdového odporu.

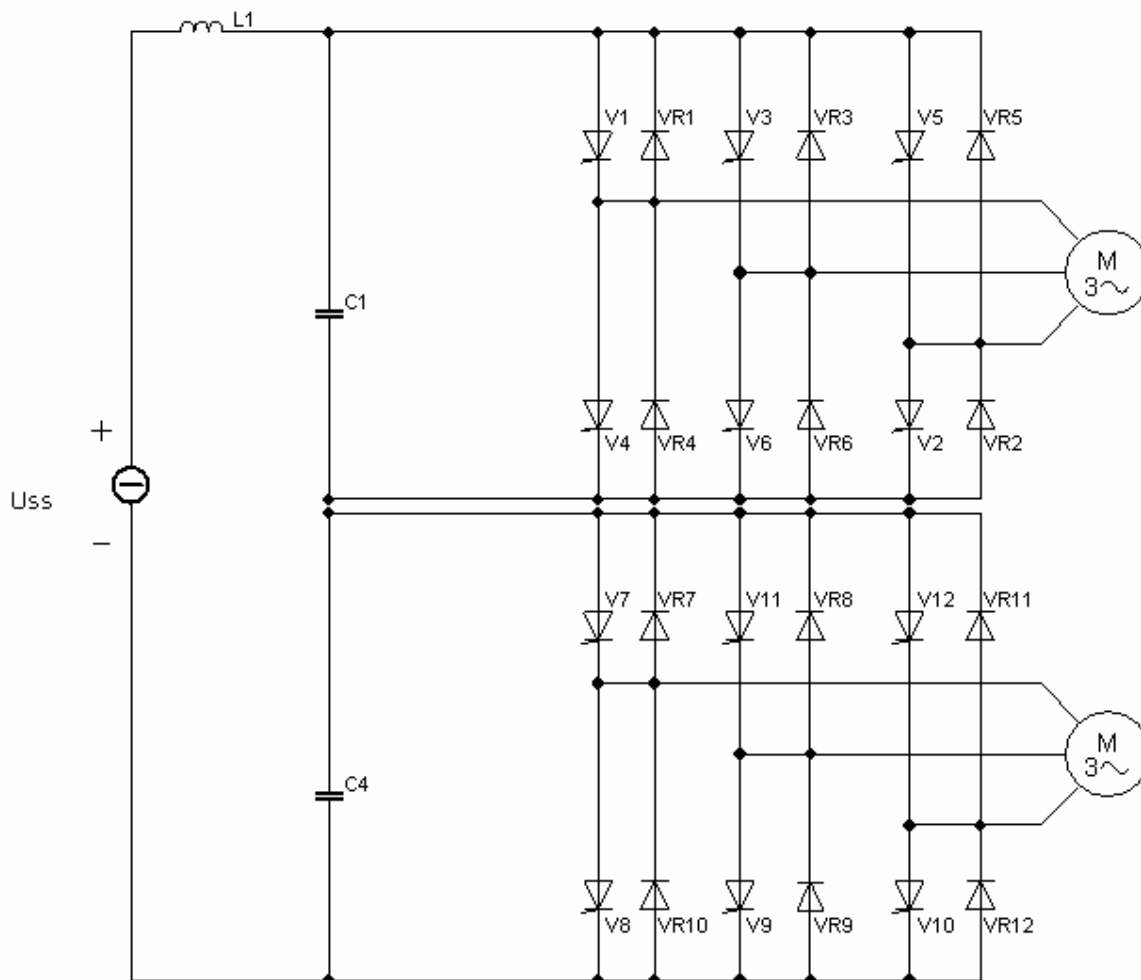
2.2.2 Třibodové zapojení



Obr.3 Třibodové zapojení

Tento způsob zapojení umožňuje řešit bez problémů sériové zapojení polovodičových součástek střídače a samotné zapojení lze přímo připojit na napájecí síť 3 kVss. Výstupní napětí může kromě hodnoty $+U_d$ a $-U_d$ nabývat také hodnoty 0, čímž se zlepší aproximace napětí a zmenší se za jinak stejných okolností odchylky proudu motoru od sinusovky.

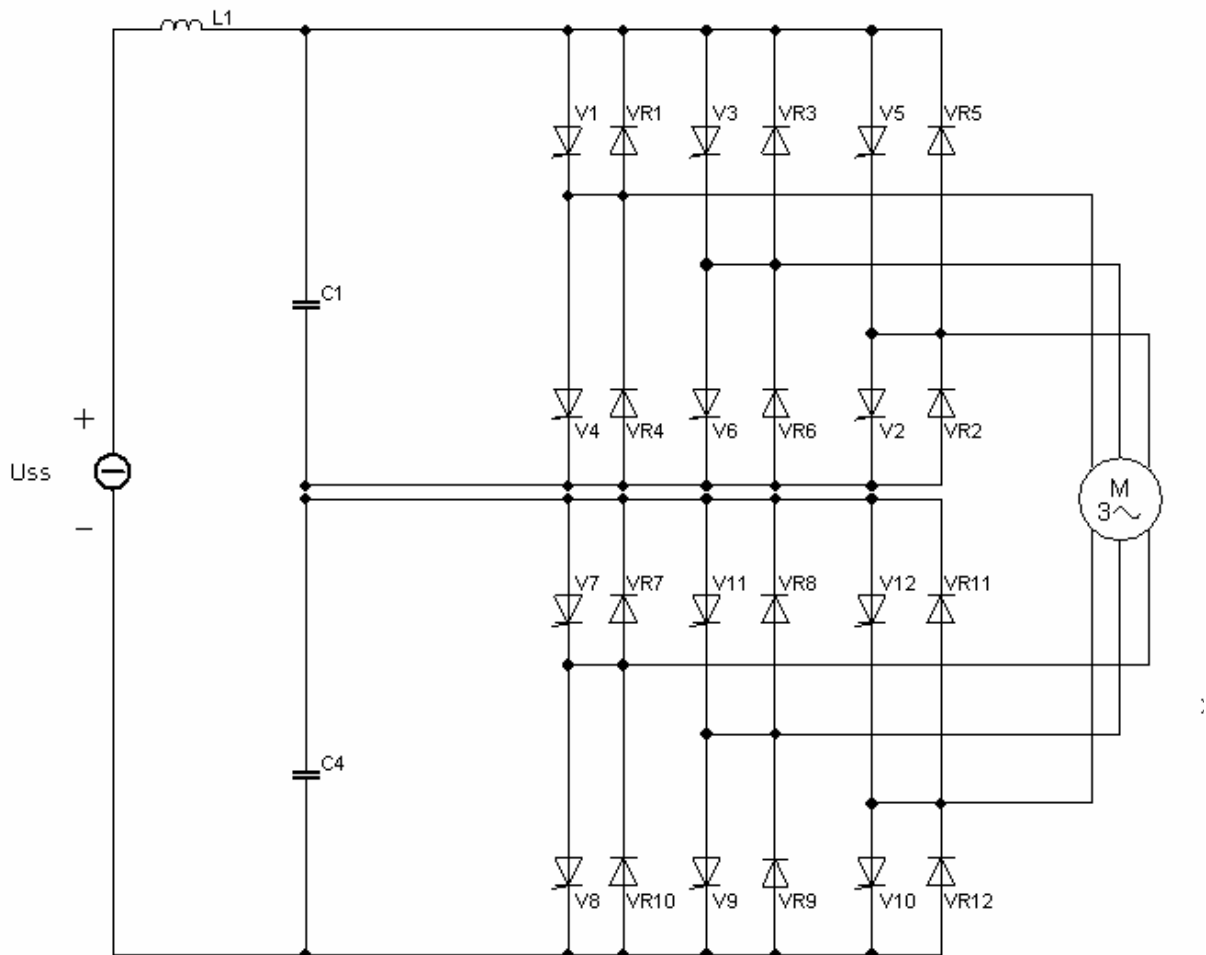
2.2.3 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr



Obr.4 Sériové zapojení dvou meziobvodů na dělený filtr

Objevuje se jen u vozidel na 3 kV_{ss}. Je důležité zajistit stabilní rozdělení napětí na měniče a motory. Při sériovém spojení napěťových střídačů je nezbytné regulací zajistit, aby vstupní napětí se na oba kondenzátory dělilo alespoň přibližně rovnoměrně. Malý rozdíl ve výkonu motorů (tzn. v odběru proudu z jednoho z kondenzátorů) vede k rychlému růstu napětí na jednom z měničů na úkor druhého. Přes to se toto zapojení používá.

2.2.4 Zapojení s dvojitou hvězdou

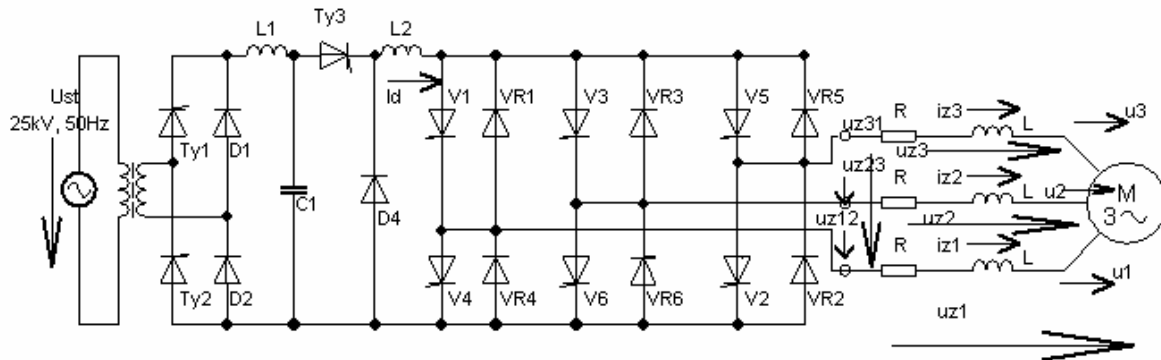


Obr.5 Zapojení s dvojitou hvězdou

Problém rozdělení napětí na vstupním filtru se automaticky řeší prostřednictvím magnetické vazby mezi „horním“ a „dolním“ systémem vinutí. Tato vinutí jsou (na rozdíl od proudové varianty) provedena co nejshodněji ve všech parametrech (osy vinutí, reaktance), protože jsou vázána společným hlavním magnetickým tokem tvořícím v podstatě transformátor, který umožňuje „přelévání“ výkonu mezi oběma systémy vinutí tak, aby napětí na nich byla stejná. To se přitom děje samočinně, přesně, rychle a naprosto spolehlivě.

3. Zapojení s asynchronními trakčními motory pro napájení ze střídavé napájecí soustavy

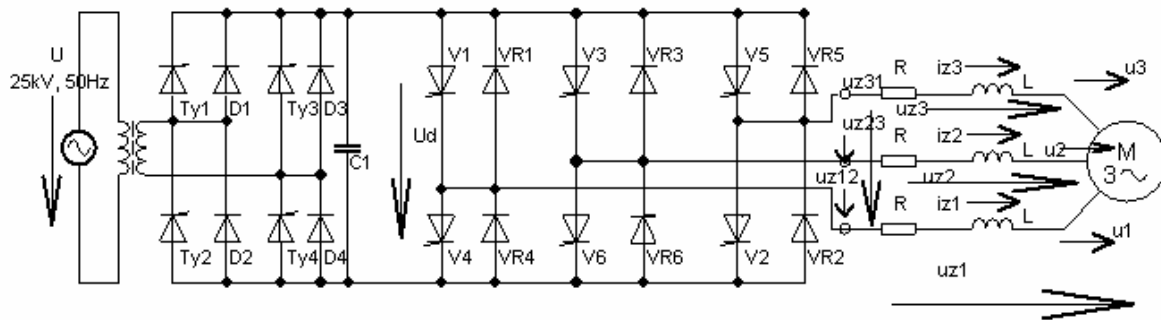
3.1 Proudové napájení střídačů



Obr.6 Proudově napájený střídač

Pro vytvoření proudového meziobvodu lze i při napájení ze střídavé sítě použít zapojení pro plynulou regulaci napětí (ve skutečnosti proudu). Prakticky to znamená použití řízených usměrňovačů s vyhlazovací tlumivkou. Ve speciálních případech (například u dvousystémových vozidel) lze uvažovat i o diodovém usměrňovači s následným LC filtrem a pulzním měničem. Zatím se nikde nepoužívá.

3.2 Napět'ové napájení střídače

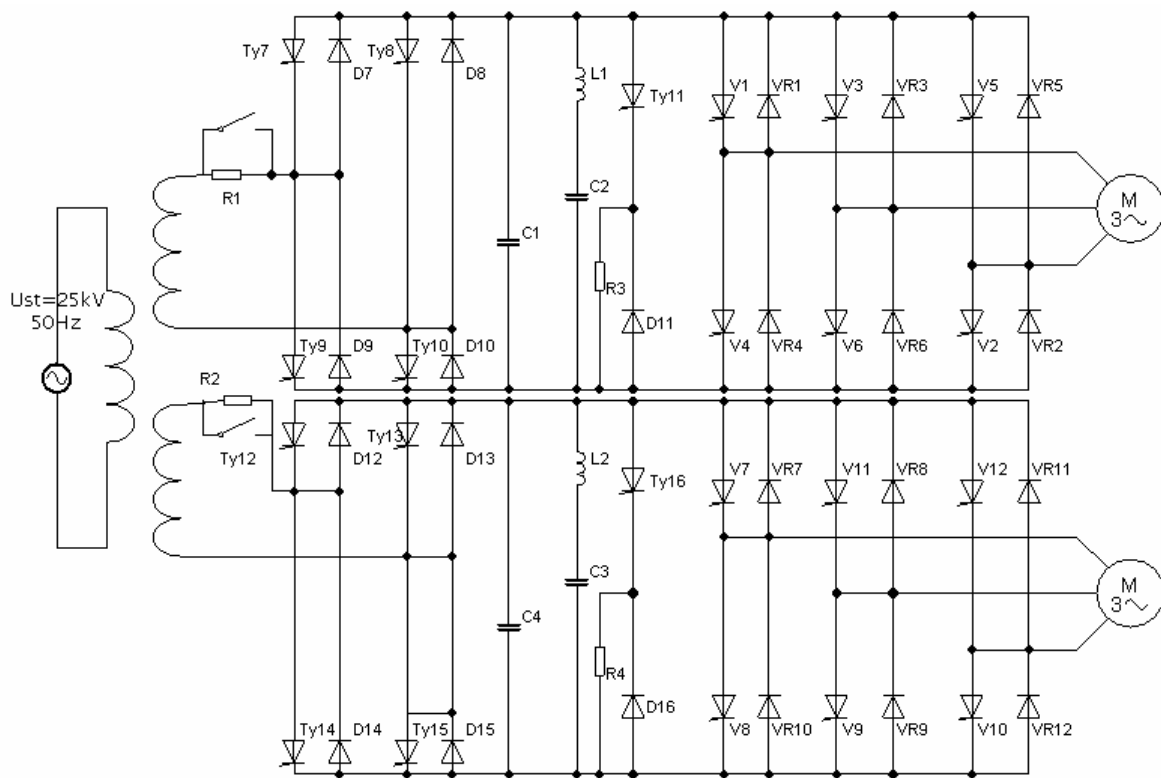


Obr.7 Napět'ově napájený střídač

Pro vytvoření napět'ového meziobvodu je nejjednodušším řešením diodový usměrňovač s LC filtrem. Pro stabilizaci napětí meziobvodu lze použít řízený usměrňovač nebo diodový a řízený můstek v sérii. Cenou za stabilizaci je zhoršení energetických vlastností vzhledem k síti - po většinu doby bude řízený usměrňovač regulován a bude pracovat se zhoršeným účinníkem v porovnání s diodovým usměrňovačem.

3.2.1 Zapojení s pulzním usměrňovačem

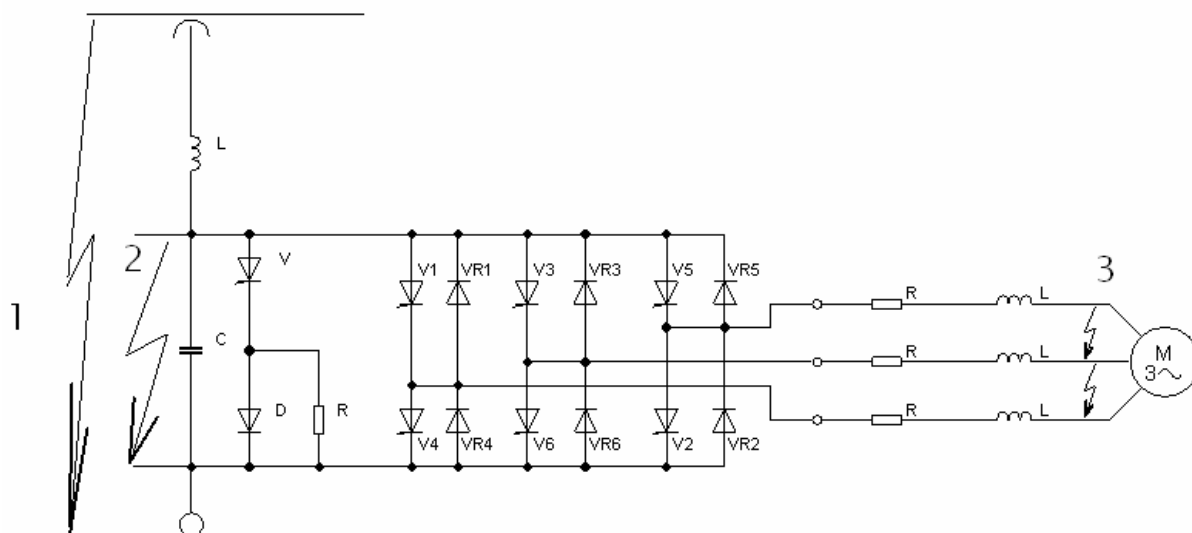
Použití více paralelně zapojených sekundárních vinutí umožňuje přesazené řízení, které podobně jako u pulzních měničů významně zmenšuje velikost „zvlnění“, v daném případě obsah vyšších harmonických v primárním proudu a v troleji. Nabízí se možnost efektivního řešení rekuperačního brzdění, které u střídavých vozidel prakticky vytlačilo brzdění odporové.



Obr.8 Zapojení s pulzním usměrňovačem

4. Místa možného výskytu zkratu

Bereme v úvahu univerzální zapojení, nikoliv plně funkční zapojení.



Obr.9 Zapojení pro možná místa zkratu

- 1) Při zkratu mimo vozidlo se kondenzátor vybíjí přes tlumivku do oblasti vzniku zkratu, je možné použít oddělovací diodu od místa zkratu.
- 2) Nastane-li zkrat v meziobvodu, pak je napájen z motoru při elektrickém brzdění, které nelze vypnout, ale je potřeba co nejdříve je odbudit pomocí řídicích impulsů. Zkrat může být také napájen z trakčního vedení, které by mělo být vypnutelné hlavním vypínačem. Především je ale zkrat napájen z kondenzátoru v meziobvodu.
- 3) Dále zmiňme zkrat v mezifázi výstupního napětí střídače (zkratování sdruženého napětí střídače).

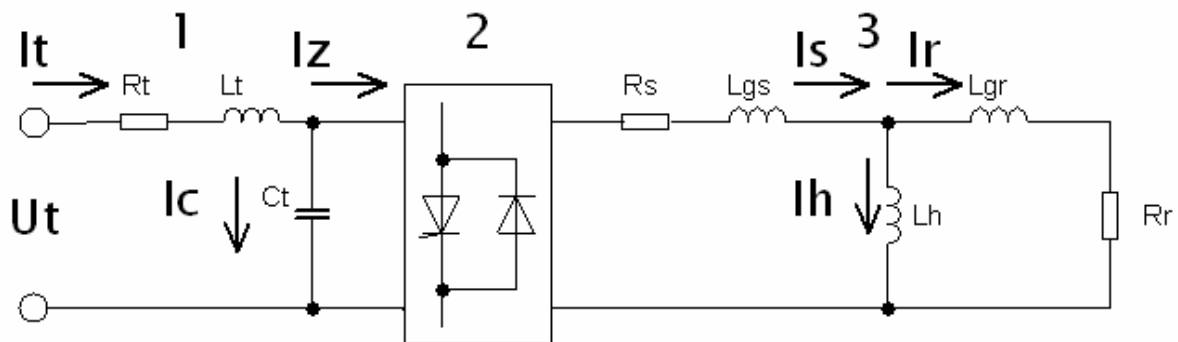
5. Výpočet průběhu proudu na sběrači při zkratu na troleji pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě 3kV

Analýza zkratu je důležitá z hlediska nastavení ochran: nastavení rychlosti vypnutí vypínače (rychlovypínače) na vozidle a v napájecí měničce, za jakou dobu dosáhne proud maxima a za jak dlouho je schopen vypínač zasáhnout a vypnout zkratový proud.

5.1 Základní údaje pro simulaci zkratu na stejnosměrné troleji

5.1.1 Zvolený obvod pro simulaci

Vyděme ze standardního uspořádání pohonu s asynchronním motorem na vozidle se stejnosměrnou trakcí. Stejnosměrná trolej připojená přes filtr k meziobvodu a napět'ovému střídači, který řídí pomocí pulsně šířkové modulace asynchronní motor.



Obr.10 Simulované zapojení pro zkrat na stejnosměrné troleji

5.1.2 Hodnoty a parametry pro simulaci v režimu tahu i rekuperace

- ideální spínací součástky
- obvod s konstantní indukčností a odporem v troleji v závislosti na jízdě vozidla
- R_s statorový odpor
- R_r rotorový odpor
- $L_{\sigma s}$ rozptylová indukčnost statorového vinutí
- $L_{\sigma r}$ rozptylová indukčnost rotorového vinutí
- L_h vzájemná indukčnost statoru a rotoru
- rezistor R_t představuje odpor troleje
- indukčnost L_t představuje součet indukčností troleje
- C_t je trakční kapacita
- U_t trakční napájení

Parametry náhradního schématu

Asynchronní motor: 1ML 4949 K/6 (1100W)

$$R_s = 0,0178 \Omega$$

$$R_r = 0,0112 \Omega$$

$$L_{\sigma s} = 0,556 \text{ mH}$$

$$L_{\sigma r} = 0,424 \text{ mH}$$

$$L_h = 14,534 \text{ mH}$$

Hodnoty trakčního vedení

$$R_t = 0,02 \Omega$$

$$L_t = 0,004 \text{ H}$$

$$C_t = 0,01 \text{ F}$$

$$U_t = 3 \text{ kV}$$

Hodnoty pro simulaci zkratu

$$f_{\text{pila}} = 1000 \text{ Hz}$$

$$f_s = 50 \text{ Hz}$$

$$T_f = 0,5$$

$$f_r = 0,5 \text{ Hz} \quad (\text{pro tah})$$

$$f_r = -0,5 \text{ Hz} \quad (\text{pro rekuperaci})$$

Zkrat nastane v čase

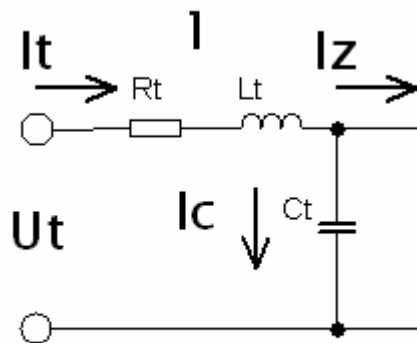
$$t = 0,2 \text{ s}$$

6. Teoretický rozbor simulovaného zapojení

Simulovaný obvod rozdělíme do tří základních částí podle funkčnosti:

1. Vstupní filtr
2. Napěťový střídač
3. Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru

6.1 Vstupní filtr

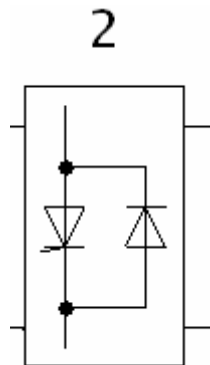


Obr. 11 Vstupní filtr

Matematický popis vstupního filtru

$$\begin{aligned} I_t &= I_c + I_z \Rightarrow I_c = I_t - I_z \\ U_t &= R \cdot I \cdot \frac{dI_t}{dt} + U_c \\ r.1 \quad U_c &= \frac{1}{C} \int_0^t I_c \cdot dt \Rightarrow \frac{dU_c}{dt} = I_c / C \\ \frac{dI_t}{dt} &= \frac{1}{L} (U_t - R \cdot I_t - U_c) \end{aligned}$$

6.2 Napěťový střídač



Obr.12 Napěťový střídač

Použijme třífázový můstkový napěťový střídač. Jako zdroj napětí je uvažován zdroj konstantního napětí U_t . Odebíraný výkon je $P = U_t \cdot I_z$. Se smyslem přenosu středního výkonu se mění smysl I_z .

$$\begin{array}{ll} P > 0 & I_z > 0 \text{ střídačový chod} \\ P < 0 & I_z < 0 \text{ usměrňovačový chod} \end{array}$$

Stejnoseměrná strana střídače musí umožňovat průchod proudu v obou směrech. Při kladném proudu I_z umožňují průchod vypínatelné součástky, při záporném I_z zajišťují vedení proudu zpětné diody, které jsou antiparalelně zapojeny k vypínatelným součástkám. Umožňují tak usměrňovačový chod i odběr jalového výkonu zátěží. V tomto případě je zdrojem napětí měnič, kde jsou pouze neřízené usměrňovače, které neumožňují rekuperaci do střídavé sítě. Brzdou energii vozidla může odebírat pouze jiné vozidlo nebo může být mařena v odporcích. Pro simulaci použijeme pulsně šířkovou modulaci, jež je založena na principu koincidence nosného signálu (vysokofrekvenčního) s nízkofrekvenčním modulačním signálem.

V závislosti na stavu sepnutí vypínatelných součástek (IGBT) lze určit napětí na zátěži. Ze stavu sepnutí lze odvodit i napětí na výstupu střídače vzhledem k pomyslnému střednímu vývodu „0“ stejnosměrného zdroje. Jde o tzv. fázová napětí střídače (U_{10} , U_{20} , U_{30}),

ale nejsou shodná s fázovými napětími (u_{z1}, u_{z2}, u_{z3}) zátěže. Pokud je střídavý vývod střídače připojen k napětí U_c (napětí na C_t) přes V1 nebo VR1, bude $U_{10} = \frac{U_c}{2}$. Pokud bude připojen přes V4 nebo VR4, pak počítáme $U_{10} = -\frac{U_c}{2}$. Záleží na tom, s jakým pólem vstupního filtru (kladnému nebo zápornému) připojíme spínací součástku. Z tohoto postupu vyplývá r.2.

$$\begin{aligned} \text{r.2} \quad \text{V3 nebo VR3} \dots U_{20} &= \frac{U_c}{2} \\ \text{V6 nebo VR6} \dots U_{20} &= -\frac{U_c}{2} \\ \text{V5 nebo VR5} \dots U_{30} &= \frac{U_c}{2} \\ \text{V2 nebo VR5} \dots U_{30} &= -\frac{U_c}{2} \end{aligned}$$

Sdružená napětí střídače pro hvězdu (Y) budou r.3.

$$\begin{aligned} \text{r.3} \quad u_{z12} &= U_{10} - U_{20} \\ u_{z23} &= U_{20} - U_{30} \\ u_{z31} &= U_{30} - U_{10} \end{aligned}$$

Sdružená napětí pro trojúhelník (D), jsou rovna fázovému napětí zátěže r.4.

$$\text{r.4} \quad u_{z12} = u_{z1}$$

Při zátěži do hvězdy bude platit r.5 pro vztah mezi sdruženým a fázovým napětím zátěže

$$\begin{aligned} \text{r.5} \quad u_{z12} &= u_{z1} - u_{z2} \\ u_{z23} &= u_{z2} - u_{z3} \\ u_{z31} &= u_{z3} - u_{z1}, \end{aligned}$$

přičemž je zachován poměr r.6 mezi fázovými napětími zátěže

$$\text{r.6} \quad u_{Z1} + u_{Z2} + u_{Z3} = 0$$

Pak dále platí r.7 pro symetrické zátěže indukovaného fázového napětí střídavého stroje:

$$\text{r.7} \quad u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

$$\text{r.8} \quad i_{Z1} + i_{Z2} + i_{Z3} = 0$$

Pomocí r.5 a r.6 lze napsat r.9, které jsou pro fázová napětí střídače na zátěži:

$$\text{r.9} \quad u_{Z1} = \frac{1}{3} (u_{Z12} - u_{Z31})$$

$$u_{Z2} = \frac{1}{3} (u_{Z23} - u_{Z12})$$

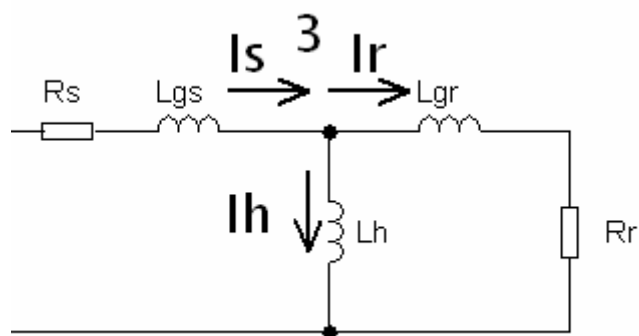
$$u_{Z3} = \frac{1}{3} (u_{Z31} - u_{Z23})$$

Při požadavku maximálního výstupního napětí střídače je amplituda modulačního signálu zvětšena až na velikost amplitudy nosného signálu. Amplituda první harmonické fázového napětí střídače může dosáhnout maximální hodnoty $U_c/2$ a amplituda 1. harmonické sdruženého napětí:

$$\text{r.10} \quad U_{z12m(1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_c = 0,866 \cdot U_c$$

6.3 Náhradní schéma (matematický model) asynchronního motoru

6.3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru



Obr. 13 Náhradní schéma asynchronního motoru

6.3.2 Vztahy pro řízení motoru (stavové rovnice)

r.11

$$\alpha = \frac{R_s + R_r \cdot \frac{L_h^2}{L_r}}{\lambda}$$

$$\beta = \frac{R_r \cdot \frac{L_h}{L_r}}{\lambda}$$

$$\gamma = \frac{\frac{L_h}{L_r}}{\lambda} \cdot p_p$$

$$\delta = \frac{1}{\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{k_p \cdot p_p}{J} \cdot \frac{L_h}{L_r}$$

$$\lambda = L_{s\sigma} + L_{r\sigma} + L_{r\sigma} \cdot \frac{L_h}{L_r}$$

Výpočet vstupního statorového proudu v „x“ a „y“ souřadnicích:

$$\begin{aligned} \text{r.12} \quad \frac{di_{sx}}{dt} &= -\alpha \cdot i_{sx} + \beta \cdot \Psi_{rx} + \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sx} \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -\alpha \cdot i_{sy} - \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} + \beta \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sy} \end{aligned}$$

Výpočet rotorového magnetického toku pro „x“ a „y“ souřadnice:

$$\begin{aligned} \text{r.13} \quad \frac{d\Psi_{rx}}{dt} &= R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sx} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{rx} - p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} &= R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sy} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{ry} + p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} \end{aligned}$$

Výpočet mechanických otáček:

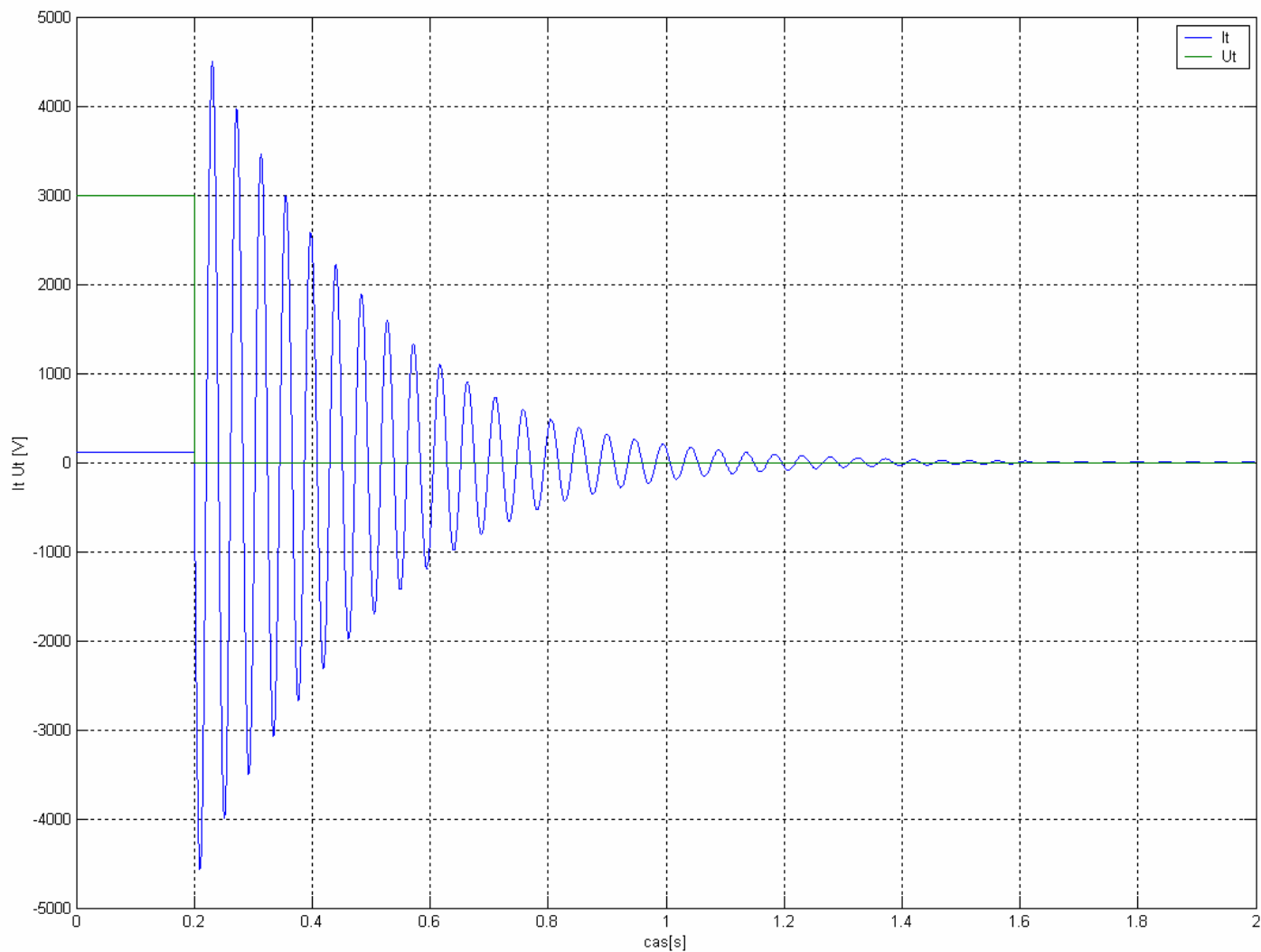
$$\text{r.14} \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \varepsilon \cdot \Psi_{rx} \cdot i_{sy} - \varepsilon \cdot \Psi_{ry} \cdot i_{sx} - \frac{1}{J} \cdot M_z$$

Výpočet mechanických otáček pro simulaci:

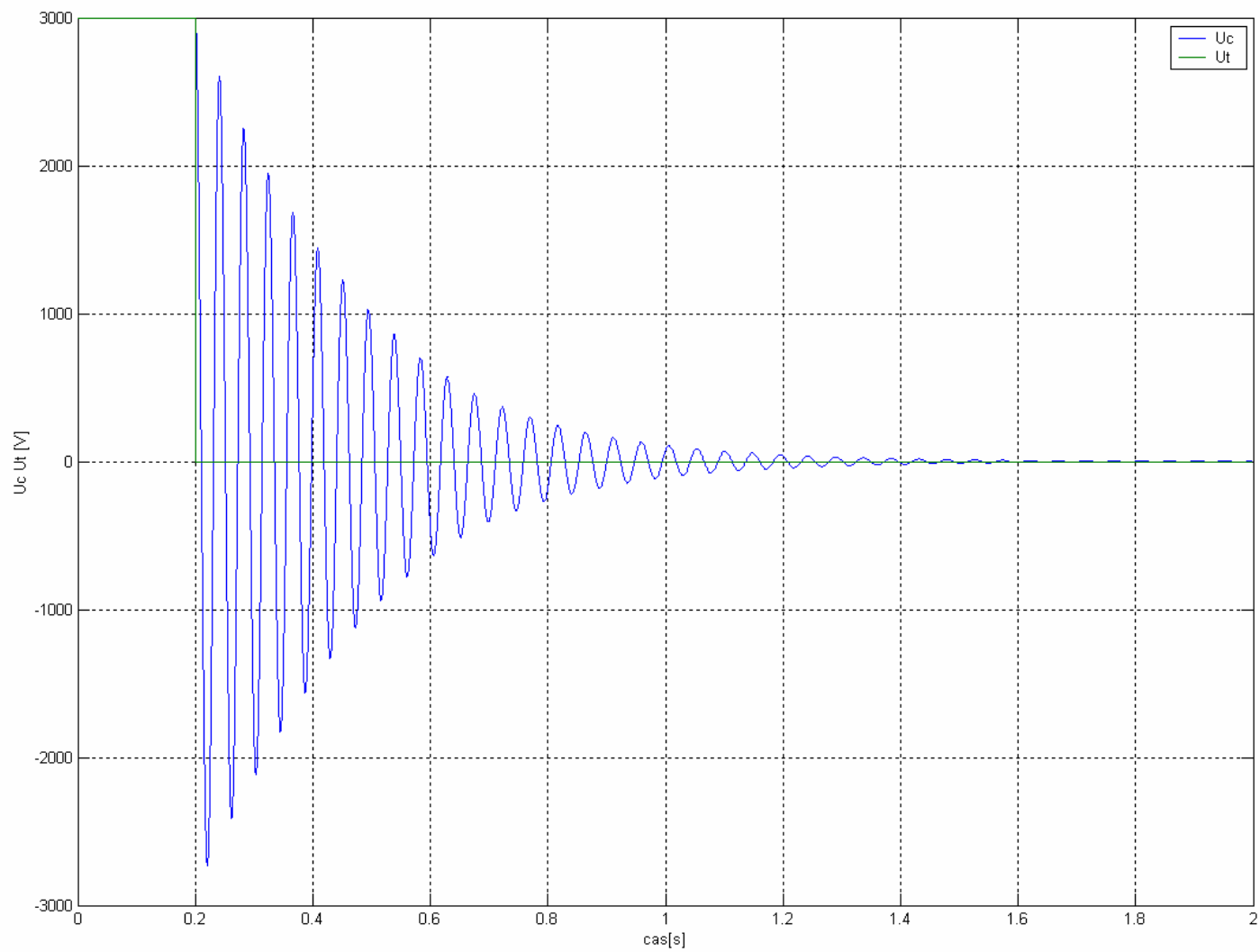
$$\begin{aligned} \text{r.15} \quad \omega &= \omega_s - 2 \cdot \pi \cdot f_r \\ \omega_s &= 2 \cdot \pi \cdot f_s \end{aligned}$$

7. Průběhy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV

7.1 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu tah

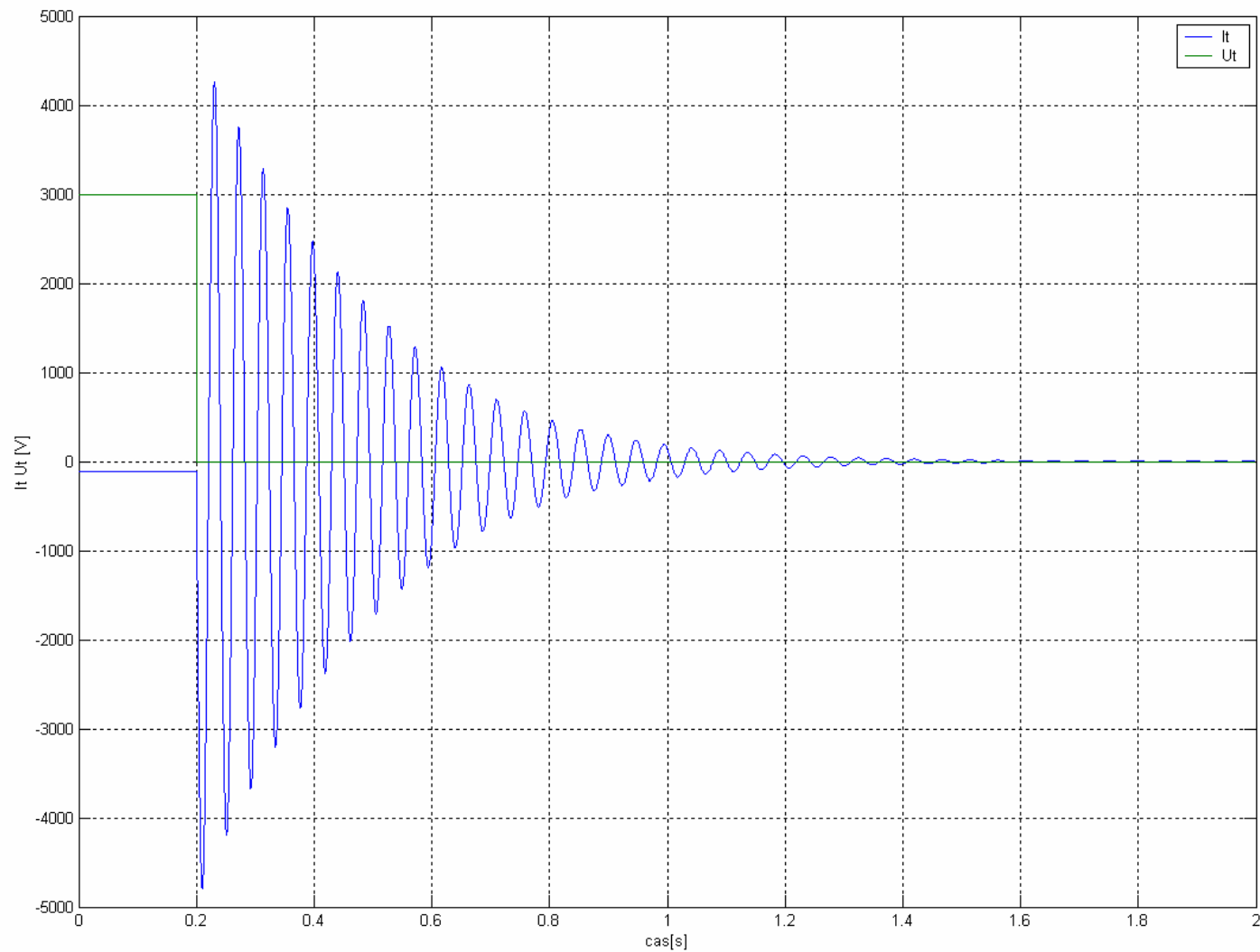


Graf.1 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2s$ v režimu tah, napětí a proud v troleji

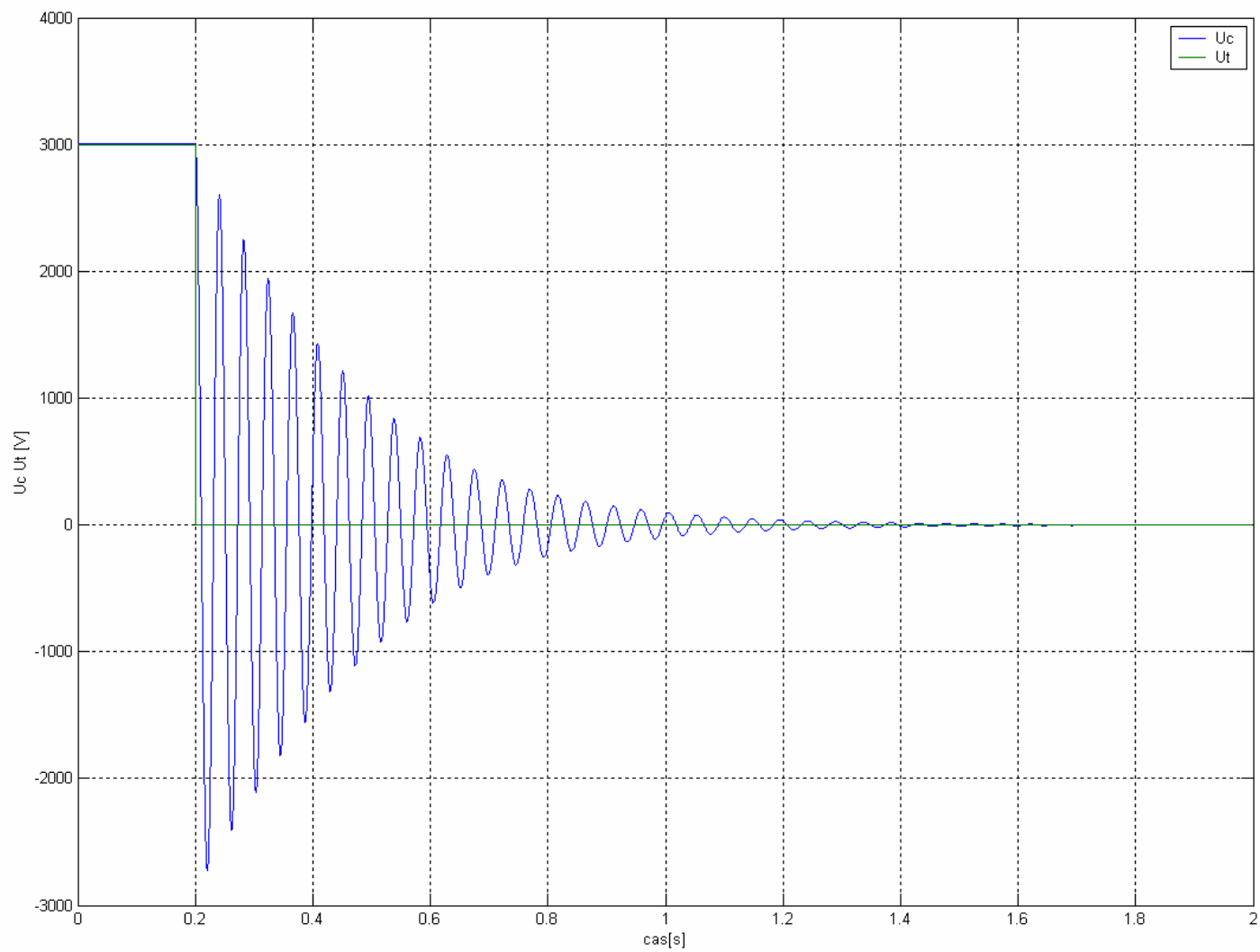


Graf.2 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu tah, napětí v troleji a na vstupním filtru

7.2 Závislost průběhu proudu na sběrači při zkratu pro vozidlo napájené ze stejnosměrné sítě v režimu rekuperace



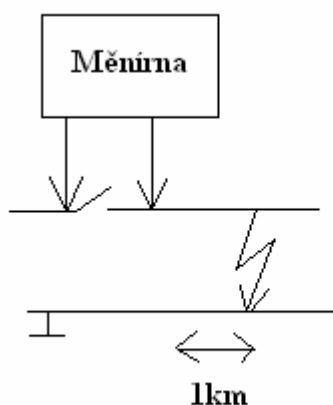
Graf.3 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu rekuperace, napětí a proud v troleji



Graf.4 Zkrat na stejnosměrné troleji v čase $t=0,2$ s v režimu rekuperace, napětí v troleji a na vstupním filtru

8. Výpočet maximální hodnoty proudu při zkratu na stejnosměrném trakčním vedení 3 kV

Tato kapitola informuje o riziku, co by se mohlo stát, když bude protizkratová ochrana špatně nastavena a nebo když nezareaguje žádná ochrana. Jedná se čistě o proudový poměr na troleji. Použijeme zjednodušené schéma měnírna a jednokolejná trať. Zkrat vznikne ve vzdálenosti 1km od měnírny a v tomto obvodu bude indukčnost vedení přibližně 1mH/km (indukčnost rozvodu v měnírně, indukčnost transformátoru).



Obr.14 Orientační schéma měnírna – trolej – kolej - zkrat

Elektrické hodnoty tohoto obvodu:

Ohmický odpor 1km vedení včetně zpětného vedení kolejemi činí pro průřez trakčního drátu 150 mm^2 a pro průřez nosného lana 120 mm^2 přibližně $0,09 \Omega$. Ohmický odpor rozvodu v měnírně a přívodech nese hodnotu přibližně $0,01 \Omega$. Celkově činí odpor $0,1\Omega$. Indukčnost zkratového obvodu je dána indukčností měnírny $1,8 \text{ mH}$ a indukčností 1km vedení 1mH . Z tohoto vyplývá, že celková indukčnost bude mít hodnotu $2,8 \text{ mH}$. Je třeba určit velikost stejnosměrného napětí napájecího obvodu ve zkratu. Závisí to jednak na výkonu primární sítě 110kV , jednak na reaktanci převodových regulačních transformátorů $110 \text{ kV} / 23 \text{ kV}$.

Vliv má rovněž i počet usměrňovacích jednotek, které jsou zapojeny. Budeme-li uvažovat zapojení tří usměrňovacích jednotek, pak indukčnost měnírny ponese hodnotu 1,8 mH. Budeme-li předpokládat, že napájecí síť 110 kV, jež napájí měnírnu, bude tvrdá, pak bude napětí činit 3 kV.

Obecný tvar rovnice pro obvod stejnosměrného proudu:

$$\text{r.16} \quad U = R \cdot I + L \cdot \frac{di}{dt}$$

Po integraci a za předpokladu, že zkrat vznikne za nezatíženého stavu, volíme hodnoty pro $t = 0$, $I = 0$. Po dosažení dostáváme rovnici pro změnu proudu:

$$\text{r.17} \quad J = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Výpočet maximálního možného zkratu při $L = 2,8$ mH:

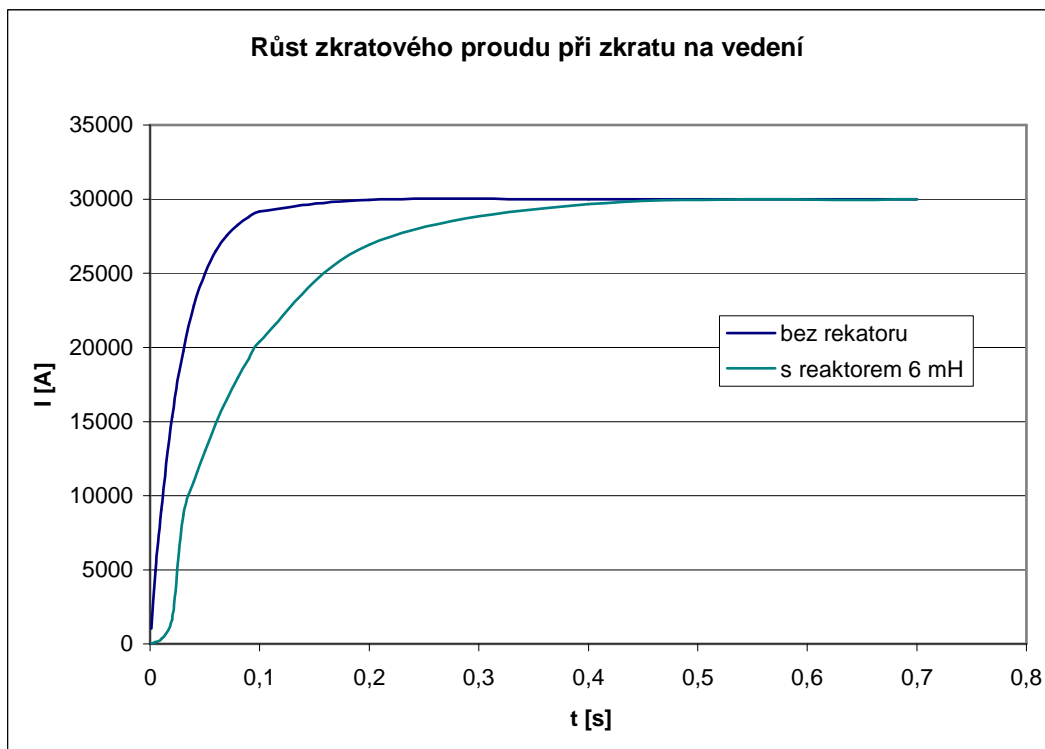
$$J = \frac{3000}{0,1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,1}{0,0028}t} \right)$$

Výpočet maximálního možného zkratu při přídavné indukčnosti $L = 8,8$ mH:

$$J = \frac{3000}{0,1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,1}{0,0088}t} \right)$$

Průběh každé náhlé změny v obvodu proudu tvoří indukčnost obvodu. Stoupání zkratového proudu je velmi strmé a za 100 ms přesahuje hodnotu 27 kA. Kdyby byl obvod jištěn běžným způsobem - pomocí relé, které působí na vypínač, muselo by být nastaveno na hodnotu 2,5 kA. Tato hodnota je brána jako maximální zatížení napáječe vzhledem k rozjezdovým proudům lokomotiv. Pokud při tomto proudu relé přitáhne a rozpojí vypínač, pak čas od dosažení nastavené hodnoty 2,5 kA až do počátku oddálení doteků vypnutí činí 50 ms.

Indukčnosti v obvodu prodlužují čas na úplné vypnutí zkratového proudu (dlouhé trolejové vedení) oproti zkratu s nepatrnou indukčností (zkrat těsně před měnírnou). Doba na vypnutí zkratu by se neměla extra zkracovat, protože vzniká větší riziko přepětí. Při použití normálního vypínače by nastalo vypnutí zkratového proudu až po značně delší době, až trojnásobně větší a s maximálním proudem dvakrát větším. To by mohlo mít za následek, že by se proud už nemuselo podařit přerušit a zařízení by shořelo.



Graf.5 Nárůst I_t při zkratu na vedení s a bez přídavné indukčnosti

9. Zkrat na troleji pro vozidlo napájené ze střídavé sítě

9.1 Zkraty mimo vozidlo v jeho blízkosti na střídavých systémech 15 kV, 16,7 Hz a 25 kV, 50 Hz.

V režimu tah i rekuperační brzda se zkrat mimo vozidlo projeví z hlediska vozidla jako ztráta (hluboký pokles) napětí. Jedná se o poměrně častou provozní událost a zařízení blokuje činnost pulzních usměrňovačů již v okamžiku, kdy trolejové napětí poklesne pod nastavenou dolní hranici, tj. 12 kV respektive 17,5 kV. Vozidlo se na zkratovém proudu nepodílí, zkrat vypne napájecí stanice. Vozidlo pokračuje výběhem. Stejný průběh má i ztráta napětí při výběhu nebo odporovém brzdění.

Také při rekuperačním brzdění probíhají jevy, jak bylo již popsáno. Proud rekuperačního brzdění klesá asi za 1s činností řídicích obvodů. Brzdný účinek může být nahrazen odporovou brzdou.

Tyto zkraty tedy nemají jiný (nebezpečný) účinek na vozidlo a popsané jevy zajišťují řídicí obvody ve velmi krátkých časech.

9.2 Možnosti vypínání střídavého zkratu

U vypínačů střídavého proudu nastává každou půlperiodu dobrý stav pro vypnutí, kdy proud prochází nulou, a tím se oblouk mezi místy zkratu velmi silně ochladí. Čím delší doba ochlazení je, tím existuje výraznější možnost uhašení oblouku.

10. Možnosti ochrany proti zkratu na stejnosměrných systémech

10.1 Možnosti vypínání stejnosměrného zkratu

Při vypínání zkratu napájeného stejnosměrným napětím o velkých výkonech se používá speciálních vypínačů, na které jsou kladeny velké požadavky na zhášecí komory vypínačů. Oblouk se musí co nejvíce natáhnout a ochladit. Součástka musí být vyrobena z vysokotepečně odolného materiálu, aby mohl být zajištěn přímý styk s obloukem. Kvůli spolehlivosti (životnosti) vypínače, je potřeba, aby se proud přerušil dříve, než dosáhne maximální ustálené hodnoty dané napětím napájecí stanice a ohmickým odporem vedení. To znamená, že kdyby nezareagovala žádná ochrana, proud může dosáhnout podle vztahu r.17 až 30 kA. To už je však destruktivní proud pro vypínač se zhášecí komorou. Důležitá je rychlost funkce vypínače.

10.2 Protizkratová ochrana

K tomuto tématu je možno zahrnout všechny zkraty, které se vyskytují téměř ve všech částech trakčního zařízení. Jsou způsobeny průrazy v místech nedokonalé izolace zařízení nebo náhodnými příčinami, jako je přetížení drátu, průjezd poškozeného vozu (může jej způsobit utržená střecha nebo plachta). Při zkratu na trakčním vedení v těsné blízkosti měničny je zkratový proud zprvu omezen indukčností zkratového obvodu, později odpory vinutí transformátoru, kabelů, přípojnic a vnitřním odporem zdroje.

Rychlost vzrůstu zkratového proudu je velmi svižná (1500 kA / do 50 ms). Z toho vyplývá, že i jeho vypnutí musí být rovněž rychlé a musí nastat dříve, než dosáhne příliš vysoké hodnoty, jež by mohla mít za následek nefunkčnost vypínače.

Protizkratová ochrana musí působit při zkratu v kterémkoliv místě trakční sítě tak, aby byl chráněný úsek odpojen od všech zdrojů napájení. Vypnutí zkratového proudu není lehkou úlohou, protože maximální provozní proud na konci trakčního vedení může mít vyšší hodnotu než zkratový proud.

Nejběžnější protizkratovou ochranou je prostá pozornost při zvýšení proudu nad určitou mez. Proto se udává podmínka pro zkratový proud - na nejvzdálenějším místě trakční sítě musí mít větší hodnotu než maximální provozní proud.

$$\text{r.18} \quad I_{k \min} = I_{knast} + 300$$

$I_{k \min}$ – minimální zkratový proud nutný pro spolehlivou činnost nadproudové ochrany

I_{nast} – nastavení na článku nadproudové ochrany

300 – rezerva v nastavení ochrany respektující neúplný obloukový zkrat a nepřesnost v činnosti nadproudového relé

$$\text{r.19} \quad I_{nast} = I_p + 200$$

200 – rezerva pro možnost nižšího napětí v napájecí síti a kvůli nahodilému překročení maxima

I_p – maximální provozní proud napáječe

Občas však nelze splnit předchozí podmínky, pak trakční zařízení není chráněno v celém úseku a nadproudovou ochranu lze zaručit jen na určitém úseku trakčního vedení.

$$\text{r.20} \quad l_0 = \frac{0,8 \cdot U_0}{r_t \cdot I_{k \min}}$$

l_0 – délka chráněného úseku

U_0 – napětí naprázdno

R_t - měrný odpor trakčního vedení a kolejí

Požítí nadproudové ochrany na naší trakční síti

Trakční vedení s trolejovým vodičem Cu – 150 mm² a nosným lanem – 120 mm²:

$R_t = 0,09 \Omega/\text{km}$; $I_p = 2300 \text{ A}$;

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot U_0}{r_t \cdot I_{k \min}}$$

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot 3000}{0,09 \cdot (2300 + 500)} = 9,52[\text{km}]$$

Nastavení nadproudové ochrany bude:

$$I_{\text{nast}} = 2300 + 200 = 2500 [\text{A}]$$

Pro trakční vedení zesílené lanem Al-Fe 240 mm² je $r_t = 0,06 \Omega/\text{km}$

$$l_0 = \frac{0,8 \cdot 3000}{0,06 \cdot (2300 + 500)} = 14,28[\text{km}]$$

Z těchto výsledků je zřejmé, že ochrana vůbec nebude postačující, protože vzdálenost mezi měnírnami je 20 km. Pro použití nadproudových ochrany lze zvětšit vzdálenost použití vzájemnou vazbou napájecích vypínačů napájecích trakční úsek z obou stran, dále příčným propojením trakčního vedení a u více kolejných tratí pomocí spínacích stanic. Využitím spínacích stanic se zvětší hodnota minimálních zkratových proudů a zatěžovací proudy se lépe rozdělí na větší počet napájení, sníží se jejich nastavení nadproudových ochrany. Správná funkce protizkratových ochrany je dána Tab.1. Na traťových úsecích, kde je malá rezerva v nastavení nadproudových ochrany, se provádí občas zkratové zkoušky, protože opotřeбенý trolejový vodič zvětšuje odpor trolejového vedení.

| | | Normální provoz | | | Jedna měřirna úplně vyřazena | | |
|--|--|----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | bez spínacích stanic | s jednou spínací stanicí | se dvěma spínacími stanicemi | bez spínacích stanic | s jednou spínací stanicí | se dvěma spínacími stanicemi |
| Trolej Cu-150mm, Nosné lano Cu - 120mm, Zesílené vedení AlFe - 240mm | Minimální zkratový proud | 2500 | 3750 | 5000 | 1250 | 3125 | 4380 |
| | Nejvyšší nastavené nadproudové ochrany | 2200 | 3450 | 4700 | 950 | 2825 | 4080 |
| | Maximální špičkový proud pro napájení | 2000 | 3250 | 4500 | 750 | 2625 | 3880 |
| Trolej Cu-150mm, Nosné lano Cu - 120mm | Minimální zkratový proud | 1666 | 2500 | 3333 | 833 | 2083 | 2920 |
| | Nejvyšší nastavené nadproudové ochrany | 1366 | 2200 | 3133 | 533 | 1783 | 2620 |
| | Maximální špičkový proud pro napájení | 1166 | 2000 | 2933 | 333 | 1583 | 2420 |

Tab.1 Minimální zkratové proudy, nejvyšší proudové nastavení protizkratových ochran a maximální špičkové proudy napáječů dvojkolejně tratě při vzdálenosti měření 17,6 km

11. Nadproudová ochrana

Tento typ ochrany je určen k ochraně trakčních motorů. Technicky je nadproudová ochrana zajišťována proudovým rozpínacím relé. Vypínací proud hlavního vypínače je vyšší, než maximální proud elektromotoru, a proto musí být tato ochrana provedena samostatně. Maximální proud trakčního motoru daleko převyšuje hodnotu trvalého proudu, čehož se využívá při rozjezdu lokomotivy, kdy je jen díky tomu možné vyvinout daleko vyšší výkon, než je udávaný trvalý výkon (samozřejmě ale musí nastat výborné adhezní podmínky). Např. na strojích 150 a 350 činí hodnota trvalého proudu elektromotoru 715 A, ale mezní hodnota, kdy již začne nadproudová ochrana, je nastavena na 1 250 A při sérii a 1 150 A při sérioparalelním zapojení.

11.1 Hlavní vypínač

Hlavní vypínač (HV) chrání lokomotivu jako celek. Je součástí vysokonapěťové výzbroje, musí být tedy umístěn v kobce. V trakčním obvodu je HV řazen za sběračem a odpojovačem. Účelem HV je co nejrychlejším rozepnutím ochránit lokomotivu před vysokými zkratovými proudy, tj. co nejrychleji přerušit napájení (to samozřejmě není možné provést stažením sběračů, neboť by došlo ke vzniku elektrického oblouku), dále také prostě "zapnutí" a "vypnutí" lokomotivy. V sepnuté poloze je hlavní vypínač udržován elektromagneticky tzv. přídržným obvodem, při přerušení proudu přídržného elektromagnetu se hlavní vypínač automaticky rozepne. Pokyn k jeho rozepnutí vydá buďto některá z ochrany (skluzová, nadproudová ochrana hlavního vypínače) nebo strojvedoucí ze stanoviště. Vzhledově hlavní vypínač připomíná část kontroléru, neboť vidět můžeme hlavně jeho zhášecí komoru. Hlavní vypínač je tvořen dvěma rovnoběžnými azbestovými deskami, mezi nimiž se nachází zhášecí komora. Při rozepnutí vypínače vznikne elektrický oblouk, který je bezpečně vyfouknut mezi tyto dvě desky do zhášecí komory. Tam je oblouk přitahován díky magnetickému tahu vznikajícímu díky přidavným cívkám, do nichž je při vypínání veden proud. Hlavní charakteristikou HV je vypínací proud, tj. proud, při kterém dojde k rozepnutí hlavního vypínače (vlastní nadproudová ochrana). Tato hodnota se opět liší podle typu HV a řady lokomotivy (např. 1 600 A - řada 140; 2 800 A - řada 150). Stav hlavního vypínače je indikován na stanovišti strojvedoucího otočným ukazatelem. Za zmínku stojí také poměrně nové nařízení, že zhášecí komory nesmí být vyrobeny z azbestu. Jsou tedy nahrazovány novými komorami, které mají oproti azbestovým bohužel daleko nižší životnost.

Účel hlavního vypínače na střídavých elektrických lokomotivách je stejný; od stejnosměrného vypínače se ale podstatně liší konstrukcí - jedná se o tlakovzdušný hlavní vypínač. Střídavý hlavní vypínač bývá obvykle umístěn na střeše lokomotivy, zatímco jeho pohon najdeme pod stropem strojovny. Vypínač je uložen na keramických izolátorech. Skládá se ze vzduchojemu, zhášecí komory, vypínače a kontaktní hlavice. V okamžiku, kdy je v hlavním vypínači nulový proud a napětí, zhasíná i elektrický oblouk.

Mezi kontakty však zůstává plazma (vysoce ionizovaný vzduch - v tomto případě elektrickým proudem), díky čemuž by byl oblouk znovu obnoven. Tomu je zabráněno vyfouknutím stlačeného vzduchu ze vzduchojemu (charakteristický zvuk střídavého hlavního vypínače). Stlačený vzduch vyfoukne oblouk i ionizovaný vzduch do zhášecí komory, kontaktní hlavice se otočí, spojí se zkratovačem a obvod je přerušen.

11.1.1 GSX II

Jedná se o první komerčně dostupný jednofázový vakuový vypínač, jenž je určen pro napájení železničních vozidel. Používá kombinace bezúdržbového vakuového zhášedla, magnetický pohon a elektronické ovládání. Rodina GSX obsahuje vhodný rozsah vakuového vypínače určený ke krytí jednofázové aplikace pro napájení železničních systémů:

| | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|----|
| - Jmenovitá frekvence: | 16,7 | Hz | nebo | 50/60 | Hz | |
| - Jmenovité napětí: | od | 17,5 | kV | až | 27,5 | kV |
| - Atmosférické impulzní napětí: | od | 125 | kV | až | 200 | kV |
| - Jmenovitý zkratový proud: | od | 25 | kA | až | 31,5 | kA |

11.2 Pojistky

11.2.1 SS pojistky:

Tavné vložky pro trakční aplikace jsou používány k ochraně trakčních rozvodů a trakčních proměnlivých zásob elektrického proudu proti účinku přetížení větším než $2 \times I$ a proti zkratu napětí 1,9 kV DC a 4kV DC (typu WBT).

11.2.2 St pojistky:

Pojistkové tavné vložky typu CMF jsou konstruovány pro aplikace v motorových obvodech. Zkouší se podle normy ČSN EN 60282-1 (IEC 60282-1) a normy ČSN EN 60644 (IEC 60644). IEC 644 platí pro pojistkové tavné vložky použité pro motory spuštěné s přímým připojením do střídavých proudových soustav. Vysokonapěťové pojistky použité v motorových obvodech musí mít schopnost snášet bez poškození opakované proudové nárazy související se spuštěním motoru. Ačkoliv se pojistka pro motorové obvody normálně provozuje při ustáleném proudu, který je mnohem nižší než proud jmenovitý, jsou CMF pojistky vzhledem k nízkým výkonovým ztrátám vhodné zvláště do kompaktních stykačových oddílů.

Dělají se pro jmenovité napětí 3.6 - 12 kV a jmenovitý proud 63 – 315 A.

12. Závěr

Tato práce shrnuje problematiku základního zapojení pro připojení asynchronního motoru na stejnosměrnou (600 V – 3 kV) a střídavou (15 kV / 16^{2/3} Hz a 25 kV / 50 Hz) napájecí soustavu. Na univerzálním zapojení jsou ukázány tři základní typy zkratů (poruch).

Program pro simulaci zkratu při připojení asynchronního motoru je napsán v programovacím jazyku C a grafy byly vygenerovány z programu MATLAB. Z této simulace jsme použili výstupy při zkratu na stejnosměrné troleji 3 kV v režimech tah a rekuperační brzdění (kap.7). Z grafů je zřejmé, že maximální hodnota I_t dosažená po zkratu nabývá hodnoty 4,4 kA v režimu tah a -4,7 kA v režimu rekuperační brzdění. Tyto nadproudy by měl zvládnout vypnout rychlo vypínač a vypnutí tohoto nadproudu by mělo být okolo 20 ms. V obou případech tento zkrat dozní (utlumí se) za 1,4s od vzniku. Program pro simulaci zkratu je uveden v příloze.

Dále jsme vypočítali maximální možný proud při zkratu na stejnosměrné 3 kV napájecí troleji. Bez přídavné indukčnosti dosáhne proud maxima 30 kA za 150 ms a s přídavnou indukčností dosáhne proud maxima 30 kA za 450 ms. Toto maximum je opravdu destruktivní a je uváděno jen pro přehled, jaké hodnoty a za jakých podmínek může dosáhnout hodnot.

Kapitola č. 10 teoreticky nastiňuje, jaký vliv má zkrat na střídavém napájecím systému. Vozidlo se na zkratovém proudu nepodílí, zkrat vypne napájecí stanice. Toto téma není po domluvě s vedoucím práce dále rozváděno.

Možnosti ochrany při zkratu na stejnosměrném napájecím systému jsou vypočítány v kapitole č. 10, tím určena účinnost nadproudové ochrany při použití na Českých napájecích systémech. Nastavení nadproudové ochrany bude na $I_{nast} = 2500$ [A], která pro trakční vedení zesílené lanem Al-Fe 240 mm² je $r_t = 0,06$ Ω/km je na vzdálenost 14,28 km nepostačující. Pro použití nadproudových ochran lze zvětšit vzdálenost použitím vzájemnou vazbou napájecích vypínačů napájecích trakční úsek z obou stran, dále příčným propojením trakčního vedení a u více kolejných tratí pomocí spínacích stanic. Poslední část této práce rozvádí nadproudové ochrany - hlavní vypínač a pojistky.

Seznam použité literatury

- [1] Kůs, V.: *Elektrické pohony a výkonová elektronika*, vyd. ZČU, Plzeň 2006
- [2] Danzer, J.: *Elektrická trakce IV.*, vyd. ZČU, Plzeň 2001
- [3] Vondrášek, F.: *Měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3*, vyd. ZČU, Plzeň 2003
- [4] Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*, vyd. ZČU, Plzeň 2004
- [5] Gert, R.: *Provozní přepětí v elektrizačních soustavách*, SNTL, Praha 1964
- [6] Duchoň, M., Ibl, J., Křivánek, J.: *Dráhové měničny*, vyd. Dopravy a spojů, Praha 1962
- [7] Fejt, J.: *Pevná trakční zařízení*, vyd. Dopravy a spojů, Praha 1966
- [8] *Možnosti ochrany proti přepětí a zkratu na systémech stejnosměrného a střídavé systému* dostupné z www: <<http://www.abb.cz/ProductGuide/>>

Přílohy

Program v jazyce C

```
#include <stdlib.h>
#include <fstream.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>

int pom=0;
float PI=3.1415927;
double h=1e-6;
double t=0,tp=1.8,eps=0;
float JM=0,A=0,B=0,C=0,D=0;
float Ufm=0,Usx=0,Usy=0;

//float      Rs=0.015,Rr=0.0082,Lqs=0.0001786,Lqr=0.000139,Lh=0.00375,Lr=Lh+Lqr;
//120kW
float      Rs=0.0178,Rr=0.0112,Lqs=0.000556,Lqr=0.000424,Lh=0.014534,Lr=Lh+Lqr;
//hodnoty pro asynchronni motor 1100kW
float Tf=0.5; //filtr napeti
float Ct=0.01,Lt=0.004,Rt=0.02,dIt=0,dUc=0;           //nastaveni pro trolej
float fpila=1000,iz=0,Ps=0,It=0;
float fs=50;           //statorova frekvence
float fr=0.5; //tah
//float fr=-0.5; //brzda
float
Isx=0,dIsx=0,Isy=0,dIsy=0,Frax=0,dFrax=0,Fry=0,dFry=0,Is=0,Qs=0,qr=0,Q=0,M=0,Fr=0;
//Q – mech rychlost , F- mag tok
int Udc=3000;//napajeni
int dupila=1,upilapom=0;
```

```

double upila=0,pilastupnu=0;
float Kfr=0;
float uc=Udc,Ucf=Udc,dUcf=0,U3=0,Urm=0;
float Ur[3],U0[3],Us[3],isf[3],tkoin[3],Isf[3]; //pro 3faze

void motor(double Usa,double Usb,double Usc){
    Lr=Lh+Lqr; //mat model pomoci stavovych rovnici
    JM=Lqs+Lqr*Lh/Lr;
    A=(Rs+Rr*Lh*Lh/(Lr*Lr))/JM;
    B=(Rr*Lh/(Lr*Lr))/JM;
    C=(Lh/Lr)/JM;
    D=1/JM;

    Usx=((2*Usa)-Usb-Usc)/3;
    Usy=(Usb-Usc)/sqrt(3);

    dIsx=-A*Isx+B*Frx+C*Q*Fry+D*Usx;
    dIsy=-A*Isy-C*Q*Frx+B*Fry+D*Usy;
    dFrx=Rr*Lh*Isx/Lr-Rr/Lr*Frx-Q*Fry;
    dFry=Rr*Lh*Isy/Lr+Q*Frx-Rr/Lr*Fry;
    dIt=1/Lt*(Udc-Rt*It-uc);
    dUc=1/Ct*(It-iz);
    dUcf=1/Tf*(uc-Ucf);

    Ucf=Ucf+dUcf*h;
    Isx=Isx+dIsx*h;
    Isy=Isy+dIsy*h;
    //Is=sqrt(Isx*Isx+Isy*Isy);
    Frx=Frx+dFrx*h;
    Fry=Fry+dFry*h;
    Fr=sqrt(Frx*Frx+Fry*Fry);
    if (Fr<0.01){Fr=0.01;}
    It=It+dIt*h;

```

```

uc=uc+dUc*h;

Isf[0]=Isx;
Isf[1]=-0.5*Isx+sqrt(3)/2*Isy;
Isf[2]=-0.5*Isx-sqrt(3)/2*Isy;
//M=2*3/2*Lh/Lr*(Frx*Isy-Fry*Isx);
Ps=3/2*(Usx*Isx+Usy*Isy);
iz=Ps/uc;    // linearita
}
int main (){

FILE *fw;

fw = fopen("zkratDCtah.txt", "w");
// fw = fopen("zkratDCbrzda.txt", "w");
while(t<=2+tp){
    if(t>2){Udc=0;}
    Qs=2*PI*fs;
    eps=eps+Qs*h;
    Q=Qs-2*PI*fr;

    pilastupnu=round(1/fpila/2/h);
    fpila=1/(pilastupnu*2*h);

    Ufm=2*230*sqrt(2)*fs/50; // U/f = konst.
    Urm=Ufm/Ucf*1.74; // 2/1.15=0.74...modulace s 3. har.

if(Urm>=(0.99*(pilastupnu/2))/(pilastupnu/2)){Urm=(0.99*(pilastupnu/2))/(pilastupnu/2);
}

    U3=0.15*sin(3*eps);

    upila=upila+dupila;    //jednoduchá symetrická pila
    if((upila>=pilastupnu/2)||upila<=-pilastupnu/2){

```

```

for(int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    Ur[ifaz]=round((pilastupnu/2)*Urm*(1.15*sin(eps-(ifaz)*2*PI/3)+U3));
}
dupila=dupila*(-1);
}

// linearita
for (int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    U0[ifaz]=Ur[ifaz]/(pilastupnu/2)*uc/2;
}

//-----konec koincidenci, vypocet Usa,b,c-----

for(int ifaz=0;ifaz<3;ifaz++){
    Us[ifaz]==((3*U0[ifaz])-U0[0]-U0[1]-U0[2])/3;}

motor(Us[0],Us[1],Us[2]);
pom++;
if ((pom>100)&&(t>1.8)){
    pom=0;
    fprintf(fw, " %f", (t-1.8));    //generovani hodnot pro grafy
    fprintf(fw, "; %f", It);
    //fprintf(fw, "; %f", uc);
    fprintf(fw, "; %d", Udc);
    fprintf(fw, "; %f\n", uc);

}

t=t+h;
} // end casoveho whilu
fclose(fw);
return(0);
}

```

Program pro MATLAB na vygenerování grafů

```
data = load('zkratDCtah.txt' , '-ascii');
```

```
%data = load('zkratDCbrzda.txt' , '-ascii');
```

```
figure(1)
```

```
plot (data(:,1),[data(:,2) data(:,3)]); grid on;
```

```
xlabel('cas[s]');ylabel('It Ut [V]'); legend('It','Ut'); %title ('Zkrat na stejnosmerne troleji v  
case t=0,2s v rezimu rekuperace, napeti a proud v troleji');
```

```
figure(2)
```

```
plot(data(:,1),[data(:,4) data(:,3)]); grid on;
```

```
xlabel('cas[s]');ylabel('Uc Ut [V]'); legend('Uc','Ut'); %title ('Zkrat na stejnosmerne troleji  
v case t=0,2s v rezimu rekuperace, napeti v troleji a napeti na vstupnim kondenzatoru');
```