

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza rozběhu asynchronního motoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš JUSTL**
Osobní číslo: **E12B0026P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Analyza rozběhu asynchronního motoru**
Zadávací 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 vlastnosti asynchronních strojů.
2. Sestavte přehled včetně vzájemného porovnání možností rozběhů asynchronních strojů.
3. Navrhněte vybraný typ rozběhu pro asynchronní stroj.
4. Realizujte a otestujte funkčnost návrhu na reálném asynchronním stroji v rámci možností laboratoře.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **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. Jiří Fořt, Ph.D.**

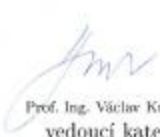
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení rozběhu asynchronního stroje pomocí softstartéru. Určení využití, výhod a nevýhod polovodičového střídavého měniče napětí.

Klíčová slova

Spouštění asynchronního motoru, analýza rozběhu, softstartér, střídavý měnič napětí, měkký start, 3-f asynchronní motor.

Abstract

The bachelor thesis is focused on solving the starting of induction machines using soft. Determining usage, advantages and disadvantages of semiconductor alternating voltage converter.

Key words

Induction motor starting, acceleration analysis, starter, AC power inverter, soft start, 3-phase asynchronous motor.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Tomáš Justl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Fořtovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a také rodině za morální a finanční pomoc během studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
INDEXY	10
1 ASYNCHRONNÍ MOTOR	11
1.1 CHARAKTERISTICKÉ ÚDAJE.....	11
1.2 KONSTRUKCE TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	12
1.2.1 <i>Provedení s kotvou nakrátko</i>	12
1.2.2 <i>Provedení s vinutou kotvou</i>	13
1.2.3 <i>Svorkovnice</i>	13
1.2.4 <i>Princip činnosti</i>	14
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA.....	17
1.4 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	18
2 ZPŮSOBY ROZBĚHU ASYNCHRONNÍHO STROJE	18
2.1 PŘÍMÉ PŘIPOJENÍ K SÍTL.....	19
2.1.1 <i>Rozběh</i>	19
2.1.2 <i>Realizace</i>	19
2.2 SPOUŠTĚNÍ POMOCÍ FREKVENČNÍHO MĚNIČE.....	20
2.3 VÝBĚREM VHODNÉ KLECE ROTORU.....	22
2.3.1 <i>Vírová klec</i>	22
2.3.2 <i>Odporová klec</i>	23
2.3.3 <i>Dvojitá klec</i>	23
2.3.4 <i>Změnou odporu rotoru</i>	24
2.3.5 <i>Změnou reaktance rotoru</i>	24
2.4 SPOUŠTĚNÍ SNÍŽENÝM NAPĚTÍM.....	24
2.4.1 <i>Spouštění se statorovým spouštěčem</i>	25
2.4.2 <i>Spouštění pomocí autotransformátoru</i>	26
2.4.3 <i>Spouštění pomocí přepínače Y/D</i>	27
2.4.4 <i>Rozběh pomocí softstartu</i>	29
3 REALIZACE ROZBĚHU ASYNCHRONNÍHO STROJE	39
3.1 SIMULACE ROZBĚHU.....	40
3.1.1 <i>Odhad parametrů stroje</i>	40
3.1.2 <i>Vytvoření simulačního schématu</i>	46
3.2 MĚŘENÍ V LABORATOŘI.....	48
3.2.1 <i>Použitý softstartér</i>	49
3.2.2 <i>Zapojení</i>	49
3.2.3 <i>Nastavení</i>	50
3.2.4 <i>Měření motoru</i>	50
3.2.5 <i>Schéma zapojení</i>	50
3.2.6 <i>Grafy</i>	51
3.3 ZÁVĚR.....	59
SEZNAM LITERATURY	60

Úvod

Práce je zaměřena na analýzu rozběhu asynchronního motoru pomocí polovodičového měniče napětí. K měření byl použit asynchronní motor o jmenovitém výkonu 4 kW. Změřený rozběh motoru se porovnává se simulací.

Text je rozdělen do tří částí. V první části se zabývá obecnými vlastnostmi asynchronního stroje. V této části je práce zaměřena na charakteristické údaje, konstrukci a principu.

Druhá část je zaměřena na různé typy rozběhů asynchronních motorů. Zde jsou popsány výhody nebo nevýhody daného typu rozběhu, pro jaké aplikace je daný rozběh výhodný či ne.

V třetí kapitole je vybrán určitý typ rozběhu asynchronního stroje. Pro tento typ bylo provedeno měření v rámci možností fakultní laboratoře. Také v této kapitole je provedena simulace a následné porovnání s měřením v laboratoři.

Seznam symbolů a zkratek

$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$1f, 3f$	Počet fází
M	Moment motoru bez pomocné fáze [Nm]
I	proud [A]
U	napětí [V]
ω	úhlová rychlost [$rad*s^{-1}$]
s	skluz
n	otáčky [$1*min^{-1}$]
f	frekvence [Hz]
L	indukčnost [L]
k	konstanta
R	odpor [Ω]
P	výkon [W]
DC	stejnoseměrný proud
AC	střídavý proud
VFD	Variable frequency drive
VSD	Variable speed drive
ZAP	zapnuto
VYP	vypnuto
K1	stykač

Indexy

max	maximální
záb	záběrný
N	jmenovitý
r	řídící
R	rotoru
H	hlavní
NJ	jmenovitý jalový
σ	rozptylová

1 Asynchronní motor

Indukční asynchronní motor je točivý elektrický stroj. Magnetický obvod točivého stroje je rozdělen malou mezerou na dvě části, na statorovou a na rotorovou. Statorové vinutí je připojeno ke zdroji střídavého zdroje proudu. Rotorové vinutí je zapojeno nakrátko nebo vinutý, přičemž vinutí je vyvedeno pomocí kroužků a kartáčů. V rotorovém vinutí vzniká proud elektromagnetickou indukcí, podobně jako u transformátorů. Nejčastějším druhem asynchronního stroje je trojfázový indukční motor. Trojfázový indukční motor je jednoduchý, v provozu spolehlivé zařízení, bez potřeby speciální údržby. Indukční stroje se vyrábí v široké výkonové škále od jednotek wattů až do 20 MW. Obdobně jako s výkonem se asynchronní motor vyrábí v širokém spektru otáček od desítek otáček za minutu (pomaloběžné stroje) až do 100 000 ot/min (respektive rychloběžné). Asynchronní motor s kotvou nakrátko je díky své konstrukční jednoduchosti nejvyužívanějším strojem. Stroj může pracovat v režimech jako indukční motor, indukční generátor nebo jako indukční brzda.

1.1 Charakteristické údaje

Jak bylo již v úvodu této kapitoly zmíněno, indukční točivý stroj může pracovat v různých režimech.

- a) asynchronní motor – zde probíhá přeměna elektrické energie na mechanickou – $\mathbf{P} > \mathbf{0}$, $\mathbf{M} > \mathbf{0}$, $(\mathbf{0} < \mathbf{s} < \mathbf{1})$, $(\boldsymbol{\omega}_s > \boldsymbol{\omega} > \mathbf{0})$
- b) brzda – indukční brzda se docílí tak, že rotor se otáčí proti směru otáčení magnetického točivého pole buzeného statorem – $\mathbf{P} < \mathbf{0}$, $\mathbf{M} > \mathbf{0}$, $(\mathbf{s} > \mathbf{1})$, $(\boldsymbol{\omega} < \mathbf{0})$
- c) asynchronní generátor – zde se převádí mechanická energie na elektrickou – $\mathbf{P} < \mathbf{0}$, $\mathbf{M} < \mathbf{0}$, $(\mathbf{s} < \mathbf{0})$, $(\boldsymbol{\omega}_s < \boldsymbol{\omega})$ [7]

Asynchronní stroj dále dělíme na:

- podle provedení rotoru
 - a) kotva nakrátko
 - b) vinutá kotva

- podle počtu fází
 - a) jednofázové
 - b) trojfázové

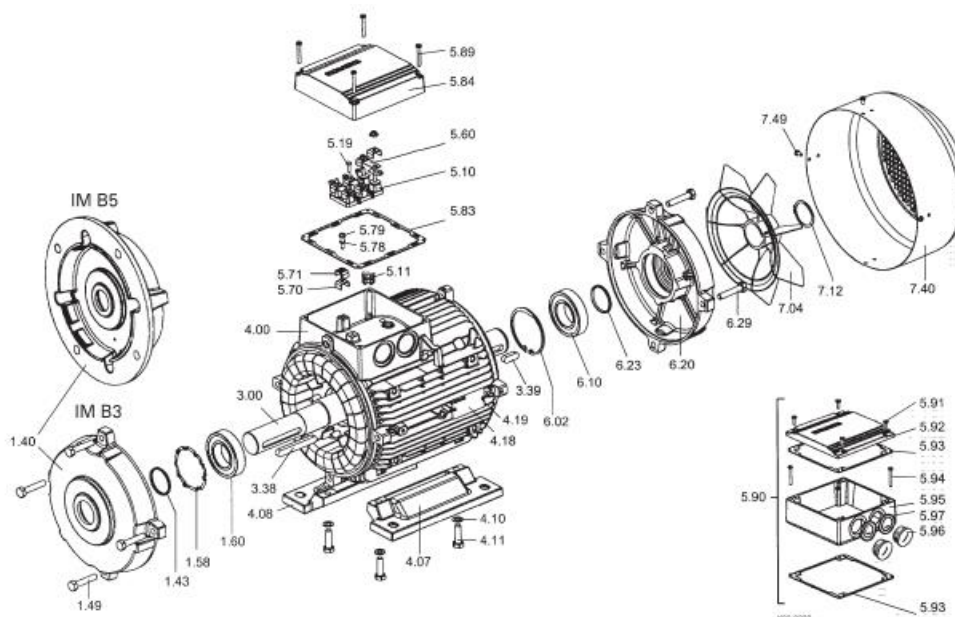
1.2 Konstrukce trojfázového asynchronního stroje

Indukční točivý stroj je rozdělen do dvou částí – pevná část nazývaná stator a rotující část pojmenovaná rotor. Tyto dvě části jsou od sebe odděleny malou vzduchovou mezerou. Dále dělíme asynchronní motor podle typu rotoru.

1.2.1 Provedení s kotvou nakrátko

Stator se skládá z mezikruží z elektrotechnických plechů vzájemně izolovaných. Tyto plechy jsou staženy do svazku, ve kterých jsou vytvořeny drážky. V těchto drážkách je uloženo statorové vinutí.

Kotva nakrátko je tvořena z elektrotechnických plechů, které jsou nalisované na hřídel. Obdobně jako ve statorové části, i zde jsou vytvořeny drážky, ve kterých je uloženo vinutí. Kotva nakrátko je vytvořena pomocí hliníkových či měděných neizolovaných tyčí, vložených v drážkách. Tyto tyče jsou na obou koncích pomocí téhož samého materiálu spojena spojovacími kruhy.



Obr.1.1 Komponenty asynchronního motoru [1]

1.2.2 Provedení s vinutou kotvou

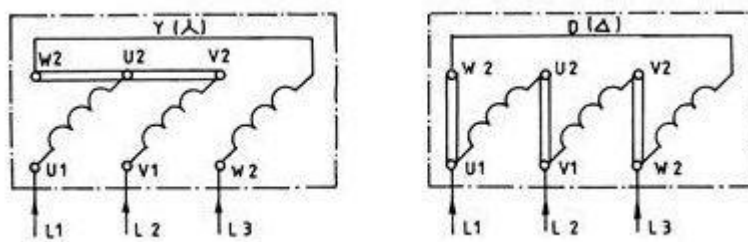
Rotor s vinutou kotvou je mechanicky složitější oproti kleci nakrátko. Toto provedení se používá pro motory s velkými výkony, kde je potřeba omezit záběrný proud, případně řídit otáčky. Vinutý rotor je podobný statorovému provedení. Také má trojfázové vinutí založené v drážkách, bez vyvedeného uzle. Počet pólů musí být shodný s počtem pólů statoru. Vývody na svorkovnici se provádí pomocí kluzných kontaktů. Kluzné kontakty se skládají z třech kroužků a třech uhlíkových kartáčů. Kroužky jsou umístěny na hřídeli, jsou izolované. Na tyto kroužky dosedají kartáče. Kluzné kontakty jsou náročné na údržbu a v průmyslu se častěji používají stroje s kotvou nakrátko.

1.2.3 Svorkovnice

Trojfázové statorové vinutí uložené v drážkách elektrotechnických plechů má vyvedené začátky a konce na svorkovnici stroje. Začátky vinutí jsou označeny U1 – V1

– W1 a konce vinutí U2 – V2 – W2. Pomocí vodivých propojek lze připojit do hvězdy nebo do trojúhelníka.

Způsob zapojení musí být uvedený na štítku stroje. Označení může být popsáno např. 400/230 V – Y/Δ. Z označení plyne, že v síti 3x400 V se zapojí asynchronní stroj do tzv. hvězdy. Druhý údaj naznačuje, že motor se zapojí do trojúhelníku v síti 3x230 V.



Obr. 2.2 Svorkovnice asynchronního motoru zapojení do hvězdy a trojúhelníku [13]

1.2.4 Princip činnosti

Princip činnosti asynchronního stroje je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole. Točivé magnetické pole je vytvořeno statorovými vinutím, kterým protéká proud. Statorové vinutí je statická, netočivá část stroje. Nejčastěji jako trojfázové, přičemž vinutí každé fáze je prostorově a časově natočeno o 120 stupňů. Indukční čáry točivého magnetického pole protínají vodiče rotoru, takže se v nich indukuje napětí (proto indukční stroj), které rotorem protlačí proud. Tento proud vybudí rotorové magnetické pole, a tedy podle pravidla levé ruky na něj působí síla, která roztočí rotor.

Vlivem mechanické rychlosti otáčení rotoru se snižuje vzájemná rychlost ω_2 vůči točivému magnetickému poli. Zvyšováním otáček dochází k zmenšení pohybu vodičů rotoru vzhledem k statorovému poli, čímž dojde k poklesu indukovaného napětí do rotoru a také k poklesu proudu a momentu. Pokud by otáčky rotoru byly stejné s rychlostí točivého magnetického pole statoru ω_1 , tedy $n = n_1$, do kotvy by se

neindukovalo napětí, rotorem by neprotékal proud a moment by byl také nulový. Vlivem mechanických ztrát způsobených ložisky, ventilátorem apod. dojde ke snížení otáček kotvy. Tím dojde opět k indukování napětí až do vyrovnání ztát a zátěžného momentu na hřídeli.

Synchronní otáčky točivého magnetického pole jsou přímo závislé na počtu pólů vinutí p a frekvenci napájecího proudu f . Pólová rozteč je vzdálenost os sousedních pólů a pro dvojpólové motory je otáčka úměrná dvěma pólovým roztečím. Rychlost synchronních otáček je úměrná:

$$\omega = \frac{\pi * n}{30} [\text{rad} * \text{s}^{-1}; \text{ot} * \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde n [$\text{ot} * \text{min}^{-1}$] je mechanická rychlost.

$$n_1 = 60 * f_1 [\text{ot} * \text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (1.2)$$

Čtyřpólové stroje vykonají za jeden kmit půl otáčky. Obecně pak platí vztah:

$$n_s = \frac{60 * f}{p} [\text{ot} * \text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (1.3)$$

kde p je počet pólových dvojic.

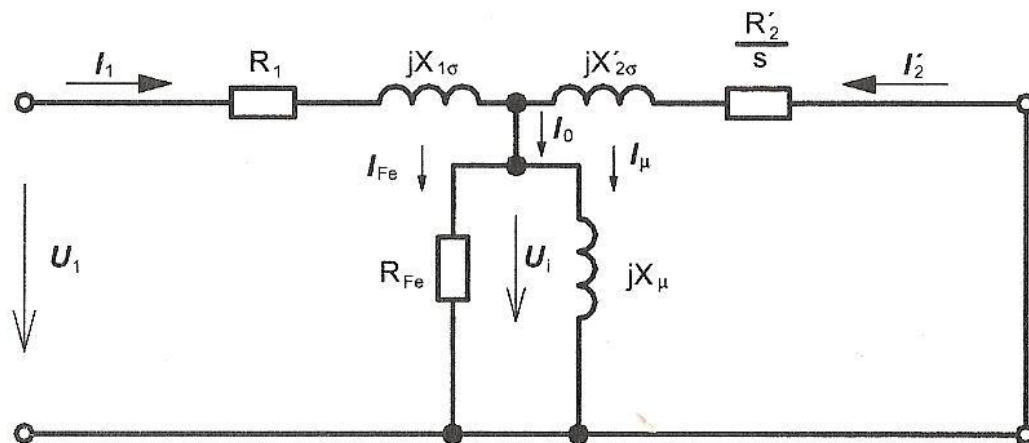
Rozdíl mezi synchronními otáčkami a mechanickým otáčením rotoru se nazývá skluz, který je udáván jako bezrozměrná jednotka nebo v procentech. Značí se s a je vyjádřen pomocí vzorce:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} (* 100) [-(\%)] \quad (1.4)$$

Rychlost mechanického otáčení rotoru je pak dán vztahem:

$$n = \frac{60 * f}{p} * (1 - s) [\text{ot} * \text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (1.5)$$

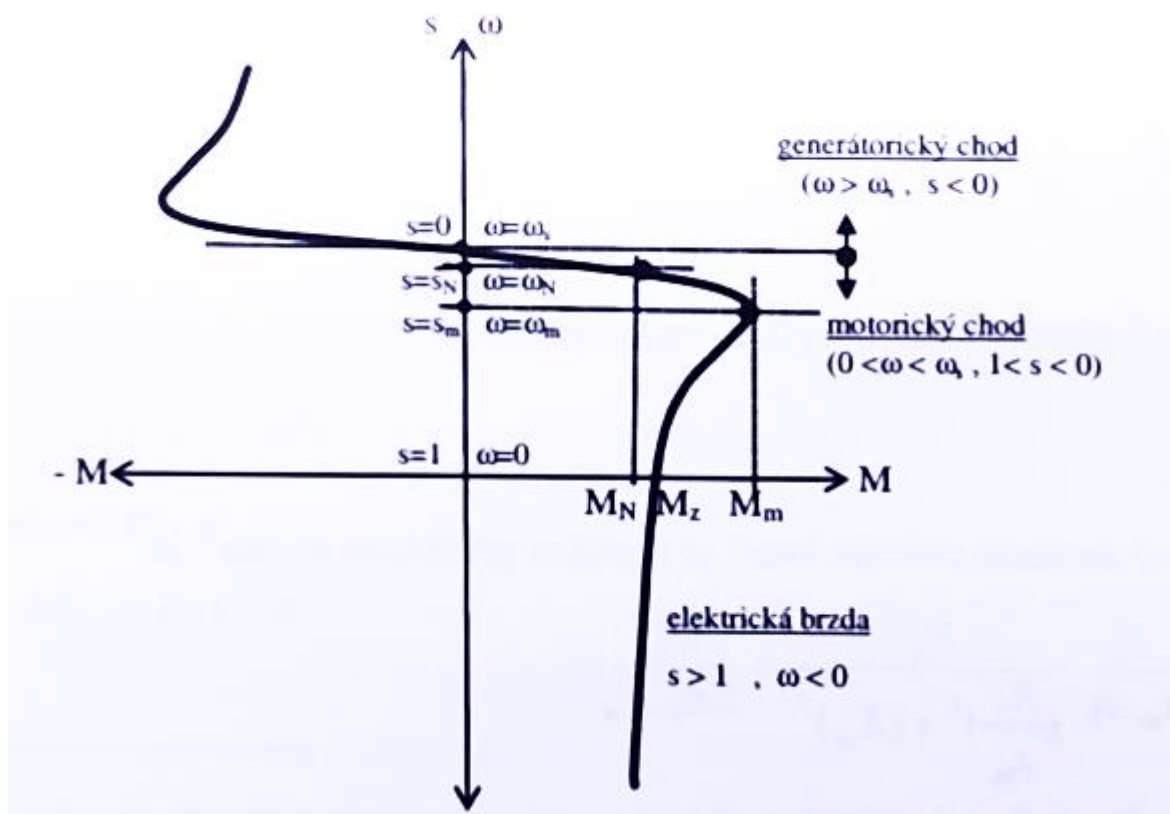
1.3 Náhradní schéma



obr 1.3 Náhradní schéma [6]

Náhradní schéma vychází ze schématu transformátoru. Oproti transformátoru jsou zde rozdíly, které je potřeba zohlednit v náhradním schéma. U transformátoru neexistuje vzduchová mezera, čímž je magnetický odpor mnohem větší a také je vyšší magnetizační proud. Mechanický výkon na hřídeli je nutné vyjadřovat ekvivalentním výkonem elektrickým. Dále proudy statoru a rotoru jsou odlišné frekvencí. To je dáno skluzem rotoru.

1.4 Momentová charakteristika



obr 1.4 Momentová charakteristika [3]

Momentová charakteristika graficky znázorňuje závislost momentu motoru na otáčkách a skluzu. Charakteristiku lze rozdělit do tří částí, podle toho v jakém režimu pracuje asynchronní stroj. Dle obr. 1.4 je vidět, že asynchronní stroj pracuje v motorickém režimu v rozmezí skluzu $1 < s < 0$. Jmenovitý pracovní bod stroje se nachází ve jmenovitém momentu M_n při skluzu s_n . Moment zvratu je roven maximálnímu momentu M_{max} pro který odpovídá maximální skluz s_{max} . Zejména pro rozběh stroje je důležitý záběrný moment $M_{záb}$ odpovídající skluzu $s = 1$.

2 Způsoby rozběhu asynchronního stroje

Z rozboru momentové charakteristiky je patrné, že při rozběhu asynchronního motoru je nutné překonat vysoký skluz, při kterém jsou velké ztráty a proud. Při počátku rozběhu je velký záběrný proud, který je řádově pět až sedminásobkem

jmenovitého proudu. Z tohoto důvodu se asynchronní motory spouští různými způsoby, které zamezí nárůstu rázového proudu. Aplikace rozběhu se liší a volí se pro neoptimálnější využití v praxi.

2.1 Přímé připojení k síti

Jedná se o nejjednodušší způsob rozběhu stroje. Ovšem tento způsob nedokáže omezit velký záběrný moment. Záběrný proud je omezen jen impedancí nakrátko motoru a sítě. Spouštění přímým připojením k síti je nejběžnější způsob rozběhu asynchronních strojů o přibližném výkonu 4 kW v síti nn. Záběrný proud se pohybuje v rozmezí 5 až 7 násobku jmenovitého proudu. U těžkého rozběhu se může záběrný proud pohybovat až desetkrát větší než jmenovitý proud. Rozběh je uvažován s plným zatížením.

2.1.1 Rozběh

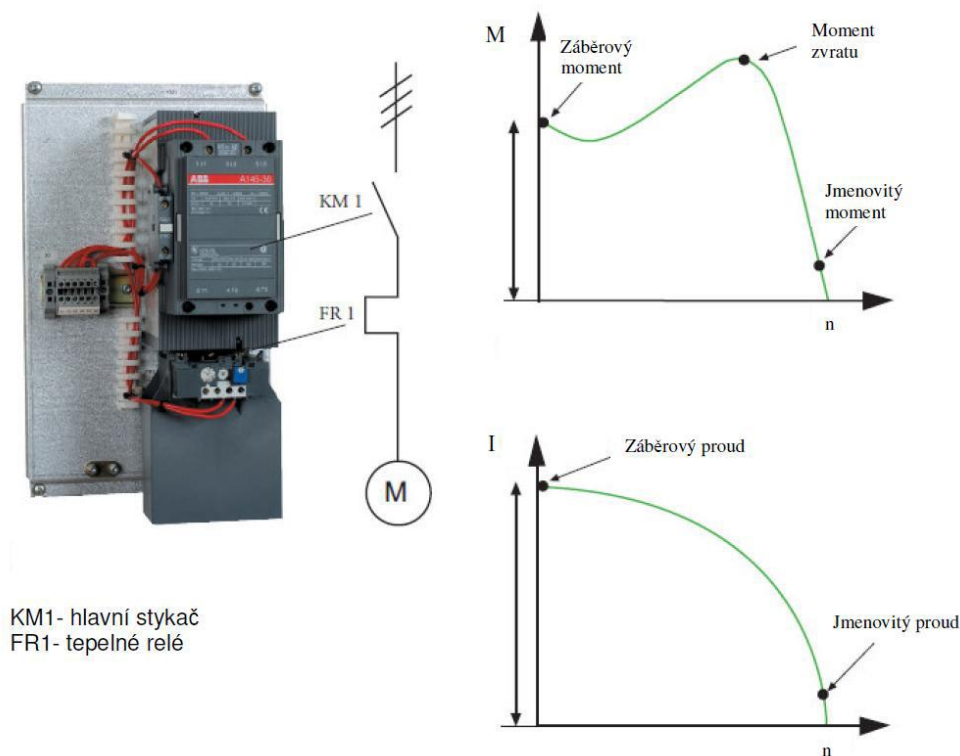
S rostoucími otáčkami neklesá úměrně proud při rozběhu. Největší pokles proud zaznamenáváme až při přiblížení k jmenovitým otáčkám. S velkým záběrným proudem docílíme také velkého momentu. Pomocí přímého připojení lze dosáhnout i většího záběrného momentu než je potřeba v dané aplikaci. Toho využíváme u aplikací, kde požadujeme plné zatížení při rozběhu stroje.

Nevýhodou této aplikace je motor značně namáhán motoru. Jedná se zejména o mechanické nárazové namáhání, namáhání ložisek nebo také namáhání izolace vinutí.

2.1.2 Realizace

Přímé připojení k síti lze realizovat pomocí trojpolového spínače. Pojistky musí být umístěny mezi spínačem a motorem z důvodu bezpečné výměny. Dalším způsobem lze

takto motor připojit pomocí jističů, které zároveň zajišťují nadproudovou ochranu. Pro dálkové ovládání rozběhu lze využít stykače. Při této možnosti nalezneme pojistky před stykači z důvodu ochrany i spínacích prvku.



obr 2.1 Přímé připojení k síti [8]

2.2 Spouštění pomocí frekvenčního měniče

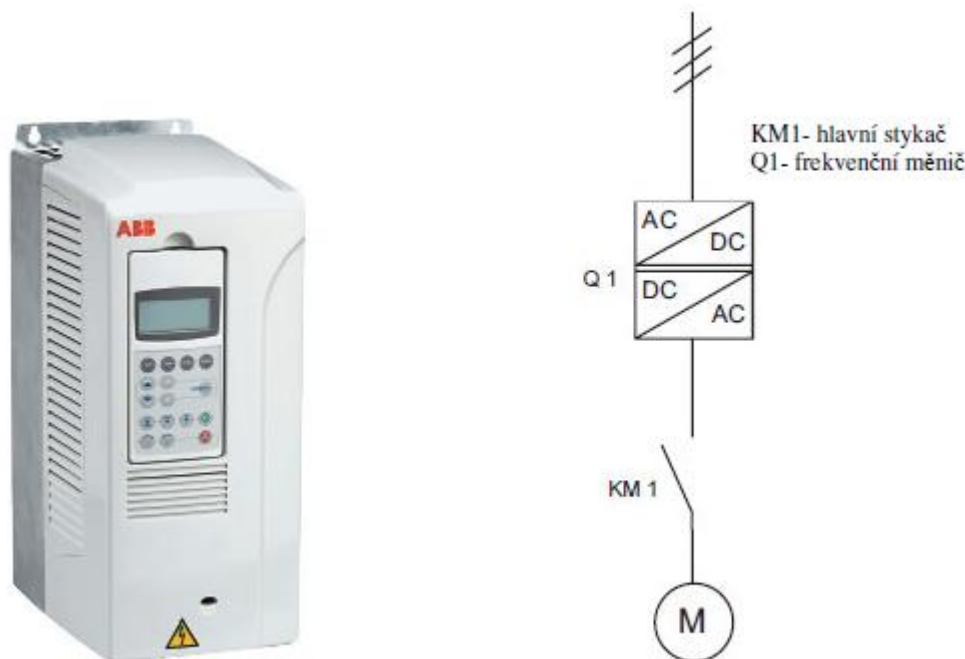
Frekvenční měnič někdy také je nazývaný VSD (Variable speed drive), nebo VFD (Variable Frequency Drive) je taktéž velmi častým prostředkem připojení motoru k síti. Samotný frekvenční měnič se skládá ze dvou částí. První konvertuje frekvenci síť AC (50-60 Hz) na frekvenci DC a druhou, konvertující frekvenci DC zpět na AC, tu ale s frekvencí proměnlivou mezi 0-250 Hz. Protože otáčky motoru jsou závislé na frekvenci, umožňuje frekvenční měnič regulovat otáčky motoru pomocí změny výstupní frekvence. Využití frekvenčního měniče je tedy, když je potřeba regulace rychlosti motoru během trvalého provozu. [8]

V mnoha aplikacích je frekvenční motor stále používán pouze jako prostředek k řízenému startu a zastavení navzdory skutečnosti, že není žádná potřeba regulace otáček motoru během provozu. Řízením výstupní frekvence, jmenovitý moment na hřídeli motoru dosahuje vysokých hodnot i u nízkých otáček motoru. Rozběhový proud motoru je taktéž výrazně omezen a pohybuje se kolem 0,5 - 1 násobku proudu jmenovitého. U motoru můžeme pomocí frekvenčního měniče docílit „dokonalého“ startu i zastavení. V případě použití inkrementálního čidla u motoru, který reguluje frekvenční měnič je docíleno maximálního momentu i při nulových otáčkách motoru. Inkrementální čidlo zajišťuje zpětnou vazbu o přesných otáčkách motoru. [8]

U frekvenčních měničů je nezbytné použití vstupních filtrů k redukci vyšších harmonických generovaných frekvenčním měničem. [8]

Nejčastěji využívaným měničem frekvence je nepřímý měnič. Nejprve v meziobvodu střídavé napětí usměrníme a poté opět přeměníme na střídavé napětí s širokým rozsahem požadované frekvence. [8]

Nevýhodou využití měniče kmitočtu jsou hlavně vysoká pořizovací cena, občas je nutné stínit vodiče k motoru. Délka vodičů z frekvenčního měniče k asynchronnímu motoru je omezena svou kapacitou vodičů, kde je často potřeba využití tlumivky nebo sinusových filtrů. [8]



obr 2.2 frekvenční měnič [8]

2.3 Výběrem vhodné klece rotoru

2.3.1 Vírová klec

Vírová klec se vyznačuje hlubokými a úzkými drážkami. Lze s ní dosáhnout zároveň zmenšení rázového proudu a zvýšení rozběhového momentu. Při rozběhu proud prochází menší plochou, vnějškem, a tedy chová se jako klec odporová. Během spouštění motoru je spodní část tyče spřažena větším rozptylovým tokem než horní část a tedy proud prochází vnější částí klece. Po skončení rozběhu se proud rozdělí takřka rovnoměrně po celé kleci.

Oproti dvojité kleci je konstrukčně jednodušší, ale nedokáže dosáhnout výhodného zvětšení momentu. Typickým využitím pro motory s vírovou klecí jsou stroje s vyššími výkony s požadavkem na menší záběrné momenty.

2.3.2 Odporová klec

Stroje s využitím odporové klece se používají v praxi, kde je kladen důraz na velký počáteční moment. Typickými příklady jsou jeřábové nebo výtahové aplikace. Zvýšením odporu kotvy dosáhneme pomocí výběru vhodného materiálu. Tyče a spojovací kruhy jsou zhotoveny z rezistivního materiálu než je obvykle použito, například mosaz. Získáním většího odporu kotvy docílíme úměrně zvýšením momentu na úkor zhoršení účinníku a zvětšení skluzu stroje. Vhodnou volbou odporu kotvy lze dosáhnout záběrného momentu až maximálními hodnotám momentu stroje.

2.3.3 Dvojitá klec

Dvojitou klecí, také známou jako Bouchetovou klecí, lze dosáhnout, bez zhoršení účinníku motoru, zvýšením záběrného momentu při snížení záběrného proudu. Dvojitá klec je konstrukčně tvořena pomocí dvou soustav tyčí rozdílného průřezu. Tyče jsou složeny vedle sebe nebo pod sebou a jsou spojeny vodivými kruhy. Mezi tyčemi musí být vzduchová mezera, aby se rozptylový magnetický tok neuzavíral pouze u jedné z tyčí.

Klece dělíme na pracovní a rozběhovou. Rozběhová klec je na vnější straně rotoru, pracovní klec nalezneme vně kotvy. Při rozběhu, kdy kotvou prochází síťový proud má reaktanci pracovní klec větší než horní rozběhová klec. Tím pádem se do obou klecí nepřímo úměrně impedanci rozdělí proud. Větší část proudu prochází rozběhovou klecí s menším průřezem s horší měrnou vodivostí a svým chováním připomíná klec odporovou. Tím při rozběhu dosáhneme většího momentu a nižších hodnot proudu.

Po rozběhu stroje jsou reaktance tyčí nepatrné a proud je rozdělen nepřímo úměrně jejich odporům. Také po rozběhnutí dosáhneme malého skluzu. Kotva se začne chovat podobně jako jednoduchá klec.

Momentová charakteristika odpovídá součtu charakteristik obou klecí. Po rozběhu je podobná jednoduché kleci, ovšem s nepatrně horšími vlastnostmi.

2.3.4 Změnou odporu rotoru

U motorů s vinutou kotvou lze omezit rozběhový proud změnou odporu rotoru. Měřením nakrátko s přídatnou impedancí rotoru určíme záběrný proud. Přídatnou impedanci kaskádně odpojeme, aby nedošlo k prudkému nárůstu proudu během rozběhu stroje. Po rozběhu je přídatná impedance odpojena.

2.3.5 Změnou reaktance rotoru

Podobně jako v předchozím bodě přidáme do vinuté kotvy přídatnou reaktanci. Docílíme tím stejného účinku rotoru a statoru a také stejné frekvence rotoru i statoru při záběru. Tento způsob rozběhu se nepoužívá z důvodu zmíněných vlastností.

2.4 Spouštění sníženým napětím

Dalším způsobem rozběhu asynchronního stroje se provádí pomocí sníženého napětí. Tím lze docílit omezení rázového rozběhového proudu, ale také snížení momentu. Proud je úměrný napětí, zatímco moment je úměrný kvadrátu napětí

Tento způsob se používá v praxi u lehkých rozběhů, kde není potřeba velký rozběhový moment. Rozběh sníženým napětím lze aplikovat několika způsoby.

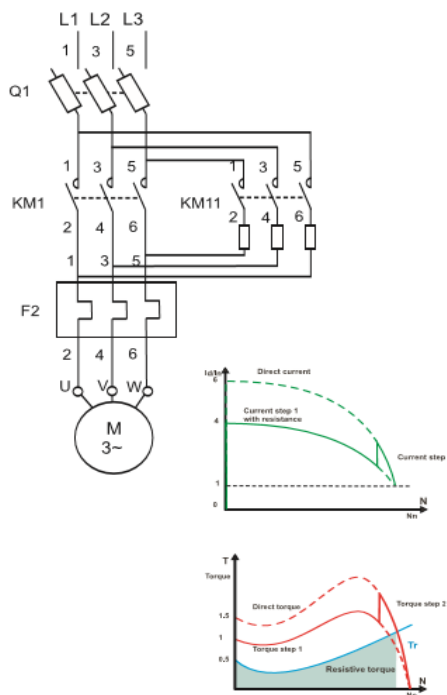
2.4.1 Spouštění se statorovým spouštěčem

Záběrný proud lze zmenšit snížením svorkového napětí. Moment ale klesá s druhou mocninou napětí a u tohoto způsobu rozběhu se záběrný moment sníží značně.

Do série se statorovým vinutím zapojíme symetrický trojfázový spouštěcí odpor nebo tlumivku, které lze také zapojit do uzlu vinutí. U motorů menších výkonů se používá spouštěcí odpor, u větších motorů spouštěcí tlumivka (reaktorové spouštění). Podle výrazu se snížením napětí lineárně zmenší záběrný proud motoru a záběrný moment se zmenší se čtvercem napájecího napětí. [10]

Na začátku rozběhu jsou odpory nastaveny na největší úrovni. Počáteční napětí je nastaveno na minimum a postupně navyšuje svou hodnotu. S klesajícím odporem moment roste rychleji než v zapojení hvězda-trojúhelník, kde je napětí konst. po celou dobu zapojení do hvězdy. [11]

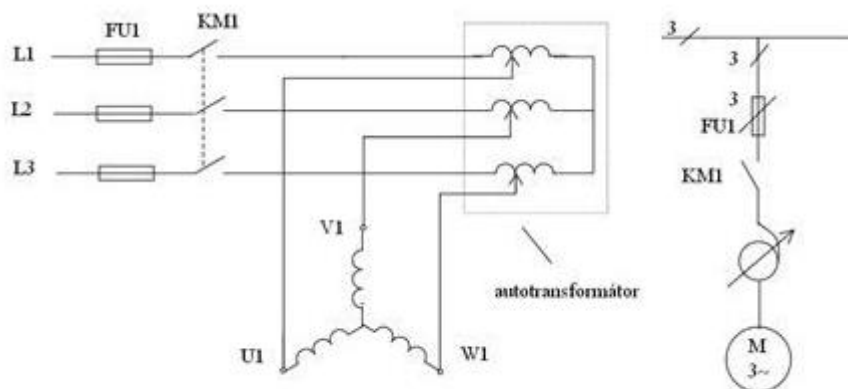
Statorový spouštěč je vhodný zejména tehdy, jestliže chceme dosáhnout jemný záběr motoru rozbíhajícího se s malým zatížením. Při rozběhu se odpory postupně vyřadí a motor je po rozběhu zapojen na plné napětí. [10]



Obr. 3.6 Spouštění motoru se statorovým spouštěčem[11]

2.4.2 Spouštění pomocí autotransformátoru

Tento způsob se využívá u větších strojů, kde přepínač hvězda-trojúhelník nedokáže dostatečně zmenšit záběrný proud. Omezení záběrného proudu při rozběhu docílíme postupným navyšováním sekundárního napětí autotransformátoru. Autotransformátor je po rozběhu odpojen, proto při rozběhu může být transformátor přetěžován. Tento způsob rozběhu je ztrátový a je spíše zřídka využívanou variantou.



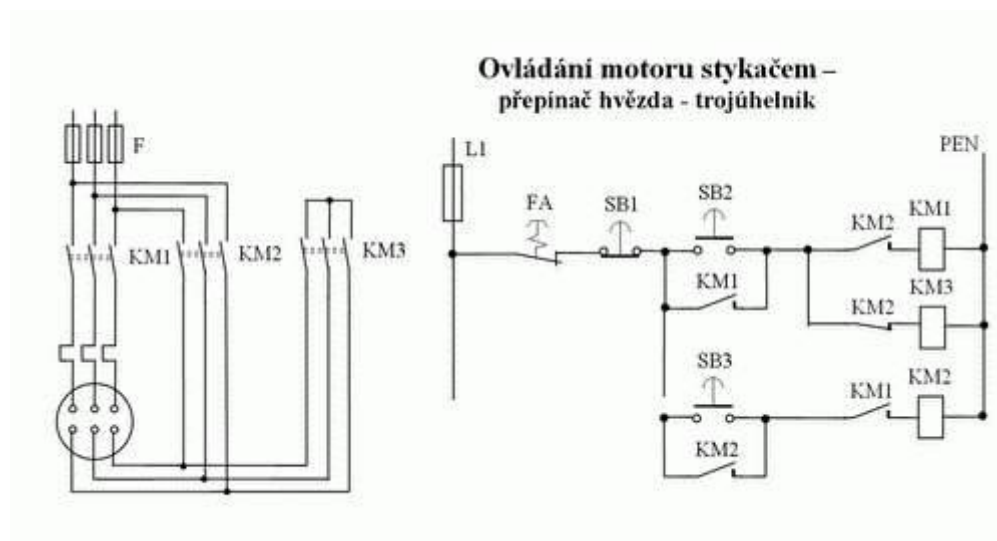
obr 2.4 Schéma zapojení: a) třípólové schéma, b) jedнопólové schéma [13]

2.4.3 Spoštění pomocí přepínače Y/D

Rozběh pomocí přepínače hvězda-trojúhelník lze rozbíhat pouze aplikace s měkkým rozběhem, tj. s malým zatížením nebo naprázdno. Lehký rozběh je typický pro ventilátory, pily nebo obráběcí stroje. Podmínkou pro tuto aplikace je trvalé zapojení svorkovnice do trojúhelníka. Také tento způsob rozběhu není určený pro rozběhy s momentem zátěže větším než 50 % jmenovitého momentu na hřídeli.

Při rozběhu je motor zapojen do hvězdy a napětí jedné fáze o $\sqrt{3}$ menší, tedy fázové napětí. Sníženým napětím se také zmenší 3x moment oproti zapojení v trojúhelníku. Proud se sníží přímo úměrně napětím, tedy o $\sqrt{3}$. Vzhledem k pozdějšímu přepnutí do trojúhelníku se proud sníží 3x.

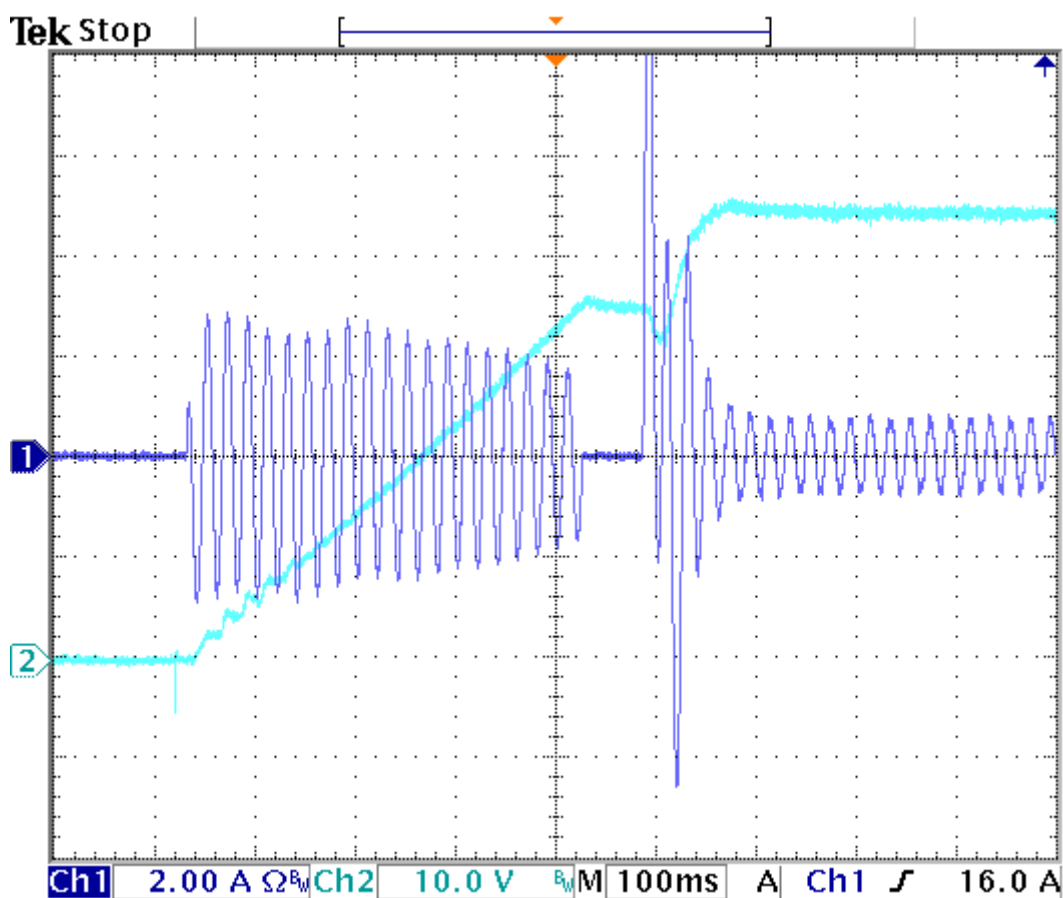
Při rozběhu ventilátoru je moment nízký a kvadraticky se zvyšuje s rostoucími otáčkami. Po dosažení jmenovitých otáček se přepíná zapojení z hvězdy na trojúhelník. Mezi vypnutím stykače hvězdy a sepnutím stykače trojúhelníku je nutná časová prodleva v řádech stovek milisekund. Toto zpoždění je nutné, aby nedošlo ke spečení kontaktů stykačů a tím pádem ke zkratu.



Obr 2.5 Přepínač hvězda-trojúhelník [14]

Měření rozběhu asynchronního stroje proběhlo na stejném motoru jako u rozběhu pomocí polovodičového měniče napětí. Parametry motoru jsou popsány v kapitole 3. Z grafu je patrná časová mezera mezi přepojením stykačů. Kanál 1 osciloskopu zachytil průběh proudu. Je zde patrná proudová špička při přepojení na trojúhelník a následný pokles proudu o odmocninu tří. Kanál 2 znázorňuje průběh momentu.

Využívání spouštění rozběhu přepínače hvězda – trojúhelník nese několik nevýhod a omezení. Největší nevýhodou je nutnost využití 6 vodičů pro připojení k vývodu motoru z rozvaděče. Dále je také nutné uvažovat o místě v rozvaděči, přepínač je prostorově náročný. Během přepnutí dochází k proudovým a momentovým rázům. Tento rozběh je nevhodný pro spouštění poháněných aplikací.



obr. 2.6 Graf proudu a otáček motoru při rozběhu pomocí přepínače hvězda-trojúhelník

2.4.4 Rozběh pomocí softstartu

Metoda spouštění motoru pomocí softstartérů je odlišná, než předchozí způsoby. Softstartér má ve fázi instalované dva anti-paralelně řazené tyristory, které jsou ovládány řídicí deskou.

Samotná regulace je napěťová, tj. řídicí deska softstartéru postupně zvyšuje/snižuje nastavenou efektivní hodnotu napětí ve fázích a to po obsluhou nastavenou dobu.

Využívá se principu, že napětí na svorkách motoru během startu je nízké a tudíž i rozběhový proud a moment. Postupným zvyšováním/snižováním napětí dochází k postupnému zvětšení/snížení momentu na hřídeli motoru a postupnému zvýšení/snížení proudu motoru a jeho otáček. Rozběh a doběh motoru je plynulý.

Matematicky lze dané vyjádřit: $M = U^2$ tj. pokud nastavíme počáteční napětí 50 % síťového napětí je $U = 50 \% \Rightarrow M(0,5^2) = 25 \% I = U$ tj. $U = 50 \% \Rightarrow I = 50 \%$ [8]

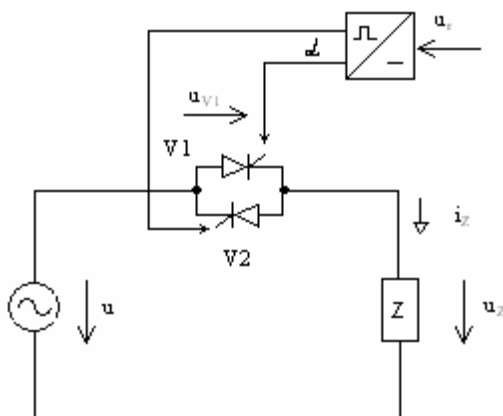
Obecně lze říct, že softstartér použijeme tam, kde je velký záběrový proud, který potřebujeme omezit, nebo tam, kde vysoký záběrový moment způsobuje trhání, rázy či jiné mechanické problémy.[8]

Zvláště výhodné je použití softstartérů u čerpadlových a ventilátorových aplikací. V neposlední řadě u aplikací přepravy materiálu pomocí dopravníkových pásů, kde řízení doběhu využíváme, k prevenci zničení přepravovaného materiálu díky rychlému zastavení. [8]

Rozběh pomocí softstartéru lze rozdělit podle typu zapojení či využití počtu součástek. Softstartéry lze také dělit na analogové či digitální. Digitální softstartéry obsahují mikročip a lze je ovládat pomocí počítače.

2.4.4.1 Jednofázový střídavý měnič napětí

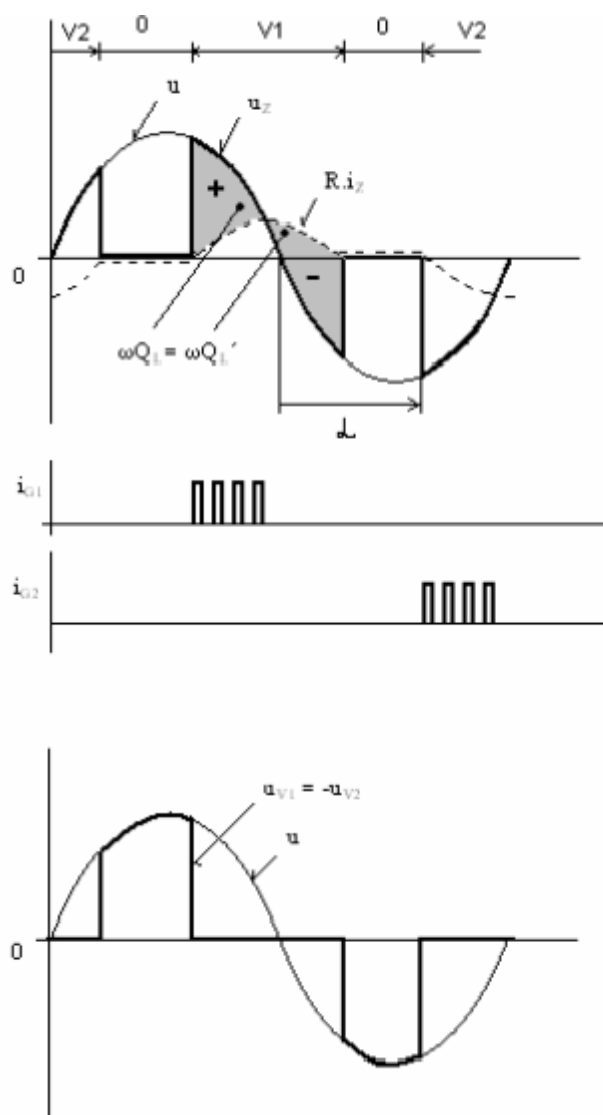
Jednofázový měnič napětí na obr. 2.7 se skládá z antiparalelní kombinace dvou tyristorů. Impedance Z je tvořena indukčností a odporem, což můžeme zjednodušeně brát jako motor. Jednofázové střídavé měniče nachází využití v již zmíněném ručním nářadí nebo vysavači.



obr 2.7 Jednofázový měnič napětí [2]

Takt $V1$ a s ním i kladná půlplna proudu zátěže i_z začínají se zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlplny napětí u . Křivka $R \cdot i_z$ a křivka u_z spolu vymezují plochy, jejichž obsah je úměrný napěťovému množství přivedenému a napěťovému množství odňatému indukčnosti zátěže v průběhu půlplny proudu. [2]

Mezi kladnou a zápornou půlplnou proudu i_z je prodleva (takt 0). Záporná půlplna i_z a s ní takt $V2$ začínají opět zpožděním α vzhledem k začátku záporné půlplny napětí u . [2]

obr. 2.8 Proudové a napěťové poměry měniče při zátěži $\varphi < \alpha < \pi$ [2]

Průběhy odpovídají velikosti řídicího úhlu α v mezích $\varphi < \alpha < \pi$, jestliže $\varphi = \arctg L/R$.

Řízením úhlu α v rozmezí $0 < \alpha < \varphi$ nejsou průběhy proudu a napětí na zátěži ovlivněny. Průběhy se nijak neliší, kdyby tyristory byli nahrazeni mechanickými spínači. [2]

2.4.4.1.1 Řídící impulsy pro tyristory

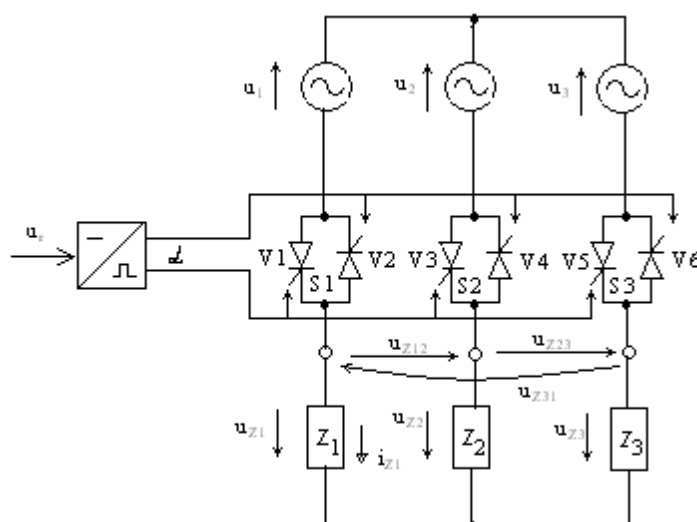
Řídící impulsy musí mít takový tvar, aby nedošlo k selhání činnosti měniče např. v rozsahu řízení $0 < \alpha < \varphi$. Řídící impulsy se začínají vysílat na tyristor V1, nemůže V1 ještě sepnout, neboť proud prochází tyristorem V2 a v důsledku toho je na V1 závěrné

napětí rovné propustnému na V2. Tyristor V1 může tedy sepnout až v úhlu φ , v němž právě zaniká proud tyristoru V2. Podmínkou ovšem je, aby v úhlu φ ještě trvalo vysílání řídicích impulsů na tyristor V1. S předpokladem krajní hodnoty $\varphi = \pi/2$ je nezbytné řešit řízení tak, aby při jakémkoliv α končil řídicí impuls, či končila řada řídicích impulsů, za polovinou příslušné půlplny napájecího napětí. Běžně se řeší řízení tak, že nezávisle na α končí řada řídicích impulsů vysílaných na tyristor vždy se zánikem příslušné půlplny napájecího napětí. [2]

2.4.4.2 Trojfázový plně řízený střídavý měnič napětí

Zátěž trojfázového plně řízeného měniče napětí může být spojena do D nebo do Y. Pokud je u zátěže Y vyveden uzel, pracuje trojfázový měnič napětí jako tři vedle sebe spojené měniče jednofázové. [2]

Běžně uzel zátěže vyveden není. Schéma trojfázového měniče se zátěží bez vyvedeného uzlu je uvedeno na obr. 2.9.



obr. 2.9 Trojfázový plně řízený střídavý měnič napětí [2]

Signálem u_r vstupujícím do bloku řízení se řídí úhel α . Tyristory s lichým číselným označením se zapínají se zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlplny příslušného fázového napětí (k němuž je ten který tyristor připojen). Tyristory se sudým označením se zapínají se zpožděním α vzhledem k začátku záporné půlplny příslušného fázového napětí. Číselné označení tyristorů vyjadřuje sled jejich spínání. S velikostí α se mění intervaly sepnutí jednotlivých tyristorů a tím i napětí na zátěži. [2]

2.4.4.2.1 Takty

Při sestavování rovnic obvodu s měničem je podstatné, je-li vývod 1 až 3 měniče přes antiparalelní dvojici tyristorů připojen k příslušnému fázovému napětí, či nikoliv. Je-li připojen, pak nezáleží na tom, který z antiparalelní dvojice tyristorů je sepnut. Jednotlivé antiparalelní dvojice tyristorů lze tedy přijmout jako spínače S1, S2, S3, tak jak je naznačeno na obrázku 3.3. V souvislosti s uvedeným označením existují tyto možné takty a jim odpovídající napěťové poměry v obvodu: [2]

Takt S1, S2, S3:

(sepnuté jsou všechny tři spínače)

$$u_{Z1} = u_1, u_{Z2} = u_2, u_{Z3} = u_3$$

$$u_{Z12} = u_1 - u_2, u_{Z23} = u_2 - u_3, u_{Z31} = u_3 - u_1$$

$$u_{S1} = u_{S2} = u_{S3} = 0$$

Takt S1, S2:

$$u_{Z1} = -u_{Z2} = (u_1 - u_2) / 2, u_{Z3} = 0$$

$$u_{Z12} = u_{Z1} - u_{Z2} = u_1 - u_2$$

$$u_{Z23} = u_{Z2} - u_{Z3} = (u_2 - u_1) / 2$$

$$u_{Z31} = u_{Z3} - u_{Z1} = (u_2 - u_1) / 2$$

$$u_{S1} = u_{S2} = 0$$

$$u_{S3} = u_3 - u_2 + u_{Z2} = u_3 - (u_1 + u_2) / 2$$

Takt S1, S3:

$$u_{Z1} = -u_{Z3} = (u_1 - u_3) / 2, u_{Z2} = 0$$

$$u_{Z12} = u_{Z1} - u_{Z2} = (u_1 - u_3) / 2$$

$$\begin{aligned}u_{Z23} &= u_{Z2} - u_{Z3} = (u_1 - u_3) / 2 \\u_{S1} &= u_{S3} = 0 \\u_{S2} &= u_2 - u_3 + u_{Z3} = u_2 - (u_1 + u_3) / 2\end{aligned}$$

Takt S2, S3:

$$\begin{aligned}u_{Z2} &= -u_{Z3} = (u_2 - u_3) / 2, u_{Z1} = 0 \\u_{Z12} &= u_{Z1} - u_{Z2} = (u_3 - u_2) / 2 \\u_{Z23} &= u_{Z2} - u_{Z3} = u_2 - u_3 \\u_{Z31} &= u_{Z3} - u_{Z1} = (u_3 - u_2) / 2 \\u_{S2} &= u_{S3} = 0 \\u_{S1} &= u_1 - u_2 + u_{Z2} = u_1 - (u_2 + u_3) / 2\end{aligned}$$

Takt 0:

$$\begin{aligned}u_{Z1} &= u_{Z2} = u_{Z3} = 0 \\u_{S1} &= u_1, u_{S2} = u_2, u_{S3} = u_3 \\[2]\end{aligned}$$

Poměry při $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$ jsou naznačeny na obr. 3.4. V horní části obrázku je uveden spínací diagram. Pod ním jsou naznačeny příslušné průběhy napětí a proudu. Tečkovaně jsou ve spínacím diagramu naznačeny intervaly, v nichž jsou na jednotlivé tyristory vysílány řady opakovaných řídicích impulsů. Ze spínacího diagramu lze vyčíst jednotlivé takty, kterými měnič ve sledovaném rozsahu α prochází. Střídají se takty se dvěma a se třemi sepnutými tyristory. Průběhy napětí obvodu v jednotlivých taktech je možno sestrojít na základě vztahů (3.1) až (3.4). Průběh fázového proudu i_{Z1} je sestrojen s využitím vztahů, které platí mezi proudem a napětíovým množstvím QL , QL' indukčnosti zátěže.[2]

Poměry při $2\pi/3 < \alpha < 5\pi/6$ se liší od předchozích tím, že odpadá takt S1,S2,S3 a místo něj se vyskytuje takt 0. Spínací diagram s příslušným průběhem napětí a proudu zátěže je naznačen na obr. 2.10. [2]

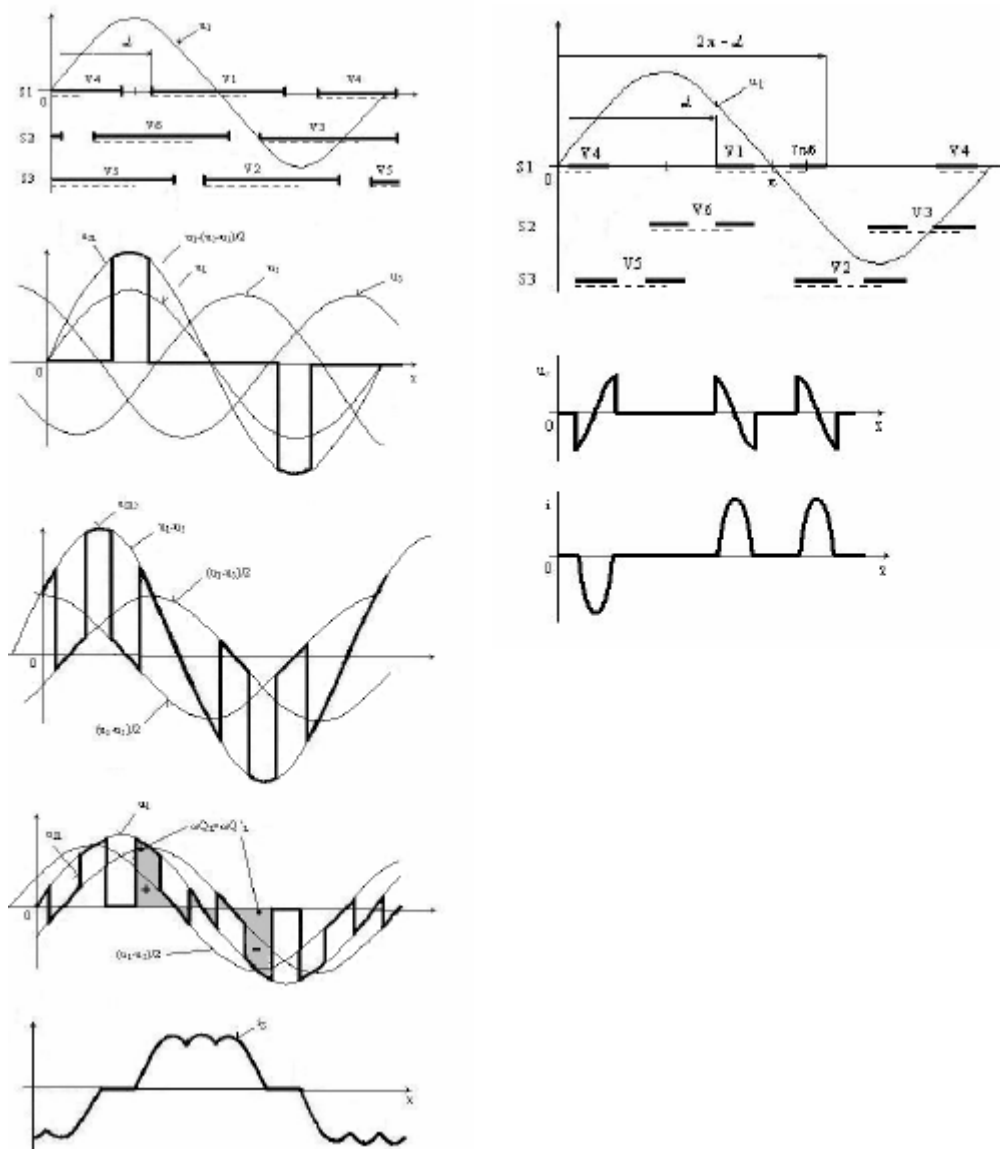
Na tyristor V1 se začínají vysílat řídicí impulsy se zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlplny napětí u_1 . Protože při začátku vysílání řídicích impulsů na V1 ještě trvá vysílání řídicích impulsů na V6, dochází k zapnutí V1, V6, což odpovídá taktu S1, S2. Podle (3.2) je v tomto taktu $u_{Z1}=(u_1-u_2)/2$. Z průběhu u_{Z1} obr. 3.5 lze odvodit průběh i_{Z1} a z něj pak interval sepnutí obou tyristorů. Tyristor V1 po malé proudové prodlev_ (taktu 0) zapíná znovu spolu s tyristorem V2. Kladnou půlplnu proudu i_{Z1} tvoří dva proudové impulsy symetricky rozložené kolem průchodu napětí u_1 nulou do záporné půlplny. [2]

Pro zjednodušení konstrukce průběhů proudů a napětí je zátěž pouze induktivního charakteru. Z toho plyne, že 1. harmonická fázového proudu je o $\pi/2$ zpožděna za fázovým napětím. Podobně jako u jednofázového měniče je kladná či záporná půlplna fázového proudu symetricky rozložena v okolí průchodu fázového napětí nulou. Začíná-li tedy interval sepnutí určitého tyristoru (spínače) se zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlplny fázového napětí, končí vzhledem k tomuto začátku v úhlu $2\pi-\alpha$.

Podobně jako jednofázový měnič je i trojfázový měnič při $\alpha < \pi/2$ plně otevřený – na zátěži je celé napájecí napětí. Teprve s nárůstem α nad hodnotu $\pi/2$ se napětí na zátěži snižuje.

Na tyristor V1 se začínají vysílat řídicí impulsy se zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlplny napětí u_1 . Protože při začátku vysílání řídicích impulsů na V1 ještě trvá vysílání řídicích impulsů na V6, dochází k zapnutí V1, V6, což odpovídá taktu S1, S2. Podle (3.2) je v tomto taktu $u_{Z1}=(u_1-u_2)/2$. Z průběhu u_{Z1} obr. 3.5 lze odvodit průběh i_{Z1} a z něj pak interval sepnutí obou tyristorů. Tyristor V1 po malé proudové

prodlevě (taktu 0) zapíná znovu spolu s tyristorem V2. Kladnou půlvlnu proudu i_{Z1} tvoří dva proudové impulsy symetricky rozložené kolem průchodu napětí u_1 nulou do záporné půlvlny. [2]



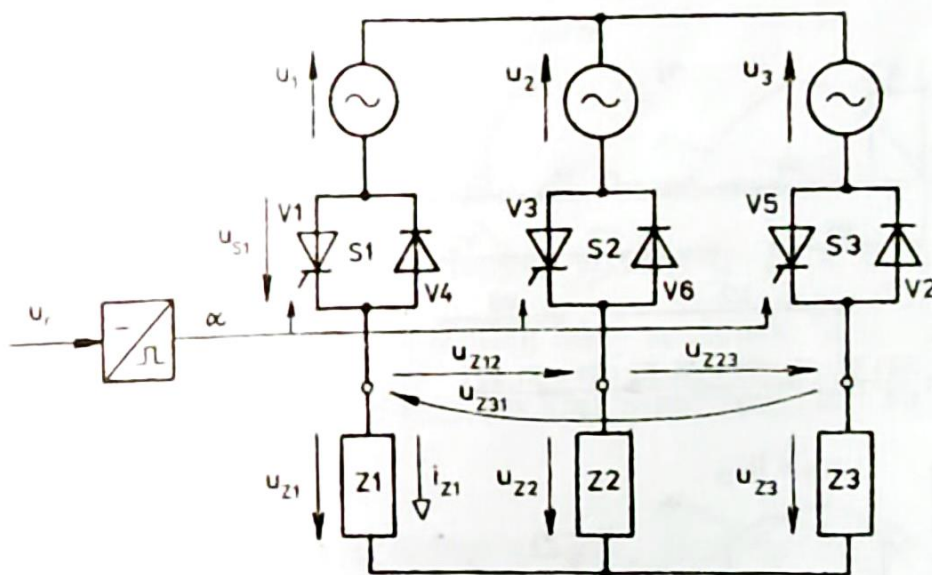
obr 2.10 Spínací diagram, proudové a napěťové poměry měniče při L zátěži a při $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$, Spínací diagram s příslušným průběhem napětí a proudu zátěže[2]

2.4.4.3 Trojfázový polořízený střídavý měnič napětí

Obdobně jako u plně řízeného trojfázového měniče, i zde lze motor zapojit do Y nebo do D. Zapojení do hvězdy se chová stejně jako u plně řízené varianty, tedy s vyvedeným vodičem jako tři samostatné jednofázové měniče napětí. Ovšem jako jednofázový měnič napětí v polo řízené variantě nemá smysl a tedy nepoužívá se.

Polořízený měnič se od plně řízeného liší tím, že v antiparalelním zapojení nejsou dva tyristory, ale místo zpětného tyristoru je použita polovodičová dioda.

2.4.4.3.1 Schéma zapojení



obr.2.11 Trojfázový polořízený střídavý měnič napětí [2]

2.4.4.3.2 Takty

Takty jsou takřka stejné jako u plně řízené varianty, ovšem mimo takt 0.

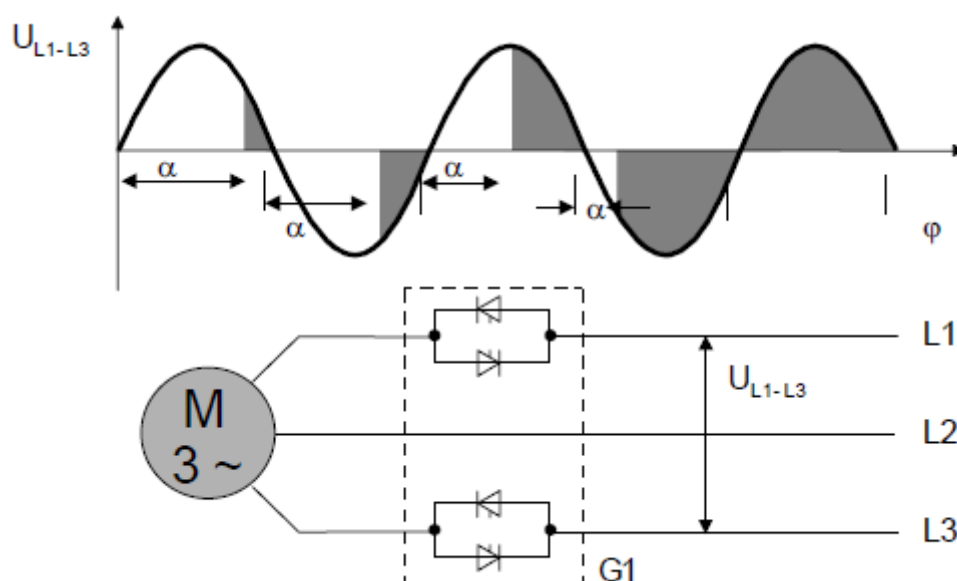
Takt 0 se liší tím, že spínače nejsou namáhány fázovým napětím. Na jednom spínači je vždy nulové napětí. Jedná se o fázi, ve které je polarizováno napájecí napětí ve směru zpětné diody. Z Kirchhoffova druhého zákona je patrné, že na zbylých fázích je sdružené napětí.

Nároky na řídicí impulsy pro polořízený měnič jsou menší než pro plně řízený měnič. Díky využití diody nenastává při žádné hodnotě řídicího úhlu opakované sepnutí téhož tyristoru v půlperiodě. Využití diody má také pozitivní vliv, že během zapnutí jediného tyristoru úspěšně startuje měnič.

2.4.4.4 Úsporná varianta s jednou přímou fází

Jedná se modifikaci trojfázového plně řízeného střídavého měniče napětí, kde jedna fáze je napřímo připojená k motoru. Na obr. je znázorněno zapojení a předpokládaný teoretický průběh zvyšování napětí na svorkách motoru.

2.4.4.4.1 Schéma zapojení



obr 2.11 Úsporná varianta střídavého měniče napětí [9]

Tuto variantu jsem podrobil analýze a reálnému měření v rámci možností laboratoře.

2.4.4.4.2 Takty

Takt 1:

Ve 3. fázi je sepnut tyristor propustně orientovaný pro zápornou půlvlnu, ve druhé fázi jsou oba tyristory vypnuté, první je propojena napřímo. Proud je oproti standardnímu značení orientován kladně.

$$u_3 = u_{s3}$$

Takt 2:

Ve 2. a 3. fázi jsou oba spínače (antiparalelní kombinace tyristor_) vypnuté, první fáze je propojena napřímo. Není vytvořen uzavřený obvod a proto neprotéká žádný proud.

$$u_3 = u_{s1}$$

Takt 3:

Ve 2. fázi je sepnut tyristor propustně orientovaný pro kladnou půlvlnu napětí, ve 3. fázi jsou oba tyristory vypnuté, první fáze je propojena napřímo. Proud 3. fázi neteče.

Takt 4:

Ve 3. fázi je sepnut tyristor propustně orientovaný pro kladnou půlvlnu, ve druhé fázi jsou oba

tyristory vypnuté, první je propojena napřímo. Proud je oproti standardnímu značení orientován záporně.

$$u_3 = u_{s3}$$

Takt 5:

Ve 2. a 3. fázi jsou oba spínače (antiparalelní kombinace tyristorů) vypnuté, první fáze je propojena napřímo. Není vytvořen uzavřený obvod, a proto neprotéká žádný proud. Na tomto taktu lze velice dobře pozorovat změnu jeho délky, která je způsobena změnou řídicího úhlu.

$$u_3 = u_{s1}$$

Takt 6:

Ve 2. fázi je sepnut tyristor propustně orientovaný pro zápornou půlvlnu napětí, ve 3. fázi jsou oba tyristory vypnuté, první fáze je propojena napřímo. Proud 3. fázi neteče. [12]

3 Realizace rozběhu asynchronního stroje

V rámci možností školní laboratoře jsem provedl měření rozběhu asynchronního.

Vybral jsem si úspornou variantu softstarétu s jednou přímou fází. Pro tento způsob jsem provedl simulaci v programu Matlab, Simulink, PLECS. V této kapitole se budu věnovat nejprve realizaci simulace rozběhu, poté reálnému zapojení a měření rozběhu a následnému porovnání obou výsledků.

Dle vybavení laboratoře jsem si vybral pro rozběh asynchronního magnetického stroje softstartér od společnosti Siemens v katalogovém označení SIRIUS 3RW30.

Přesněji se jedná o typ SIRIUS 3RW30 – 1AB14.

Tato varianta je výhodná zejména pro úsporu použití polovodičových součástek a tím i konečné ceny měniče. Měnič s použitím 6 polovodičových prvků je zejména výhodné využít v domácích aplikacích jako např. kotoučová pila nebo ventilátor, kde není potřeba případné regulace.

3.1 Simulace rozběhu

Simulaci jsem provedl pro nezatížený stroj a pro částečně zatížený, pro stejné stavy jsem měřil rozběh stroje v laboratoři. Pro řízení tyristorů jsem použil šesti pulzní generátor. Pro simulaci asynchronního stroje jsem využil z knihovny PLECSu model asynchronního stroje. Soubor se simulacemi a nachytanými parametry je v příloze na CD. Přiložené simulace popisují úspornou variantu s jednou přímou fází a také plně řízenou verzi měniče. Obě varianty jsou s i bez zátěže. Pro určení parametrů jsem použil vzorečky z literatury [3].

3.1.1 Odhad parametrů stroje

Odhad parametrů stroje je vhodný spíše pro stroje vyšších výkonů. Pro malé výkony je odhad více nepřesný, ale pro simulaci dané aplikace dostačuje.

Štítek asynchronního stroje:

- **TYPE** – AP112M/4
- **IP44**
- **4 kW**
- **50 Hz**
- **Δ 380 V**
- **8,6 A**
- **1430 ot*min⁻¹**

Účinnost stroje ve jmenovitém režimu uvažuji $\cos \varphi = 0,8$ a účinnost $\eta = 90 \%$ a moment zvratu 3.

$$I_N = \frac{P_N}{3 * U_N * \cos \varphi * \eta} \quad (3.1)$$

$$I_N = \frac{4000}{3 * \frac{380}{\sqrt{3}} * 0,8 * 0,9} \quad (3.2)$$

$$I_N = 8,44 [A] \quad (3.3)$$

Dle štítku stroje je jmenovitý proud 8,6 A a z odhadu parametrů jsme vypočetli velikost jmenovitého proudu 8,44 A. Zde je patrné, že odhad parametrů odpovídá přibližným reálným hodnotám stroje.

$$s_N = \frac{s_N - s}{s_N} * 100 \quad (3.4)$$

$$s_N = \frac{1500 - 1430}{1500} * 100 \quad (3.5)$$

$$s_N = 4,67 [\%] \quad (3.6)$$

Z vypočteného skluzu získáme jmenovitou skluzovou frekvenci

$$f_N = s_N * f_N \quad (3.7)$$

$$f_N = 0,0467 * 50 \quad (3.8)$$

$$f_N = 2,335 \text{ [Hz]} \quad (3.9)$$

$$\omega_N = \frac{n_N * \pi}{30} \quad (3.10)$$

$$\omega_N = \frac{1430 * \pi}{30} \quad (3.11)$$

$$\omega_N = 149,75 \text{ [rad/s]} \quad (3.12)$$

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} \quad (3.13)$$

$$M_N = \frac{4000}{149,75} \quad (3.14)$$

$$M_N = 26,71 \text{ [Nm]} \quad (3.15)$$

Z předpokladu uvažujeme moment zvratu 3. Pak lze vypočítat:

$$M_{MAX} = M_N * 3 \quad (3.16)$$

$$M_{MAX} = 26,71 * 3 \quad (3.17)$$

$$M_{MAX} = 80,13 \text{ [Nm]} \quad (3.18)$$

Poté lze získat rozptyly pomocí následujícího vztahu:

$$L_{\sigma} = \frac{m * p_p * U_S^2}{2 * M_K * \omega^2} \quad (3.19)$$

$$L_K = \frac{3 * 2 * 230^2}{2 * 80,13 * (2 * \pi * 50)^2} \quad (3.20)$$

$$L_K = 18,26 \text{ [mH]} \quad (3.21)$$

$$R_R = \omega_{RK} * L_K \quad (3.22)$$

$$R_R = 2 * \pi * 14,01 * 18,26 * 10^{-3} \quad (3.23)$$

$$R_R = 1,61 \text{ [\Omega]} \quad (3.24)$$

Pro další výpočet je nutné si rozdělit jmenovitý proud na složku činnou a jalovou. Jalovou část jmenovitého proud použijeme pro výpočet hlavní indukčnosti.

$$L_H = \frac{U_s}{\omega_s * I_{SNj}} \quad (3.25)$$

$$L_H = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{2 * \pi * 5.064} \quad (3.26)$$

$$L_H = 138 \text{ [mH]} \quad (3.27)$$

Moment setrvačnosti a vlastní ztráty motoru jsem určil po konzultaci se svým vedoucím práce.

Při simulaci měření zatíženého rozběhu motoru jsem využil matematický operátor místo stejnosměrného stroje, který byl využit při reálném měření. Matematický operátor simuluje zátěž s proměnlivým zátěžným momentem. Takto nastavený operátor odpovídá rozběhu ventilátoru. Při začátku rozběhu se motor rozbíhá takřka naprázdno, až s přibývajícými otáčkami rotoru roste moment zátěže. Pro výpočet operátoru jsem použil tyto vzorce.

$$P = M * \omega \quad (3.28)$$

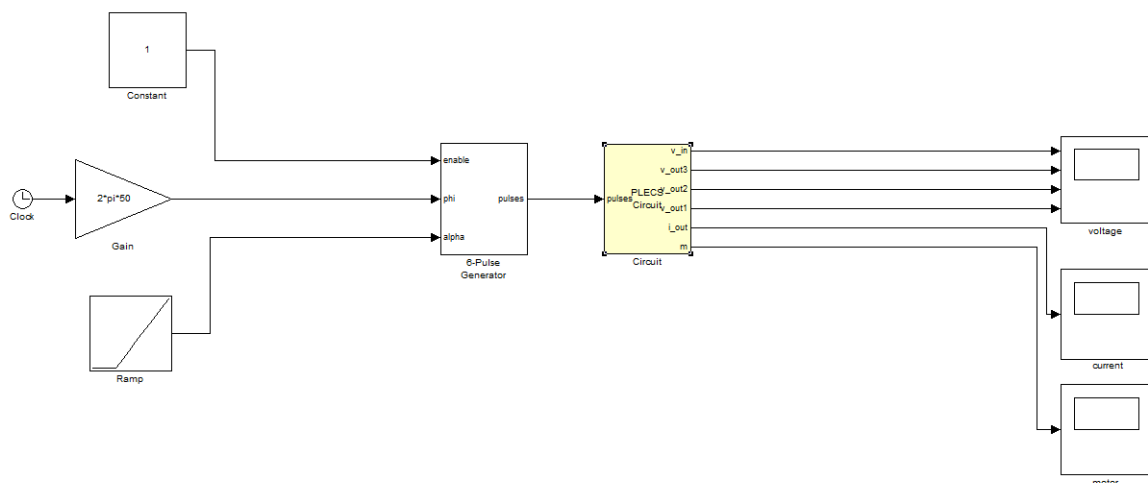
$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.29)$$

$$M = k * \omega \quad (3.30)$$

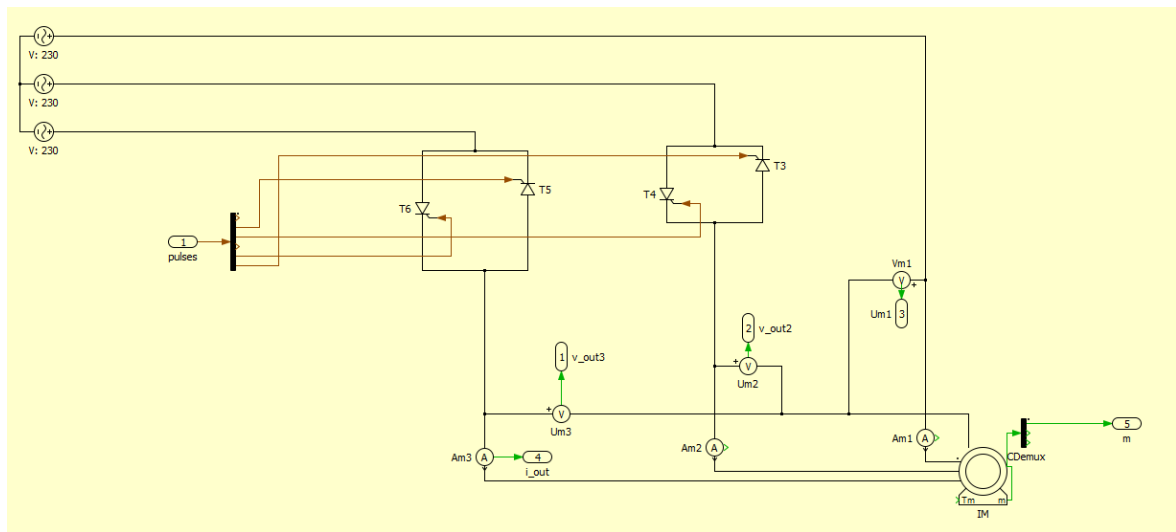
$$k = 0,07 \quad (3.31)$$

3.1.2 Vytvoření simulačního schématu

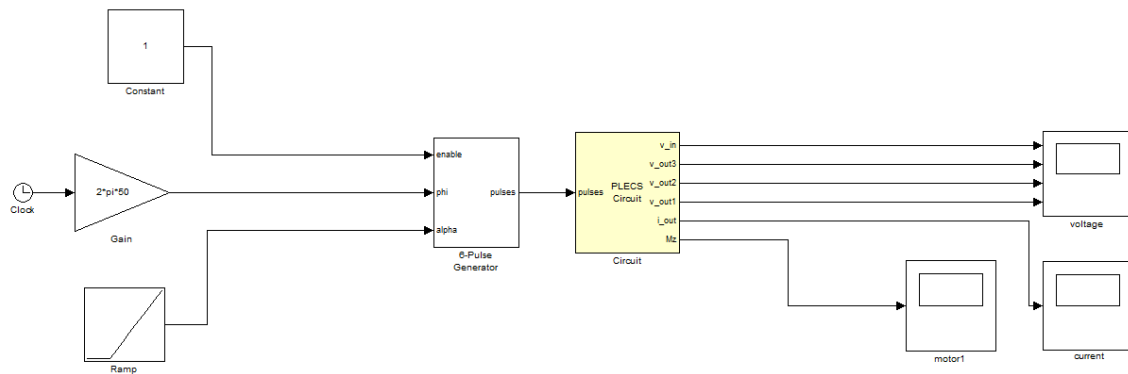
V této kapitole popíši pouze simulace, které jsem měřil. Simulaci plně řízeného trojfázového střídavého měniče napětí příkládám do přílohy na CD.



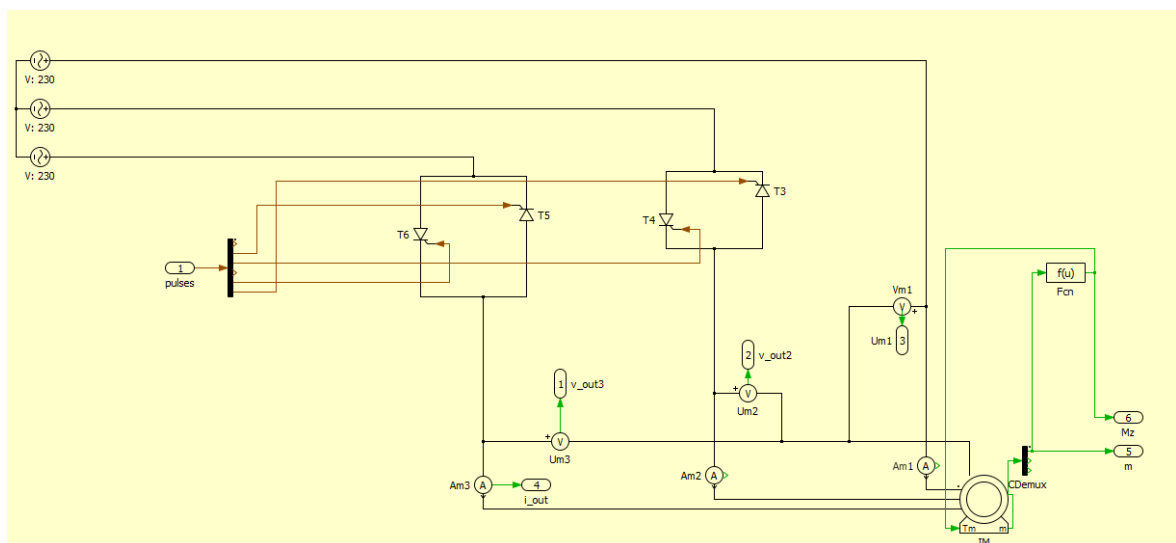
obr. 3.1 Schéma zapojení řídicího a měřícího obvodu nezátíženého stroje



obr. 3.2 Schéma zapojení silového obvodu nezátíženého stroje



obr. 3.3 Schéma zapojení řídicího a měřicího obvodu zatíženého stroje



obr. 3.4 Schéma zapojení silového obvodu zatíženého stroje

Řídicí obvod se skládá z prvků viz. obr. 3.1. Prvek constant zastupuje spínač sepnutí 6-ti pulsního generátoru. Prvky clock a gain zastupují synchronizaci se sítí. Gain je nastaven na frekvenci sítě. Prvek ramp simuluje řídicí úhel. Zde se nastavuje počáteční a koncová hodnota a také s jakým krokem chceme změnu. Šesti pulsní generátor jsem použil z knihovny, zde jsem pouze nastavil šířku pulsu na $\pi/3$. Řídicí obvod se nijak neliší v provedení nezatíženého a zatíženého motoru.

Silový obvod se mírně liší v zapojení motoru naprázdno a zatíženého stroje. Zdroje simulují třífázovou síť, jsou od sebe fázově posunuty o 120° . Na druhé a třetí fázi jsou antiparalelní zapojení tyristorů, první fáze je bez tyristorů. Toto zapojení simuluje úspornou variantu střídavého měniče napětí s jednou přímou fází. Pomocí demultiplexoru rozdělíme úhly pro každý tyristor. Motor je též převzat z knihovny, jen jsem nastavil parametry odpovídající parametrům stroji, na kterém jsem měřil. Nastavil jsem parametry podle předchozí kapitoly.

U zatíženého stroje přibývá prvek simulující zátěž, např. ventilátor. Jedná se o matematický operátor, kde jsem určil jeho konstantu v předchozí kapitole. Pomocí multiplexoru jsem rozdělil signály vycházející z motoru. Pro potřebu simulace zátěže bylo třeba jen použít otáčky motoru. Matematický operátor jsem připojil na svorku simulující hřídel stroje.

3.2 Měření v laboratoři

V této kapitole se budeme zabývat měřením v laboratoři. Popíši vybraný typ softstartéru, jeho možné nastavení, zapojení a praktické využití. Poté se zaměřím na popis měření a následnou analýzu změřených průběhů. Vybraný model softstartéru

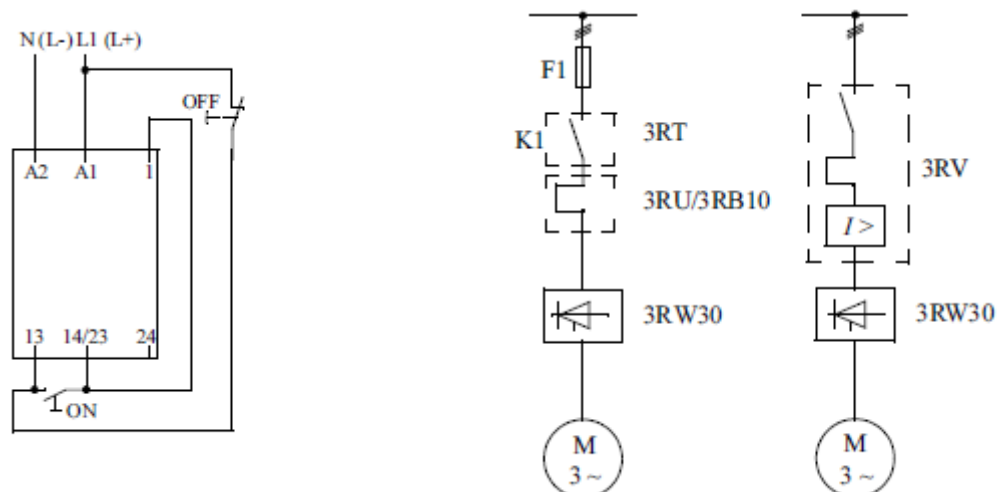
má přesné označení 3RW3026 – 1AB14. Tento model má proudové omezení 25 A, které dostačuje vybranému motoru.

3.2.1 Použitý softstartér

V rámci možnosti laboratoře jsem použil pro měření rozběhu asynchronního stroje softstartér od společnosti Siemens Sirius 3RW30. Tento model se používá pro jednofázové motory. V této verzi se dodává měnič ve čtyřech variantách, které se liší velikostí a proudovým omezením.

3.2.2 Zapojení

Měnič má hlavní kontakty pro přívod třífázového připojení k síti a třífázový vývod do motoru. Poté má pomocné kontakty. Jeden pomocný kontakt „ON“ je samodržný kontakt, který se využívá pouze pro stavy zapnuto a vypnuto. Další pomocný kontakt „BYPASSED“ se využívá pro úsporu ztrát na měniči po dokončení rozběhu. Koncem rozběhu pomocí signálu měnič přemostí tyristory a tím dojde k úspoře.



obr. 3.10 Schéma připojení 3RW30 [9]

3.2.3 Nastavení

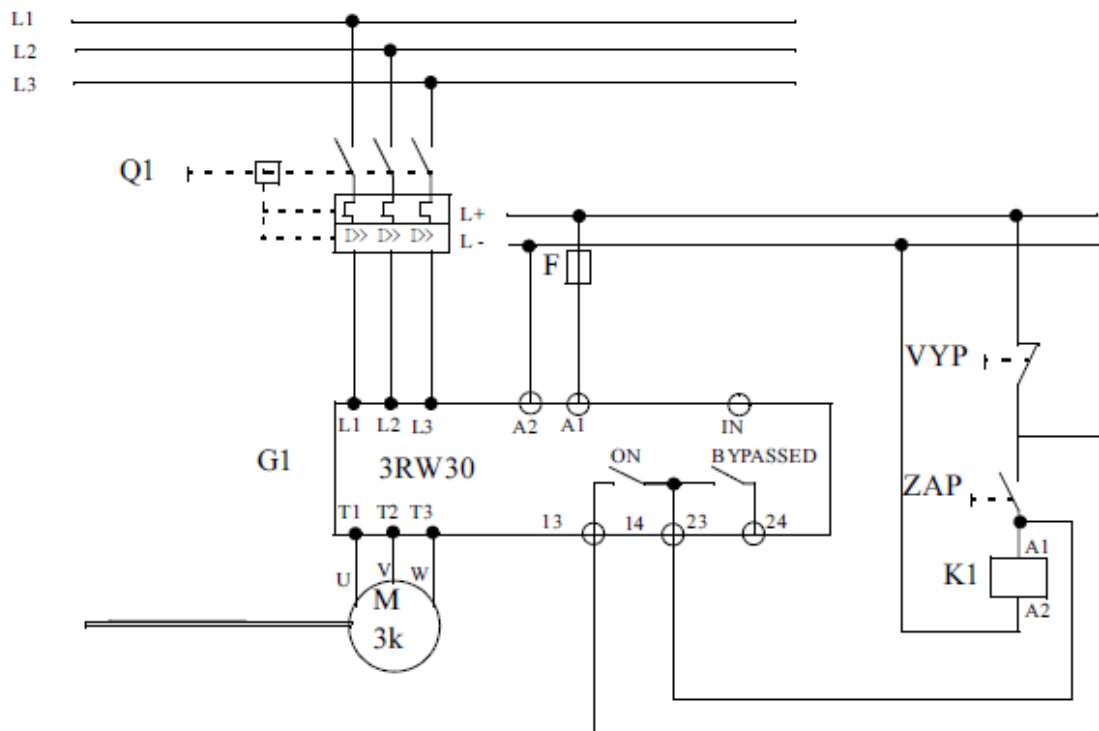
Na softstartéru lze nastavit nezávisle 3 hodnoty. Dobu rozběhu a dobu doběhu lze nastavit v rozsahu 0 až 20 sekund. Jako poslední lze nastavit počáteční napětí, které pomůže pro rozběh s větším záběrným momentem. Jedná se o hodnotu, od které se uskuteční rozběh. Počáteční napětí lze nastavit v mezích 30 – 100 % jmenovitého napětí motoru.

3.2.4 Měření motoru

Před měřením v laboratoři jsem si zvolil způsob rozběhu a pro jakou aplikaci následně budu analyzovat změřené údaje. Vybral jsem si střídavý měnič napětí a zvolil dobu rozběhu na 4 sekundy, počáteční napětí jsem zvolil 30 % jmenovitého napětí. Dobu doběhu jsem nenastavoval, nebylo to nutné pro měření. Pro vyhodnocení údajů při rozběhu jsem využil osciloskop.

3.2.5 Schéma zapojení

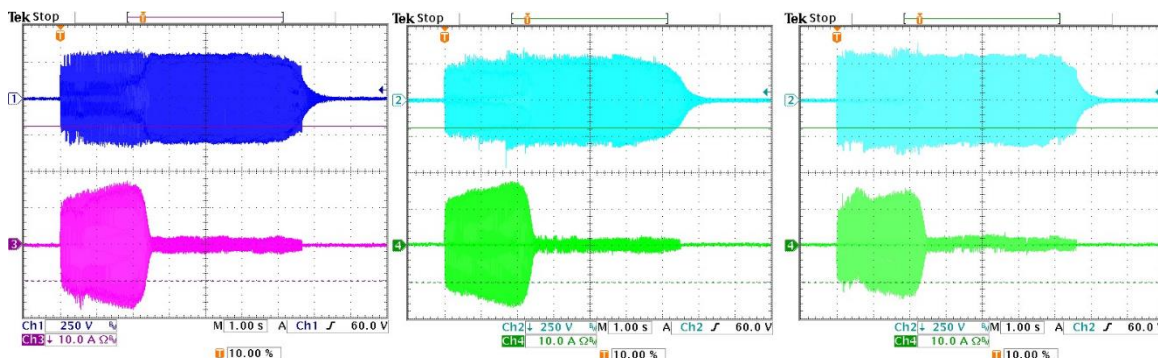
Softstartér byl zapojen dle obr. 3.11. Svorkovnice motoru byla zapojen do hvězdy.



obr 3.11 Schéma zapojení

3.2.6 Grafy

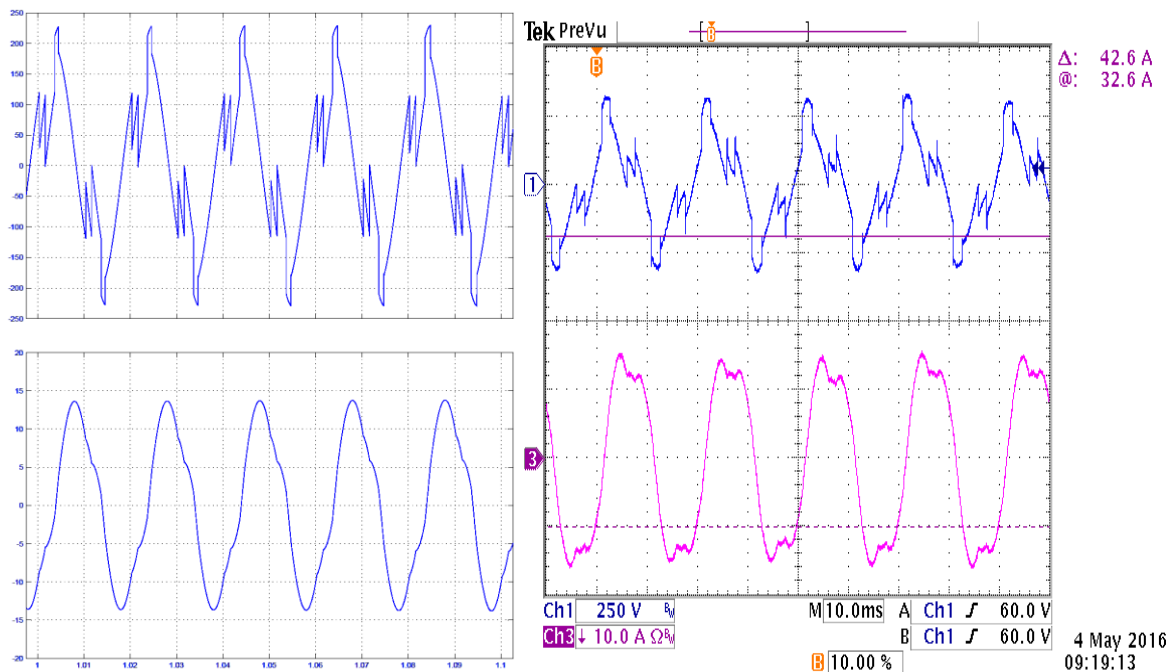
Zde jsou grafy zobrazeny pouze pro orientační znázornění. Pro lepší odečítání z grafu jsou tyto grafy přiloženy v příloze na CD.



obr. 3.12 Průběh napětí a proudu ve všech fázích zprava první, druhá a třetí fáze

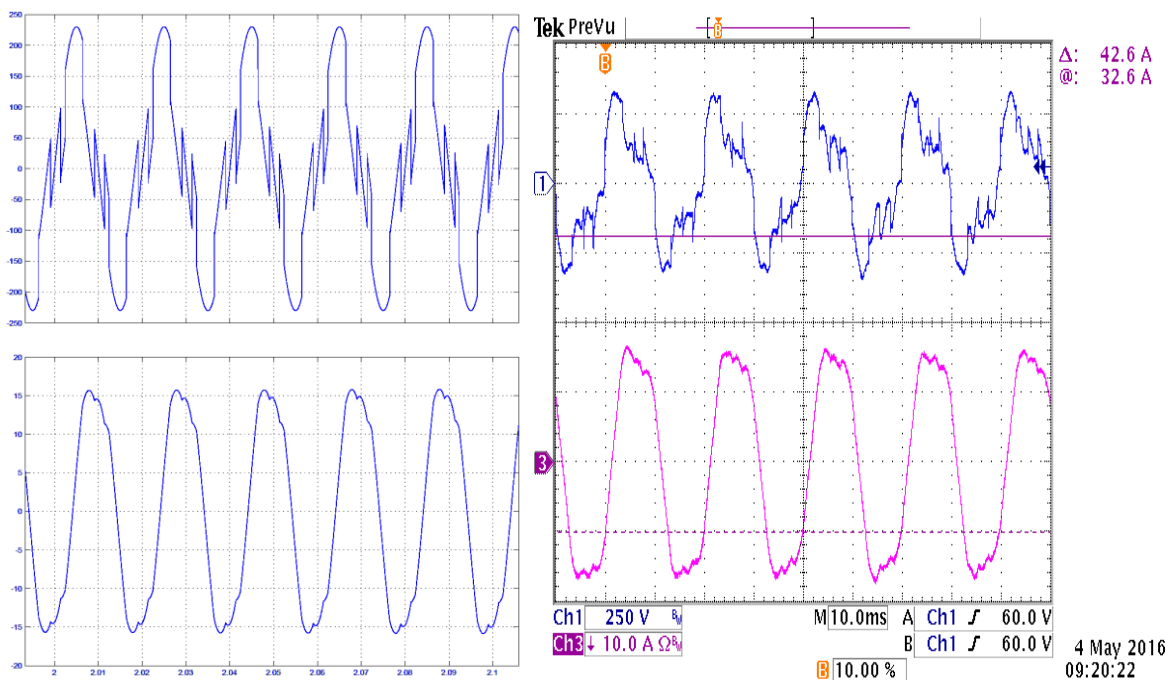
V prvních třech grafech je zaznamenána obálka poměrů napětí a proudů při rozběhu. Čas byl nastaven na 4 sekundy s počátečním napětím 30 % jmenovitého napětí. Je zde patrný pozvolný nárůst proudu, kde nedochází k proudovým rázům. Pokles na konci

průběhu je zbytkové naindukované napětí v rotoru stroje. Po rozběhu je zde patrný pokles proudu. Proud není jmenovitý, je menší přibližně 5 A, protože stroj není zatížený a dostačuje pro chod stroje naprázdno.



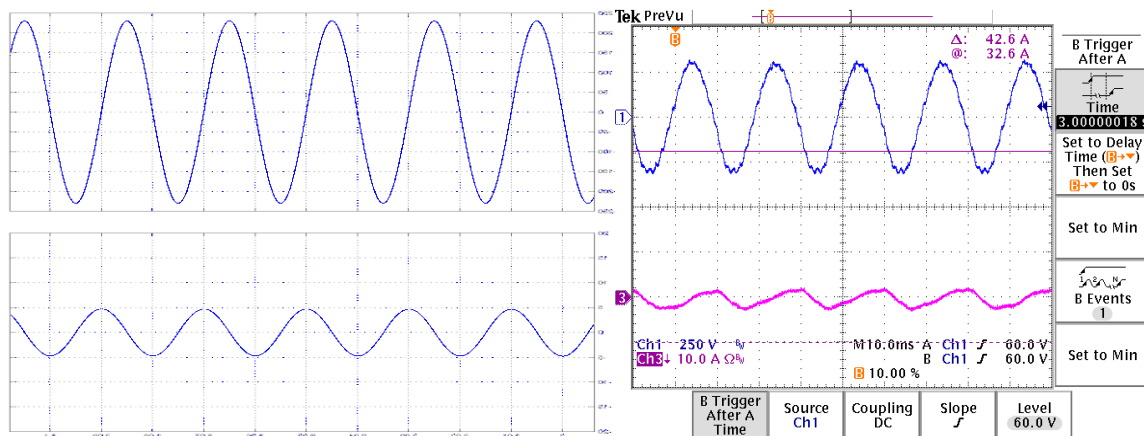
obr. 3.13 Průběh napětí a proudu neřízené fáze v čase jedna sekunda

Zde je vidět porovnání poměrů napětí a proudu simulace a měření. Oba grafy zaznamenávají poměry po první sekundě průběhu. Jedná se o přímou fázi. Je zde vidět deformace sinusovky napětí, proud je téměř čistý sinusový průběh. Z grafu měření je patrná větší deformace, což mohli způsobit nepřesně měřící zařízení a síť není ideálně tvrdá.



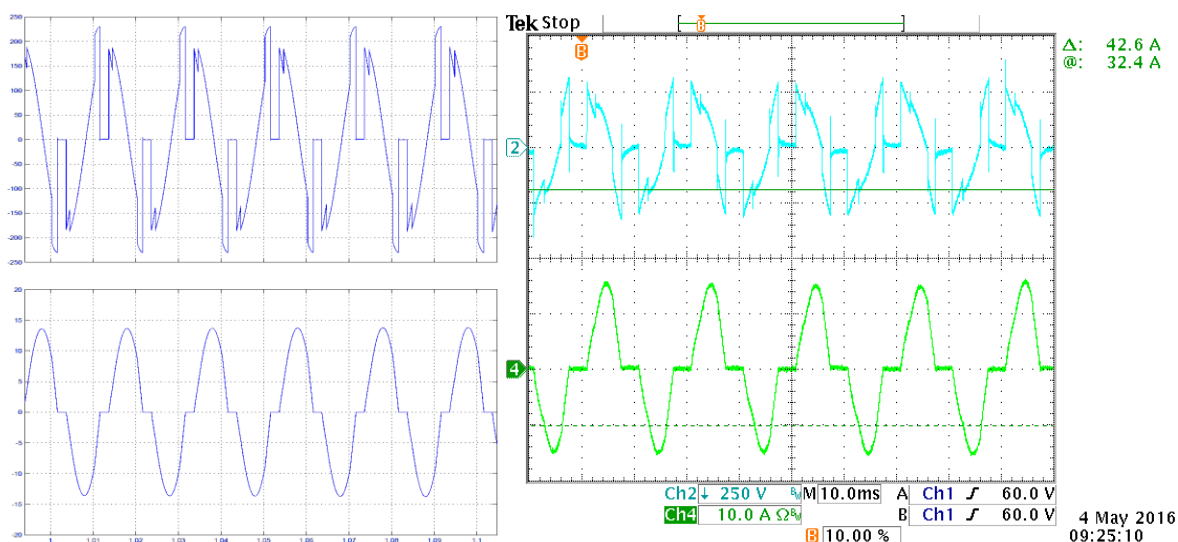
obr. 3.14 Průběh napětí a proudu neřízené fáze v čase dvě sekundy

Po druhé sekundě rozběhu je vidět nárůst hodnot. Je zde patrný větší rozdíl v průběhu napětí ze simulace a měření. Proudů jsou téměř shodné.



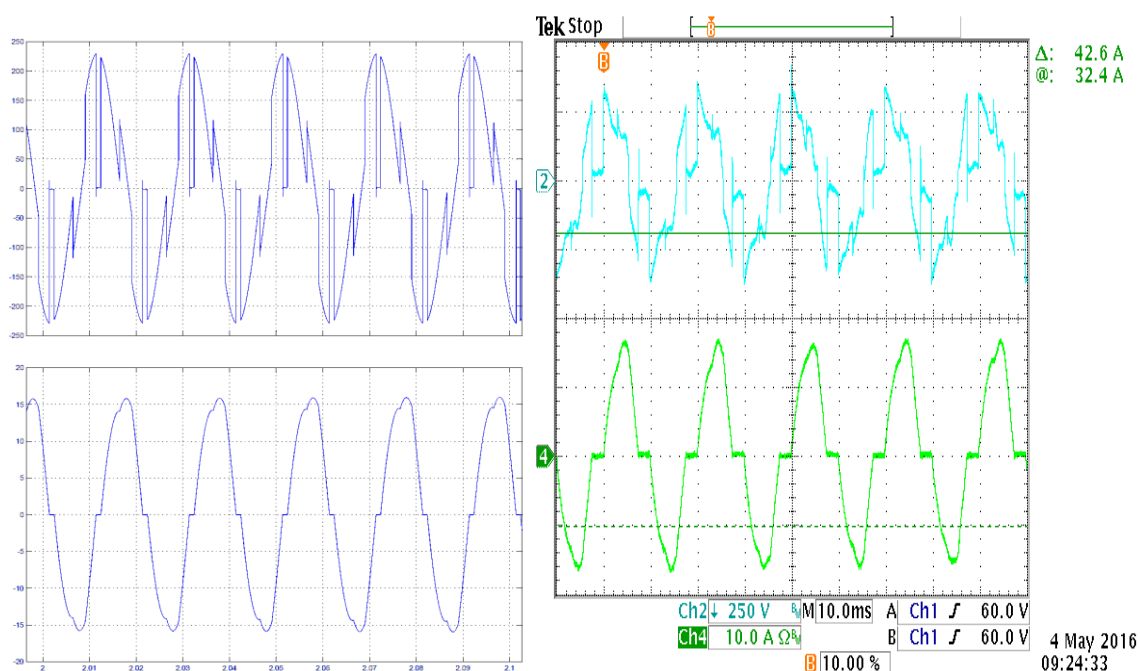
obr. 3.15 Průběh napětí a proudu neřízené fáze v čase tři sekundy

Po třetí sekundě je motor rozběhnut. Proud klesl na hodnotu přibližně 5 A. Napětí mají sinusový průběh jak u měření, tak i u simulace.



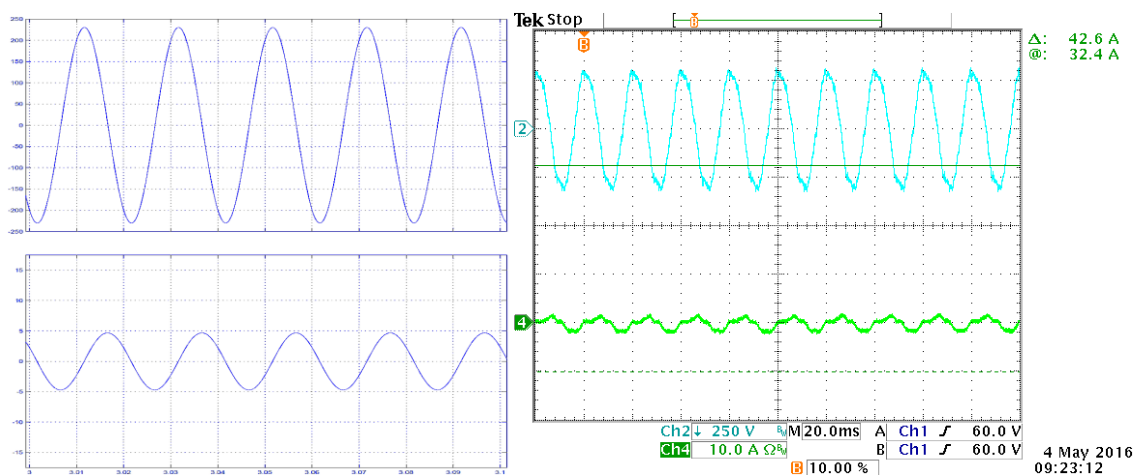
obr. 3.16 Průběh napětí a proudu druhé, řízené fáze v čase jedna sekunda

Obdobně jako u první fáze jsou zde grafy, které znázorňují postupné průběhy napětí a proudu. Zaznamenané grafy jsou stejně časově odstupňované jako u první fáze. Grafy proudů jsou téměř shodné, jako do velikosti, tak i tvarem průběhu. Průběh napětí je deformovaný použitím polovodičových součástek. U grafu proudu je patrné sepnutí tyristorů.



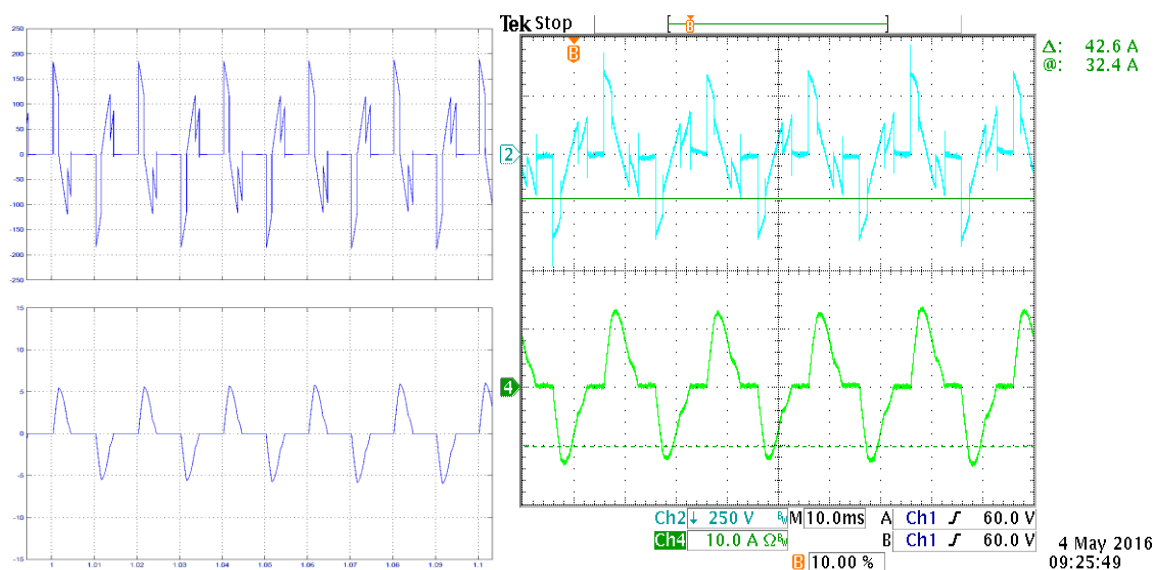
obr. 3.17 Průběh napětí a proudu druhé, řízené fáze v čase dvě sekundy

Grafy proudů jsou shodné. Grafy napětí se liší. Opět je zde patrný nárůst hodnot amplitud.



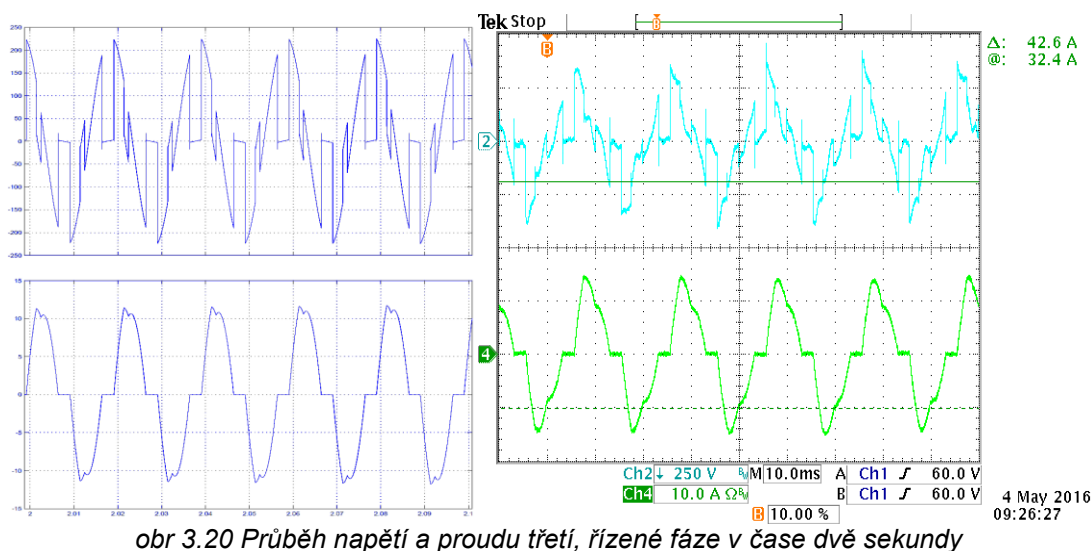
obr. 3.18 Průběh napětí a proudu druhé, řízené fáze v čase tři sekundy

V tomto čase je motor rozběhnut a grafy napětí i proudů se neliší a nabývají stejných průběhů a hodnot. Opět proud poklesl a napětí nabývá fázové hodnoty.

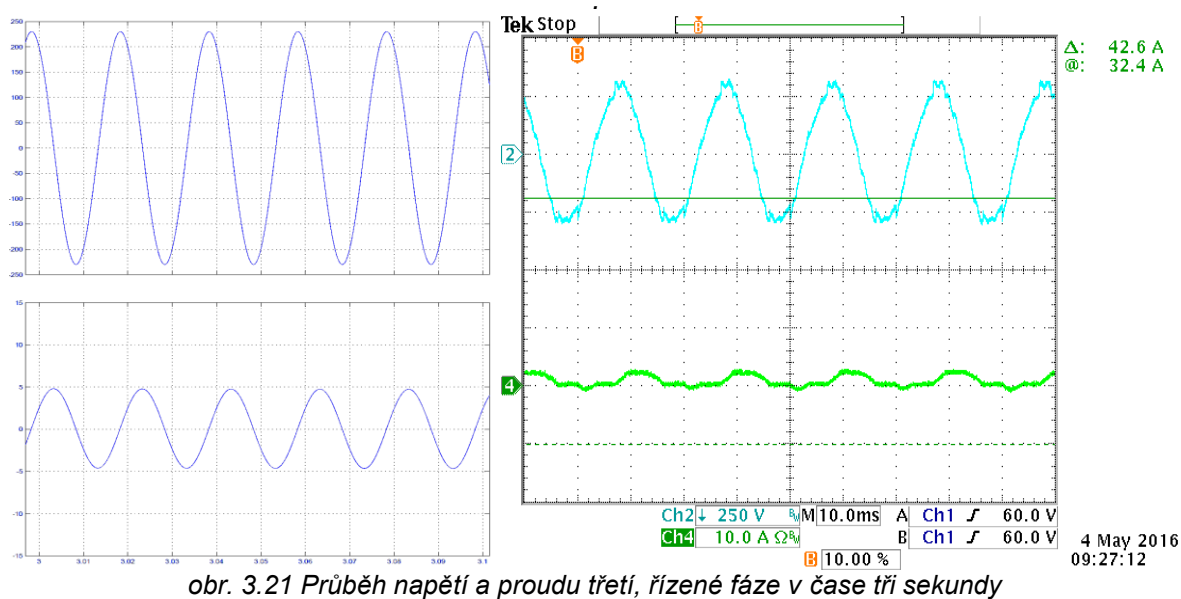


obr. 3.19 Průběh napětí a proudu třetí, řízené fáze v čase jedna sekunda

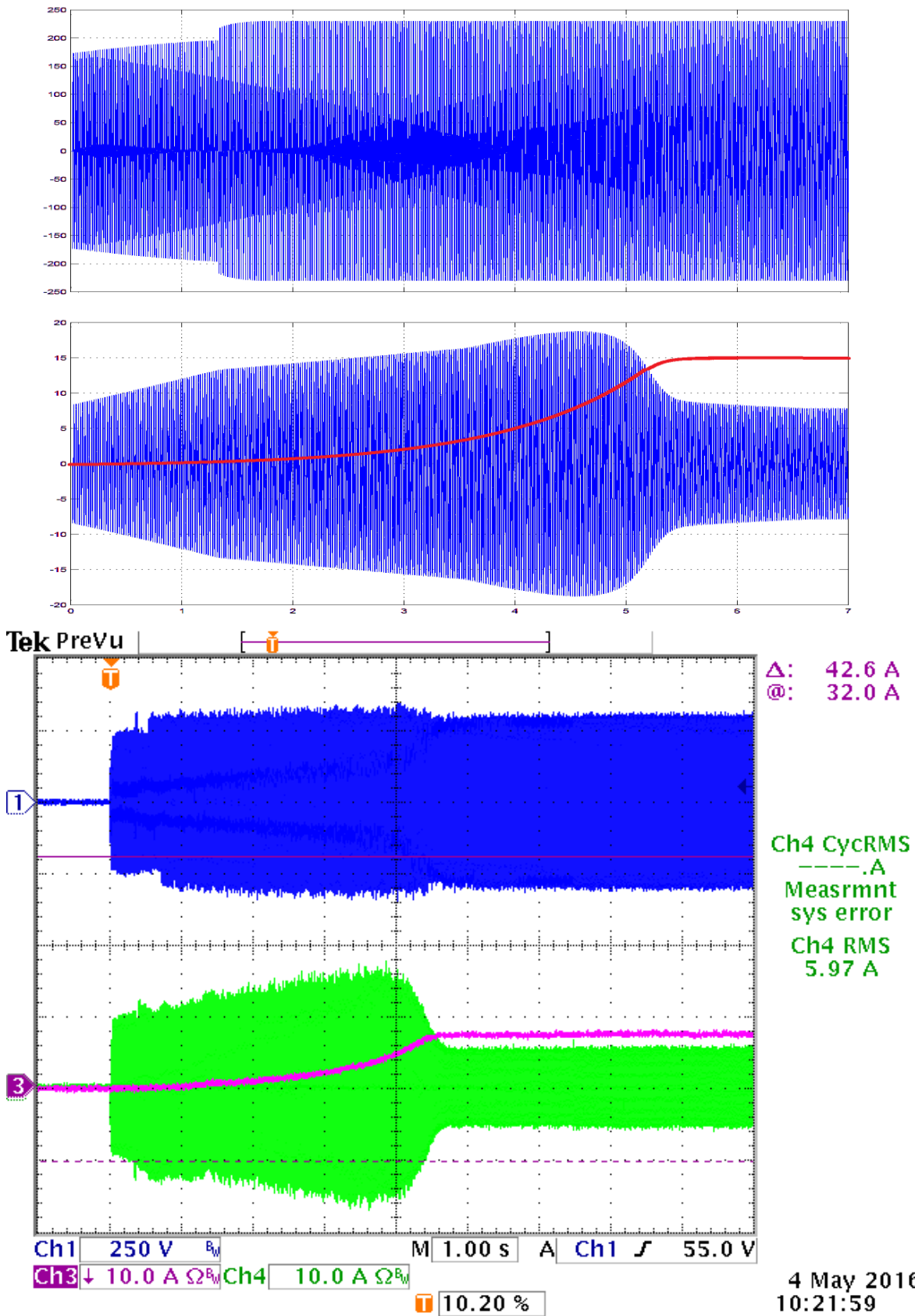
Obdobně jako u druhé fáze, třetí fáze je také řízená antiparalelní kombinací zapojení tyristorů. Tato kombinace tyristorů deformuje sinusový průběh napětí. Průběhy proudů se taktéž téměř neliší.



Po druhé vteřině je vidět nárůst hodnot. U průběhů proudu je vidět delší doba sepnutí tyristorů. Graf napětí je v tomto okamžiku ještě hodně deformovaný.



Po třetí sekundě je patrný pokles proudu a napětí se ustálilo na fázové hodnotě. Z porovnání grafů ve všech zachycených časech je patrné vidět čas sepnutí tyristorů a nárůst hodnot napětí i proudu. Po skončení rozběhu dojde k poklesu proudu na přibližně 5 A. Takto velký proud dostačuje chodu stroje bez zatížení.



obr. 3.16 Průběh napětí a proudu první fáze pro zatížený motor. Průběh nárůstu otáček stroje

V posledním grafu je patrné obálka průběhů napětí a proudu neřízené fáze. Na kanálu 3 jsou znázorněné otáčky motoru. V tomto případě byl motor zatížený a rozběh nastaven na 6 sekund. Stroj byl zatížený téměř na polovinu. Asynchronní motor byl zatížený stejnosměrným motorem. Na kotvu stejnosměrného stroje byly připojeny odpory. Kotvou stejnosměrného stroje protékal proud 7,5 A při napětí 220 V. Stejnosměrný motor simuloval například ventilátor.

Graf simulace odpovídá změřeným hodnotám. Maximální hodnota rozběhového proudu nabývá přibližně 18 A. Z průběhu nárůstu otáček je patrné, že motor je rozběhnut po 6 vteřinách. Po rozběhu proud klesne na jmenovitou hodnotu a napětí se ustálí na fázové hodnotě.

3.3 Závěr

Měřením a simulací byly ověřeny teoretické předpoklady. Měkký start pomocí softstartéru je výhodný zejména pro aplikace s nulovým záběrným momentem při začátku rozběhu. Během rozběhu nedochází k proudovým rázům a tím pádem nedochází k opotřebením stroje. Při měření jsem zkoušel nastavit různé hodnoty času rozběhu a také počáteční napětí. Vyšší záběrný moment lze kompenzovat zvýšením počátečního napětí a také dobou rozběhu. Existuje více variant softstartéru, které se hodí pro různé využití. Varianty se navzájem liší využitím součástek, pořizovací cenou, přídatnými funkcemi atd.

Použitý softstartér SIEMENS SIRIUS 3RW30 lze po rozběhu přemostit takzvaným bypassem a tím docílit takřka bezeztrátového provozu. Tento model má také řízený doběh stroje. Doběh se nastavuje stejně jako čas rozběhu.

Polovodičové střídavé měniče napětí lze nahradit za spouštěč hvězda-trojúhelník. Při využití softstartéru nedochází k proudovým rázům a tím je rozběh plynulejší. Navíc oproti přepínači není třeba použít 6 vodičů, ale jen 3.

Vůči frekvenčnímu měniči nabízí softstartér pro rozběh jednodušší elektroniku pro řízení tyristorů, je podstatně levnější a není potřeba uvažovat připojení filtrů. Frekvenční měnič je vhodný pro aplikace, kde je třeba během provozu stroje provádět regulaci.

Seznam literatury

- [1] BARTOŠ, Václav et. al. *Elektrické stroje*. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2011, 140 s. ISBN 978-80-7043-444-4
- [2] VONDRÁŠEK, Václav, *Výkonová elektronika. Sv. III, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*, vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003, 267 s. ISBN 80-702-982-X
- [3] PITTERMANN, Martin, *Elektrické pohony základy*, vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 100 s. ISBN 978-80-7043-729-2
- [4] https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/11707/content_UC2-4730-obr3.jpg
- [5] SKALA, Bohumil, ŽÍŽEK, František, *Měření a zkoušení elektrických zařízení, Využití počítače pro řízení experimentů a sběr dat*, vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004, 204 s. ISBN 80—7043-306-X
- [6] KOČMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [7] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [8] ABB AUTOMATION TECHNOLOGIE. *Softstartéry: Průvodce problematikou softstartérů* [online]. Jiří VAŠINKA. 2009 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/\\$file/softstarter-%20handbook.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/$file/softstarter-%20handbook.pdf)
- [9] SIEMENS, *Elektronické softstartéry SIRIUS 3RW30/31*, Dostupné z: http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/spinaci_technika/spousteni/softstartery/manual/manual_sirius_3rw30_2007_cz.pdf
- [10] KOČMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [11] SCHNEIDER ELECTRIC. *AC motors starting and protection systems* [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.schneider-electric.hu/documents/automation-and-control/asg-4-motor-starting-and-protection.pdf>
- [12] TOPKA, David, *Problematika střídavých měničů napětí používaných pro elektrické pohony*, vyd. V Plzni, 2007, vyd. V Plzni, 2007, 38 s.
- [13] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/783>
- [14] <http://pavel.lasakovi.com/projekty/elektrotechnika/ovladani-motoru/>