

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulační model usměrňovače

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana NĚMCOVÁ**
Osobní číslo: **E11B0235P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Simulační model usměrňovače**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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


1. Uveďte základní principy a vlastnosti usměrňovače a možnosti jeho řízení. Pozornost věnujte zejména můstkovému zapojení.
2. Vytvořte simulační model usměrňovače v prostředí Matlab-Simulink.
3. Zhodnoťte výsledky simulací.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

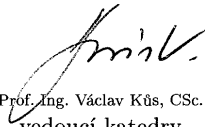
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vendula Mužíková**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis a návrh simulačních modelů usměrňovačů. Simulace byly vytvořeny v prostředí MATLAB/Simulink s využitím knihovny PLECS, která je určena k simulaci problémů z oblasti výkonové elektroniky a elektrických pohonů. Vytvořené modely jsou určeny k použití ve výuce na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky.

Teoretická část je zaměřena na popis jednotlivých typů usměrňovačů a prostředí, ve kterém byly simulace vytvořeny. Praktická část práce je věnována popisu tvorby simulačních modelů a uživatelské aplikace.

Klíčová slova

neřízený uzlový usměrňovač, neřízený můstkový usměrňovač, řízený uzlový usměrňovač, řízený můstkový usměrňovač, simulace, MATLAB, Simulink, PLECS

Abstract

This bachelor thesis deals with the description and development of simulation models of rectifiers. Simulations were performed in MATLAB/Simulink with use of PLECS library. This library is used for simulation of power electronics and electric drives problems. Designed models are intended for use in the courses at the Department of Electromechanics and Power Electronics.

Theoretical part is focused on the description of different types of rectifiers and simulation program. Practical part is aimed at the description of simulation model design.

Key words

diode rectifier, diode rectifier in bridge connection, thyristor rectifier, thyristor rectifier in bridge connection, simulation, MATLAB, Simulink, PLECS

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Jana Němcová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí bakalářské práce. Ing. Vendule Mužíkové za užitečné rady při tvorbě simulačních modelů a metodické vedení při vypracování této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	12
1.1 OBVODY USMĚRŇOVAČŮ	12
1.1.1 <i>Napájení</i>	12
1.1.1.1 Jednofázový napěťový zdroj	12
1.1.1.2 Třífázový napěťový zdroj	13
1.1.2 <i>Výkonové polovodičové součástky</i>	14
1.1.2.1 Dioda	15
1.1.2.2 Tyristor	15
1.1.3 <i>Zátěž</i>	16
1.1.3.1 Rezistor	16
1.1.3.2 Indukčnost	17
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY Z TEORIE MĚNIČŮ	17
1.2.1 <i>Napětové množství</i>	17
1.2.2 <i>Takt</i>	18
1.2.3 <i>Komutace</i>	18
1.3 CHARAKTER USMĚRNĚNÉHO NAPĚTÍ A PROUDU	19
1.3.1 <i>Usměrněné napětí</i>	19
1.3.2 <i>Usměrněný proud</i>	19
2 ZÁKLADNÍ TYPY USMĚRŇOVAČŮ	20
2.1 NEŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE	20
2.1.1 <i>Neřízené usměrňovače v uzlovém spojení</i>	20
2.1.1.1 Neřízený jednofázový usměrňovač v uzlovém spojení	21
2.1.1.2 Neřízený třífázový usměrňovač v uzlovém spojení	24
2.1.2 <i>Neřízené usměrňovače v můstkovém spojení</i>	26
2.1.2.1 Neřízený jednofázový usměrňovač v můstkovém spojení	27
2.1.2.2 Neřízený třífázový usměrňovač v můstkovém spojení	30
2.2 ŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE	32
2.2.1 <i>Řízené usměrňovače v uzlovém spojení</i>	32
2.2.1.1 Řízený jednofázový usměrňovač v uzlovém spojení	32
2.2.1.2 Řízený třífázový usměrňovač v uzlovém spojení	34
2.2.2 <i>Řízené usměrňovače v můstkovém spojení</i>	36
2.2.2.1 Řízený jednofázový usměrňovač v můstkovém spojení	36
2.2.2.2 Řízený třífázový usměrňovač v můstkovém spojení	39
3 MATLAB, SIMULINK, PLECS	42
3.1 MATLAB	42
3.2 SIMULINK	43
3.3 PLECS	44
4 SIMULACE	45
4.1 VIZUALIZACE VÝSTUPNÍCH SIGNÁLŮ	45
4.2 SIMULACE NEŘÍZENÝCH USMĚRŇOVAČŮ	45
4.3 SIMULACE ŘÍZENÝCH USMĚRŇOVAČŮ	47
4.4 UŽIVATELSKÁ APLIKACE	50
5 ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54

PŘÍLOHY.....1

Seznam symbolů a zkratk

$1f, 3f$	počet fází
u	okamžitá hodnota napětí 1f zdroje
U_m	amplituda napětí
ω	úhlový kmitočet
φ	fázový posuv
f	frekvence
T	perioda
U	efektivní hodnota napětí
u_1, u_2, u_3	okamžité hodnoty napětí 3f zdroje
u_F	propustné napětí diody
i_F	propustný proud diody
u_R	závěrné napětí diody a tyristoru
i_R	závěrný proud diody a tyristoru
u_R	propustné napětí diody
u_D	blokovací napětí tyristoru
i_D	blokovací proud tyristoru
R	odpor zátěže
I	proud
W_m	energie akumulovaná v indukčnosti
L	indukčnost zátěže
u_L	napětí na indukčnosti
Q_L	napěťové množství přivedené indukčnosti
Q_L'	napěťové množství odčerpané indukčnosti
u_d	okamžitá hodnota napětí na zátěži
U_d	střední hodnota napětí na zátěži
p	pulznost
$f_{\sigma(1)}$	frekvence 1. harmonické střídavé složky usměrněného napětí a proudu
i_d	okamžitá hodnota proudu zátěží
I_d	střední hodnota proudu zátěží
$D_1 - D_6$	diody
$T_1 - T_6$	tyristory
MATLAB	matrix laboratory

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis problematiky základních typů usměrňovačů a tvorbu jejich simulačních modelů. Hlavním účelem práce bylo vytvoření uživatelské aplikace pro simulace usměrňovačů, která bude využitelná při výuce vybraných předmětů na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky.

Text je rozdělen do čtyř částí. V první části jsou uvedeny základní vztahy a pojmy související s problematikou usměrňovačů. Druhá část je zaměřena na popis vlastností a principu činnosti neřízených a řízených usměrňovačů v uzlovém a můstkovém spojení při napájení jednofázovým a třífázovým napěťovým zdrojem. Ve třetí části je popsáno prostředí MATLAB, Simulink a PLECS, ve kterém byly vytvořeny simulační modely. Čtvrtá část je zaměřena na samotný popis vytváření simulačních modelů a je zde popsána také vytvořená uživatelská aplikace.

1 Úvod do problematiky

Usměrňovače jsou historicky nejstarším druhem polovodičových měničů. Jejich základní funkcí je, jak již vyplývá ze samotného názvu, usměrňování střídavých proudů (AC → DC). [1] Oblast použití usměrňovačů je velice široká. Jako příklad použití lze uvést usměrňovače v síťových adaptérech mobilních telefonů a laptopů. Další aplikace jsou např. usměrňovače pro elektrochemické procesy, usměrňovače pro stejnosměrné regulované pohony nebo usměrňovače pro napájení stejnosměrného vedení. [1, 2] V současné době se usměrňovače hojně využívají jako součást nepřímých měničů kmitočtu. [1]

1.1 Obvody usměrňovačů

1.1.1 Napájení

Zdrojem střídavého napětí pro usměrňovač je zpravidla třífázová rozvodná síť, ke které je usměrňovač připojen např. přes měničový transformátor. Při popisu základních principů usměrňovačů v této práci jsou uvažovány modely s napájením z jednofázového a třífázového napěťového zdroje. [2]

1.1.1.1 Jednofázový napěťový zdroj

Příkladem použití 1f napěťového zdroje je střídavá trolej. Tento zdroj dodává do obvodu harmonicky proměnné napětí o amplitudě U_m [V], frekvenci f [Hz] (resp. úhlovém kmitočtu ω [rad·s⁻¹]), periodě T [s] a fázovém posuvu φ [°, rad]. Okamžitou hodnotu napětí lze matematicky vyjádřit rovnicí 1.1. [3]

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad [V] \quad (1.1)$$

Mezi frekvencí a úhlovým kmitočtem platí vztah popsáný rovnicí 1.2. [3]

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad [rad \cdot s^{-1}] \quad (1.2)$$

Vztah mezi periodou a frekvencí zdroje vyjadřuje rovnice 1.3. [3]

$$T = \frac{1}{f} \quad [s] \quad (1.3)$$

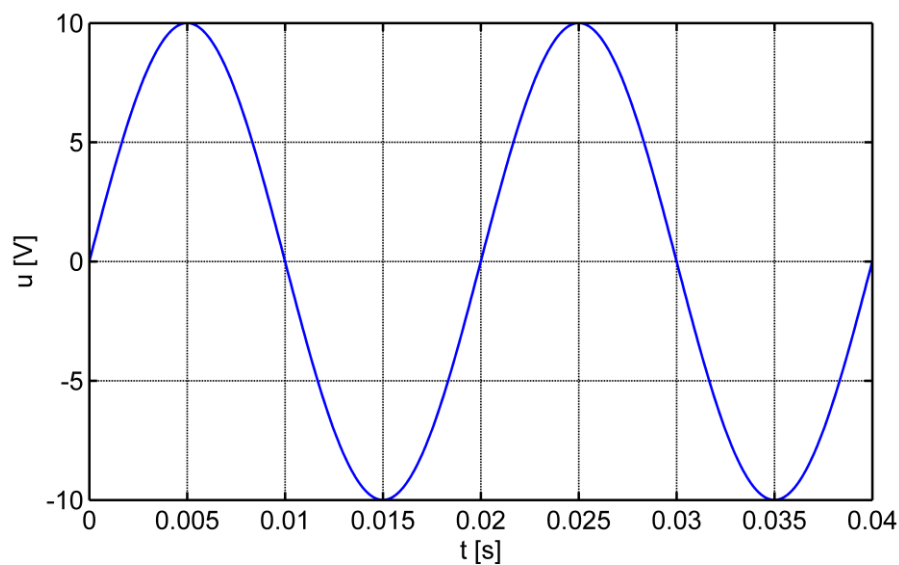
Dosažením frekvence vyjádřené z rovnice 1.2 do rovnice 1.3 je získána rovnice 1.4 popisující vztah mezi periodou a úhlovým kmitočtem. [3]

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad [\text{s}] \quad (1.4)$$

Často je při výpočtech a simulacích místo velikosti amplitudy používána hodnota napětí zvaná efektivní, vzájemný vztah mezi těmito dvěma hodnotami je popsán rovnicí 1.5. [3]

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U \quad [\text{V}] \quad (1.5)$$

Na obr. 1 je zobrazen graf harmonického napětí v závislosti na čase v intervalu $\langle 0; 2T \rangle$, jehož parametry jsou: $U_m = 10 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.



Obr. 1: Graf napětí 1f zdroje

1.1.1.2 Třífázový napěťový zdroj

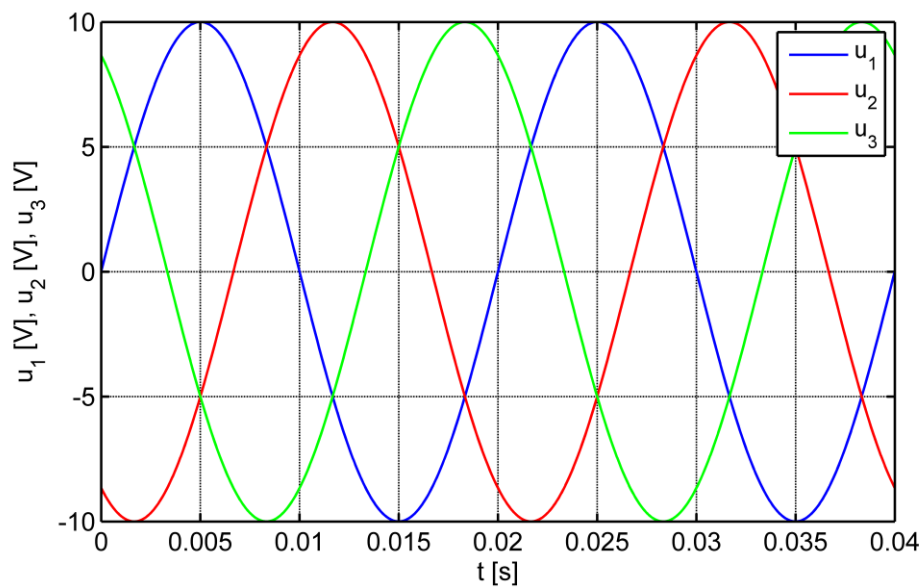
Příkladem 3f napěťového zdroje je rozvodná síť 3x400 V. Tento zdroj vznikne spojením tří jednofázových napěťových zdrojů. V případě symetrického zdroje mají všechna napětí stejnou amplitudu a frekvenci (tzn. také úhlový kmitočet), vzájemně se liší pouze fázovým posuvem. Fázový posuv napětí u_1 je 0° . Vůči němu jsou zbylá dvě napětí fázově posunuta o $\pm 120^\circ$ (tj. o $\pm 2/3 \pi$). Okamžité hodnoty fázových napětí 3f zdroje popisují rovnice 1.6, 1.7 a 1.8. [4]

$$u_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad [V] \quad (1.6)$$

$$u_2(t) = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad [V] \quad (1.7)$$

$$u_3(t) = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad [V] \quad (1.8)$$

Na obr. 2 je vykresleno napětí souměrného třífázového harmonického napěťového zdroje v závislosti na čase pro interval $\langle 0; 2T \rangle$, jehož parametry jsou: $U_m = 10 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.



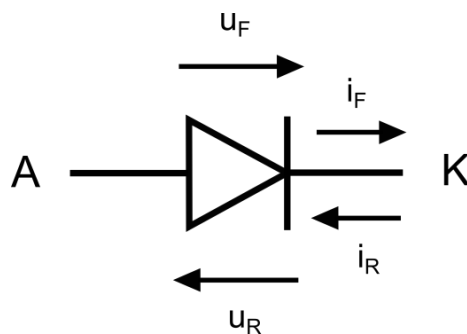
Obr. 2: Graf napětí 3f zdroje

1.1.2 Výkonové polovodičové součástky

Výkonové části obvodů usměrňovačů jsou tvořeny polovodičovými součástkami, zpravidla diodami nebo tyristory. Polovodičové součástky se vyznačují nelineární V-A charakteristikou. Při popisu funkce usměrňovače a jeho simulaci lze součástky uvažovat jako idealizované a některé jejich reálné vlastnosti zanedbat. [2] Při návrhu konkrétního usměrňovače však nelze zjednodušený model využít (především kvůli typovému výběru součástek).

1.1.2.1 Dioda

Nejjednodušším typem polovodičových součástek jsou diody. Existuje mnoho typů diod (usměrňovací, Zenerova, LED aj.), z nichž každý má specifické vlastnosti a použití. Diody jsou tvořeny jedním P-N přechodem a dvěma pracovními vývody (anodou a katodou). Anoda je spojena s polovodičem typu P a katoda s polovodičem typu N. [1] Schematická značka usměrňovací diody (včetně naznačených směrů napětí a proudů) je na obr. 3.

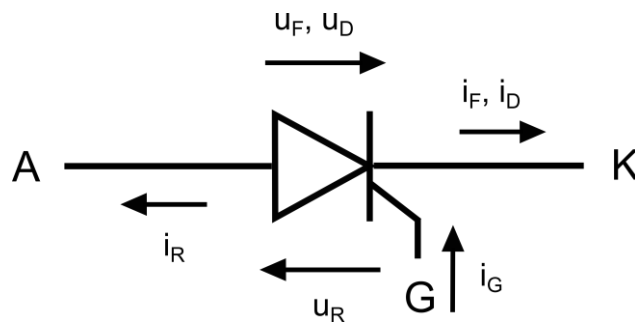


Obr. 3: Schematická značka diody [1]

Chování součástky v obvodu závisí na polaritě a velikosti přiloženého napětí. Je-li dioda zapojena v obvodu tak, že je anoda spojena s kladným pólem zdroje a katoda se záporným, nachází se dioda v tzv. propustném stavu. Změnou polaritě přiloženého napětí přechází dioda do tzv. závěrného stavu. Na diodě se v propustném stavu objevuje propustné napětí u_F (přibližně 1 V) a prochází jí propustný proud i_F (až několik kA) v tzv. přímém směru. V závěrném stavu je na diodě závěrné napětí u_R (až několik kV) a v tzv. zpětném směru prochází diodou závěrný proud i_R (až desítky mA). Je-li uvažován zjednodušený model součástky, zanedbáváme propustné napětí a závěrný proud (předpokládáme nulové hodnoty). [1, 5]

1.1.2.2 Tyristor

Tyristory jsou tvořeny čtyřmi polovodičovými vrstvami (třemi P-N přechody, obvyklé uspořádání je PNPN) a třemi pracovními vývody. Kromě anody a katody je ze součástky vyvedeno tzv. hradlo (G), které slouží k přivedení spínacího proudového impulsu. [5] Schematická značka tyristoru (včetně naznačených směrů napětí a proudů) je na obr. 4.



Obr. 4: Schematická značka tyristoru [1]

Tyristor se po připojení k harmonickému napětí může nacházet ve třech stavech. Je-li anoda spojena se záporným potenciálem zdroje a katoda s kladným, tyristor je v tzv. závěrném stavu (závěrné napětí u_R , závěrný proud i_R). Změní-li se polarita napájecího napětí, přechází tyristor do tzv. blokovacího stavu (blokovací napětí u_D , blokovací proud i_D). K zapnutí součástky, tedy k přechodu do tzv. propustného stavu (propustné napětí u_T , propustný proud i_T), dojde pouze při splnění dvou podmínek: tyristor se nachází v blokovacím stavu a na jeho hradlo je přiveden krátký proudový impulz. [1, 5] K vypnutí součástky dojde obvykle změnou polarity napájecího napětí (přechod do závěrného stavu). V některých případech je třeba zatížit tyristor bezprostředně po vypnutí blokovacím napětím, vypínání tyristoru je proto složitější. Nejprve je třeba docílit zániku propustného proudu, pro obnovení blokovací schopnosti součástky je potřeba na tyristoru zachovat po tzv. vypínací dobu závěrné nebo alespoň nulové napětí, jinak by mohlo dojít k nechtěnému zapnutí součástky. Uvažujeme-li zjednodušený model součástky, zanedbáváme propustné napětí a blokovací a závěrný proud (předpokládáme nulové hodnoty). [5]

1.1.3 Zátěž

Charakter zátěže a její parametry významně ovlivňují parametry napětí a proudu na výstupu usměrňovače.

1.1.3.1 Rezistor

Rezistory jsou pasivní součástky. Lineární rezistory mají konstantní hodnotu odporu R a vyznačují se lineární V-A charakteristikou. Vztah mezi odporem součástky R [Ω], úbytkem napětí U [V], který na ní vzniká, a proudem I [A], který jí protéká, vyjadřuje rovnice 1.9 (Ohmův zákon).

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (1.9)$$

V obvodech usměrňovačů ovlivňuje velikost připojeného odporu zejména velikost výstupního proudu.

1.1.3.2 Indukčnost

Indukčnost patří do skupiny tzv. akumulacních prvků. Základním parametrem této součástky je indukčnost L [H]. Průchodem proudu součástkou vzniká magnetické pole, jehož energii lze vyjádřit zjednodušeným vztahem podle rovnice 1.10. [6]

$$W_m(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i(t)^2 \quad [J] \quad (1.10)$$

Jelikož se energie vždy musí měnit spojitě, proud indukčností také nemůže být změněn skokově. Dojde-li v obvodu s indukčností ke změně parametrů (připojení nebo odpojení od zdroje, změna zátěže, změna parametrů napájecího zdroje apod.), dochází vždy k přechodnému ději, který lze popsat diferenciální rovnicí nebo soustavou diferenciálních rovnic. Po jeho odeznění nastává ustálený stav. Důležitým parametrem pro charakterizování přechodného děje je časová konstanta τ [s], která udává strmost nárůstu (poklesu) proudu na počátku děje, a je závislá na parametrech zátěže. Délka trvání přechodného děje zpravidla nepřesahuje dobu delší než pětinašobek časové konstanty. Napětí na indukčnosti se mění skokově, výpočet jeho okamžité hodnoty lze provést podle rovnice 1.11. [6]

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad [V] \quad (1.11)$$

1.2 Základní pojmy z teorie měničů

Usměrňovače popisované v této práci patří mezi přímé polovodičové měniče s vnější komutací. [2] V následující podkapitole jsou blíže popsány některé pojmy, které se vztahují k teorii usměrňovačů, a jsou používány v další kapitole k popisu principu činnosti několika základních typů spojení usměrňovačů.

1.2.1 Napět'ové množství

Tento pojem se do výkonové elektroniky zavádí kvůli induktivnímu charakteru zátěže. Napět'ové množství přivedené indukčnosti za časový interval $\langle t_1; t_2 \rangle$ je definováno rovnicí 1.12. [2]

$$Q_L(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} u_L(t) dt \quad (1.12)$$

Je-li do předchozí rovnice dosazen za napětí u_L vztah z rovnice 1.11, po krátké úpravě je získána rovnice 1.13, ze které vyplývá, že napěťové množství přivedené indukčnosti za časový interval $\langle t_1; t_2 \rangle$ je přímo úměrné velikosti nárůstu proudu indukčností v daném čase. [2]

$$Q_L(t_1, t_2) = L \cdot [i(t_2) - i(t_1)] \quad (1.13)$$

Stejným způsobem lze popsat napěťové množství odčerpané indukčnosti za časový interval $\langle t_2; t_3 \rangle$ (rovnice 1.14). [2]

$$Q_L(t_2, t_3) = \int_{t_2}^{t_3} -u_L(t) dt \quad (1.14)$$

Po úpravě je získána rovnice 1.15, ze které vyplývá, že napěťové množství odčerpané indukčnosti za časový interval $\langle t_2; t_3 \rangle$ je přímo úměrné velikosti poklesu proudu indukčností v daném čase. [2]

$$Q_L(t_2, t_3) = L \cdot [i(t_2) - i(t_3)] \quad (1.15)$$

1.2.2 Takt

Tímto pojmem je označován časový interval "*mezi dvěma po sobě následujícími změnami vodivosti větví měniče*". [2] V literatuře bývá obvykle značen značkami součástek, které jsou v daném taktu sepnuty. [2]

1.2.3 Komutace

Jako komutace větve měniče je označován děj, při kterém vodivost přechází z jedné větve na druhou, aniž by došlo k přerušení proudu tekoucího uzlem, který obě větve spojuje. Obvykle ke komutaci dochází, jakmile je sepnuta polovodičová součástka v jedné z komutujících větví. Sepnutí součástky je způsobeno tzv. komutačním napětím. V případě usměrňovačů je zdroj komutace umístěn vně samotného měniče, jedná se proto o tzv. vnější komutaci. Při popisu činnosti měničů je často uvažována tzv. okamžitá komutace, při které není zohledněna doba poklesu a nárůstu proudu v komutujících větvích měniče. [2]

1.3 Charakter usměrněného napětí a proudu

1.3.1 Usměrněné napětí

Okamžitá hodnota napětí na zátěži usměrňovače je označována u_d . "Průběh u_d se vyznačuje střídavou složkou superponovanou na jeho střední hodnotu U_d ." [2] Na zátěži se objevuje jen taková část křivky napájecího napětí, aby napětí na výstupu usměrňovače bylo stejnosměrné (tvar napětí záleží na zátěži, počtu fází zdroje a zapojení usměrňovače). Napětí na zátěži není konstantní, ale jedná se o tzv. pulzní průběh. Množství pulzů v jedné periodě lze vyjádřit jako podíl frekvence 1. harmonické střídavé složky usměrněného napětí u_d ($f_{\sigma 1}$ [Hz]) a frekvence napájecího zdroje (f [Hz]), tedy podle rovnice 1.16. [2]

$$p = \frac{f_{\sigma(1)}}{f} \quad [-] \quad (1.16)$$

Na základě hodnoty tohoto parametru mohou být usměrňovače označovány jako p-pulzní. [2]

1.3.2 Usměrněný proud

Okamžitá hodnota proudu zátěží usměrňovače je označována i_d . Cílem usměrnění je dosažení nepřerušovaného proudu s co nejmenším zvlněním. Kmitočet 1. harmonické střídavé složky usměrněného proudu je stejný jako kmitočet 1. harmonické střídavé složky usměrněného napětí. Je-li usměrňovač zatížen sériovým RL spojením, po připojení ke zdroji proud postupně vzrůstá, dokud se nedostane do ustáleného stavu. V ustáleném stavu se proud nachází tehdy, pokud během jednoho pulzu napětí zátěže je napěťové množství přivedené indukčnosti rovno napěťovému množství indukčnosti odčerpanému. Proud tedy během tohoto časového intervalu nejprve vzrůstá z hodnoty i_{dmin} na hodnotu i_{dmax} , poté opět klesá na hodnotu i_{dmin} . Tuto skutečnost lze matematicky vyjádřit rovnicí 1.17, kde Q_L je napěťové množství přivedené indukčnosti, L je velikost připojené indukčnosti, Δi_d je rozdíl mezi maximem a minimem proudu a Q_L' je napěťové množství odčerpané indukčnosti. [2]

$$Q_L = L \cdot \Delta i_d = Q_L' \quad (1.17)$$

2 Základní typy usměrňovačů

V následující kapitole jsou popsány jednofázové a třífázové usměrňovače v uzlovém a můstkovém spojení se dvěma možnostmi řízení (neřízené a plně řízené usměrňovače). Ve schématech je naznačena počáteční polarita napěťového zdroje po jeho zapnutí.

U každého typu zapojení jsou uvedeny grafy napětí na zátěži u_d a proudu zátěží i_d v závislosti na čase pro první tři periody napájecího napětí u .

Jednofázové usměrňovače jsou napájeny z 1f harmonického zdroje, pro jehož okamžitou hodnotu platí rovnice 1.1 s parametry: $U = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\varphi = 0$.

Třífázová spojení jsou napájena z 3f souměrného harmonického zdroje. Pro okamžité hodnoty fázových napětí platí rovnice 1.6, 1.7 a 1.8 s parametry: $U = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

2.1 Neřízené usměrňovače

Neřízené usměrňovače neumožňují řízení parametrů výstupní elektrické energie (napětí a proudu zátěží). Typem polovodičových součástek, které se v jejich obvodech používají, jsou diody. [2]

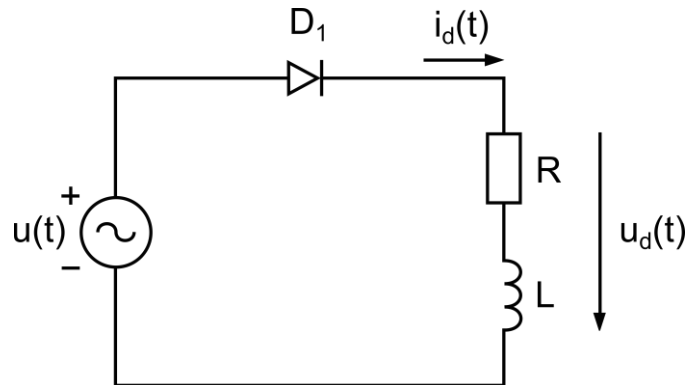
U každého zapojení je popsán vliv parametrů prvků zátěže na průběhy napětí a proudu na výstupu usměrňovače. Vliv charakteru zátěže na průběhy veličin na výstupu usměrňovače je uveden pouze pro 1f uzlové spojení. U ostatních zapojení je uvažována pouze RL zátěž.

2.1.1 Neřízené usměrňovače v uzlovém spojení

Uzlová spojení umožňují tok elektrické energie pouze jedním směrem, jsou tedy energeticky jednosměrná. [1] Obecně lze vytvořit m -fázové uzlové spojení s užitím m -fázového zdroje, množství připojených diod odpovídá počtu fází zdroje. [2]

2.1.1.1 Neřízený jednofázový usměrňovač v uzlovém spojení

Tento typ usměrňovače je tvořen sériovým spojením jednofázového napěťového zdroje s diodou a zátěží. Na obr. 5 je schéma tohoto typu usměrňovače s RL zátěží.



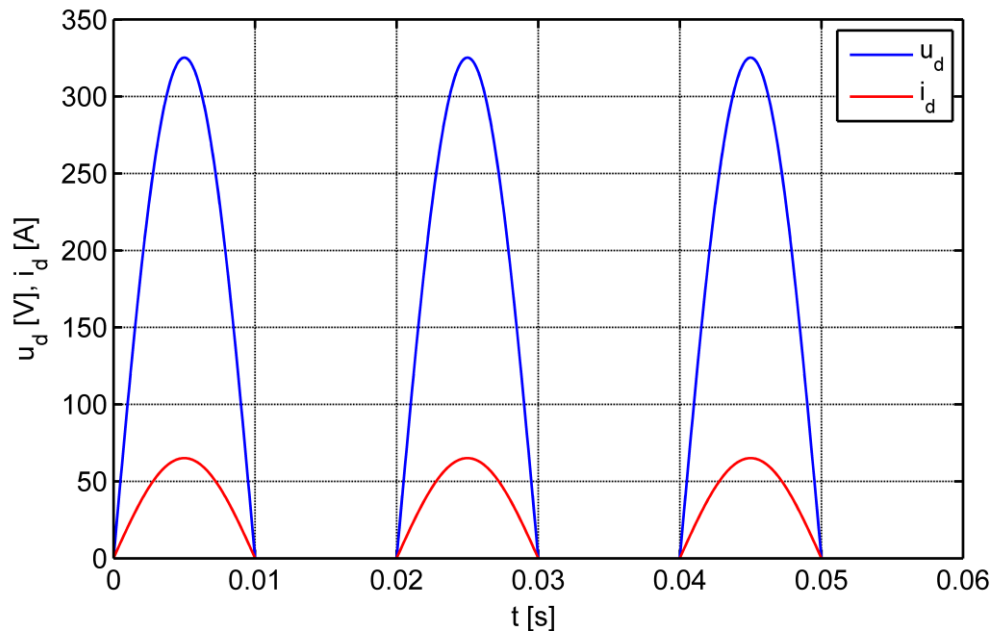
Obr. 5: Schéma zapojení neřízeného 1f uzlového usměrňovače s RL zátěží [2]

Po zapnutí zdroje dochází k sepnutí diody a nárůstu proudu zátěží. Charakter zátěže a velikost připojených prvků mají vliv na komutaci a parametry výstupních veličin (u_d , i_d). [1] Pulznost tohoto typu usměrňovače je $p = 1$, proto je často označován jako jednopulzní neřízený usměrňovač.

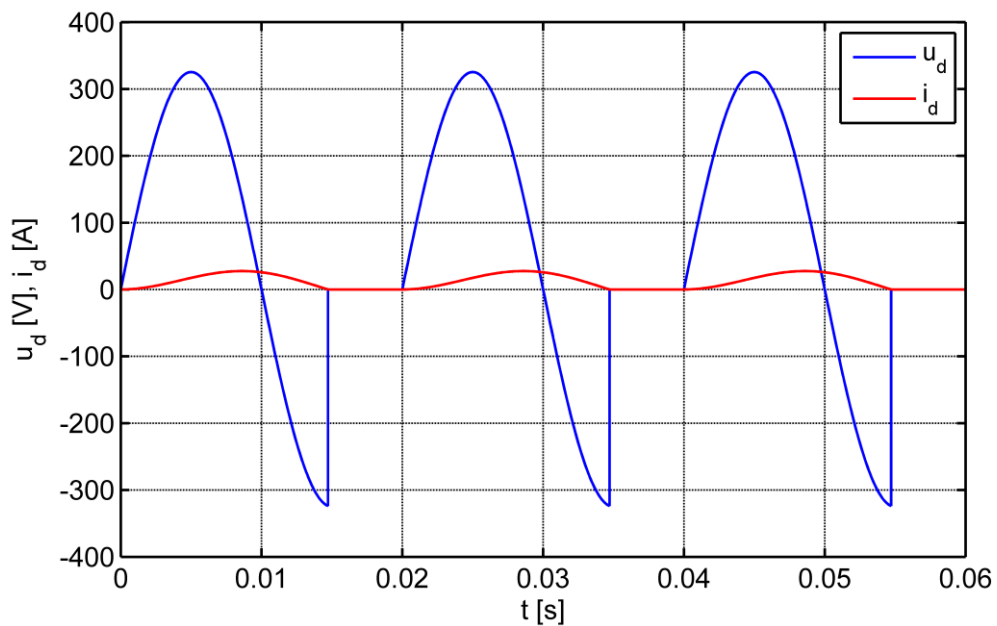
Je-li zátěž ohmického charakteru, napětí u_d svým tvarem a velikostí odpovídá kladným půlvlnám napětí napájecího zdroje u . Dioda D_1 se po zapnutí zdroje otevírá a umožňuje nárůst proudu zátěží i_d . Jeho okamžitá hodnota je přímo úměrná okamžité hodnotě napětí na zátěži. Při poklesu napětí na nulovou hodnotu v polovině periody klesá na nulovou hodnotu rovněž proud a dochází k zavření diody. Celá záporná půlvlna napájecího napětí u se objevuje na diodě jako závěrné napětí. Proud zátěží dosahuje amplitudy o velikosti dané Ohmovým zákonem (rovnice 1.9, dosazení U_m , R), změna velikosti odporu má vliv pouze na velikost proudu i_d , napětí u_d není změnou odporu ovlivňováno. [1] Na obr. 6 je graf závislosti napětí a proudu odporovou zátěží ($R = 5 \Omega$) neřízeného 1f uzlového usměrňovače na čase.

Induktivní zátěž má výrazný vliv na tvar a velikost veličin na zátěži usměrňovače. Indukčnost zpomaluje nárůst proudu i_d a snižuje hodnotu i_{dmax} . Po dosažení maxima proudu se energie akumulovaná v součástce postupně vybíjí, proud klesá na nulovou hodnotu pomaleji než napětí, na zátěži se proto objevuje kromě kladné půlvlny napájecího napětí také část půlvlny záporné. Ke komutaci dochází až při poklesu proudu na nulovou hodnotu. [1]

Na obr. 7 je graf závislosti napětí a proudu RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$) neřízeného 1f uzlového usměrňovače na čase.



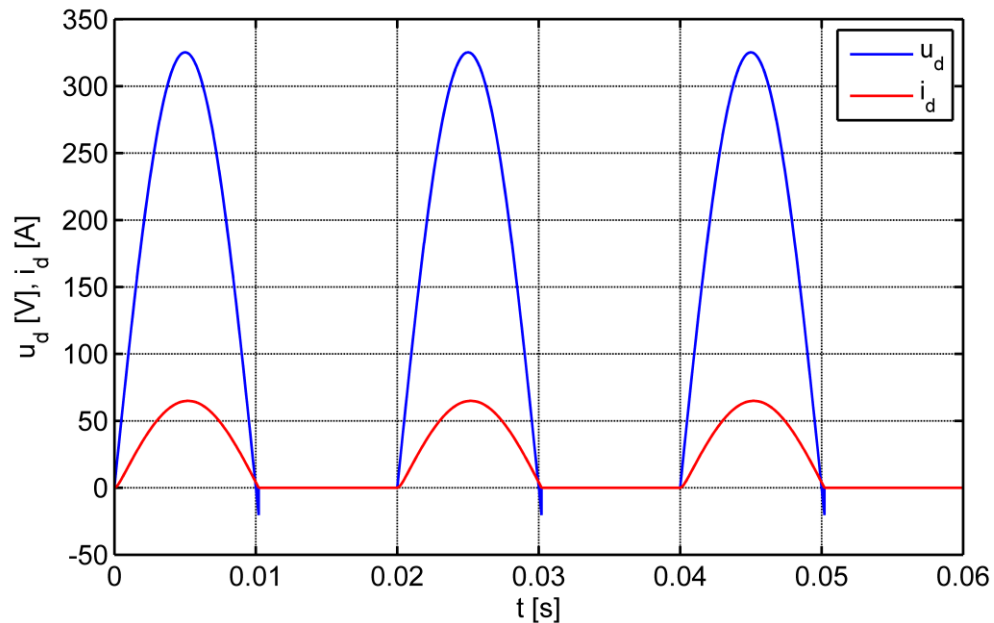
Obr. 6: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 1f uzlového usměrňovače, $R = 5 \Omega$



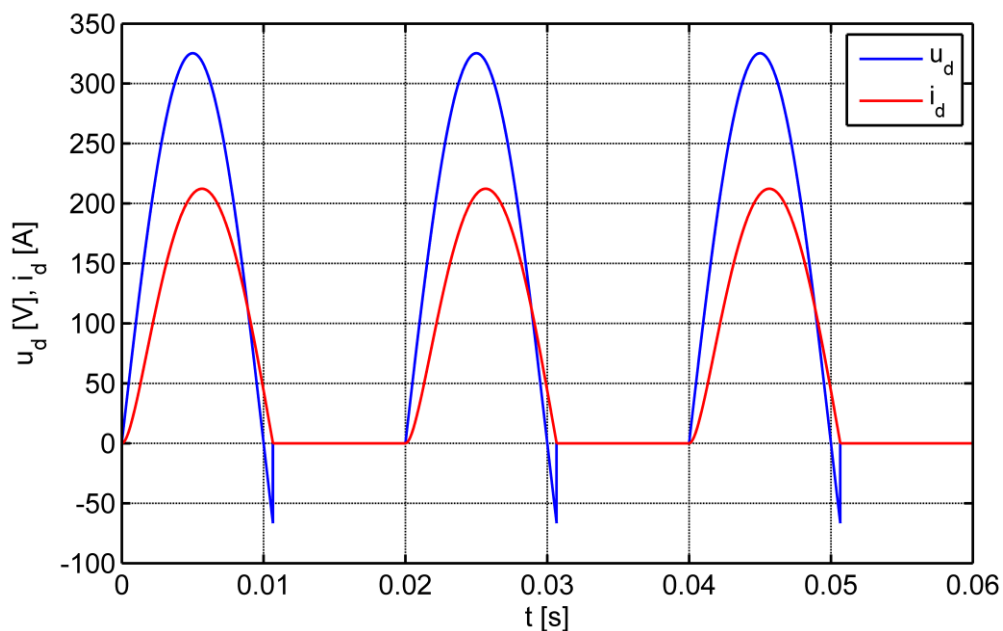
Obr. 7: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 1f uzlového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$

Z obr. 6 a 7 je patrný vliv indukčnosti na průběhy u_d a i_d . Přestože je v obou případech v zátěži zapojen stejně velký odpor R , dosahuje proud RL zátěží nižšího maxima než v případě ohmické zátěže (proudu RL zátěží je více vyhlazen).

Vliv velikosti odporu RL zátěže na průběhy u_d a i_d je patrný při porovnání obr. 8 a 9. Na obr. 8 je graf napětí a proudu neřízeného 1f uzlového usměrňovače zatíženého odporem $R = 5 \Omega$ a indukčností $L = 1 \text{ mH}$ v závislosti na čase. Obr. 9 zobrazuje graf stejných průběhů při zatížení výstupu usměrňovače odporem $R = 1,5 \Omega$ a indukčností $L = 1 \text{ mH}$.



Obr. 8: Graf napětí a proudu zátěží 1f uzlového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$



Obr. 9: Graf napětí a proudu zátěží 1f uzlového usměrňovače, $R = 1,5 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$

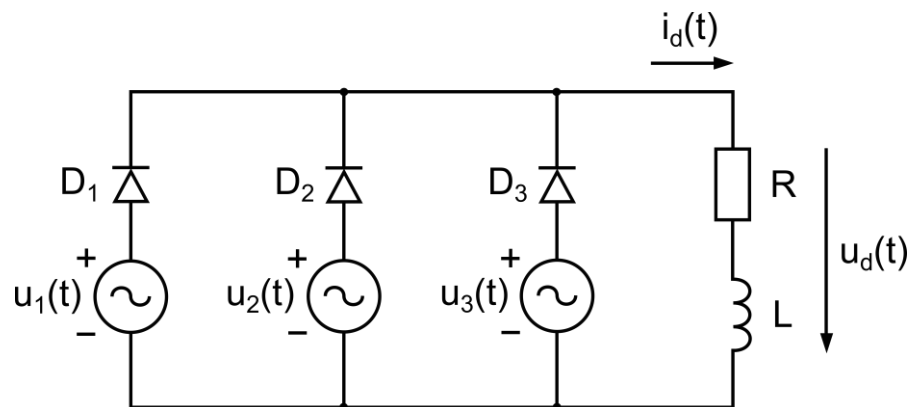
Z porovnání obr. 8 a 9 vyplývá, že velikost připojeného odporu RL zátěže má vliv na komutaci, hodnotu $i_{d\max}$ a průběh u_d . Čím větší je velikost odporu R , tím více je proud

vyhlazen (hodnota i_{dmax} je menší). Energie akumulovaná v indukčnosti je menší, proto k poklesu proudu na nulovou hodnotu dochází rychleji, a napětí u_d je tvořeno menší částí záporné půlvlny napětí u , než při nižší hodnotě odporu.

Ze srovnání obr. 7 a 8 je patrné, že čím větší je hodnota indukčnosti zátěže L , tím pomalejší je nárůst a pokles proudu zátěží. Proud je v případě větší indukčnosti méně zvlněný. S rostoucí velikostí indukčnosti klesá hodnota i_{dmax} a zvětšuje se část záporné půlvlny napětí u , která společně s kladnou půlvlnou napětí u tvoří napětí na zátěži u_d . Tuto vlastnost charakterizuje veličina nazývaná napěťové množství.

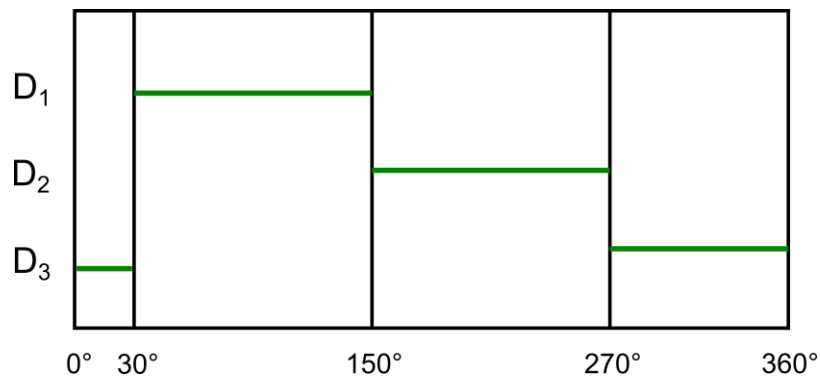
2.1.1.2 Neřízený třífázový usměrňovač v uzlovém spojení

Třífázové uzlové spojení vychází z předchozího typu zapojení. [2] Tři jednofázové zdroje jsou vzájemně spojeny zápornými póly, ke společnému uzlu je připojen jeden vývod zátěže. Ke každému zdroji je anodou sériově připojena dioda, katody diod jsou spojeny do uzlu, ke kterému je připojena rovněž zátěž. Schéma zapojení 3f uzlového usměrňovače s RL zátěží je na obr. 10.



Obr. 10: Schéma zapojení neřízeného 3f uzlového usměrňovače s RL zátěží [2]

Ke komutaci mezi větvemi měniče dochází působením sdružených napětí mezi fázemi 3f zdroje. V závislosti na velikostech okamžitých hodnot fázových napětí přechází vodivost periodicky z jedné větve měniče na druhou. Proud protéká vždy větví, která je připojena k fázovému napětí s nejvyšší okamžitou hodnotou. [2] Každá z diod je sepnuta po dobu jedné třetiny periody. Jednotlivé takty znázorňuje spínací diagram na obr. 11. Ve spínacím diagramu je výhodné vynášet na horizontální osu hodnoty pomocí úhlů (délce jedné periody odpovídá 360°).

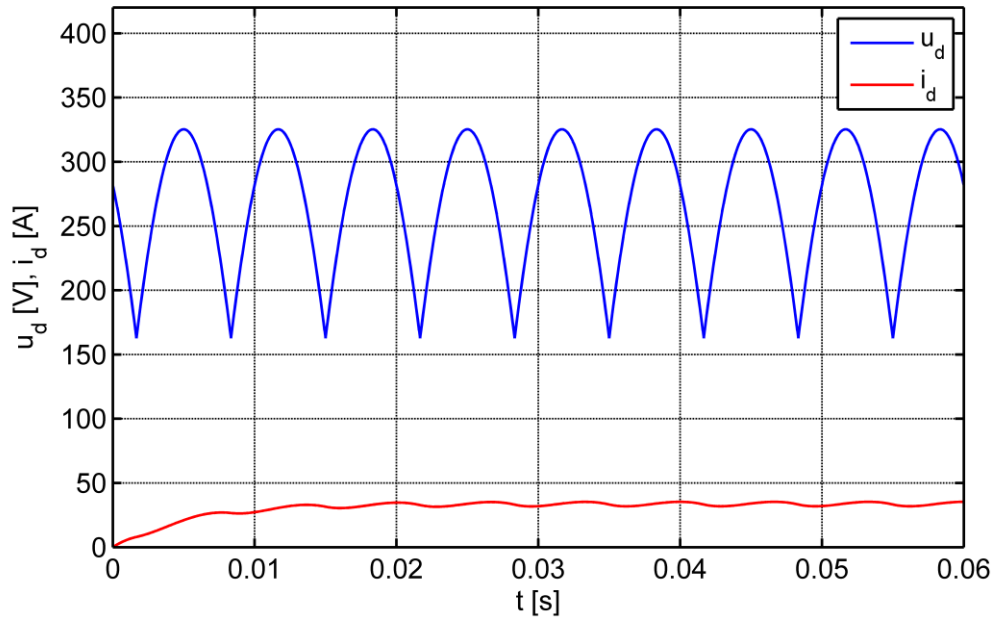


Obr. 11: Spínací diagram neřízeného 1f uzlového usměrňovače

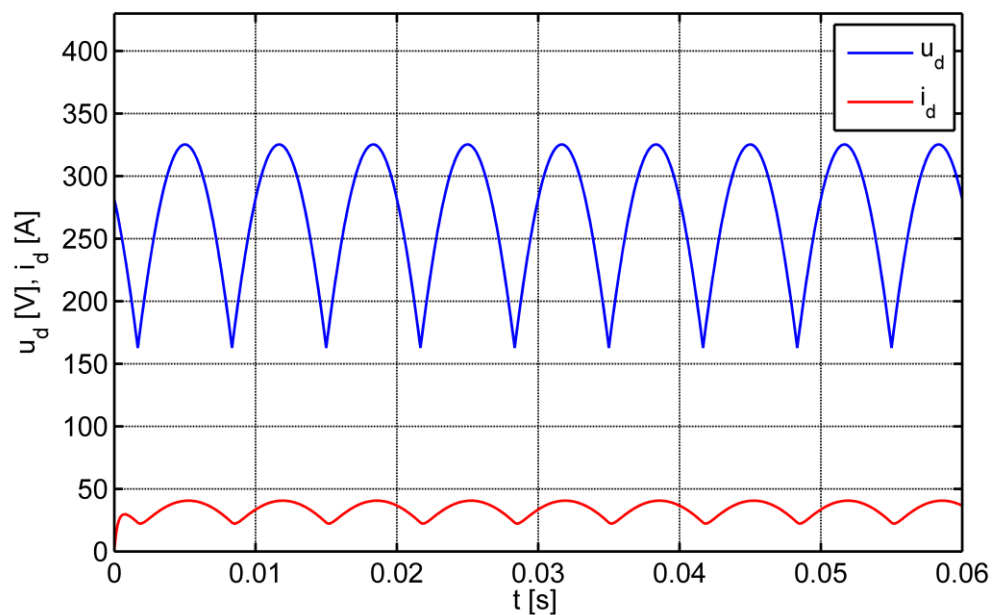
Na zátěži se objevuje napětí u_d , jehož okamžitá hodnota svou velikostí odpovídá okamžité hodnotě fázového napětí zdroje zapojeného v právě vedoucí větvi. Napětí zátěže tedy neklesá na nulovou hodnotu. Charakter zátěže a velikost připojených prvků nemá na jeho velikost vliv. Pulznost 3f uzlového usměrňovače je $p = 3$, proto je tento typ usměrňovače často označován jako trojpulzní. [2]

Charakter zátěže a její parametry ovlivňují průběh proudu zátěží i_d . RL zátěží začíná po zapnutí zdroje protékat proud, který pulzuje v závislosti na pulzaci napětí. Zpočátku je napěťové množství přivedené indukčnosti během jednoho pulzu větší než napěťové množství indukčnosti odčerpané, nárůst proudu během jednoho pulzu je proto větší než jeho pokles a proud obvodem postupně narůstá, dokud nedosáhne ustáleného stavu, který je popsán rovnicí 1.17. Na obr. 12 je graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 8 \Omega$, $L = 0,04 \text{ H}$) neřízeného 3f uzlového usměrňovače v závislosti na čase.

Velikost prvků zátěže ovlivňuje hodnotu $i_{d\max}$ a dobu, za kterou proud zátěží dosáhne ustáleného stavu. Velikost indukčnosti ovlivňuje velikost zvlnění proudu. Čím větší indukčnost je do zátěže zapojena, tím je zvlnění menší (proud je více vyhlazen). Prodlužuje se však doba, za kterou dojde k ustálení proudu. Na obr. 13 je graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 8 \Omega$, $L = 2 \text{ mH}$) neřízeného 3f uzlového usměrňovače v závislosti na čase.



Obr. 12: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 3f uzlového usměrňovače, $R = 8 \Omega$, $L = 0,04 \text{ H}$



Obr. 13: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 3f uzlového usměrňovače, $R = 8 \Omega$, $L = 2 \text{ mH}$

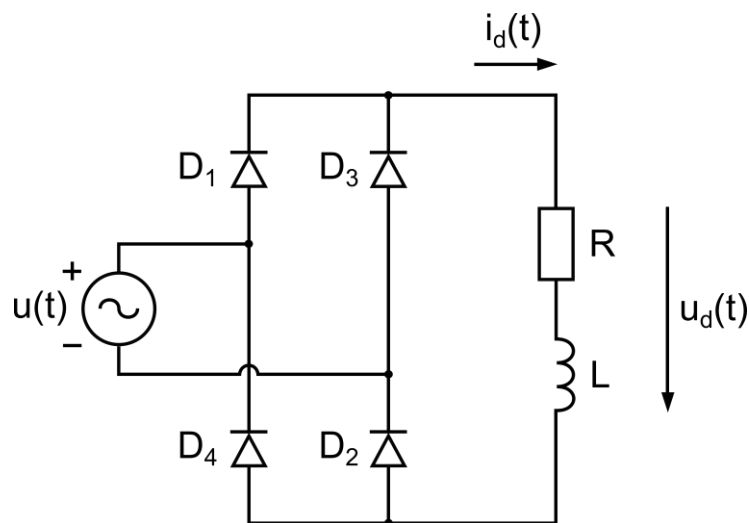
2.1.2 Neřízené usměrňovače v můstkovém spojení

Můstková spojení usměrňovačů umožňují tok elektrické energie v obou směrech, jsou proto označována jako spojení energeticky dvojsměrná. [1] Při použití vhodného napájecího zdroje a potřebného množství součástek lze vytvořit obecně m-fázová můstková spojení, v současné době jsou využívána především 1f a 3f spojení. [2]

Můstkové usměrňovače vznikají sériovým spojením dvou uzlových usměrňovačů, z tohoto důvodu se v souvislosti s můstkovými spojeními zavádí pojmy anodová a katodová komutační skupina. Termín komutační skupina označuje skupinu hlavních větví měniče, které obsahují polovodičové součástky, a jejich cyklická komutace není závislá na komutaci ostatních větví měniče. Komutace anodové a katodové skupiny jsou tedy vzájemně nezávislé. Anodová komutační skupina je tvořena těmi větvemi, jejichž součástky jsou s napájecím zdrojem spojeny svými anodami. Katodovou skupinu tvoří větve měniče se součástkami připojenými ke zdroji svými katodami. Součástky anodové skupiny jsou obvykle označovány lichými číselnými indexy, součástky katodové skupiny pak indexy sudými. Tyto indexy zároveň odpovídají pořadí spínání jednotlivých součástek při chodu měniče. [2]

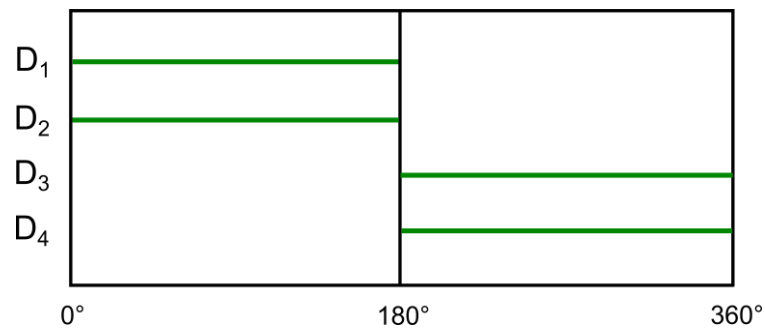
2.1.2.1 Neřízený jednofázový usměrňovač v můstkovém spojení

Obvod neřízeného 1f můstku je tvořen 1f napájecím zdrojem, čtyřmi diodami a zátěží. Toto zapojení je rovněž známo pod názvem Grätzův můstek. Na obr. 14 je zobrazeno schéma tohoto typu usměrňovače s RL zátěží.



Obr. 14: Schéma zapojení neřízeného 1f můstkového usměrňovače s RL zátěží [1]

Při nárůstu napětí zdroje dochází k otevření diod D_1 a D_2 , na zátěži se objevuje napětí u_d a protéká jí proud i_d . Komutace anodové a katodové skupiny probíhá současně, je vyvolána poklesem napětí zdroje k nulové hodnotě, a vodivost přechází do větví, v nichž jsou zapojeny součástky D_3 , D_4 . [2] Na obr 15. je spínací diagram 1f můstku během jedné periody.

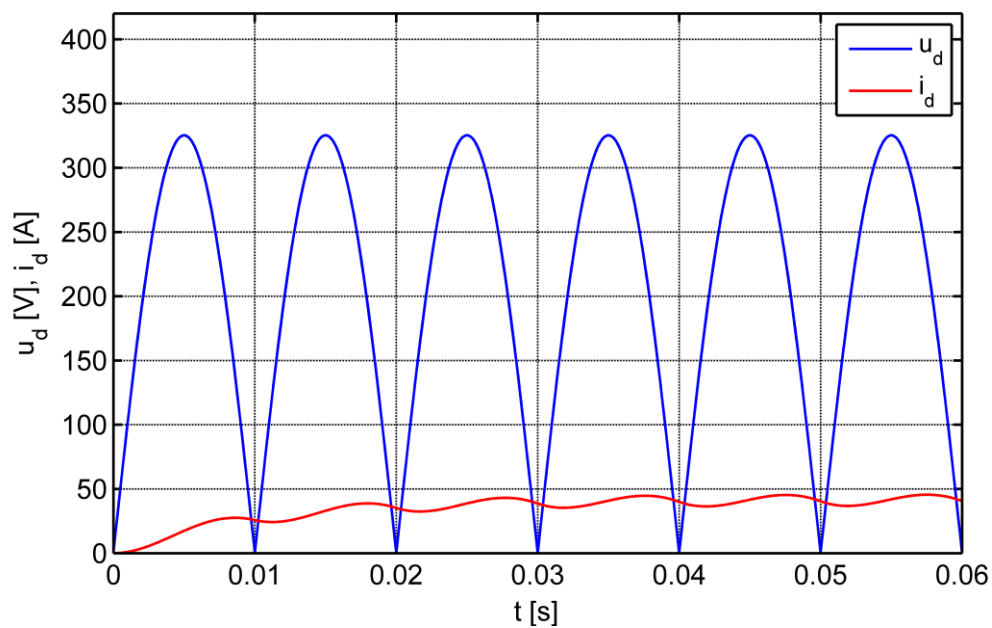


Obr. 15: Spínací diagram neřízeného 1f můstkového usměrňovače

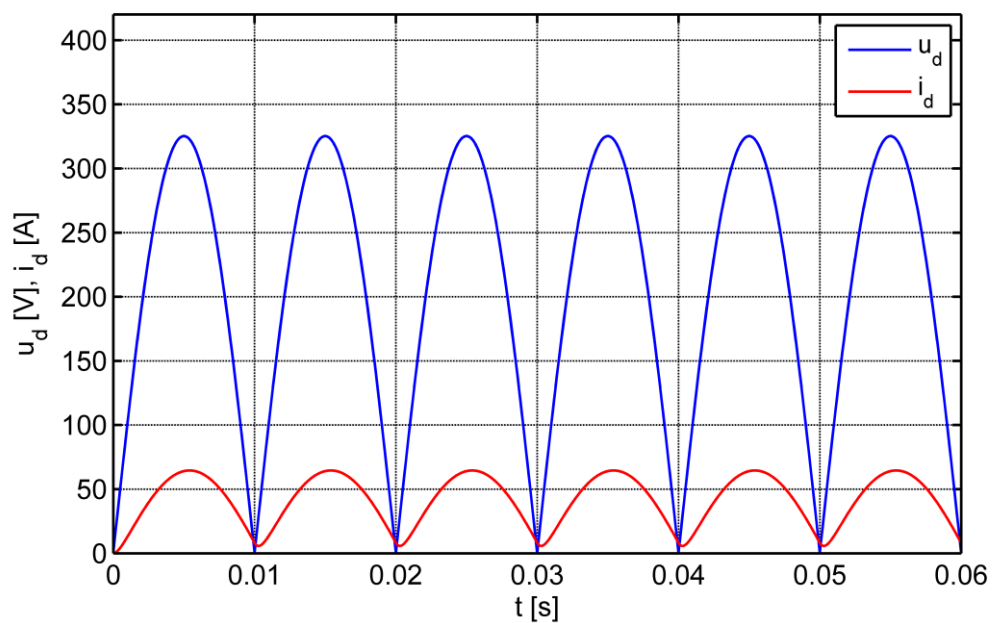
Pulznost tohoto typu usměrňovače je $p = 2$. [2] První pulz napětí zátěže u_d je tvořen kladnou půlvlnou napájecího napětí u . Druhý pulz odpovídá usměrněné záporné půlvlně. Napětí u_d klesá na nulovou hodnotu dvakrát za periodu T . Průběh napětí není ovlivňován charakterem a parametry zátěže.

Usměrněný proud i_d je ovlivňován charakterem a parametry zátěže. Po zapnutí zdroje začíná postupně narůstat proud RL zátěží. Zpočátku je napěťové množství přivedené indukčnosti během jednoho pulzu větší než napěťové množství indukčnosti během stejného pulzu odčerpané, proto proud zátěží postupně narůstá, přestože napětí na zátěži v pravidelných intervalech klesá na nulovou hodnotu. Po určité době nastává ustálený stav popsany rovnicí 1.17. Na obr. 16 jsou graficky zobrazeny průběhy napětí a proudu RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$) neřízeného 1f můstkového usměrňovače v závislosti na čase.

Vliv velikosti prvků zátěže na průběh proudu je stejný jako v případě neřízeného 3f uzlového usměrňovače. Vliv velikosti připojené indukčnosti je patrný při porovnání obr. 16 a 17. Obr. 17 zobrazuje graf průběhů napětí a proudu RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 2 \text{ mH}$) neřízeného 1f můstkového usměrňovače v závislosti na čase. Zvlnění proudu zátěží usměrňovače s menší indukčností je výrazně větší než zvlnění proudu protékajícího zátěží s větší indukčností.



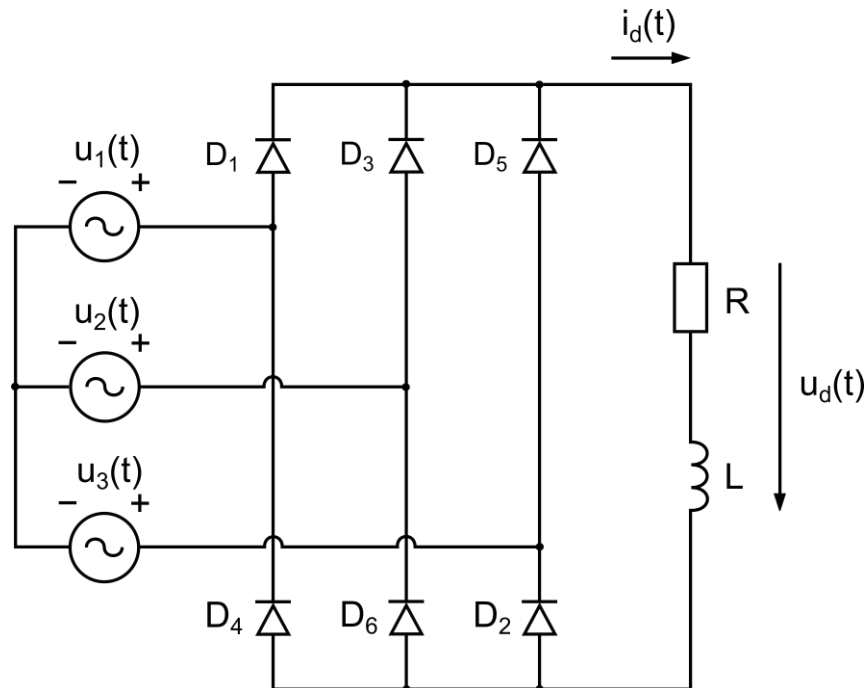
Obr. 16: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 1f můstkového usměrňovače, $R = 5$, $L = 0,05$ H



Obr. 17: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 1f můstkového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 2$ mH

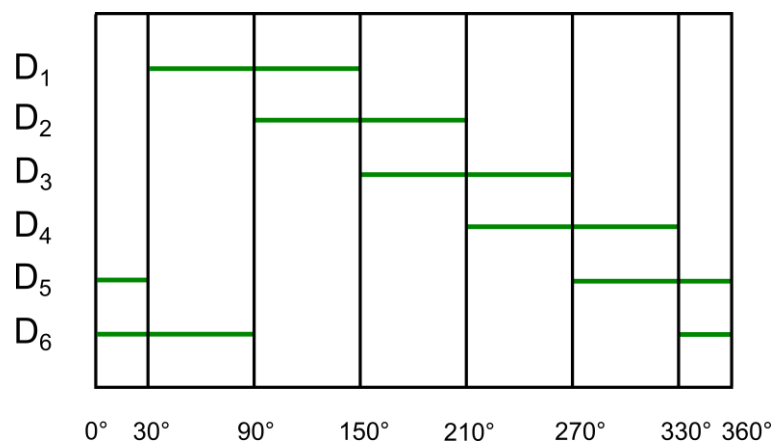
2.1.2.2 Neřízený třífázový usměrňovač v můstkovém spojení

Tento usměrňovač je napájen z 3f napěťového zdroje, který je se zátěží propojen pomocí šesti diod. Schéma tohoto typu zapojení s RL zátěží je na obr. 18.



Obr. 18: Schéma zapojení neřízeného 3f můstkového usměrňovače s RL zátěží [2]

V každém okamžiku je sepnuta jedna součástka z katodové a anodové komutační skupiny. [2] Každá dioda je sepnuta po dobu jedné třetiny periody, dvojice součástek je sepnuta po dobu jedné šestiny periody. Spínací diagram součástek pro jednu periodu je zobrazen na obr. 19.

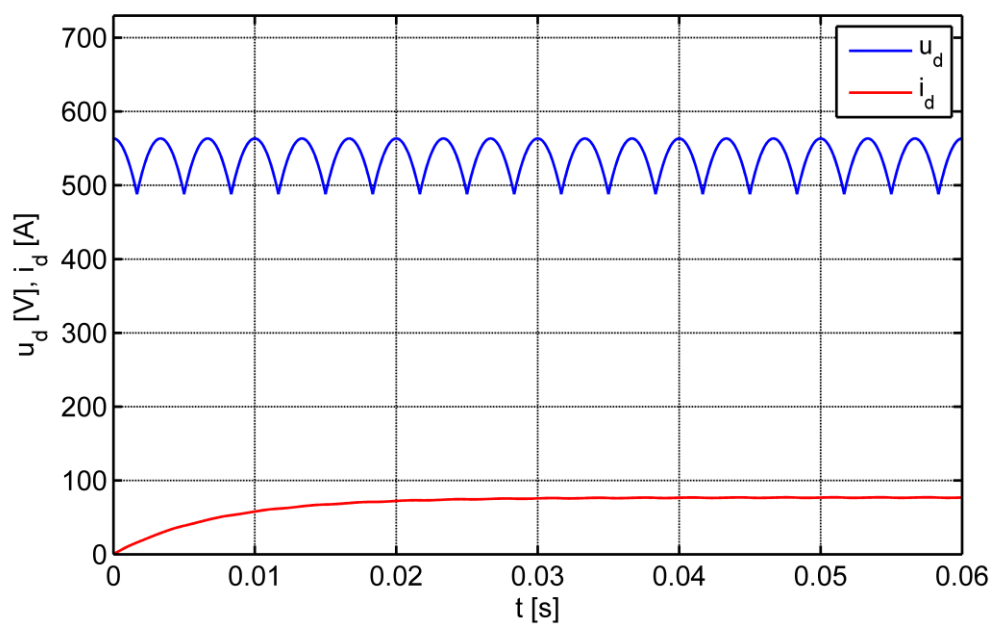


Obr. 19: Spínací diagram neřízeného 3f můstkového usměrňovače

Zdrojem komutačního napětí je sdružené napětí mezi fázemi zdroje. Komutace anodové komutační skupiny je analogická s komutací neřízeného 3f uzlového usměrňovače. Vodivá je vždy větev obsahující diodu, která je svou anodou spojena s fází zdroje s nejvyšší okamžitou hodnotou napětí. Z katodové komutační skupiny vede vždy větev, jejíž dioda je katodou spojena s fází zdroje s nejnižší okamžitou hodnotou napětí. [2]

Pulznost tohoto typu usměrňovače je $p = 6$. [2] Napětí na zátěži u_d dosahuje amplitudy rovné sdruženému napětí zdroje a jeho zvlnění je výrazně menší než u zapojení uvedených v předchozím textu. Průběh napětí není ovlivňován charakterem zátěže ani velikostí připojených součástí.

Charakter zátěže ovlivňuje průběh proudu zátěží i_d stejně jako v případě neřízeného 3f uzlového usměrňovače a neřízeného 1f můstkového usměrňovače Proud RL zátěží po zapnutí zdroje postupně narůstá, dokud nedosáhne ustáleného zvlněného průběhu. Velikost zapojených prvků ovlivňuje velikost i_{dmax} a dobu, za kterou nastane ustálený stav. Velikost připojené indukčnosti má vliv na zvlnění proudu a strmost jeho nárůstu po zapnutí zdroje. Na obr. 20 je znázorněn graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 7 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$) neřízeného 3f můstkového usměrňovače v závislosti na čase.



Obr. 20: Graf napětí a proudu zátěží neřízeného 3f uzlového usměrňovače, $R = 7$, $L = 0,05 \text{ H}$

2.2 Řízené usměrňovače

Výhodou řízených usměrňovačů je možnost ovlivňovat parametry výstupní energie (napětí a proudu zátěží) vhodným spínáním tyristorů, které nahrazují diody neřízených usměrňovačů. Změny jsou realizovány tzv. fázovým řízením - nastavováním řídicího úhlu α [°]. [1] Pulznost jednotlivých zapojení řízených usměrňovačů je stejná jako v případě usměrňovačů neřízených. [2]

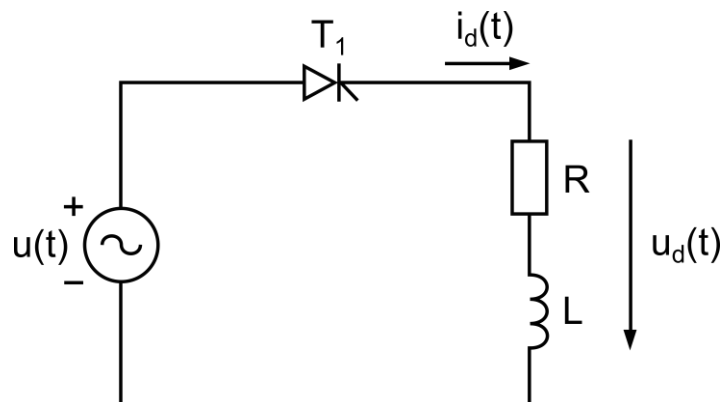
Řídicí úhel určuje fázové resp. časové zpoždění sepnutí tyristoru proti sepnutí diody neřízeného usměrňovače (zpoždění komutace). [2] Převod z hodnoty ve stupních na čas lze provést na základě následující úvahy: Plný úhel je 360° a v harmonickém signálu mu odpovídá délka jedné periody T [s]. Úhel řízení např. 60° tedy odpovídá jedné šestině periody.

Velikost maximálního řídicího úhlu je omezena v důsledku samotné podstaty procesu usměrňování. Pro různé typy zapojení se tedy maximální nastavitelné úhly řízení liší. [2] Při některých hodnotách α se prochází zátěží přerušovaný proud, proto je kromě maximální nastavitelné hodnoty úhlu řízení důležitá také jeho nejvyšší hodnota, při které je proud danou zátěží ještě nepřerušovaný.

2.2.1 Řízené usměrňovače v uzlovém spojení

2.2.1.1 Řízený jednofázový usměrňovač v uzlovém spojení

Schéma tohoto typu usměrňovače s RL zátěží je na obr. 21.

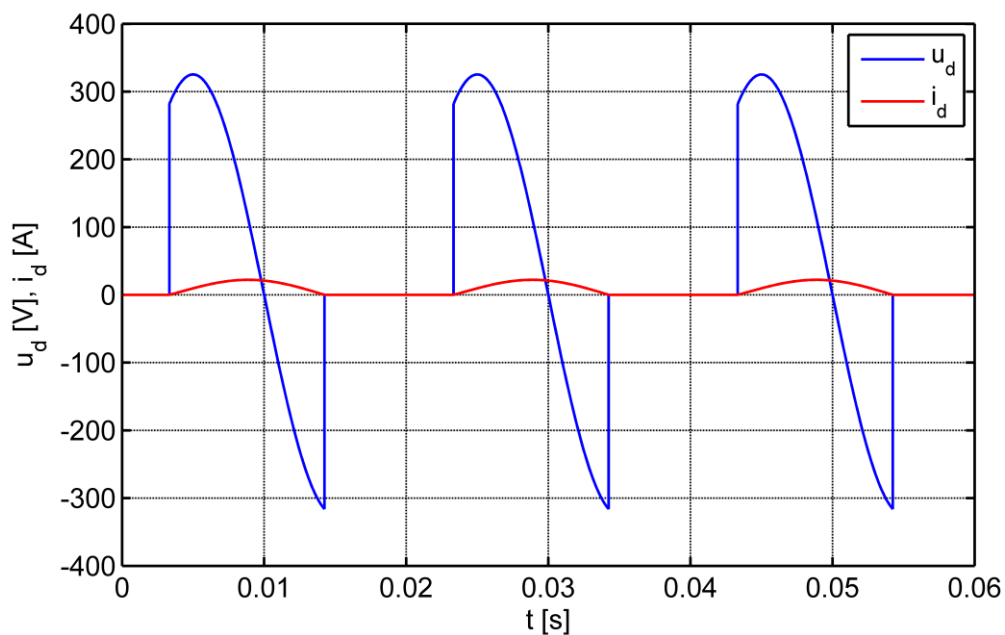


Obr. 21: Schéma zapojení řízeného 1f uzlového usměrňovače s RL zátěží [2]

Na tyristoru se po zapnutí zdroje objevuje blokovací napětí. Aby se obvod stal vodivým a začal jím procházet proud, musí být během první poloviny periody napájecího napětí u vyslán spínací impulz na hradlo tyristoru. [1]

Charakter zátěže a velikost řídicího úhlu ovlivňují průběhy napětí u_d a proudu i_d . V případě RL zátěže následuje po sepnutí tyristoru nárůst proudu obvodem, napětí na tyristoru klesne na nulovou hodnotu a napětí napájecího zdroje u se objevuje na zátěži. Vlivem připojené indukčnosti nedojde k vypnutí tyristoru v okamžiku poklesu napětí na nulovou hodnotu v polovině periody, ale až v okamžiku, kdy obvodem přestane protékat proud. Z tohoto důvodu se na zátěži v čase mezi průchodem napětí nulou a vypnutím tyristoru objevuje záporné napětí. [1] Vliv velikosti připojených prvků je stejný jako u neřízeného 1f uzlového usměrňovače.

Na obr. 22 je zobrazen graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$) řízeného 1f uzlového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení $\alpha = 60^\circ$.



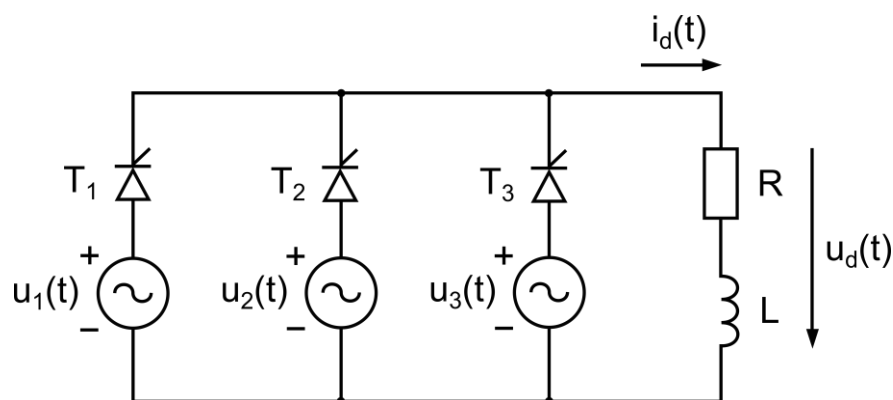
Obr. 22: Graf napětí a proudu řízeného 1f uzlového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 0,05 \text{ H}$, $\alpha = 60^\circ$

Ve srovnání s grafem neřízeného 1f uzlového usměrňovače na obr. 7 (zátěž má stejné parametry) je proud zátěži méně zvlňný, napětí na zátěži je tvořeno pouze částí kladné půlvlny napájecího napětí (dáno velikostí α) a stejnou částí záporné půlvlny, jako v případě

neřízeného usměrňovače. Změnou zátěže ani pomocí řízení se při tomto spojení nelze vyhnout přerušovanému proudu.

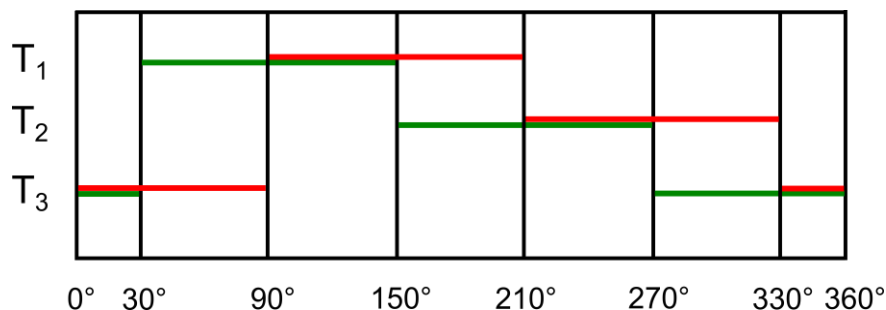
2.2.1.2 Řízený třífázový usměrňovač v uzlovém spojení

Na obr. 23 je schéma tohoto usměrňovače s RL zátěží.



Obr. 23: Schéma zapojení řízeného 3f uzlového usměrňovače s RL zátěží [2]

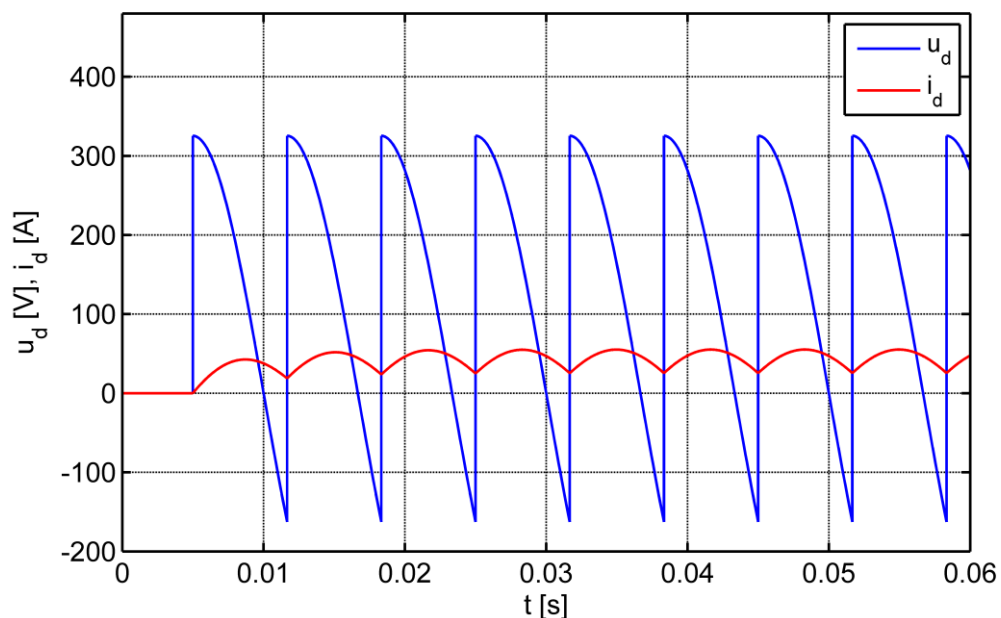
Princip funkce měniče byl již částečně popsán v textu popisujícím činnost neřízeného 3f uzlového usměrňovače. Blokovací napětí je vždy na tyristoru, který je spojen s fází zdroje s nejvyšší okamžitou hodnotou napětí. Je-li tyristor zatížen blokovacím napětím, je třeba na jeho hradlo přivést spínací impuls, aby došlo k jeho sepnutí a obvod se stal vodivým. Tyristory jsou spínány cyklicky po celou dobu, kdy je měnič v chodu. [2] Na obr. 24 je znázorněn spínací diagram řízeného 3f uzlového usměrňovače při úhlu řízení 60° . Zelené křivky zobrazují dobu, po kterou je na jednotlivé tyristory přivedeno blokovací napětí (tyristory je možno sepnout), červené křivky zobrazují dobu, kdy jsou tyristory sepnuty.



Obr. 24: Spínací diagram řízeného 3f uzlového usměrňovače, $\alpha = 60^\circ$

Charakter zátěže, velikost připojených prvků a velikost úhlu řízení ovlivňují průběh napětí a proudu zátěží usměrňovače. Se zvyšujícím se úhlem řízení klesá střední hodnota napětí na zátěži (a také střední hodnota proudu zátěží), nedochází však ke změně kmitočtu 1. harmonické střídavé složky, pulznost řízeného 3f uzlového usměrňovače je proto stejná jako pulznost neřízeného usměrňovače ve stejném zapojení. [2] Velký úhel řízení, malá indukčnost nebo velký odpor mohou zapříčinit přerušovaný proud zátěží. Aby byl proud nepřerušovaný, je třeba vhodně zvolit všechny tři parametry.

Na obr. 25 je graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 3 \Omega$, $L = 0,015 \text{ H}$) 3f uzlového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení $\alpha = 60^\circ$.



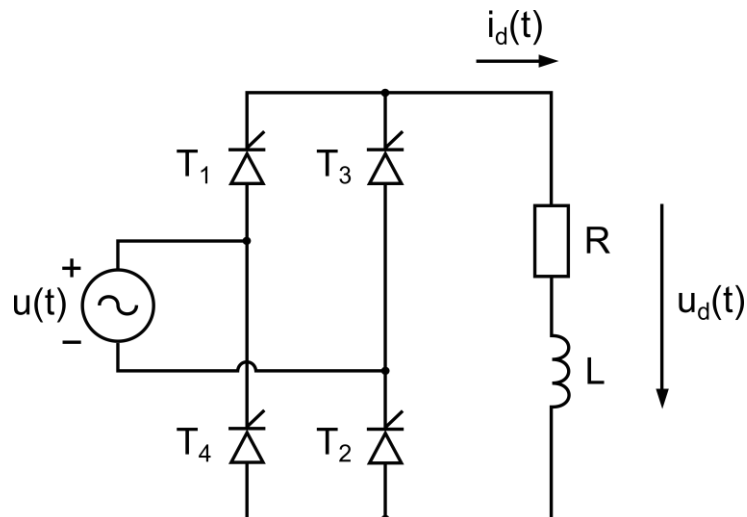
Obr. 25: Graf napětí a proudu zátěží řízeného 3f uzlového usměrňovače, $R = 3 \Omega$, $L = 0,015 \text{ H}$, $\alpha = 60^\circ$

Při daném úhlu řízení a velikosti zátěže dochází k pravidelnému poklesu napětí až do záporných hodnot, proud však zůstává spojitý. Bude-li na výstup usměrňovače připojena stejná zátěž, ale zvětší se úhel řízení, bude napětí klesat na nižší hodnotu a proud již bude přerušovaný. Zvětšení střední hodnoty napětí a proudu lze docílit snížením úhlu řízení.

2.2.2 Řízené usměrňovače v můstkovém spojení

2.2.2.1 Řízený jednofázový usměrňovač v můstkovém spojení

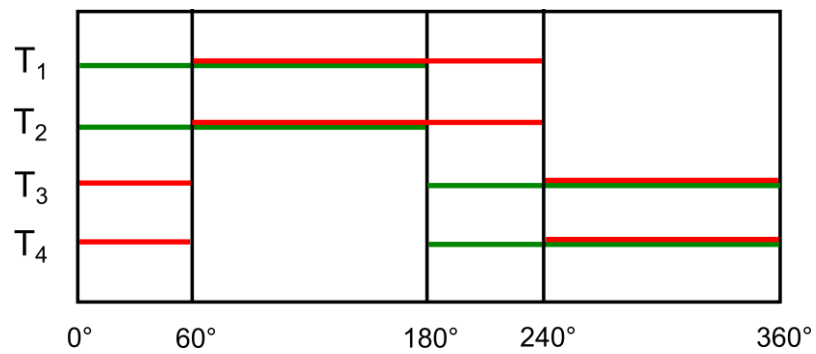
Schéma řízeného 1f můstku s RL zátěží je na obr. 26.



Obr. 26: Schéma zapojení řízeného 3f můstkového usměrňovače s RL zátěží [2]

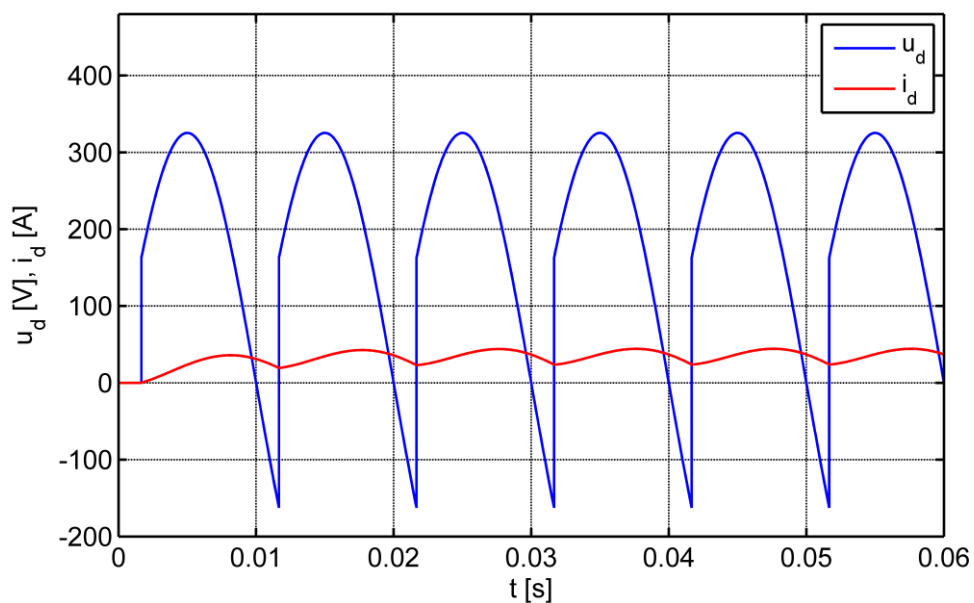
V průběhu první poloviny periody napájecího napětí u je na tyristorech T_1 a T_2 blokovácí napětí. Pro bezchybný chod měniče je třeba, aby byl na hradla obou tyristorů přiveden řídicí impuls ve stejném okamžiku. K vypnutí těchto součástek dochází až poté, co dojde k sepnutí druhé dvojice tyristorů T_3 a T_4 . Na jejich hradla je přiveden řídicí impuls (opět ve stejném okamžiku na oba tyristory) v průběhu záporné půlvlny napětí, tedy během druhé poloviny periody. Nastavováním řídicího úhlu je ovlivňován okamžik komutace a tím i průběhy výstupních veličin na zátěži. [2]

Spínací diagram řízeného 1f můstku při $\alpha = 60^\circ$ je na obr. 27. Zelené křivky značí dobu, po kterou je na tyristorech blokovácí napětí, červené křivky značí dobu, po kterou jsou součástky sepnuty při daném úhlu řízení.



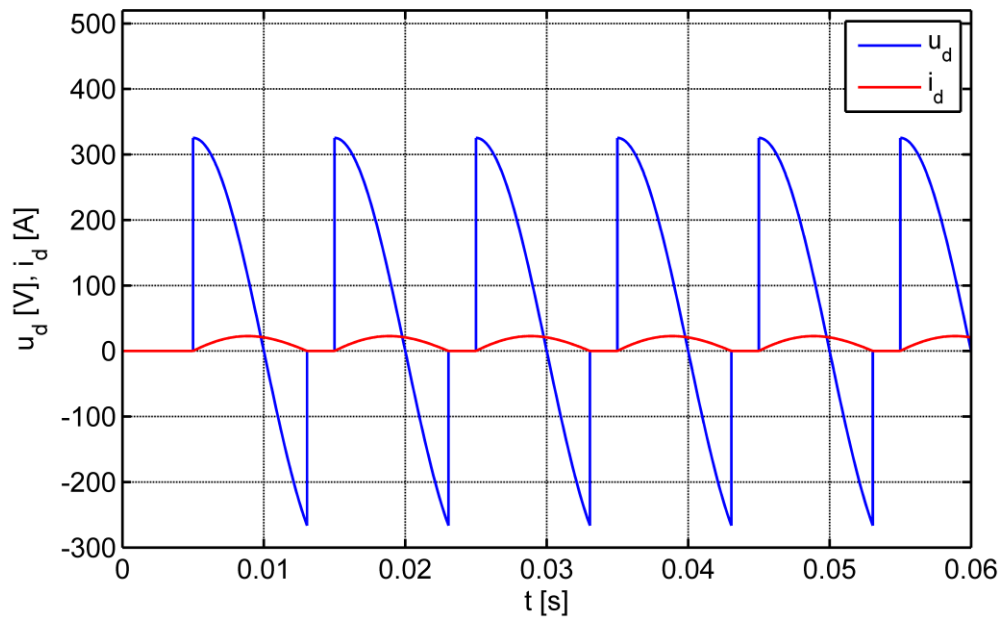
Obr. 27: Spínací diagram řízeného 1f můstkového usměrňovače, $\alpha = 60^\circ$

Kromě velikosti řídicího úhlu jsou průběhy napětí a proudu zátěží usměrňovače ovlivňovány také charakterem zátěže a velikostí připojených prvků. Střední hodnota napětí a proudu je při stejném zatížení výrazně menší než v případě neřízeného 1f můstku. Napětí na zátěži řízeného 1f můstku klesá v pravidelných intervalech do záporných hodnot, tomu se nelze vyhnout ani při zmenšení úhlu řízení. Čím větší je úhel řízení, tím nižších hodnot napětí nabývá. Velký úhel řízení, malá indukčnost nebo velký odpor mohou zapříčinit přerušovaný proud zátěží. Aby byl proud nepřerušovaný, je třeba vhodně zvolit všechny tři parametry. Na obr. 28 je graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$) řízeného 1f můstkového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení 30° .



Obr. 28: Graf napětí a proudu zátěží řízeného 1f můstkového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$, $\alpha = 30^\circ$

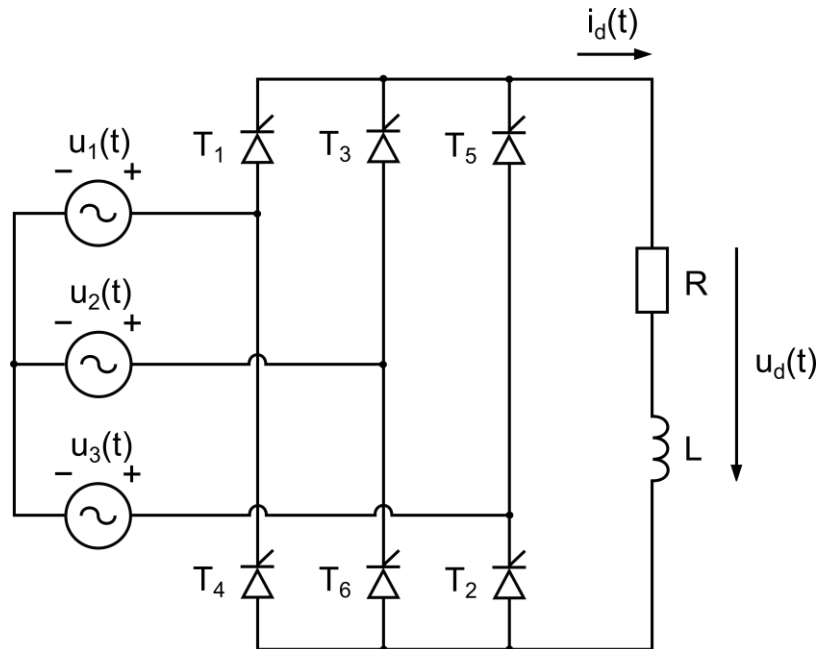
Na obr. 29 jsou vykresleny napětí a proud RL zátěží ($R = 5 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$) řízeného 1f můstkového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení $\alpha = 60^\circ$. Z grafu je patrné, že větší úhel řízení vyvolává při stejném zatížení přerušovaný proud.



Obr. 29: Graf napětí a proudu zátěží řízeného 1f můstkového usměrňovače, $R = 5 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$, $\alpha = 60^\circ$

2.2.2.2 Řízený třífázový usměrňovač v můstkovém spojení

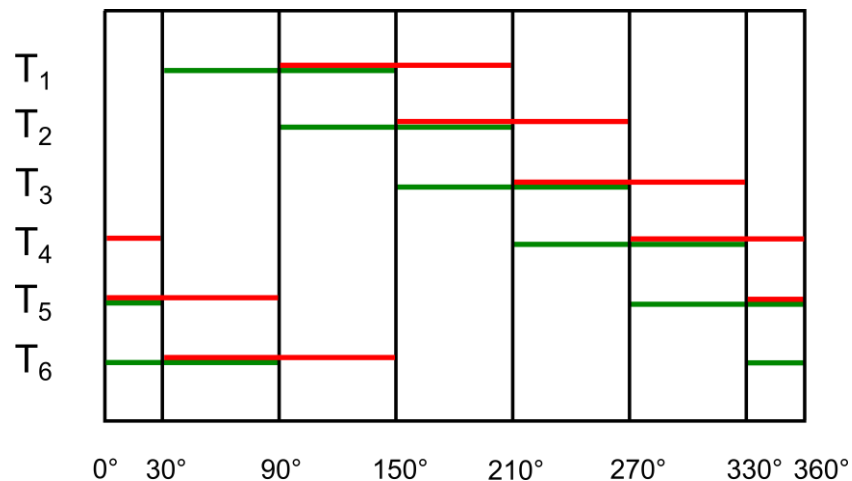
Na obr. 30 je schéma řízeného 3f můstku s RL zátěží.



Obr. 30: Schéma zapojení řízeného 3f můstkového usměrňovače s RL zátěží [2]

Na tyristorech řízeného 3f můstku se objevují blokovací napětí ve stejných časech, kdy jsou sepnuty jednotlivé diody neřízeného 3f můstku. V intervalu, kdy je na tyristoru blokovací napětí, je třeba přivést řídicí impuls na jeho hradlo. Komutace jsou proti neřízenému 3f můstku fázově zpožděny o řídicí úhel α . [2]

Spínací diagram 3f můstku při $\alpha = 60^\circ$ je na obr. 31. Zelené křivky značí dobu, po kterou je na tyristorech blokovací napětí, červené křivky značí dobu, po kterou jsou součástky sepnuty při daném úhlu řízení.



Obr. 31: Spínací diagram řízeného 3f můstkového usměrňovače, $\alpha = 60^\circ$

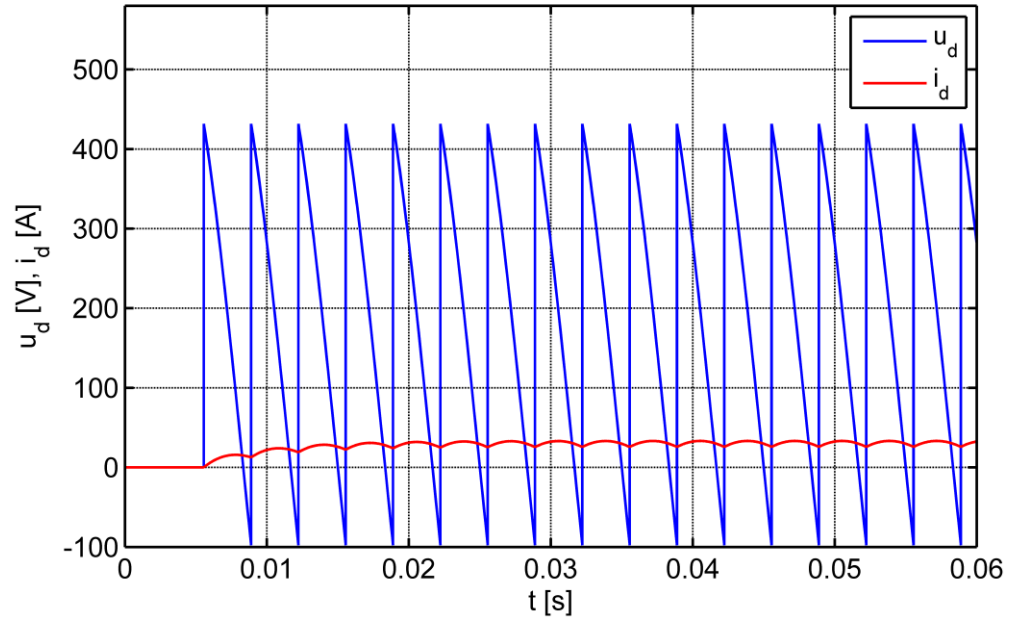
Napětí na zátěži u_d je ovlivňováno zejména úhlem řízení, charakter zátěže ani parametry připojených prvků na něj nemají vliv, pokud je úhel řízení menší než 60° . Se zvyšující se hodnotou řídicího úhlu klesá střední hodnota napětí U_d . Je-li velikost řídicího úhlu $\alpha = 60^\circ$, napětí v pravidelných intervalech klesá na nulovou hodnotu (šestkrát za periodu napájecího napětí). Při větším úhlu řízení napětí pravidelně klesá do záporných hodnot, přičemž platí, že čím větší je úhel řízení při stejném zatížení, tím nižší hodnoty napětí nabývá. Zároveň je napětí ovlivňováno také velikostí prvků zátěže, pokud je proud přerušovaný. Nejnižší hodnota napětí se při přerušovaném proudu snižuje s rostoucí velikostí indukčnosti a se snižující se velikostí odporu.

Průběh proudu je ovlivňován nejen velikostí řídicího úhlu, ale také charakterem a parametry zátěže. Velký úhel řízení, malá indukčnost nebo velký odpor mohou zapříčinit přerušovaný proud zátěží. Aby byl proud nepřerušovaný, je třeba vhodně zvolit všechny tři parametry.

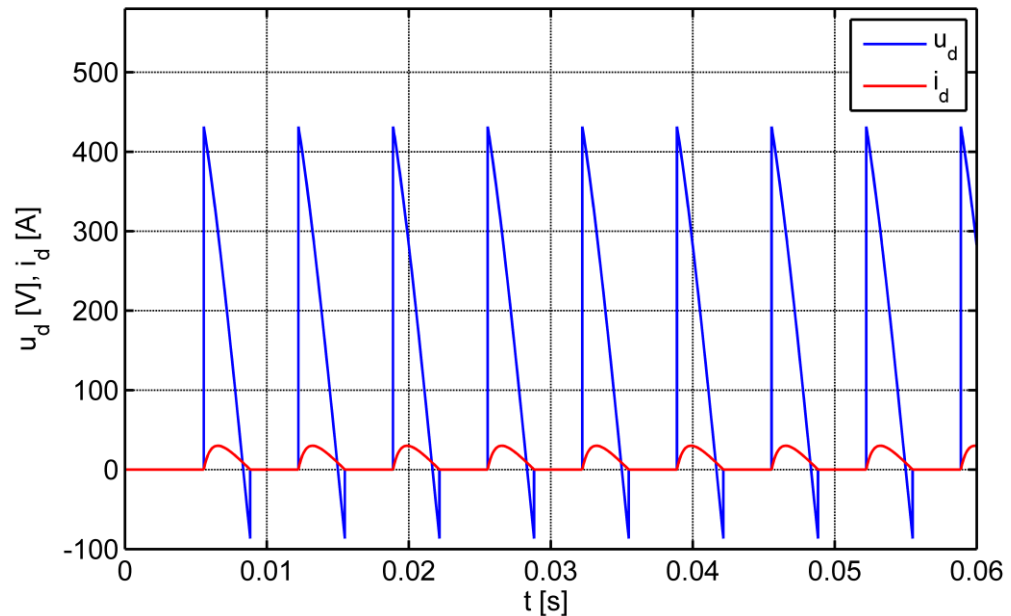
Na obr. 32 je zobrazen graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 6 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$) řízeného 3f můstkového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení $\alpha = 70^\circ$. Proud zátěží je nepřerušovaný.

Změna průběhů napětí a proudu vyvolaná změnou parametrů zátěže je patrná při porovnání obr. 32 a obr. 33. Na obr. 33 je zobrazen graf napětí a proudu RL zátěží ($R = 10 \Omega$,

$L = 5 \text{ mH}$) řízeného 3f můstkového usměrňovače v závislosti na čase při úhlu řízení $\alpha = 70^\circ$. Proud je přerušovaný a nejnižší hodnota napětí je větší než na obr. 32.



Obr. 32: Graf napětí a proudu zátěží řízeného 3f můstkového usměrňovače, $R = 6 \Omega$, $L = 0,03 \text{ H}$, $\alpha = 70^\circ$



Obr. 33: Graf napětí a proudu zátěží řízeného 1f můstkového usměrňovače, $R = 10 \Omega$, $L = 5 \text{ mH}$, $\alpha = 70^\circ$

3 MATLAB, Simulink, PLECS

Pro simulace jednotlivých druhů usměrňovačů a uživatelské aplikace bylo využito nástrojů MATLAB/Simulink. V následující části jsou popsány jednotlivé simulační nástroje.

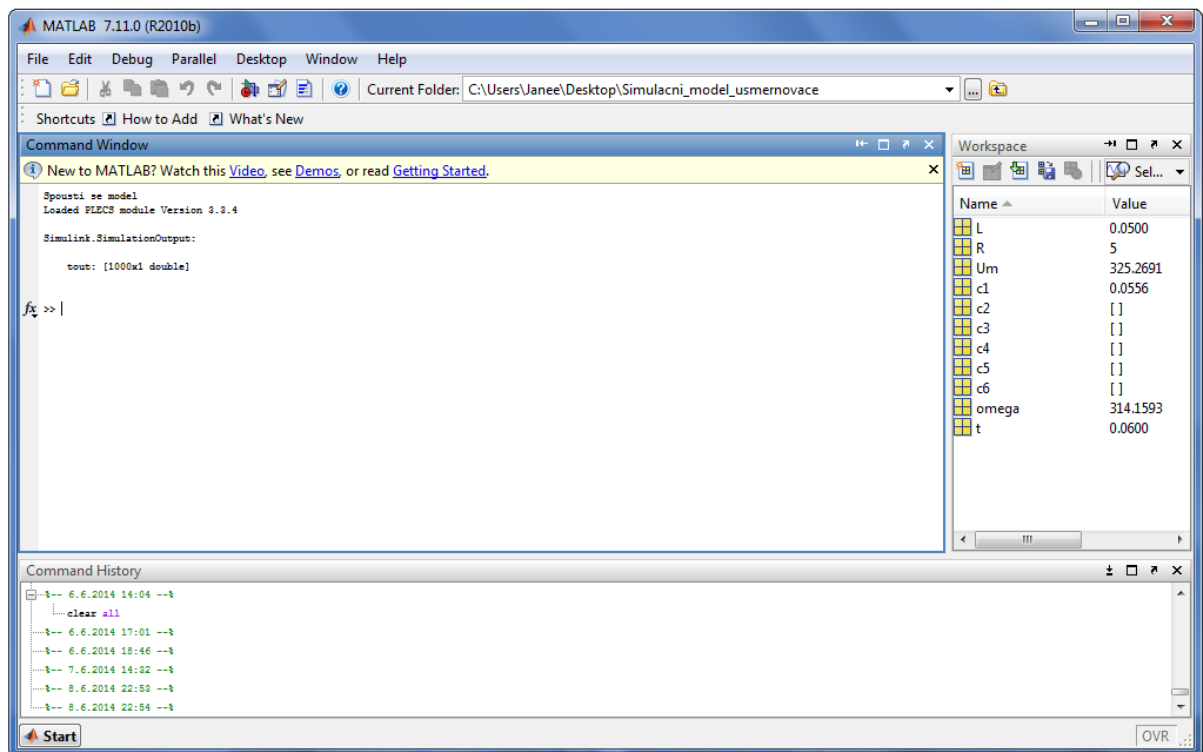
3.1 MATLAB

Tento výkonný výpočetní software byl poprvé představen firmou The Mathworks, Inc. v roce 1984. Název MATLAB je zkratkou z anglického matrix laboratory a vystihuje charakter proměnných, se kterými program pracuje (matice). [7] MATLAB má široké spektrum použití ve všech technických oblastech. Umožňuje např. zpracovávání a vizualizaci dat získaných měřeními nebo simulování a modelování problémů z oblasti matematiky, fyziky, elektrotechniky a strojního inženýrství. [7] Velkou oblíbenost u uživatelů si MATLAB získal zejména tím, že součástí programu jsou základní matematické funkce (např. mocnina, odmocnina, absolutní hodnota aj.) a také složitější funkce, které umožňují např. řešení soustav lineárních či diferenciálních rovnic. Základní verzi MATLABu lze rozšířit o tzv. toolboxy, které obsahují funkce ze specifického vědního oboru. [7] Vestavěné funkce značně urychlují řešení daného problému ve srovnání s jinými programy, ve kterých je třeba nadefinovat vlastní funkce (např. v jazyce C nebo Pascal).

Pracovní prostředí je obvykle tvořeno třemi okny. Jejich pozice může uživatel libovolně měnit. Okno Command Window slouží k zadávání příkazů z příkazové řádky (tyto příkazy jsou ihned prováděny). Jsou zde zobrazovány systémová hlášení a objevuje se zde rovněž odezva programu na zadaný příkaz. Okno Workspace představuje pracovní prostor, ve kterém jsou zobrazovány proměnné. Lze jej přepnout na okno Current Directory, které zobrazuje seznam v aktuální adresáři. Třetím oknem je Command History a zobrazuje historii provedených příkazů. [7] Pracovní plocha MATLAB je zobrazena na obr. 34.

Pro zadávání jednoduchých příkazů a jejich okamžité provedení lze využít příkazový řádek. Při řešení složitějších problémů je třeba provádět postupně velké množství příkazů, proto je využití příkazové řádky značně nepraktické. Efektivním řešením je vytvoření m-souboru, který obsahuje zdrojový text k provedení všech příkazů. Lze vytvářet jednoduché skripty, nebo složitější funkce. Funkce mohou být volány v rámci skriptu. Po spuštění m-souboru dojde k provedení všech příkazů, výsledky jsou zobrazeny v okně Command Window. [7]

MATLAB lze rozšířit o funkční nadstavby, které mají obvykle odlišný způsob ovládání. Mezi ně patří např. Simulink [7]



Obr. 34: Pracovní plocha MATLAB

3.2 Simulink

Simulink je určen především k simulaci chování dynamických systémů. Způsob ovládání je značně odlišný od ovládání MATLABu. Příkazy a funkce jsou zadávány pomocí grafických bloků s nastavitelnými parametry, Simulink lze proto využívat samostatně. Pro simulování složitých systémů je však potřeba znalost MATLABu. [8]

Simulink lze otevřít z příkazové řádky Command Window nebo kliknutím na ikonu v horní části MATLABu. Nový model může být v Simulinku založen např. pomocí File → New → Model. V okně Simulink Library Browser jsou zobrazeny knihovny grafických bloků. Vybraný blok lze tažením myši přetáhnout do vytvořeného modelu. Bloky jsou v modelu vzájemně propojovány pomocí myši. Po rozkliknutí bloku se objeví nové okno Block Parameters, ve kterém je možné nastavovat parametry bloku. Kromě parametrů jednotlivých bloků je třeba nastavit také parametry simulace. Délka simulace je nastavována v horní části modelu, kde je pro ni připraveno (již vyplněné) editační pole. Podrobnější

nastavení simulace lze provést kliknutím na ikonu na liště modelu Simulation → Configuration Parameters. Zde je možné nastavovat kromě délky simulace také krok simulace aj. Spuštění simulace lze provést tlačítkem Start simulation v horní části modelu nebo přes Simulation → Start.

3.3 PLECS

PLECS je simulační software pro výkonovou elektroniku, který byl vyvinut společností Plexim. [9] K dispozici je jako samostatný program nebo v podobě vestavěné knihovny doplňující základní knihovny Simulinku.

Pokud je PLECS součástí knihovny Simulinku, je do modelu vkládán blok PLECS Circuit. Po otevření bloku je zobrazeno nové okno představující simulační prostředí PLECS. Do něj jsou vkládány bloky z knihovny PLECS - Components. Nastavení parametrů bloků je stejné jako v případě bloků v Simulinku. Komunikace mezi prostředím PLECS a Simulink je zprostředkována pomocí portů Out a In.

4 Simulace

V této kapitole je popsána tvorba simulací v prostředí MATLAB/Simulink s využitím knihovny PLECS. Jelikož je tvorba simulačních modelů jednotlivých zapojení analogická, je v následujícím textu popsán pouze příklad simulace neřízeného 3f můstkového usměrňovače a řízeného 1f můstkového usměrňovače. Poslední část kapitoly je věnována popisu uživatelské aplikace, která slouží ke spouštění všech vytvořených modelů a nastavování parametrů simulace a jednotlivých bloků.

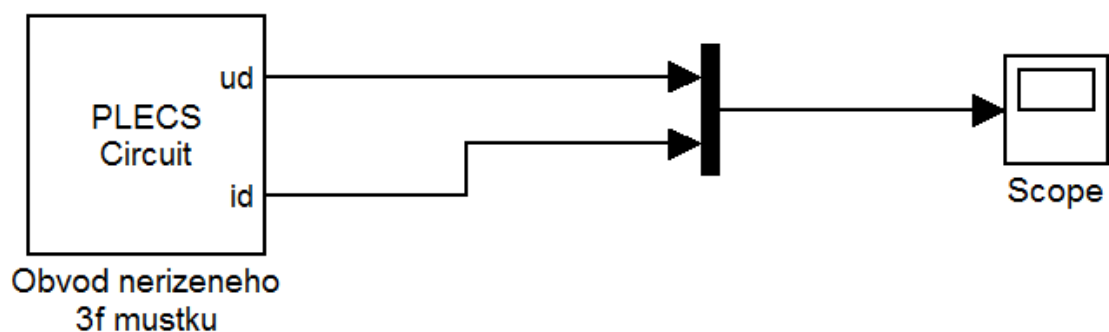
Pro vizualizaci výstupních signálů byl použit Simulink. Řízení a obvody usměrňovačů byly vytvořeny pomocí knihovny PLECS.

4.1 Vizualizace výstupních signálů

K zobrazení průběhů simulací byl použit blok Scope. Po rozkliknutí bloku jsou v novém okně graficky zobrazeny průběhy výstupních signálů. Pomocí tlačítek Zoom, Zoom X-axis a Zoom Y-axis v levém horním rohu je možné zobrazit detaily průběhů. Po stisknutí tlačítka Autoscale je zobrazen celý průběh simulace. Nastavení bloku (přes pravé tlačítko myši) umožňuje rozdělení zobrazovaných průběhů do více grafických oken, která jsou situována pod sebou.

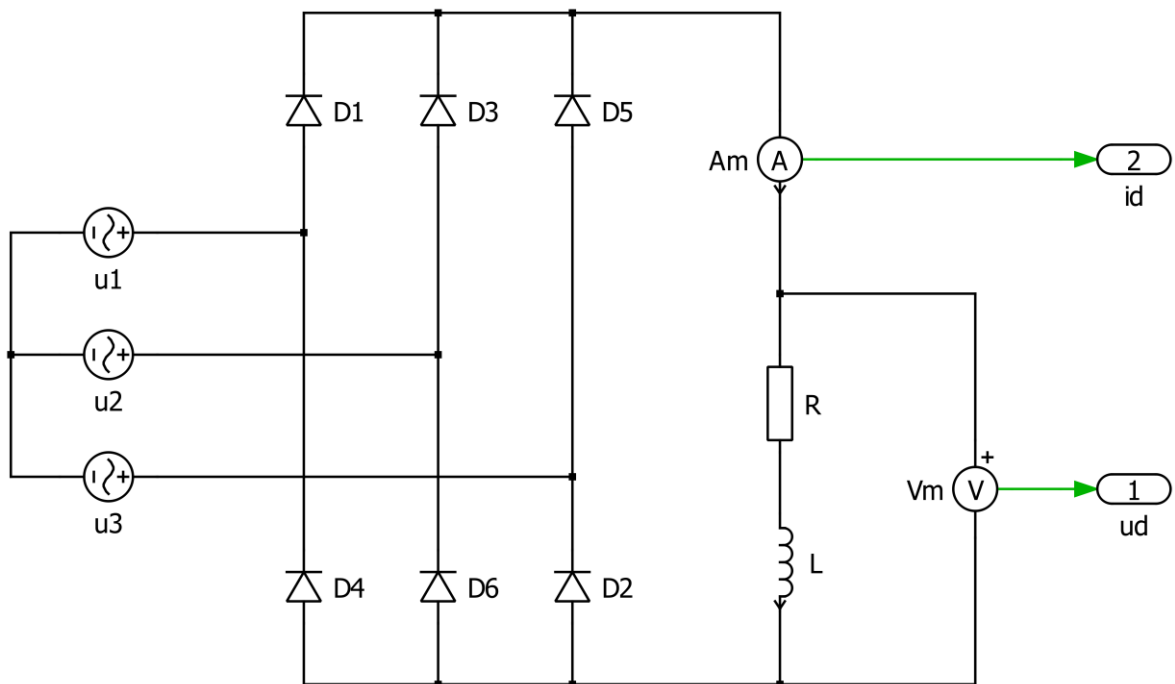
4.2 Simulace neřízených usměrňovačů

Model neřízeného usměrňovače v prostředí Simulink, PLECS je tvořen třemi propojenými bloky. Model neřízeného 3f můstkového usměrňovače je zobrazen na obr. 35.



Obr. 35: Schéma simulačního modelu neřízeného 3f můstkového usměrňovače v prostředí Simulink

Do simulačního prostředí PLECS (vytvořeného blokem PLECS Circuit) jsou vkládány součástky z knihovny PLECS Electrical Components. Součástky jsou vzájemně propojeny tak, aby zapojení obvodu odpovídalo schématu uvedenému v kapitole 2 na obr. 18. Aby byla umožněna vizualizace dat v prostředí Simulink, musí být obvod doplněn o součástky reprezentující přístroje pro měření napětí a proudu. Výsledné zapojení je na obr. 36.



Obr. 36: Schéma obvodu neřízeného 3f můstkového usměrňovače v prostředí PLECS

3f napájecí zdroj je vytvořen ze tří střídavých napěťových zdrojů (Voltage Source AC). Pro tyto bloky jsou nastavovány tři parametry - amplituda napětí (Amplitude) [V], úhlový kmitočet (Frequency) [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] a fázový posuv (Phase) [rad]. Při jejich propojování je třeba dbát na správnou orientaci znamének, která udávají počáteční polaritu svorek zdrojů při spuštění simulace.

Diody (Diode) jsou považovány za ideální (nulové propustné napětí atd.), proto nejsou jejich parametry nastavovány.

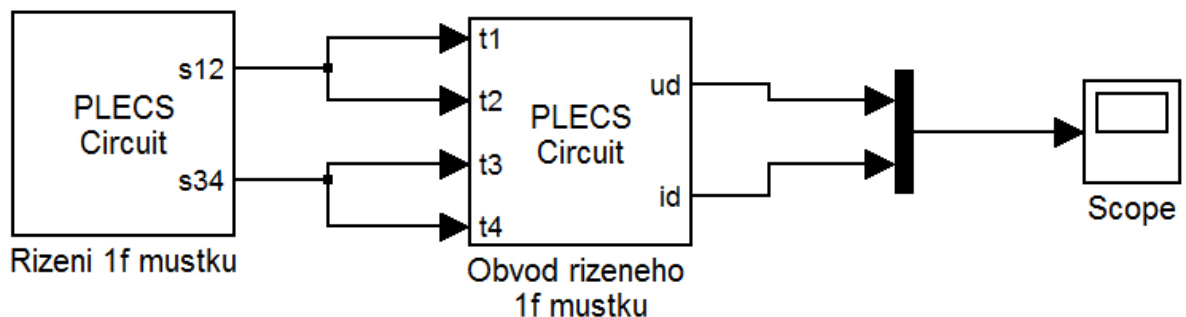
Zátěž je vytvořena odporem (Resistor) a indukčností (Inductor). Pro odpor je nastavována jeho velikost Resistance [Ω]. Indukčnost musí být v obvodu zapojena tak, aby orientace šipky byla shodná se směrem protékajícího proudu. Parametrem, který je indukčnosti nastavován, je její velikost Induktance [H].

Součástky reprezentující měřicí přístroje musejí být do obvodu zapojovány dle odpovídajícího reálného měření. Ampérmetr (Ammeter) je zapojen do série se zátěží, orientace šipky musí být shodná se směrem procházejícího proudu. Voltmetr (Voltmeter) je k zátěži připojen paralelně tak, aby orientace přístroje (znaménko plus) byla shodná s orientací napětí na zátěži. Součástky mají tři vývody, dva z nich jsou připojeny k obvodu, třetí musí být propojen s blokem ud nebo id (Signal Outport), který slouží ke zprostředkování výstupu simulace do prostředí Simulink.

PLECS Circuit obsahuje dvě součástky Signal Outport, má proto dva vývody. Ty jsou přivedeny na vstupy bloku Mux, který slouží k jejich spojení, což umožňuje přívod obou signálů na vstup bloku Scope. Blok Mux může mít libovolný počet vstupů, který lze nastavit parametrem bloku Number of inputs. Signály spojené přes Mux se vzájemně neovlivňují.

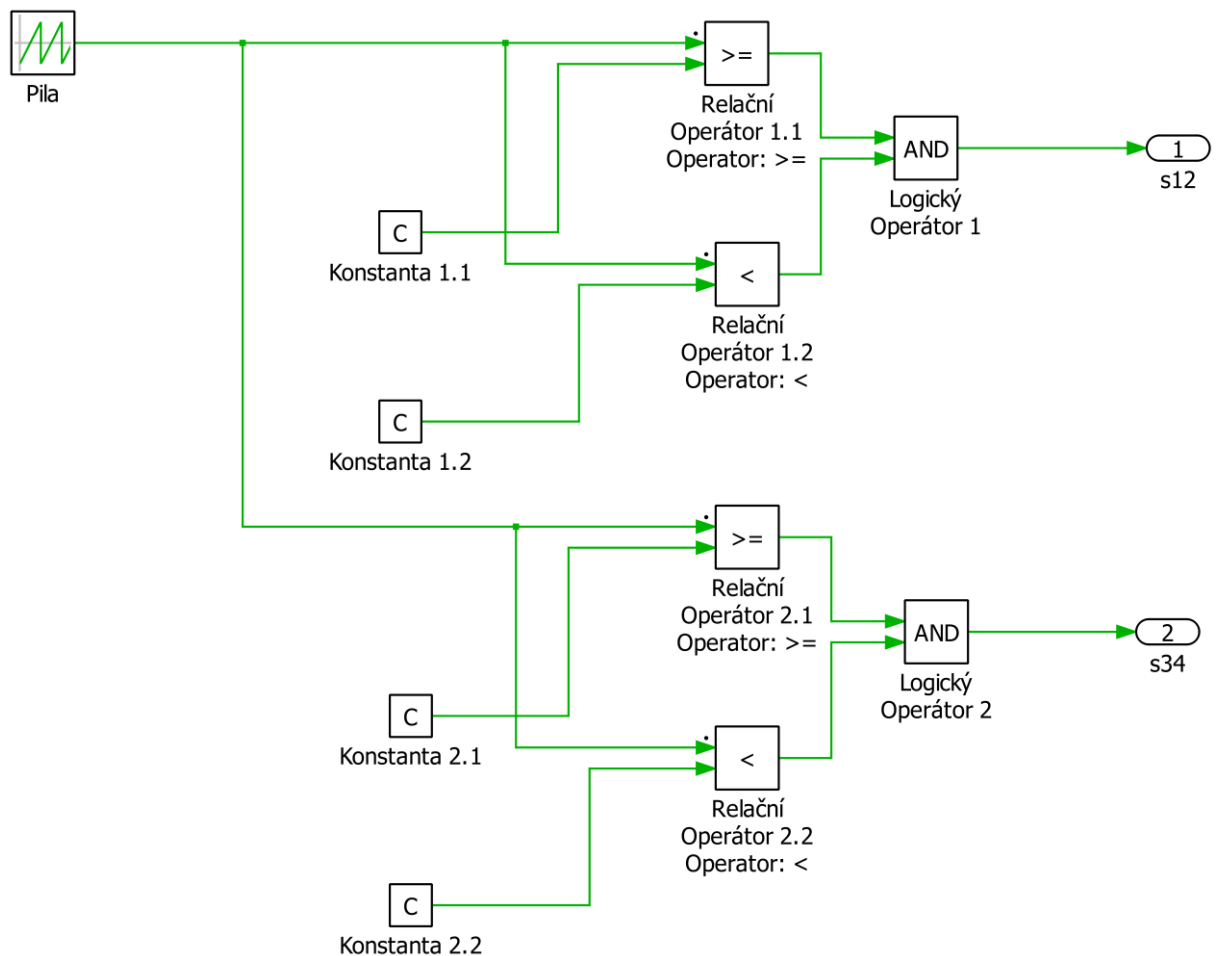
4.3 Simulace řízených usměrňovačů

Model řízeného usměrňovače v prostředí Simulink, PLECS je tvořen čtyřmi bloky. Model řízeného 1f můstkového usměrňovače je zobrazen na obr. 37.



Obr. 37: Schéma simulačního modelu řízeného 1f můstkového usměrňovače v prostředí Simulink

Pomocí bloku PLECS Circuit s názvem Rizeni 1f mustku je realizováno řízení usměrňovače. Simulační schéma řízení 1f můstku v prostředí PLECS je na obr. 38.



Obr. 38: Řízení 1f můstkového usměrňovače v prostředí PLECS

Řídící obvod je vytvořen bloky z knihovny PLECS System Components a Control Components. Blok Pila generuje pilovitý signál, který je pomocí relačních operátorů porovnáván s konstantami. Při splnění podmínky (např. okamžitá hodnota pilovitého signálu je větší nebo rovna konstantě, se kterou je relačním operátorem porovnávána) se na výstupu relačního operátoru objeví signál o konstantní hodnotě jedna (dokud je podmínka splněna). Na vstup bloku Logický operátor AND jsou přivedeny signály ze dvou relačních operátorů. Pokud mají oba signály hodnotu jedna, objevuje se na výstupu bloku Logický operátor signál o hodnotě jedna.

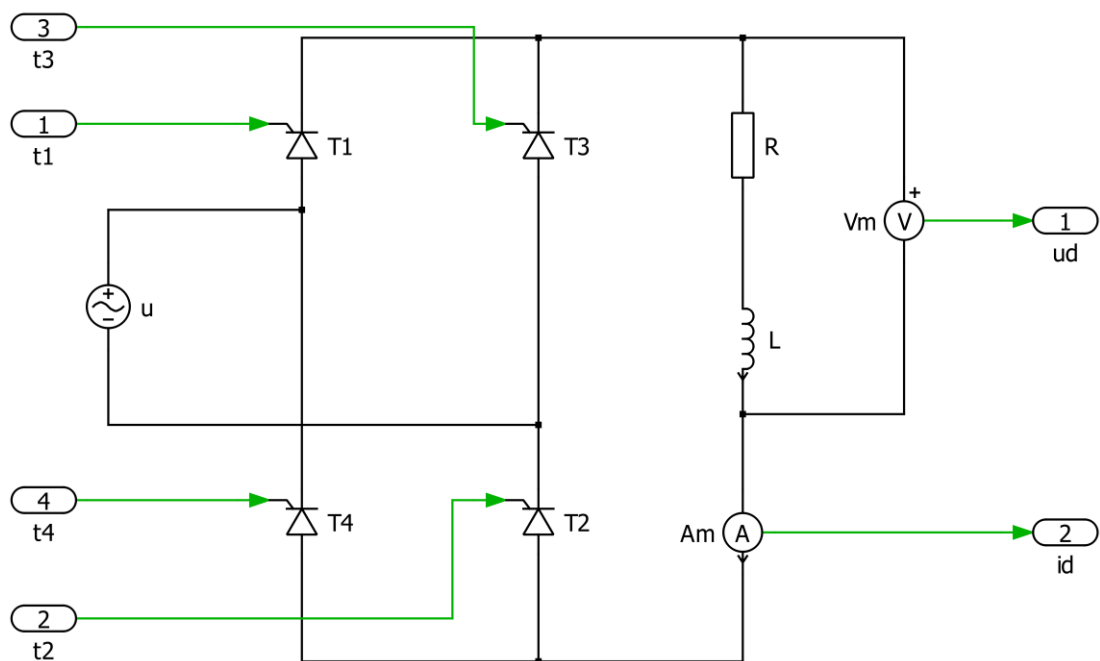
Blok Pila (Triangular Wave Generator) má pět nastavitelných parametrů. Pro simulaci řízení byl nastaven průběh signálu tak, aby počáteční (a zároveň nejnižší) hodnota byla nulová, a maximální hodnota na konci periody byla rovna jedné. Frekvence pily musí být shodná s frekvencí zdroje usměrňovače, který je řízen. Pomocí Minimum signal value je

nastavována nejmenší hodnota signálu. Parametr Maximum signal value slouží k nastavení maximální hodnoty signálu. Frekvence pily je nastavována parametrem Frequency [Hz]. Parametrem Duty cycle [p.u.] je definováno, zda má průběh pily začínat v maximální nebo v minimální hodnotě. Pro průběh začínající v minimu musí být hodnota tohoto parametru rovna jedné. Posledním nastavitelným parametrem je fázové zpoždění (Phase delay) [s].

Blok představující relační operátor (Relational Operator) má jeden parametr - typ relace, který je nastavován výběrem z popup menu. Pro simulaci řízení byly využity relace "větší rovno" a "menší". Blok má dva vstupy, na které jsou přiváděny porovnávané signály. Výstupem je signál o hodnotě nula nebo jedna.

Blok Logický operátor (Logical Operator) má dva nastavitelné parametry. Prvním z nich je typ operátoru Operator, který je nastavován výběrem z popup menu. Druhým parametrem je počet vstupů Number of inputs. Na výstupu bloku se objevuje signál o hodnotě nula nebo jedna. Výstupní signály jsou pomocí bloků s12 a s34 (Signal Output) přenášeny do prostředí Simulink.

Uvnitř druhého bloku PLECS Circuit s názvem Obvod 1f řízeného můstku je vytvořeno zapojení 1f řízeného můstku, které je zobrazeno na obr. 39.



Obr. 39: Schéma obvodu řízeného 1f můstkového usměrňovače v prostředí PLECS

Bloky reprezentující napěťový zdroj, odpor, indukčnost a měřicí přístroje byly již popsány v předchozím textu. Rovněž byl také popsán blok Signal Outport sloužící k přenosu výstupních signálů do prostředí Simulink.

Bloky tyristorů (Thyristor) jsou (stejně jako u neřízených usměrňovačů diody) považovány za ideální, proto není potřeba nastavovat jejich parametry. Je však třeba řídit jejich spínání. Spínací impulzy jsou na tyristory přiváděny z prostředí Simulink pomocí bloků t1, t2, t3 a t4 (Signal Inport).

Přenos řídicích signálů pro spínání tyristorů na součástky je realizován propojením obou bloků PLECS Circuit v prostředí Simulink tak, jak je naznačeno na obr. 37. Řídicím signálem z portu s12 bloku Rizeni 1f mustku jsou řízeny tyristory T1 a T2, proto je propojen s porty t1 a t2. Signálem z portu s34 téhož bloku se řídí tyristory T3 a T4, je tedy propojen s porty t3 a t4. Výstupy ud, id bloku Obvod rizeného 1f mustku jsou přivedeny na vstup bloku Mux, jehož výstup je propojen se vstupem bloku Scope.

4.4 Uživatelská aplikace

Pro snazší práci se simulačními modely byla vytvořena uživatelská aplikace. Jednotlivé modely jsou otevírány automaticky v závislosti na požadavcích uživatele. Rovněž zadávání parametrů jednotlivých bloků a parametrů simulace je zajištěno tak, aby je uživatel nemusel nastavovat přímo uvnitř jednotlivých modelů. Ke spuštění aplikace slouží m-file Spusteni_simulace_usmernovace. Skript obsahuje stručný návod.

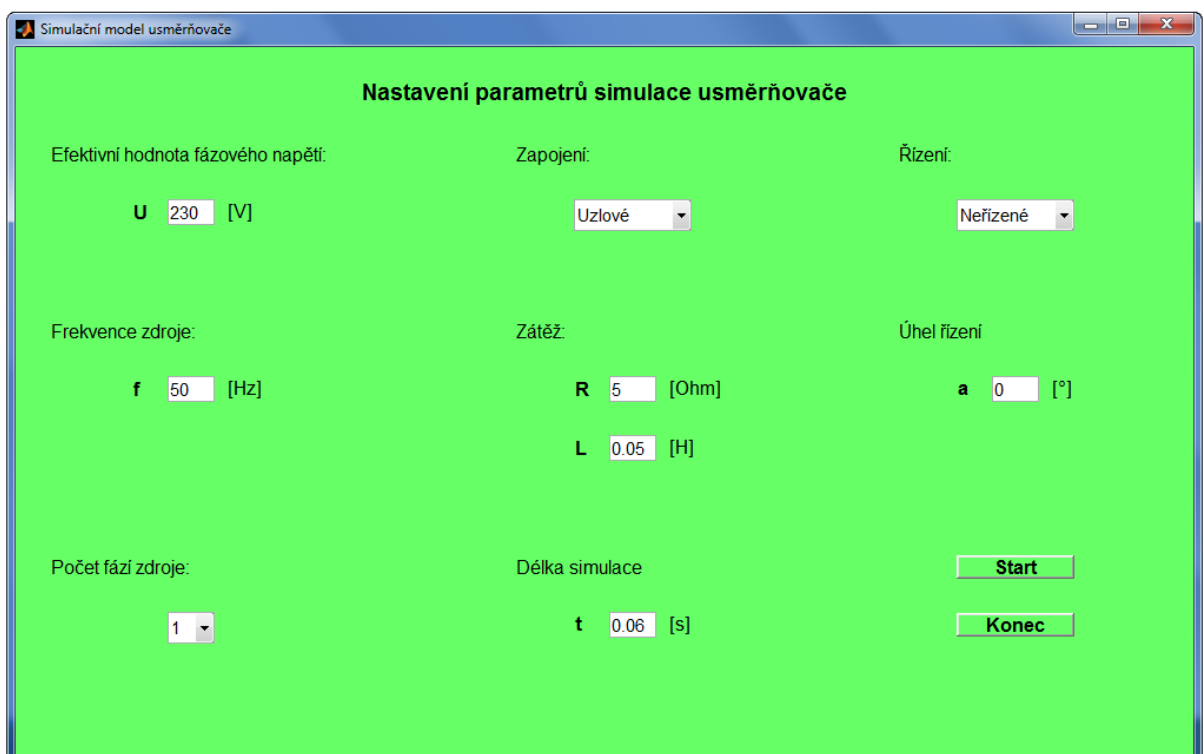
Zadávání parametrů probíhá pomocí uživatelského menu, které je tvořeno objektem figure. V rámci objektu figure bylo vytvořeno několik objektů uicontrol typu Text, Edit, Popup a Pushbutton. Uicontrol typu Text slouží k popisu menu.

Do uicontrol typu Edit uživatel wpisuje požadavky na efektivní hodnotu napětí U [V], frekvenci zdroje f [Hz], hodnotu odporu R [Ω], velikost indukčnosti L [H], velikost řídicího úhlu α [$^\circ$] a délku simulace t [s]. Z důvodu bezproblémového chodu simulací jsou hodnoty nastavovaných parametrů omezeny funkcí Podminky (viz dále).

Uicontrol typu Popup slouží k zadávání počtu fází zdroje, typu zapojení a možnosti řízení. Uživatel může nastavit celkem 8 kombinací.

V menu jsou zobrazeny dvě tlačítka Pushbutton. Tlačítko Start slouží ke spuštění simulace, po stisknutí tlačítka Konec dojde k zavření všech spuštěných souborů souvisejících s aplikací (menu, modely, Scope).

Po spuštění skriptu Spusteni_simulace_usmernovace dojde k zobrazení uživatelského menu, které je zobrazeno na obr. 40. Všechny parametry jsou již předdefinovány, uživatel je však může změnit. Po stisku tlačítka Start dojde k načtení parametrů zadávaných z menu a jejich uložení do proměnných (parametry zadávané pomocí editačních polí je třeba konvertovat z řetězce na číslo). Pomocí funkce Podminky je ověřena jejich platnost. V případě chybného zadání (např. zadání nulového nebo záporného napětí, nastavení příliš velké hodnoty napětí apod.) se otevře další objekt figure obsahující specifické chybové hlášení (uživatel je upozorněn na konkrétní chybu v zadání). Jsou-li zadány parametry v pořádku, dojde k výpočtu amplitudy napětí a úhlového kmitočtu. V případě řízených usměrňovačů je zavolána některá z funkcí pro výpočet konstant sloužících k nastavení spínání tyristorů. Do Command Window je vypsáno hlášení o spuštění modelu, příslušný model je otevřen společně s blokem Scope, který zobrazuje výsledky simulace. Otevírání modelu může trvat několik vteřin. Doba otevírání bloku Scope závisí na zadané délce simulace.



Obr. 40: Menu pro zadávání parametrů a spuštění simulace

Pro možné nastavování parametrů simulace a parametrů bloků pomocí menu musí být všechny nastavované parametry uvnitř modelů pojmenovány názvy proměnných, které jsou používány v rámci uživatelské aplikace. Všechny proměnné musejí být ve skriptech a funkcích definovány jako globální, aby se automaticky ukládaly do Workspace, odkud jsou odesílány do spouštěných modelů.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit simulační modely neřízených a řízených usměrňovačů v uzlovém a můstkovém spojení při napájení z jednofázového a třífázového napěťového zdroje v prostředí Simulink, PLECS. Simulace byly vytvořeny pro potřeby výuky vybraných předmětů na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky. Všechny modely byly proto sdruženy do uživatelské aplikace, která je spouštěna v programu MATLAB.

V první kapitole byly popsány základní vztahy, pojmy, principy a zařízení související s tématem práce, které byly ve druhé kapitole využity k popisu jednotlivých typů usměrňovačů. Kromě základních principů funkce usměrňovačů zde byly rovněž popsány vlivy parametrů zátěže a úhlu řízení na průběhy napětí na zátěži a proudu zátěži.

Třetí kapitola byla věnována stručnému popisu simulačního programu MATLAB, jeho funkční nadstavby Simulink a doplňkové knihovny Simulinku PLECS. PLECS je simulační nástroj pro simulaci problémů z oblasti výkonové elektroniky a elektrických pohonů.

Čtvrtá kapitola byla zaměřena na popis tvorby simulačních modelů v prostředí Simulink, PLECS. Vytváření modelů bylo vysvětleno na příkladu neřízeného 3f můstkového usměrňovače a řízeného 1f můstkového usměrňovače. Dále zde byla stručně popsána vytvořená uživatelská aplikace. Vyvinutá uživatelská aplikace slouží ke snazšímu ovládní simulačních modelů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika. Sv. 2, Měniče s vnější komutací*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 149 s. ISBN 80-7082-137-X.
- [3] KUSALA, Jaroslav. *Miniencyklopedie Elektřina: O střídavém proudu - fyzikální základy*. ČEZ. [online]. 2003 [cit. 2014-06-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz5.htm>>
- [4] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
- [5] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika. Sv. 1, Přehled výkonových polovodičových součástek*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 72 s. ISBN 80-7082-136-1.
- [6] KOTLAN, Jiří. *Úvod do elektrotechniky (učební texty pro předmět KTE/ UE)*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007.
- [7] ZAPLATÍLEK, Karel a DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 151 s. ISBN 80-7300-175-6
- [8] DUŠEK, František a HONC, Daniel. *Matlab a Simulink: Úvod do používání*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. 172 s. ISBN 80-7194-776-8.
- [9] PLECS [online].[cit. 2014-06-1]. Dostupné z WWW: <<http://www.plexim.com/>>

Přílohy

Příloha A - Skript pro spuštění simulací

%Simulační model usměrňovače - příloha k BP
%Jana Němcová, 2014

```
%NÁVOD
% Po spuštění skriptu se objeví objekt figure zobrazující menu pro zadávání
%parametrů simulací.
% Omezení velikosti parametrů:
    % všechny hodnoty musejí být kladné
    % U, f, R, t nesmí být nulové
    % U <= 1 kV
    % f <= 500 Hz
    % R <= 1 kOhm
    % L <= 1 H
    % a < 180° pro 1f zapojení
    % a < 120° pro 3f zapojení
    % t <= 10 s
% Po stisku tlačítka "start" dojde k otevření příslušného modelu podle zvo-
%lených parametrů, proběhne simulace a zobrazí se výsledky simulace pomocí
%oscilopické obrazovky bloku scope. Tento proces trvá několik sekund.
% V případě nevhodně zadaných parametrů se po stisku "start" zobrazí další
%objekt figure s upozorněním na chybu v zadání.
```

```
clear all; close all
%Proměnné pro simulace
global Um;
global omega;
global R;
global L;
global t;
global c1;
global c2;
global c3;
global c4;
global c5;
global c6;
%Zavolání funkce "menu"
menu;
```

Příloha B - Funkce menu

```
function menu(start)
global Um, global omega, global R, global L, global t, global a, global c1; global c2, global
c3; global c4, global c5, global c6;
% Vytvoření menu s předdefinovanými parametry
if nargin==0
    h=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 1000 600],'Name','Simulační model
usměrňovače', 'NumberTitle','off','MenuBar','none');
    h1=uicontrol('Style','Text','String','Efektivní hodnota fázového napětí:', 'Position',
[30 500 400 20]);
    h2=uicontrol('Style','Text','String','U','Position',[100 452 20 20]);
    h3=uicontrol('Style','Edit','String',230,'Position',[130 450 40 22],'Tag','Uef');
    h4=uicontrol('Style','Text','String','[V]','Position',[180 453 40 20]);
    h5=uicontrol('Style','Text','String','Frekvence zdroje:', 'Position',[30 350 400 20]);
    h6=uicontrol('Style','Text','String','f','Position',[100 302 60 20]);
    h7=uicontrol('Style','Edit','String',50,'Position',[130 300 40 22],'Tag','fz');
    h8=uicontrol('Style','Text','String','[Hz]','Position',[180 303 40 20]);
    h9=uicontrol('Style','Text','String','Počet fází zdroje:', 'Position',[30 150 400 20]);
    h10=uicontrol('Style','Popup','String','1|3','Position',[130 100 40 22],'Tag','pocfaz');
    h11=uicontrol('Style','Text','String','Zapojení:', 'Position',[425 500 100 20]);
    h12=uicontrol('Style','Popup','String','Uzlové|Můstkové','Position',
[475 450 100 22],'Tag','zap');
    h13=uicontrol('Style','Text','String','Zátěž:', 'Position',[425 350 100 20]);
    h14=uicontrol('Style','Text','String','R','Position',[475 302 40 20]);
    h15=uicontrol('Style','Edit','String',5,'Position',[505 300 40 22],'Tag','Rz');
    h16=uicontrol('Style','Text','String','[Ohm]','Position',[555 303 50 20]);
    h17=uicontrol('Style','Text','String','L','Position',[475 252 40 20]);
    h18=uicontrol('Style','Edit','String',0.05,'Position',[505 250 40 22],'Tag','Lz');
    h19=uicontrol('Style','Text','String','[H]','Position',[555 253 50 20]);
    h20=uicontrol('Style','Text','String','Řízení:', 'Position',[750 500 100 20]);
    h21=uicontrol('Style','Popup','String','Neřízené|Řízené','Position',
[800 450 100 22],'Tag','riz');
    h22=uicontrol('Style','Text','String','Úhel řízení','Position',[750 350 100 20]);
```

```

h23=uicontrol('Style','Text','String','a','Position',[800 303 30 20]);
h24=uicontrol('Style','Edit','String','0','Position',[830 300 40 22],'Tag','uhel');
h25=uicontrol('Style','Text','String','[°]','Position',[880 303 40 20]);
h26=uicontrol('Style','Text','String','Délka simulace','Position',[425 150 200 20]);
h27=uicontrol('Style','Text','String','t','Position',[475 103 30 20]);
h28=uicontrol('Style','Edit','String','0.06','Position',[505 100 40 22],'Tag','cas');
h29=uicontrol('Style','Text','String','[s]','Position',[555 103 40 20]);
h30=uicontrol('Style','Push','String','Start','Position',[800 150 100 20],'CallBack','menu
start');
h31=uicontrol('Style','Push','String','Konec','Position',[800 101 100 20],'CallBack','menu
konec');
h32=uicontrol('Style','Text','String','Nastavení parametrů simulace
usměrňovače','Position',
[0 550 1000 25],'BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','black','FontSize',14,
'FontWeight','bold');
set([h1,h5,h9,h11,h13,h20,h22,h26],'BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor',
'black','FontSize',12,'HorizontalAlignment','left'); % nastavení nadpisu
set([h2,h6,h14,h17,h23,h27],'BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor',
'black','FontSize',13, 'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left'); % nastavení veličin
set([h4,h8,h16,h19,h25,h29],'BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor',
'black','FontSize',13, 'HorizontalAlignment','left'); % nastavení jednotek
set([h3,h7,h15,h18,h24,h28],'BackgroundColor','white','ForegroundColor','black',
'FontSize',11, 'HorizontalAlignment','left'); % nastavení editačních poli
set([h10,h12,h21],'BackgroundColor','white','ForegroundColor','black','FontSize',11,
'HorizontalAlignment','left'); % nastavení popup výběrů
set([h30,h31],'BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','black','FontSize',12,
'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left'); % nastavení push tlačítek
else
% Spuštění simulace
switch(start)
case('start')
% Načtení zadaných parametrů
U=str2num(get(findobj('Tag','Uef'),'String')); % konverze zadaného U na číslo
- uložení do proměnné
f=str2num(get(findobj('Tag','fz'),'String')); % konverze zadané f na číslo
- uložení do proměnné
faze=get(findobj('Tag','pocfaz'),'Value'); % uložení zadaného počtu fází do
proměnné
zapojeni=get(findobj('Tag','zap'),'Value'); % uložení zadaného zapojení do
proměnné
R=str2num(get(findobj('Tag','Rz'),'String')); % konverze zadaného R na číslo
- uložení do proměnné
L=str2num(get(findobj('Tag','Lz'),'String')); % konverze zadaného L na číslo
- uložení do proměnné
rizeni=get(findobj('Tag','riz'),'Value'); % uložení zadaného řízení do proměnné
a=str2num(get(findobj('Tag','uhel'),'String')); % konverze zadaného a na číslo
- uložení do proměnné
t=str2num(get(findobj('Tag','cas'),'String')); % konverze zadaného t na číslo
- uložení do proměnné

% Ověření platnosti zadaných parametrů
[x1,x2,x3,x4,x5,x6] =Podminky( U,f,faze,R,L,t,a );
sum_chyb=x1+x2+x3+x4+x5+x6;
% Otvírání jednotlivých modelů
for sum_chyb=6
Um=U*sqrt(2);
omega=2*pi*f;
% Výběr řízení
if rizeni==1
% Výběr zapojení - neřízené usm.
if faze==1 && zapojeni==1 % neřízený 1f uzlový usm.
disp('Spouští se model')
open('uzlovy_1f_ner')
sim('uzlovy_1f_ner','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
elseif faze==2 && zapojeni==1 % neřízený 3f uzlový usm.
disp('Spouští se model')
open('uzlovy_3f_ner')
sim('uzlovy_3f_ner','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
elseif faze==1 && zapojeni==2 % neřízený 1f můstkový usm.
disp('Spouští se model')
open('mustek_1f_ner')
sim('mustek_1f_ner','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
else % neřízený 3f můstkový usm.
disp('Spouští se model')
open('mustek_3f_ner')
sim('mustek_3f_ner','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
end
else

```



```

    %Výběr zapoenní - řízené usm.
    if faze==1 && zapojeni==1 % řízený 1f uzlový usm.
        [c1]=konst_uzl_1f(a); % výpočet konstant
        disp('Spousti se model')
        open('uzlovy_1f_riz')
        sim('uzlovy_1f_riz','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
    elseif faze==2 && zapojeni==1 % řízený 3f uzlový usm.
        [c1,c2,c3]=konst_uzl_3f(a); % výpočet konstant
        disp('Spousti se model')
        open('uzlovy_3f_riz')
        sim('uzlovy_3f_riz','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
    elseif faze==1 && zapojeni==2 % řízený 1f můstkový usm.
        [c1,c2]=konst_mustek_1f(a); % výpočet konstant
        disp('Spousti se model')
        open('mustek_1f_riz')
        sim('mustek_1f_riz','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
    else % řízený 3f můstkový usm.
        [c1,c2,c3,c4,c5,c6]=konst_mustek_3f(a); % výpočet konstant
        disp('Spousti se model')
        open('mustek_3f_riz')
        sim('mustek_3f_riz','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
    end
end
end
% Otevření bloku Scope, autoscale
bh=find_system(gcs,'FindAll','on','BlockType','Scope');
for x=1:length(bh)
    set_param(bh(x),'Open','off');
end
for x=1:length(bh)
    set_param(bh(x),'Open','on');
    fh=gcf; AxesInScope=findall(fh,'type','axes');
    for y=1:length(AxesInScope)
        set(fh,'CurrentAxes',AxesInScope(y)); xlim('auto'); ylim('auto');
    end
end
end
% Ukončení práce s menu
case('konec')
    close all
end
end
end
end

```

Příloha C - Funkce pro ověření platnosti nastavených parametrů simulace

```

function [x1,x2,x3,x4,x5,x6] = Podminky(U,f,faze,R,L,t,a)
if U==0 || f==0 || R==0 || t==0 %nevyplněné menu
    p1=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
    p2=icontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte vstupní parametry simulace.','Position',[80 140 350 30],'FontSize',14);
else
    if U>0 && U<=1000 %napětí 0 < U <= 1000 V
        x1=1;
    elseif U<0
        p3=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
        p4=icontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte U > 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
    else
        p5=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
        p6=icontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte U <= 100.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
    end
    if f>0 && f<=500 %frekvence 0 < f <= 500 Hz
        x2=1;
    elseif f<0
        p7=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
        p8=icontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte f > 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
    else
        p9=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
        p10=icontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte f <= 500.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
    end
end
end
end
end
end

```

```

end

if R>0 && R<=1000 %odpor 0 < R <= 1 kOhm
    x3=1;
elseif R<0
    p11=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
    p12=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte R > 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
    else
        p13=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
        p14=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte R <= 10^3.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
        end
        if L>=0 && L<=1 %indukčnost 0 < L <= 1 H
            x4=1;
        elseif L<0
            p15=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
            p16=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte L >= 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
            else
                p17=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
                p18=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte L <= 1.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                end
                if t>0 && t<=10 %čas simulace 0 < t <= 10 s
                    x5=1;
                elseif tz<0
                    p19=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
                    p20=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte t > 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                    else
                        p21=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
                        p22=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte t <= 10.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                        end
                        if a<0
                            p23=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení o chybě',
'NumberTitle','off','Menubar','none');
                            p24=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style','Text',
'String','Zadejte a >= 0.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                            else
                                if a>=180 && faze==1
                                    p25=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení
o chybě','NumberTitle','off','Menubar','none');
                                    p26=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red','Style',
'Text','String','Zadejte a < 180.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                                    elseif a>=120 && faze==2
                                        p27=figure('Color',[0.4 1 0.4],'Position',[200 100 500 300],'Name','Hlášení
o chybě','NumberTitle','off','Menubar','none');
                                        p28=uicontrol('BackgroundColor',[0.4 1 0.4],'ForegroundColor','red',
'Style','Text','String','Zadejte a < 120.','Position',[100 140 300 30],'FontSize',14);
                                        else
                                            x6=1;
                                        end
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

```

Příloha D - Funkce pro výpočet konstanty řízeného 1f uzlového usměrňovače

```

function [c1] = konst_uzl_1f(a)
c1=a/360;
end

```

Příloha E - Funkce pro výpočet konstant řízeného 3f uzlového usměrňovače

```

function [c1,c2,c3] = konst_uzl_3f(a)
pos=30;
fi=120;
c1=(a+pos)/360;

```

```
c2=(a+pos+fi)/360;
if a<90
    c3=(a+pos+2*fi)/360;
elseif a==90
    c3=0;
else
    c3=(a+pos+2*fi)/360-1;
end
end
```

Příloha F - Funkce pro výpočet konstant řízeného 1f můstkového usměrňovače

```
function [ c1,c2 ] = konst_mustek_1f(a)
fi=180;
c1=a/360;
c2=(a+fi)/360;
end
```

Příloha G - Funkce pro výpočet konstant řízeného 3f můstkového usměrňovače

```
function [ c1,c2,c3,c4,c5,c6 ] = konst_mustek_3f(a)
pos=30;
fi=120;
c1=(a+pos)/360
c2=(a+3*pos)/360
c3=(a+pos+fi)/360
c4=(a+3*pos+fi)/360
if a<90
    c5=(a+pos+2*fi)/360
elseif a==90
    c5=0
else
    c5=(a+pos+2*fi)/360-1
end
if a<30
    c6=(a+3*pos+2*fi)/360
elseif a==30
    c6=0
else
    c6=(a+3*pos+2*fi)/360-1
end
end
```