

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Opětné zapnutí asynchronního motoru na síť

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Miroslav MERTL**
Osobní číslo: **E18B0078P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Opětné zapnutí asynchronního motoru na síť**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište spouštění asynchronního motoru přímým připojením na síť.
2. Popište rozdíly mezi stavy, kdy je motor v okamžiku připojení na síť v klidu a kdy má nenulovou rychlost.
3. Proveďte měření přechodového stavu pro různé počáteční rychlosti $n = \langle -n_s; n_s \rangle$.
4. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Dodatek k zadání Bakalářské práce
Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušební řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Body 1, 2 a 4 zůstávají v plném rozsahu.

Bod 3. Proveďte měření přechodového stavu pro různé počáteční rychlosti $n = \langle -n_s; n_s \rangle$.

je změněn na:

3. Okomentujte poskytnuté záznamy přechodových dějů stroje.

V Plzni dne 31.03.2021

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 3.4.2021



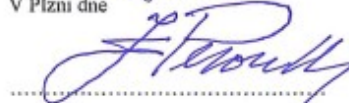
Vedoucí práce:



Student:

V Plzni dne

08.04.21



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou opětného spuštění asynchronních motorů a jejich funkcí, konstrukcí a různými způsoby rozběhu. Práce se snaží přiblížit vlastnosti jednotlivých rozběhů. To zahrnuje jejich výhody, nevýhody a chování jednotlivých elektrických a mechanických veličin ve stroji při rozběhu v různých situacích a zapojeních.

Klíčová slova

Elektrická síť, 3-f asynchronní motor, 1-f asynchronní motor, magnetický tok, skluz, rozběh motoru, elektromagnetické pole.

Abstract

The bachelor thesis deals with the problem of restarting asynchronous motors and their function, construction and different starting methods. The thesis attempts to present the characteristics of the different starting methods. This includes their advantages, disadvantages and the behaviour of the various electrical and mechanical variables in the machine during start-up in different situations and circuits.

Key words

Electrical network, 3-f asynchronous motors, 1f asynchronous motor, magnetic flux, slip, motor start-up, electromagnetic field.

Prohlášení

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

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



.....
podpis

V Plzni dne 13.5.2021

Miroslav Mertl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	9
ÚVOD.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 OBECNÉ SEZNÁMENÍ S FUNKCÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	12
1.1 KONSTRUKCE.....	12
1.2 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	13
1.3 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ A PROUD.....	14
2 MOMENT ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	16
3 NÁHRADNÍ SCHÉMA A STAVY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	20
3.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA.....	20
3.2 ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	23
3.3 STAV NAPRÁZDNO.....	24
3.4 STAV NAKRÁTKO.....	25
4 SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	26
4.1 SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU S VINUTOU KOTVOU.....	26
4.2 SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ S KOTVOU NAKRÁTKO S RŮZNÝMI VLASTNOSTMI PŘI ROZBĚHU.....	27
4.2.1 Přímé připojení na síť.....	28
4.2.2 Doběh asynchronního stroje.....	31
4.2.3 Opětovné zapnutí stroje.....	33
4.2.4 Spouštění se sníženým napětím.....	37
4.2.5 Spouštění přepínačem hvězda trojúhelník.....	39
4.2.6 Přepínání Y-D s časovou prodlevou.....	43
4.2.7 Přepínání Y-D bez časové prodlevy.....	48
4.2.8 Spouštění asynchronních motorů se speciálním vinutím rotoru.....	56
4.2.9 Změna napětí při rozběhu a chodu naprázdno.....	57
4.2.10 Spouštění střídavým měničem napětí.....	61
5 ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR.....	62
ZÁVĚR.....	64
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	65

Úvod

Asynchronní stroje jsou nejrozšířenějším typem elektrických točivých strojů, které se v průmyslu nacházejí svoje uplatnění už více jak 100 let. Avšak za tuto dobu docházelo k soustavnému zlepšování detailů stroje. Tyto stroje umožňují elektromechanickou přeměnu. Podle toho je dělíme na motory, tudíž stroje měnící elektrickou energii na mechanickou a generátory, které mění energii mechanickou na elektrickou. Jejich předností je principiální a konstrukční jednoduchost. V provedení s kotvou nakrátko jsou i relativně levné, spolehlivé a jednoduché na údržbu.[1][3]

Díky rozvoji výkonové elektroniky je možné efektivně měnit otáčky těchto motorů, což je hlavním důvodem jejich velkého uplatnění v elektrických pohonech. Vyrábějí se ve velkém rozmezí výkonů a můžeme je najít jak v průmyslu, tak i v domácnostech. [1]

Do cílů této práce spadá seznámení se základní funkcí a konstrukcí asynchronních strojů, jejich rozběhem a popsání závislosti rychlosti otáčení hřídele při rozběhu na chování motoru.

Seznam symbolů a zkratek

M	.....	moment (Nm)
F	.....	síla (N)
ω	.....	úhlová rychlost ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
n	.....	otáčky ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$)
s	.....	skluz (-)
n_s	.....	synchronní otáčky ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$)
p	.....	počet pólů (-)
U	.....	elektrické napětí (V)
f	.....	frekvence (Hz)
N	.....	počet závitů (-)
ϕ	.....	magnetický tok (Wb)
k_v	.....	činitel vinutí (-)
I	.....	elektrický proud (A)
R	.....	elektrický odpor (Ω)
X	.....	elektrická reaktance (Ω)
P_m	.....	mechanický výkon (W)
P'	.....	elektrický výkon (W)
P_δ	.....	výkon ve vzduchové mezeře (W)
m	.....	počet fází (-)
$\cos\varphi$	.....	účinnost (-)
R'	.....	přepočítaná hodnota elektrického odporu z rotoru na stator (Ω)
X'	.....	přepočítaná hodnota elektrické reaktance z rotoru na stator (Ω)
I'	.....	přepočítaná hodnota elektrického proudu z rotoru na stator (A)
U'	.....	přepočítaná hodnota elektrického napětí z rotoru na stator (V)
Z	.....	elektrická impedance (Ω)
ΔP_{fe}	.....	ztráty v železe (W)
ΔP_m	.....	mechanické ztráty (W)
ΔP_j	.....	Joulovy ztráty (W)

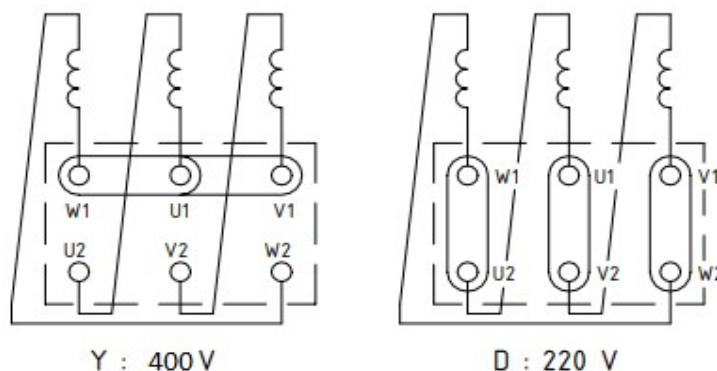
1 Obecné seznámení s funkcí asynchronních motorů

1.1 Konstrukce

Všechny asynchronní stroje se skládají ze dvou hlavních částí. Pevné části nebo-li statoru a rotační části nebo-li rotoru, taky někdy označovaného jako kotva. Stator je upevněn na kostře stroje a skládá se z vinutí uložených drážkách. Konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici, kde se pak mohou spojit buď do hvězdy nebo trojúhelníka, zapojení takové svorkovnice je na obrázku 1.1. Zapojení svorkovnice se mění podle potřeby. Rotor může mít dvě varianty. První z nich je klec na krátko, tento rotor má místo vinutí kovové tyče z mědi nebo hliníku uložené v drážkách. Konce těchto tyčí jsou na obou koncích vyzkratovány kovovými kruhy připomínající klec v angličtině se tomuto provedení rotoru říká „squirrel cage“. Druhé provedení má na rotoru podobné vinutí jako na statoru, které je uloženo v drážkách, konce těchto vinutí jsou vyvedena na kroužky na hřídeli. Na kroužky dosedají kartáče, které po nich kloužou buď trvale nebo jen při rozběhu a potom se odpojují a vinutí se zkratuje zkratovačem. Pomocí kartáčů se připojují k motoru obvodu, které vylepšují vlastnosti stroje, například pro zlepšení jeho vlastností při rozběhu se na ně připojuje odporová kaskáda z důvodu snížení počátečních nárazových proudů, které se v motoru vytvářejí. [1]

Dále existují i speciální provedení rotorů, které vznikly za účelem potlačení negativních vlastností asynchronních strojů. Těmito vlastnostmi jsou malý záběrný moment a velký záběrný proud. Zvětšením odporu při rozběhu docílíme chtěného efektu snížení záběrného proudu a zvýšení momentu, ale při normálním provozu však není žádoucí, aby vinutí rotoru mělo velký odpor, protože chceme co nejvíce omezit ztráty, které při chodu motoru vznikají. To se řeší tím, že konstrukce rotoru je provedena tak, že se mění odpor rotoru s měnícím se skluzem. Prvním provedením těchto klecí je klec vírová, které využívají složitějších tvarů tyčí. Druhým provedením je kotva dvojitá, které se skládá ze dvou klecí nakrátko. Tyto klece jsou uloženy nad sebou, dříve se používaly rozdílné materiály, ale dnes jsou již ze stejných materiálů. Vnější klec je rozběhová, má vyšší měrný odpor a vnitřní klec slouží k provozu motoru a je tvořena z materiálů s menším měrným odporem. Při rozběhu je proud vytlačován do rozběhové klece, díky které dochází k zmenšení záběrného proudu. [1][3]

Magnetický obvod jak na statoru, tak i na rotoru se skládá z transformátorových plechů, které jsou navzájem izolované tenkou vrstvou izolantu. Tloušťka těchto plechů většinou bývá 0,5 mm. Velikost vzduchové mezery závisí na velikosti a zároveň na výkonu motoru. U malých strojů se pohybuje v řádech desetin mm a u velkých strojů se pohybuje až v jednotkách mm. Jelikož je rotor hladký tak rozložení vzduchové mezery je rovnoměrné.[1]



Obrázek 1.1: Zapojení svorkovnice asynchronního motoru

Vlastní vinutí statoru se skládá z jednotlivých cívek, které jsou z měděných vodičů navzájem izolovaných od sebe. Tyto cívky jsou pak následně uloženy v drážkách. Nejdůležitější je však, aby cívka byla izolovaná od magnetického obvodu, z toho důvodu se používá přídatná izolace.[1]

1.2 Princip činnosti asynchronních motorů

Při funkci asynchronního motoru dochází k přenosu výkonu do rotoru pomocí elektromagnetické indukce proto se tyto stroje taky někdy označují za indukční stroje. Princip je tedy založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého pole statoru a proudů, které se indukují v rotoru působením tímto polem. Snažíme se o co nejlepší magnetickou vazbu mezi státorem a rotorem, proto vzduchová mezera musí být co nejužší. Vznik točivého pole je způsoben připojením statorového vinutí k napájení. Toto pole protíná stojící vodiče rotorového vinutí a podle indukčního zákona se do nich indukují indukované napětí. To má za následek i začátek průtoku rotorového proudu, který vytváří vlastní točivé magnetické pole. Toto pole se snaží dohnat pole vytvářené na statoru obě pole mají synchronní rychlost a vzájemným působením vzniká moment podle vztahu

$$M \approx F_1 \times F_2 \quad (1)$$

To způsobuje, že se rotor začíná otáčet. Tudiž růst jeho úhlové rychlosti ω , platí

$$\omega = \frac{(\pi * n)}{30} \quad (2)$$

kde je n rychlost otáčení. Zároveň dochází k poklesu vzájemné úhlové rychlosti ω_2 . Tato rychlost je mezi otáčivým magnetickým polem statoru a mechanickou rychlostí otáčení rotoru. To má za následek zmenšování indukovaného napětí v rotoru a také jeho frekvence. [1]

U asynchronních strojů existuje stejná vazba jako u transformátorů. Jediný rozdíl je ten, že sekundární vinutí u asynchronních strojů se točí. Aby došlo k indukci napětí v rotorovém vinutí je nutné, aby existoval relativní pohyb mezi polem statoru a rotoru. Proto zatížený asynchronní motor má o něco nižší otáčky než synchronní, tak zvané asynchronní. Pokles těchto otáček není velký a závisí na zatížení. Poklesu otáček se říká skluz a je definován vztahem

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} = \frac{(\omega_1 / p - \omega)}{(\omega_1 / p)} \quad (3)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky, ω_1 je úhlová rychlost magnetického pole statoru a p jsou pólpáry stroje. Skluz se u strojů udává v procentech a u velkých strojů se pohybuje pod 1% a u malých strojů je pod 10%. [1]

Prakticky se vektory magnetomotorických napětí statoru F_{m1} a rotoru F_{m2} proti sobě nepohybují, tedy oba se točí stejnou rychlostí, jen vektor rotorového napětí otáčí se zpožděním. Rychlost otáčení je tedy

$$\omega_2 + \omega = \omega_1 - (1 - s) + s * \omega_1 = \omega_1 \quad (4)$$

Toto je však jen v rámci teorie, jelikož ve stroji existuje jen jedno pole vytvořené tokem ϕ , složené z pole statoru a rotoru. Ve stroji však existují i rozptylové toky. Z uvedeného vyplývá, že počet pólů na statoru a rotoru se musí rovnat, ale počet fází může být různý. [1]

1.3 Indukované napětí a proud

Velikost rotorového napětí a proudu je úměrná velikosti skluzu. Základní vztah indukovaného napětí pro střídavé stroje zní

$$U = 4,44 * f * N * \phi * k_v \quad (5)$$

pak statorové napětí je

$$U_{i1} = 4,44 * f_1 * N_1 * \phi * k_{v1} \quad (6)$$

Pokud budeme předpokládat, že rotor je vinutý, rozpojený a stojí, pak jeho ideální indukované napětí je

$$U_{i2} = 4,44 * f_1 * N_2 * \phi * k_{v2} \quad (7)$$

jelikož když je rotor v klidu, tak se frekvence na rotoru a statoru rovnají $f_1 = f_2$ a velikost napětí na rotoru je maximální. Druhý případ je, že se stroj točí synchronními otáčkami, což má za následek, že je nulový skluz. V tom případě je rotorové napětí nulové. Vzorec pro napětí rotoru při libovolných otáčkách zní

$$U_2 = 4,44 * f_2 * N_2 * \phi * k_{v2} = 4,44 * s * f_1 * N_2 * \phi * k_{v2} \quad (8)$$

nebo

$$U_2 = s * U_{20} \quad (9)$$

kde U_{20} je napětí naprázdno. Působením indukovaného napětí dochází ke vzniku a průtoku proudu rotorem, velikost proudu je dána vztahem

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{(R_2^2 + (s * X_2)^2)}} = \frac{U_{20}}{\sqrt{\left(\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2\right)}} \quad [1] \quad (10)$$

2 Moment asynchronního motoru

Působením magnetomotorického napětí a proudu, vzniklých naindukovaným napětím na rotoru, vzniká moment, který začíná točit rotorem ve směru otáčení magnetického pole. Mechanický moment můžeme vyjádřit jako

$$M = \frac{(P')}{\omega} = \frac{(P')}{(\omega_1 * (1-s))} \quad (11)$$

Mechanický výkon získáme z

$$P' = P_\delta - \Delta P_{cu2} \quad (12)$$

$$P_\delta = \frac{m_2 * R_2}{s} * I_2^2 \quad (13)$$

v náhradním schématu musí odpovídat výkon na odporu sekundární větve celkovému výkonu, který přechází přes vzduchovou mezeru a tedy platí

$$P_{cu2} = m_2 * R_2 * I_2^2 \quad (14)$$

po dosazení

$$P' = \frac{m_2 * R_2}{(s)} * I_2^2 - m_2 * R_2 * I_2^2 = \frac{m_2 * R_2 * I_2^2 * (1-s)}{s} \quad (15)$$

pak moment získáme

$$M = \frac{m_2 * R_2 * I_2^2 * \left(\frac{(1-s)}{s}\right)}{(\omega_1 * (1-s))} = \frac{(m_2 * R_2 * I_2^2)}{(\omega_1 * s)} = \frac{P_\delta}{\omega_1} = M_\delta [1]. \quad (16)$$

„Točivý moment asynchronního motoru můžeme tedy vyjádřit pomocí mechanického výkonu P' a uhlové rychlosti ω_2 nebo pomocí výkonu ve vzduchové mezeře P_δ a uhlové rychlosti točivého pole ω_1 .“ [1]

„Nyní si všimněme, na kterých veličinách je moment motoru závislý. Pro zjednodušení zanedbáváme ztráty ve statoru a bude tedy přibližně platit $P_1 = P_\delta$.

$$M = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{(m_2 * U_2 * I_2 * \cos \varphi_2)}{\omega_1} = C * \Phi * I_2 * \cos \varphi_2 \quad (17)$$

neboť $U_2 = 4.44 * f_1 * \Phi * N_2 * k_{v2}$ - za předpokladu stojícího motoru $f_1 = f_2$. [1]“ (18)

„Točivý moment je tedy úměrný součinu rotorového proudu I_2 , toku a \cos úhlu mezi I_2 a U_{2i} . V normálním chodu a při chodu naprázdno, tedy při malých skluzech, je reaktance rotoru malá, takže $\cos\varphi_2 = 1$. Tedy pak je

$$M = C * I_2 * \varphi \cdot [1] \quad (19)$$

Závislost mezi rotorovým odporem, skluzem a momentem můžeme vyjádřit pomocí

$$P_{el} = s * P_{\delta} \quad (20)$$

tedy také

$$P_{el} = m_2 * R_2 * I_2^2 \quad (21)$$

pak

$$P_{\delta} = \frac{(m_2 * R_2 * I_2^2)}{s} \quad (22)$$

protože

$$M = \frac{P_{\delta}}{\omega_1} = \frac{(m_2 * R_2 * I_2^2)}{(\omega_1 * s)} = \frac{C * (R_2 * I_2^2)}{s} \cdot [1] \quad (23)$$

„Moment asynchronního je tedy přímo úměrný čtverci proudu rotoru a rotorového odporu a nepřímo úměrný skluzu. U kroužkových motorů závislosti na velikosti odporu můžeme využít pro regulaci momentu. [1]“

Pro přepočítané hodnoty rotoru na stator můžeme vyjádřit rovnici výkonu jako

$$P_{\delta} = m_1 * \frac{I_2'^2 * (R_2')}{s} \quad (24)$$

Pak moment motoru

$$M = \frac{(m_1 * R_2' * I_2'^2)}{(\omega_1 * s)} \quad (25)$$

po dosazení za rotorový proud dostáváme

$$M = \left(\frac{(m_1 * R_2')}{(\omega_1 * s)} \right) * \left(\frac{(U_1')}{\left(R_1 + \left(\frac{(R_2')}{s} \right)^2 + X_{\delta} \right)} \right) \cdot [1] \quad (26)$$

Pokud se skluz bude rovnat $s=1$, můžeme získat záběrný moment M_z vyjádřený pro parametry stroje. [1]

Tyto tvary rovnic můžeme zjednodušit pro proud I'_2 a moment pokud zanedbáme absolutní hodnoty $/R_1+X_\delta/$, jelikož oproti R'_2/s může být velice malá, dostáváme tedy

$$I'_2 = U_1 * \left(\frac{s}{R'_2} \right) \quad (27)$$

$$M = \left(\frac{m_1}{\omega_1} \right) * (U_1^2) * \left(\frac{s}{R'_2} \right) \quad (28)$$

Tyto výrazy jsou platné přesně do 1,5 násobku jm. proudu příp. momentu. [1]

Maximální moment nebo také označovaný jako zvratový moment, nastává při zvratovém skluzu. Jeho velikost zjistíme po derivaci $dM/ds=0$ nalezením extrému. Po úpravě a derivaci dostáváme vztah

$$M_{zvr} = \frac{(m_1)}{(\omega_1)} * \left(\frac{(U_1^2)}{(2 * (R_1 \pm \sqrt{(R_1^2 + X_\delta^2)}))} \right) \quad (29)$$

což se přibližně rovná

$$M_{zvr} = \frac{(m_1 * U_1^2)}{(\omega_1 * 2 * X_\delta)} \quad (30)$$

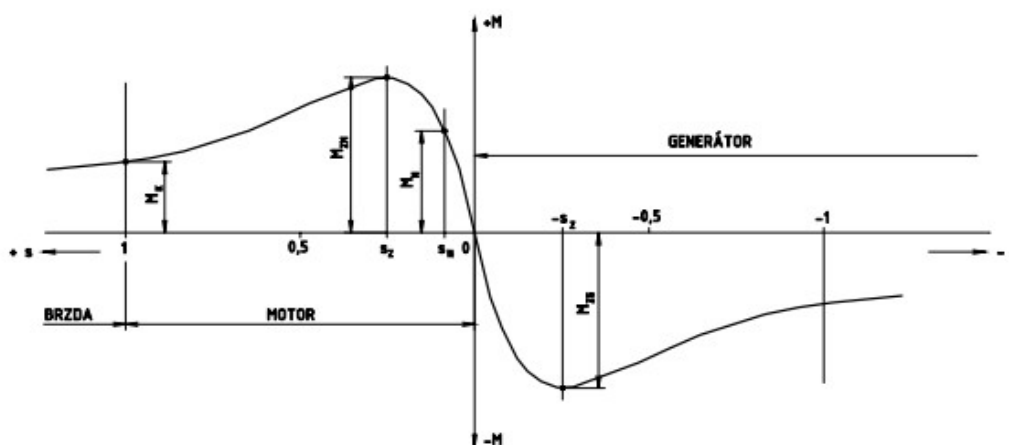
$$s_{zvr} = \frac{\pm(R'_2)}{\sqrt{(R_1^2 + X_\delta^2)}} \quad (31)$$

Znaménka v těchto rovnicích se mění podle typu stroje, + platí pro motory a – pro generátory. Dále můžeme říci že moment je přibližně úměrný mocnině napětí na druhou a jeho průběh závisí na rotorovém odporu. To samé platí i pro moment zvratu, který je na rozdíl nepřímo úměrný reaktanci nakrátko. Dále můžeme konstatovat, že velikost rotorového odporu neovlivňuje moment zvratu, ale pouze zvratový skluz.[1]

Pokud si zvratový moment a moment motoru dáme do poměru a tento vztah upravíme a nakonec zanedbáme R_1 , dostaneme vztah pro přetížitelnost motoru

$$\frac{M_{max}}{M_n} = \frac{\left(\frac{s_n}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s_n} \right)}{2} \quad (32)$$

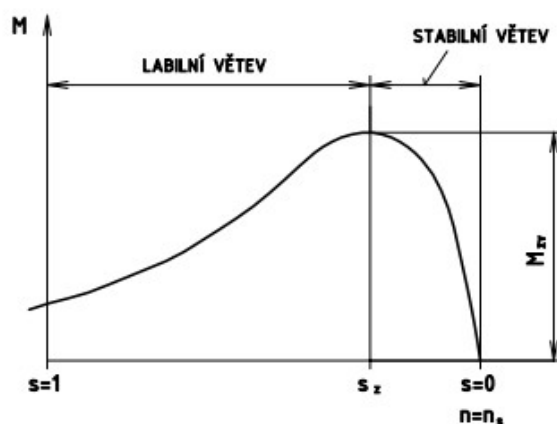
Její velikost je závislá na konstrukci a provedení motoru (velikost, provedení kotvy atd.) a pohybuje se od 1,6-4.



Obrázek 2.1: Průběh momentové charakteristiky pro všechny pracovní body

Průběh momentu v závislosti na skluzu se podle konstrukce motoru moc nemění můžeme tedy říct, že všechny motory mají stejný průběh momentu. Jeden takový průběh pro všechny pracovní body je na obrázku 2.1.[1]

Momentová charakteristika se dělí na dvě části, labilní a stabilní část. Charakteristika přechází z jedné části do druhé po překonání zvrátového skluzu. Po připojení motoru na síť stroji rostou otáčky a moment, po překonání maximálního momentu při stále rostoucích otáčkách moment klesá až teoreticky do 0 při synchronních otáčkách. Části momentové charakteristiky dělíme na labilní a stabilní. Své pojmenování mají podle toho, jestli v nich může stroj pracovat stabilně nebo ne. Počáteční část charakteristiky je labilní, motor v ní nemůže pracovat stabilně. Po překonání maximálního momentu charakteristika přechází do stabilní části, ve které je možné provozovat stroj stabilně. Momentová charakteristikamotoru s popsányými částmi je na obrázku 2.2.[1]



Obrázek 2.2: Momentová charakteristika motoru

3 Náhradní schéma a stavy asynchronního motoru

3.1 Náhradní schéma

Náhradní schéma asynchronních strojů na první pohled připomíná schéma transformátoru s tím rozdílem, že na jednotlivých vinutích jsou rozdílné frekvence, tedy že frekvence na statoru je rozdílná od frekvence napětí, které se indukují do rotoru. Dále se může měnit počet fází, které jsou na vinutích. To je závislé na provedení kotvy motoru. U vinuté kotvy se může stát, že počet fází je rovný s počtem fází na statoru. Ale u motoru s klecí na krátko je počet fází na rotoru větší, než počet fází na statoru z toho důvodu, že každá jednotlivá tyč se v rotoru počítá jako samostatná fáze. Dále dochází ke změně velikosti reaktancí z důvodu přítomnosti vzduchové mezery, které u transformátorů není přítomna. Z toho důvodu klesá hodnota X_b , což má za následek růst magnetizačního proudu a naopak roste hodnota X_σ . Proto při chodu naprázdno nelze zanedbávat příčná větev jako při chodu naprázdno transformátoru. Náhradní schéma představuje jednu fázi motoru a je napájeno ustáleným harmonickým zdrojem.[2]

Rovnice asynchronního motoru zní

$$U_1 = Z_1 * I_1 + U_{i1} = (R_1 + jX_{1\sigma}) * I_1 + U_{i1} \quad (33)$$

$$U_2 = Z_2 * I_2 + U_{i2} = (R_2 + s * jX_{2\sigma}) * I_2 + U_{i2} \quad (34)$$

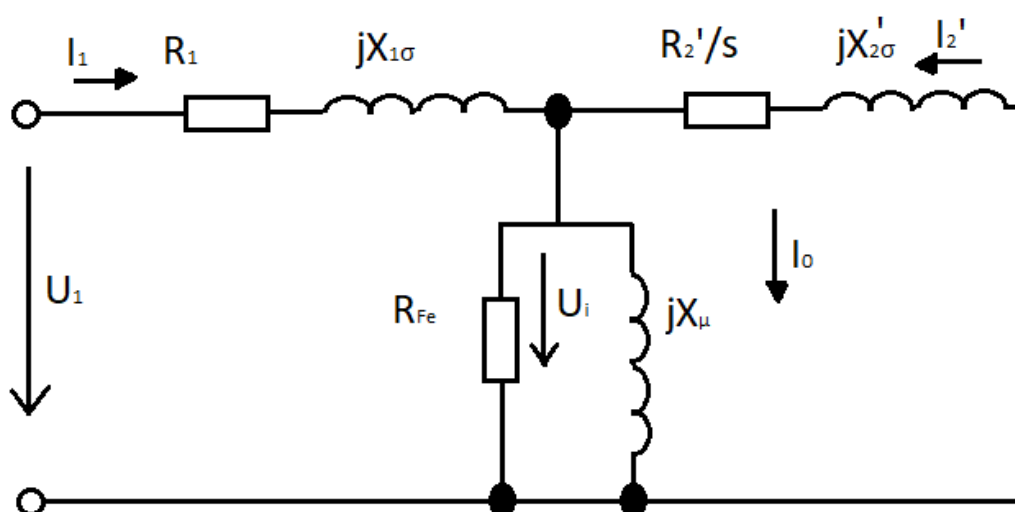
jelikož platí vztah

$$U_{i2} = s * U_{i20} \quad (35)$$

může tyto rovnice upravit do tvaru

$$\frac{U_2}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) * I_2 + U_{i20} \quad (36)$$

Dále je nutno převést rotorové veličiny na stator. Převod se provádí stejně jako u transformátorů k zjednodušení práce se strojem. Jelikož sekundární vinutí je spojeno dokrátka, napětí je $U_2=0$. Nyní můžeme nakreslit náhradní schéma s přepočítanými rotorovými hodnotami na stator ve tvaru „T“ článku, do kterého musíme doplnit R_{fe} . [2]



Obrázek 3.1: Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru T článku

Pro toto schéma nyní platí rovnice

$$U_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) * I_1 + U_i \quad (37)$$

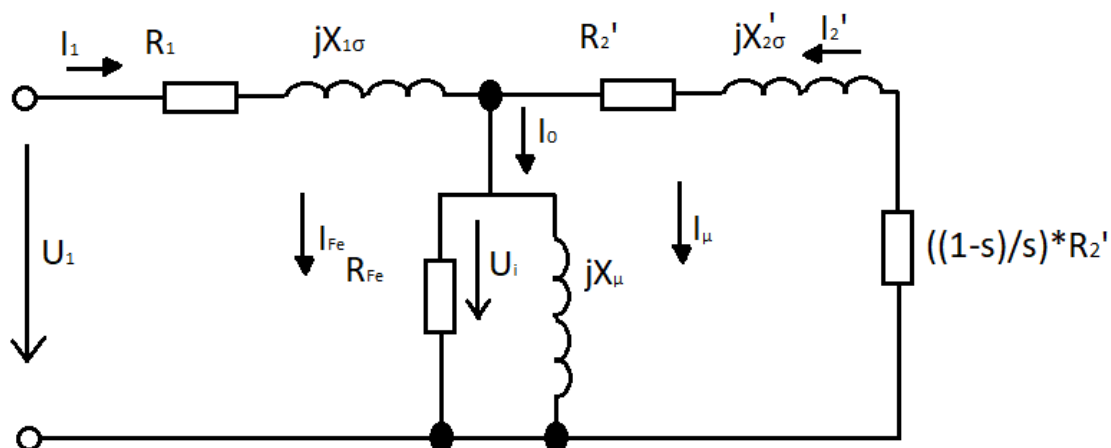
$$0 = (R_2' / s + jX_{2\sigma}') * I_2' + U_i \quad [2] \quad (38)$$

Mechanický výkon je tedy závislý na činném proudu. Joulovy ztráty v rotoru můžeme vyjádřit jako

$$\Delta P_{j2} = m_2 * R_2 * I_2'^2 = m_1 * R_2 * I_2'^2 \quad (39)$$

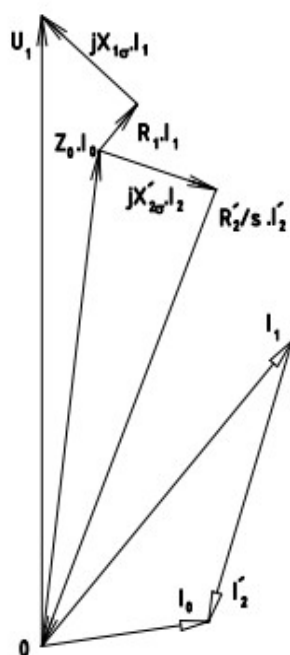
tudíž užitečný výkon na hřídeli získáme odečtením Joulovo ztrát od celkového výkonu

$$P = m_1 * R_2' * I_2'^2 - m_1 * R_2 * I_2'^2 = m_1 * \left(\frac{R_2'}{s} - R_2 \right) * I_2'^2 = m_1 * R_2' * \left(\frac{1-s}{s} \right) * I_2'^2 \quad (40)$$



Obrázek 3.2: Rozdělení ztrát a mechanického výkonu

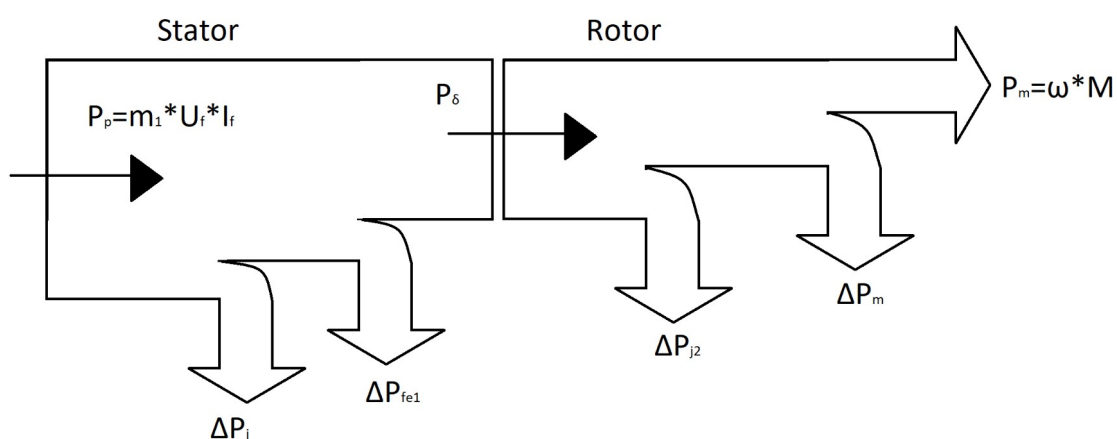
Pokud je motor v motorickém režimu platí že skluz je $s \leq 1$. Plyne z toho tedy že na odporu v náhradním schématu se vyskytují nejenom Joulovy ztráty ale také užitečný mechanický výkon. Z tohoto důvodu náhradní schéma upravíme a rozdělíme v něm Joulovy ztráty a mechanický výkon. [2]



Obrázek 3.3: Fázorový diagram pro náhradní schéma asynchronního motoru

3.2 Energetická bilance asynchronního motoru

Pokud budeme předpokládat, že všechny fáze asynchronního motoru jsou symetrické, tak pro celý stroj platí náhradní schéma. Jinak náhradní schéma asynchronních motorů platí jen pro jednu fázi, proto je nutno při výpočtech Joulovo ztrát násobit tyto ztráty počtem fází ve většině případech tedy tři krát. Energetická bilance, která je představena na obrázku 3.4 však se vztahuje pro celý stroj.[2]



Obrázek 3.4: Energetická bilance motoru

Z elektrického příkonu stroje můžeme zjistit výkon, který se přenáší přes vzduchovou mezeru neboli výkon P_δ , pokud od něj odečteme ztráty ve vinutí statoru a magnetickém obvodu

$$P_\delta = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{fe} \quad (41)$$

Kromě užitečného výkonu se do rotoru přenáší i mechanické ztráty a ztráty ve vinutí, které můžeme vyjádřit

$$P_\delta = P + \Delta P_{j2} + \Delta P_m \quad (42)$$

Joulovy ztráty ve statoru můžeme vyjádřit pomocí

$$P_{j1} = m_1 * R_1 * I_1^2, \quad (43)$$

ztráty ve statorovém magnetickém obvodu

$$\Delta P_{Fe1} = \Delta P_{FeH} + \Delta P_{FeV}, \quad (44)$$

a Joulovy ztráty v rotoru

$$P_{j2} = m_1 * R_2' * I_2'^2. \quad (45)$$

Ztráty mechanické jsou způsobeny třením ložisek a vlastní ventilací stroje a můžeme je vyjádřit jako

$$\Delta P_m = n^2 \quad (46)$$

Pokud zanedbáme ztráty, tak je vnitřní moment roven tomu na hřídeli $M=M_i$.

Součinem rychlosti točivého pole a vnitřního momentu dostáváme výkon ve vzduchové mezeře ze strany statoru.

$$P_\delta = M_i * \omega_1 \quad (47)$$

Joulovo ztráty v rotoru jsou

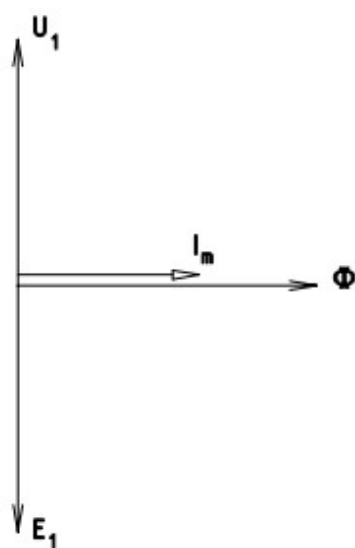
$$\Delta P_{j2} = M_i * \omega_1 - M_i * \omega = M_i * (\omega_1 - \omega) = M_i * s * \omega_1 = s * P_\delta \quad (48)$$

Jelikož v pracovním stavu má motor v rotoru velmi nízký kmitočet můžeme zanedbat jeho ztráty $\Delta P_{fe2}=0$. [2]

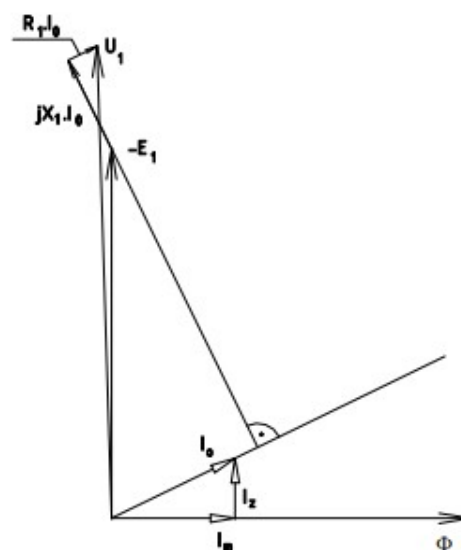
3.3 Stav naprázdno

Ideálním stavem naprázdno nazýváme idealizovaný stav, při kterém motor ze sítě odebírá pouze magnetizační proud. Tento proud je nutný pro vytvoření magnetického toku, který je indukovaný elektromotorickou silou E_1 . Její velikost je identická s velikostí vektoru U_1 , ale je opačná. Dále při ideálním stavu naprázdno předpokládáme, že se rotor otáčí stejnou rychlostí jako elektromagnetické točivé pole ve vzduchové mezeře, tedy synchronními otáčkami. To znamená že mezi statorem a rotorem není žádný relativní pohyb. Takže frekvence v rotoru je nulová a skluz je taky nula.[1][4]

V reálném stavu naprázdno je nutno ze sítě dodávat nejenom magnetizační proud, ale hradit ztráty v ložiskách atd. Proto je vždy zatížen do míry velikosti těchto ztrát. Při skutečném stavu naprázdno také dochází k úbytkům napětí a ztrátám v železe a ve vinutí stroje. Na obrázku 3.5 je vidět fázorový diagram idealizovaného stavu naprázdno a na obrázku 3.6 je fázorový diagram skutečného stavu naprázdno zahrnující ztráty naprázdno. Do nich spadá činná složka proudu naprázdno a úbytky napětí.[1][4]



Obrázek 3.5: Fázorový diagram idealizovaného stavu naprázdno



Obrázek 3.6: Fázorový diagram reálného stavu naprázdno

3.4 Stav nakrátko

Stav nakrátko u asynchronních motorů je stavem, ve kterém se motor nachází na začátku spouštění nebo pokud dojde k jeho přetížení a následnému zastavení. Tudiž jeho otáčky jsou nulové a skluz má hodnotu 1. Na rozdíl od stavu, kdy se motor netočí a má rozpojené vinutí, tak se motor spojeným vinutí do krátka se chová podstatně jinak. Důsledkem vysokého magnetického odporu, který je způsobený vzduchovými mezerami má asynchronní motor velký rozptyl na rozdíl od transformátoru. Z toho důvodu je většinový magnetický tok při stavu nakrátko rozptylový. Zbytek magnetického toku je pouze nutný na pokrytí úbytků ztrát na činném odporu a reaktanci vinutí. Velikost proudu nakrátko má menší hodnotu než u transformátorů a jeho velikost se pohybuje od 5 až do 7 násobku proudu jmenovitého. Další věcí kterou se motor odlišuje od transformátoru je chování pole, u motoru dochází k prostorové změně magnetického pole na rozdíl od časové změny, která je u transformátorů. V zapojení nakrátko se všechna dodávaná energie mění na teplo. Stav, ve kterém motor provozujeme se nachází někde mezi stavem nakrátko a naprázdno. Motor při zatížení má skluz v mezích 0 a 1 a otáčky v mezích 0 a n_1 . Motor musí být schopen vytvořit indukované napětí na rotoru, které vyvolá proud a působením s magnetickým točivým polem vyvolá moment motoru, to má za následek, že se motor otáčí ve stejném smyslu jako magnetická pole v motoru. [1][4]

4 Spouštění asynchronních motorů

Spouštěním asynchronního motoru rozumíme přechodový děj, při kterém dochází ke ať už nárazové, nebo pozvolné změně většiny veličin v motoru z klidového stavu (moment, otáčky, proudy) a po jeho skončení přechází motor na pracovní otáčky. Samotné spouštění může mít značné vlivy na samotný stroj, a i na poháněné zařízení, tyto vlivy jsou o to značnější, pokud dochází ke častému spouštění stroje.[1]

Při posuzování vlastností asynchronních strojů při jejich spouštění využíváme skupiny veličin. První z nich je poměr záběrného proudu ku proudu jmenovitému. Při spouštění motoru jsou hodnoty záběrného proudu značně veliké, protože jediná impedance, která tento proud ovlivňuje je impedance nakrátko. Velikost záběrného proudu je přímo úměrná napětí při spouštění a nepřímo úměrná impedanci rotoru. Záběrný proud tedy můžeme jenom snížit snížením napětí, nebo zvětšením odporu při rozběhu. Varianta kdy zvyšujeme odpor je možná pouze u strojů s kotvou kroužkovou a několika speciálních provedení kotvy nakrátko. Důležitá je taky plynulost samotného průběhu proudu v motoru, a ta je dána buď poměry mezi momentem a protimomentem při neřízeném spouštění, nebo při řízeném spouštění stupňovitým na zvolení počtu a hustoty stupňů, mezi kterými se přepíná. Při plynulém řízení i průběh proudu bude nejvíce plynulý.[1]

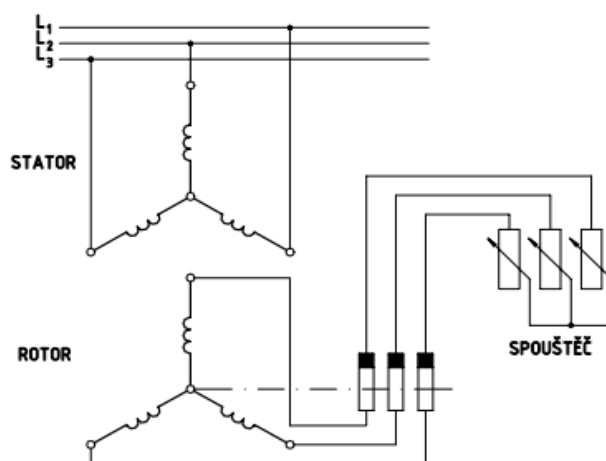
Dalšími veličinami jsou např. doba rozběhu, ztráty a oteplování stroje při spouštění, požadavek na opakované rozběhy nebo také jestli stroj spouštíme s nebo bez zátěže, u kterých záleží na průběhu protimomentu a zátěžového momentu. U některých momentů může být působící setrvačný moment tak velký, že doba rozběhu se několikanásobně krát prodlouží.[1]

Ve většině případech naším cílem při spouštění motoru je dosáhnout co nejmenšího záběrného proudu při co největším záběrném momentu. Tohoto cíle se snažíme dosáhnout několika způsoby, které se mění podle toho, s jakým typem stroje pracujeme.[1]

4.1 Spouštění asynchronního motoru s vinutou kotvou

Motory s vinutou kotvou kroužkovou mají velmi jednoduché spouštěcí zapojení. Na kartáče na rotorovém vinutí je připojena odporová kaskáda nebo jenom spouštěcí odpor, u kterého můžeme měnit jeho hodnotu. Při spouštění měníme hodnotu odporu na rotorovém

obvodu podle potřeby buď plynule nebo skokově přepínáním stupňů kaskády. Po přechodu motoru do pracovního stavu se tento odpor odpojuje a rotorové vinutí se spojí do krátka. Toto se provádí buď krátkospojovačem nebo jednoduše stykači. Zapojení obvodu motoru za použití stykačů je na obrázku 4.1. U některých motorů, zvláště u těch velkých s dlouhou pracovní dobou dochází k nadzvedávání kartáčů po přechodu do pracovního stavu. Kartáče se zvedají za účelem omezení jejich opotřebení.[1]



Obrázek 4.1: zapojení asynchronního motoru se spouštěcím odporem

Zařazováním odporu do obvodu rotoru dochází k změně momentové charakteristiky. Dochází k jejímu posuvu, jelikož zvrátový skluz je závislý na velikosti odporu, na druhou stranu moment zvratu se nemění se změnou skluzu, takže výška charakteristiky se nemění jen její horizontální posun. Tímto způsobem můžeme zvýšit hodnotu záběrného momentu, až na hodnotu momentu zvratu.[1]

4.2 Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko s různými vlastnostmi při rozběhu

Při spouštění asynchronních motoru s kotvou kroužkovou musíme brát v potaz jejich velké proudové a momentové rázy, které mohou ovlivnit, jak stroj samotný, tak i ostatní zařízení v okolí a síť, která ho napájí. Z toho důvodu podobně jako u motorů s vinutou kotvou se musí používat zařízení vně elektromotoru, která zařídí spouštění motoru s určitými vlastnostmi, neboli spouštěč. Nebo se využije speciální konstrukce elektromotoru, která zařídí rozběh s požadovanými parametry.[1]

4.2.1 Přímé připojení na síť

Motory, které nemají při spouštění větší ráz než 22 kVA, tj. motory se jmenovitým výkonem do 3 kW včetně, lze připojit přímo na síť nízkého napětí bez zvláštního spouštěcího zařízení.[1]

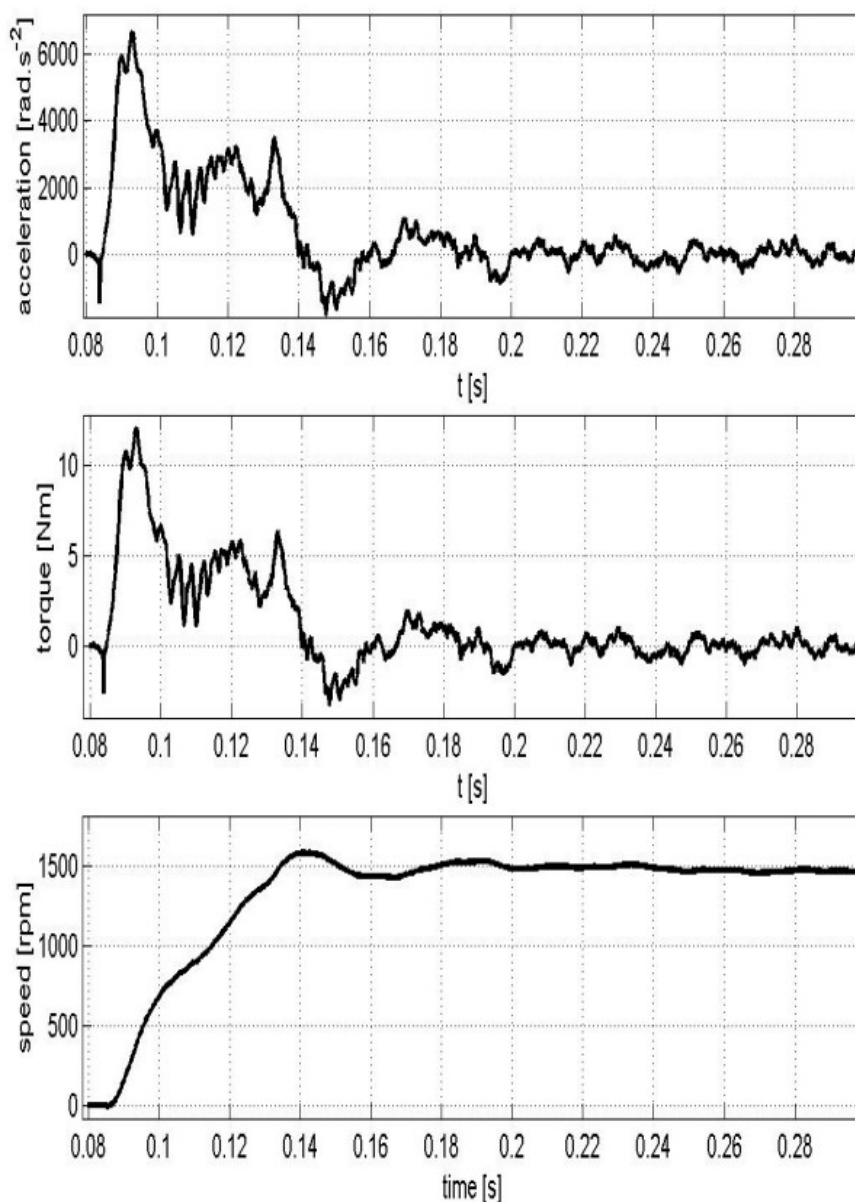
Pokud bychom chtěli připojovat přímo na síť i stroje větších výkonů je nutné, abychom je připojovali na síť se zvláště dobrou přenosovou schopností. V podnicích je možno připojovat motory i v rámci MW na síť, pokud je konfigurace dané sítě dostatečně dobrá a jsou dodržovány zvláštní opatření. Mezi tyto opatření patří například vyčlenění vlastních vývodů z elektrárny atd. [1]

Na následujících několika obrázcích jsou změřené průběhy stroje při přímém připojení na síť. Parametry stroje, který byl měřen jsou:

		Přepočet pro 50 Hz
Napětí	440 V D	367 V
Proud	2A	
Výkon	0,9 kW	749,6 W
Účinnost	0,78	
Kmitočet	60Hz	50Hz
Rychlost	1705 rmp	1421 rpm
Moment setrvačnosti	0,0018 kg*m	

Tabulka 4.1 Štítkové hodnoty měřeného stroje

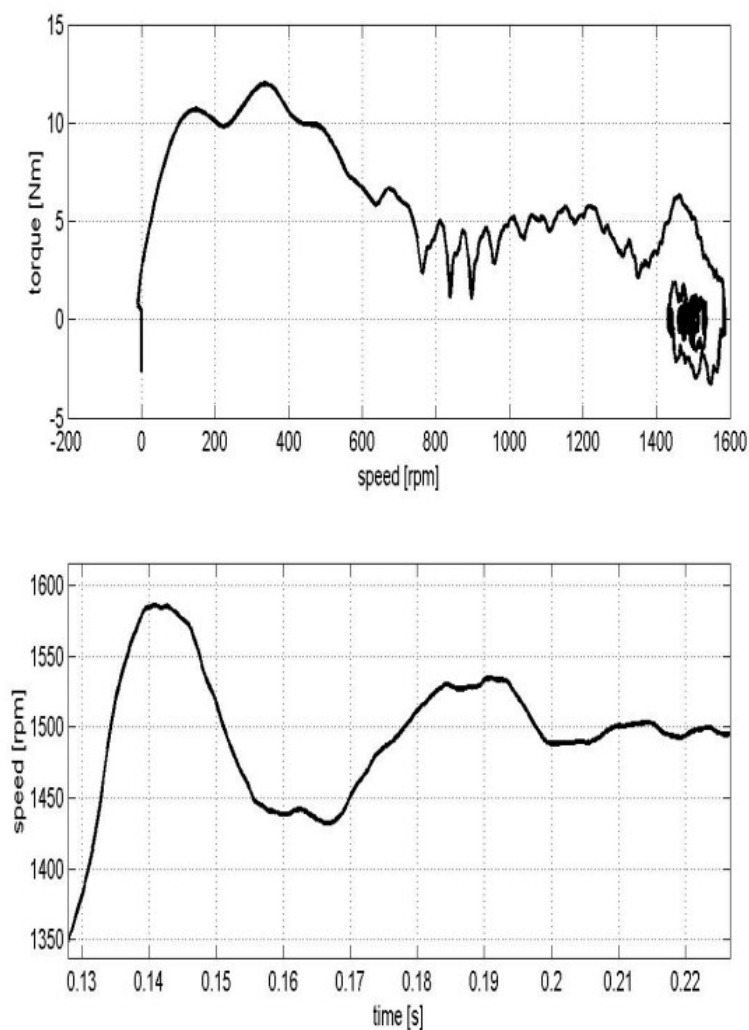
Jak můžeme vidět, tak na horním a prostředním průběhu na obrázku 4.2 je na začátku malý záporný impulz v hodnotách akceleračního momentu a zrychlení. Ten je způsobem reluktančním momentem, který vzniká ještě před vznikem točivého pole. Velikost tohoto impulzu záleží na okamžiku připojení stroje k síti a vzájemné poloze statoru a rotoru. Jelikož má stator a rotor rozdílný počet zubů, tak ideální stav, při kterém je tento impulz nejmenší, když zuby statoru a rotoru se natočí, tak aby se vytvořila co největší magnetická vodivost.[5]



Obrázek 4.2: Průběhy zrychlení, akceleračního momentu při připojení na $U=420\text{V}$ v zapojení Y

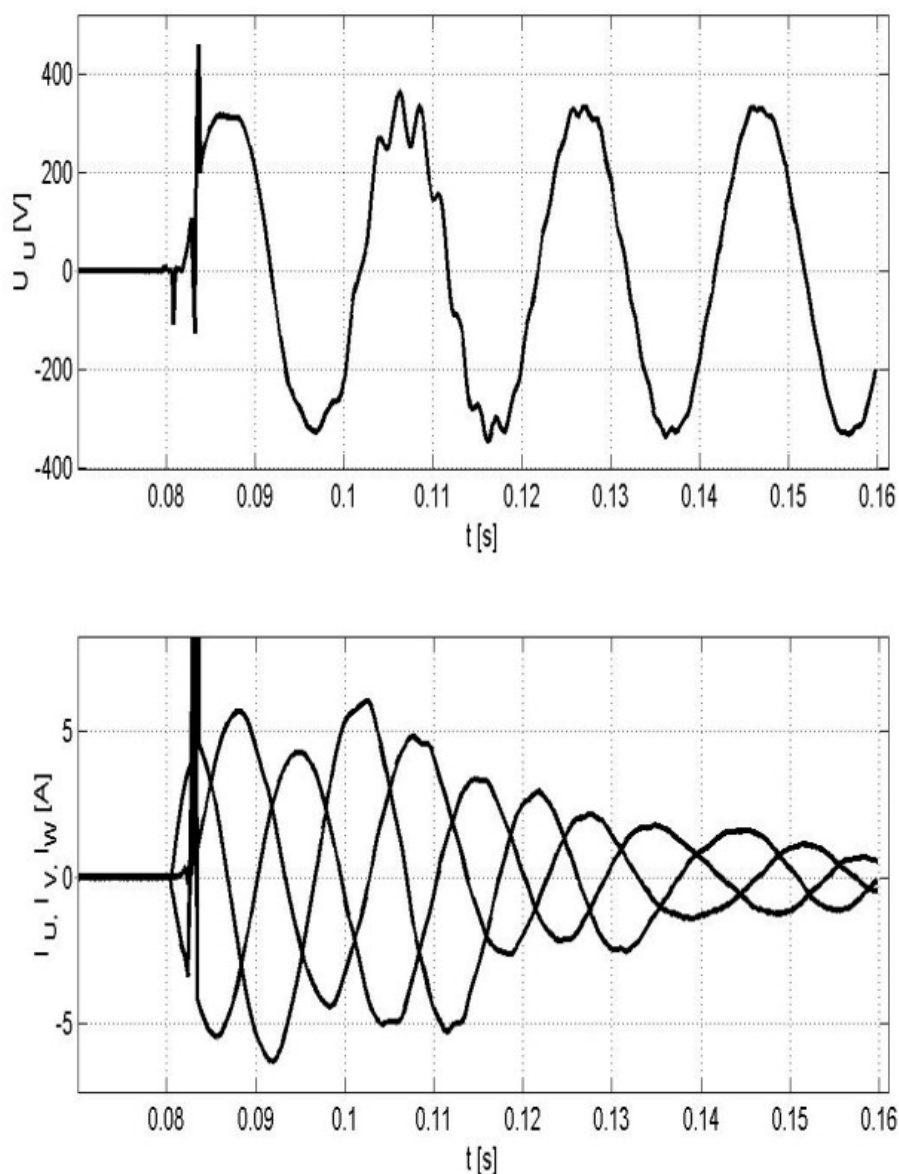
Následně v čase 0,14 sekundy dochází k překročení synchronní rychlosti $1500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Stroj byl chopen překonat synchronní rychlost díky tomu, že se rozbíhal naprázdno se značným zrychlením. Po překročení synchronní rychlosti dochází k následnému přechodu do generátorického režimu a dodávání energie do sítě. Přechodem do generátorického režimu dochází k brzdění a po pádu pod synchronní rychlost k opětovnému zrychlování. Tento přechodový děj se pak nadále opakuje, až nakonec se ustálí v těsně podsynchronní rychlosti. Detail tohoto kmitavého přechodového děje je na spodním průběhu na obrázku 4.3. Pokud je stroj zatížen mechanickou zátěží s velkým setrvačným momentem, tak

většinou ani nedojde ke kmitavému přechodovému ději, ale k aperiodickému ději. Pro zobrazení momentu, se ale častěji než časová závislost, využívá závislost momentu na rychlosti. Na obrázku 4.3 můžeme vidět takovou závislost. Na začátku průběhu můžeme vidět záporný impulz akceleračního momentu a zrychlení způsobené reluktančním momentem. A na konci průběhu mezi rychlostmi 1400 a 1600 ot.min⁻¹ je zobrazen kmitavý přechodový děj.[5]



Obrázek 4.3: Dynamická momentová charakteristika a detail kmitavého přechodového děje

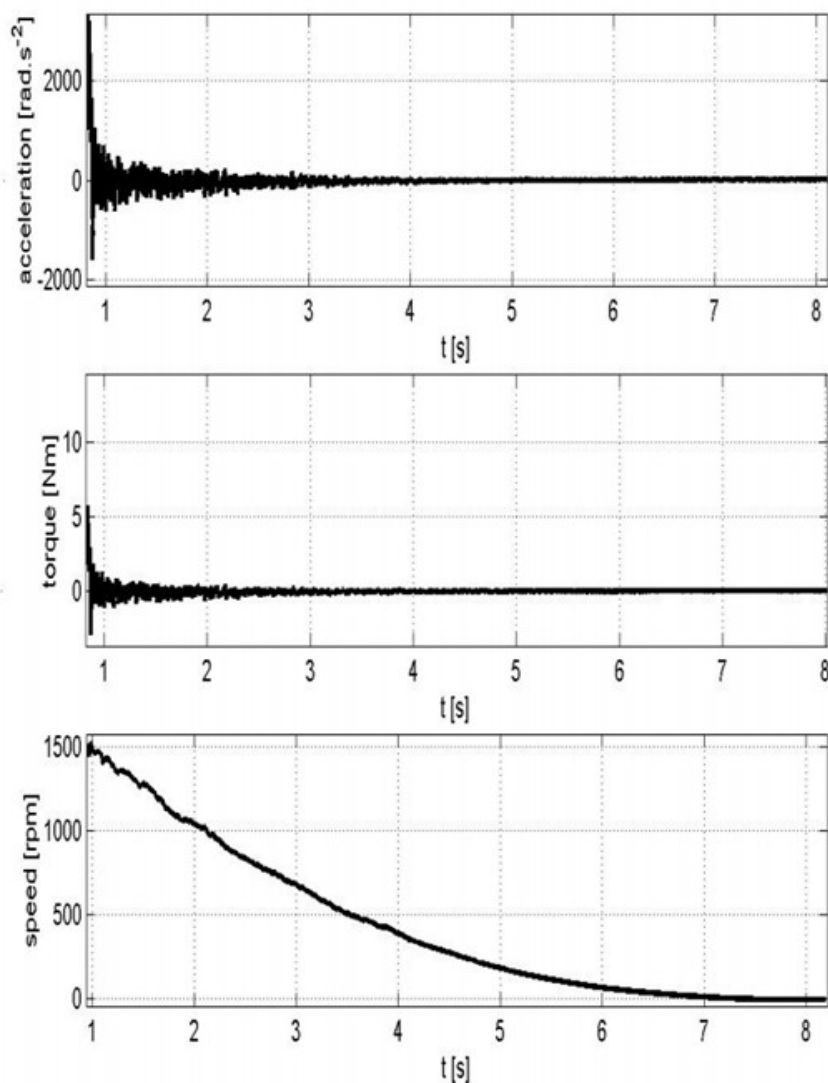
Pokud by nás zajímaly elektrické veličiny tak jejich průběhy jsou na obrázku 4.4. Na obou průbězích je rapidní nárůst napětí i proudu po připojení stroje v nule napětí, který je způsoben vytvořením oblouku při odskoku kontaktů. Tento oblouk následně způsobil pokles následující amplitudy napětí ve stroji. Přechod stroje do generátorického stavu lze vidět na průběhu proudů, jelikož v čase 0,14 sekundy dochází k prodloužení periody proudů a otočení fáze proudů vůči napětí.[5]



Obrázek 4.4: Průběhy elektrických veličin při rozběhu stroje

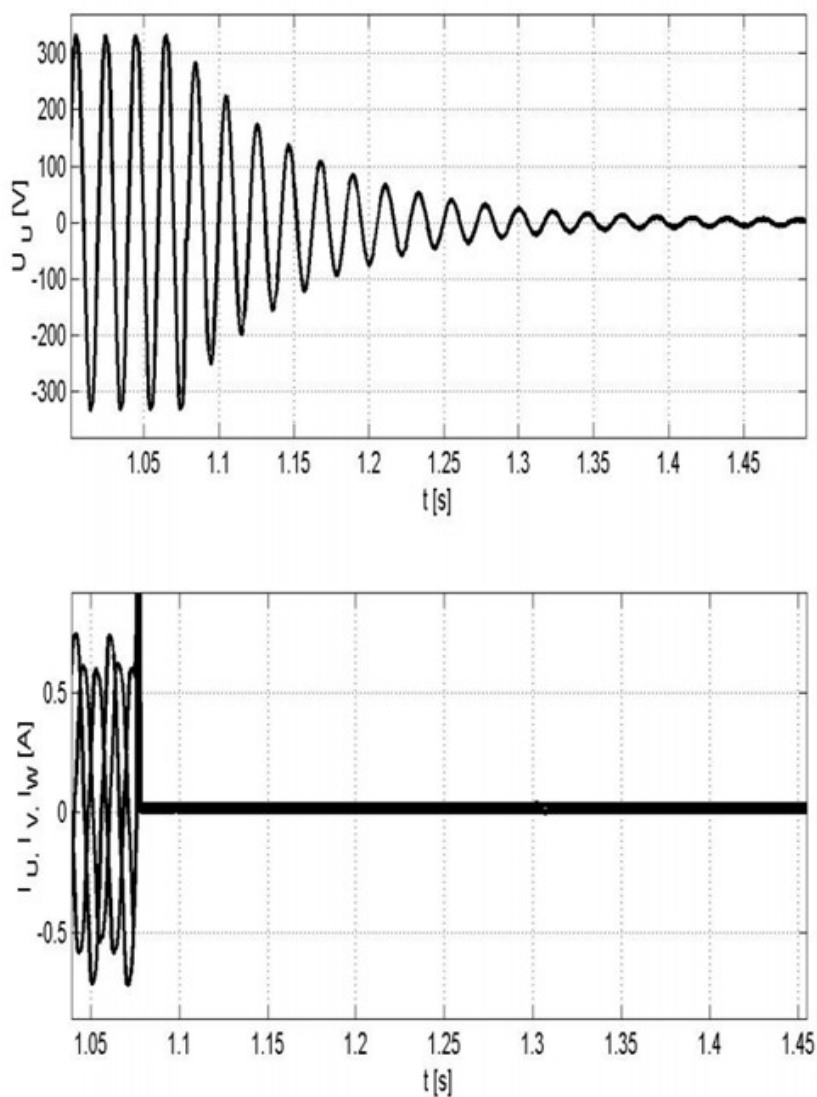
4.2.2 Doběh asynchronního stroje

Následující průběhy na obrázcích 4.5 a 4.6 představují doběh stroje se stejnými parametry jako byl předem zmíněn. Stroj pracoval naprázdno v zapojení Y a k odpojení od napájení došlo v čase 1,076 sekundy, následně dochází k pozvolnému doběhu stroje a asi za 6 sekund po odpojení stroj úplně zastaví. Při volném doběhu je stroj brzděn ztrátami v magnetickém obvodu a ztrátami třením rotoru a ztrátami v ložiskách. Po zániku magnetického toku dochází k brzdění už jenom třením a ztrátami v ložiskách.[5]



Obrázek 4.5: Mechanické veličiny při doběhu stroje

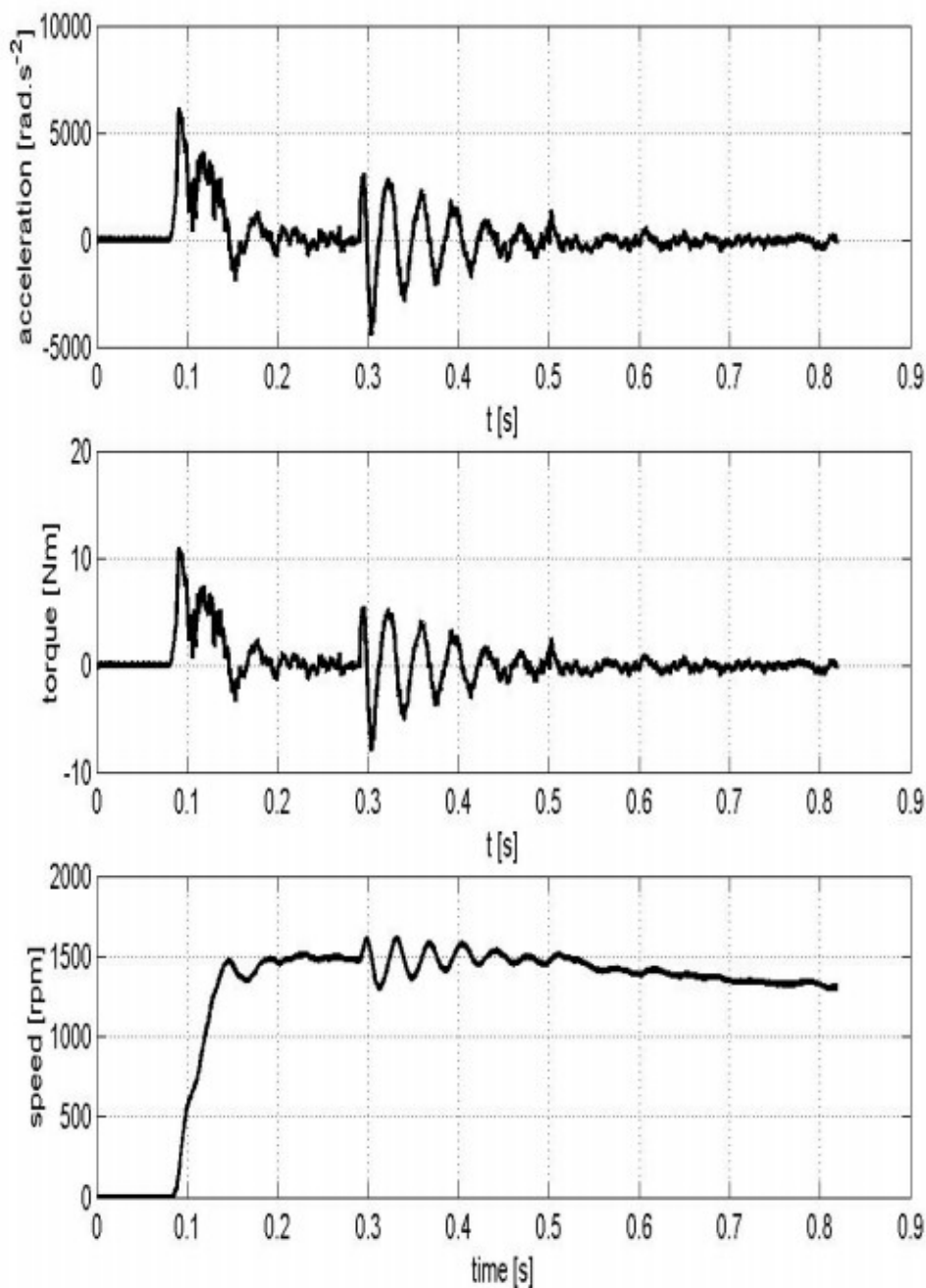
V průběhu elektrických veličin můžeme vidět, že po odpojení stroje od napájení dochází k okamžitému pádu proudu k nule. Určité napětí na svorkách zůstává, tak dlouho dokud stroj brzdí v generátorickém stavu, jinými slovy, dokud nezanikne magnetický tok ve stroji. Nebezpečné dotykové napětí na svorkách zaniká několik desítek ms po odpojení od napájení.[5]



Obrázek 4.6: Elektrické veličiny při doběhu stroje

4.2.3 Opětné zapnutí stroje

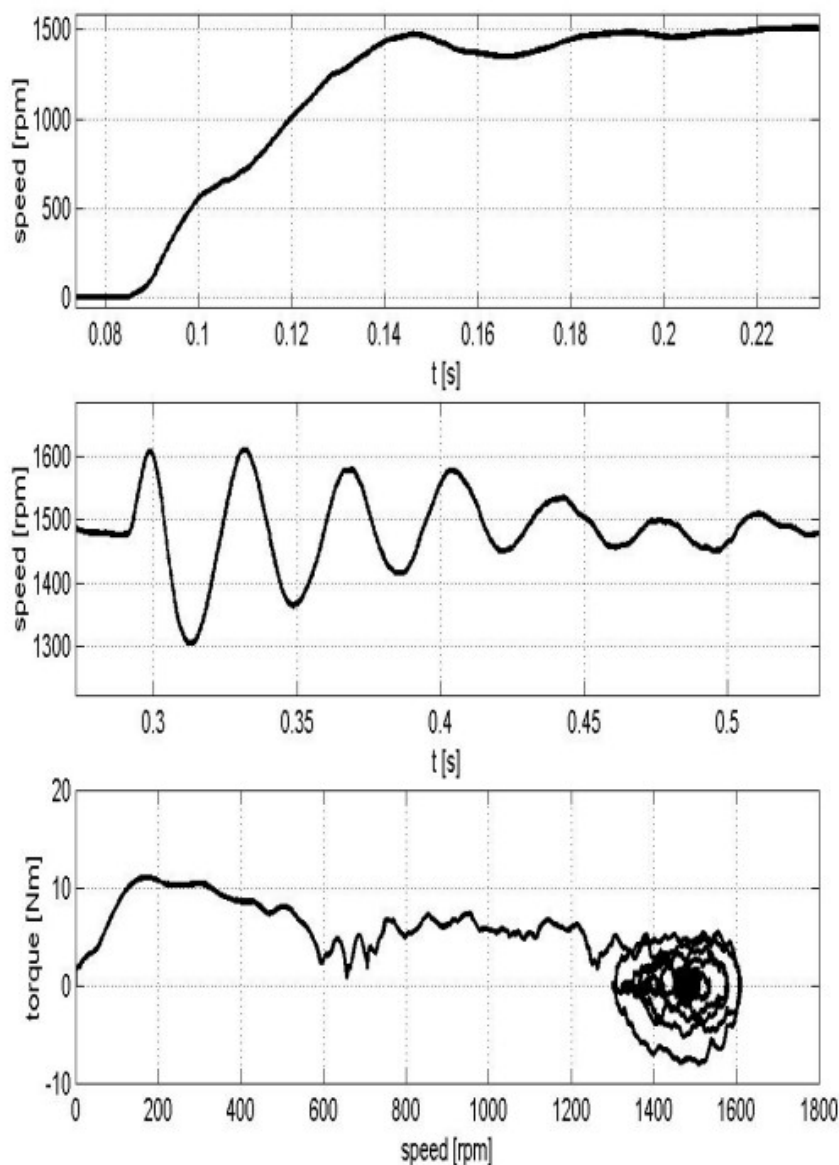
Pro popsání následujících průběhů budeme uvažovat stav, ve kterém stroj se stejnými parametry jako předtím, je připojen na napájení 420V v zapojení Y a po jeho rozběhu a přechodu do pracovního stavu je odpojen a následně je znovu připojen na napájení s vyšší hodnotou napětí a to 520V.[5]



Obrázek 4.7: Průběhy mechanických veličin při opětovném připojení stroje na napájecí síť

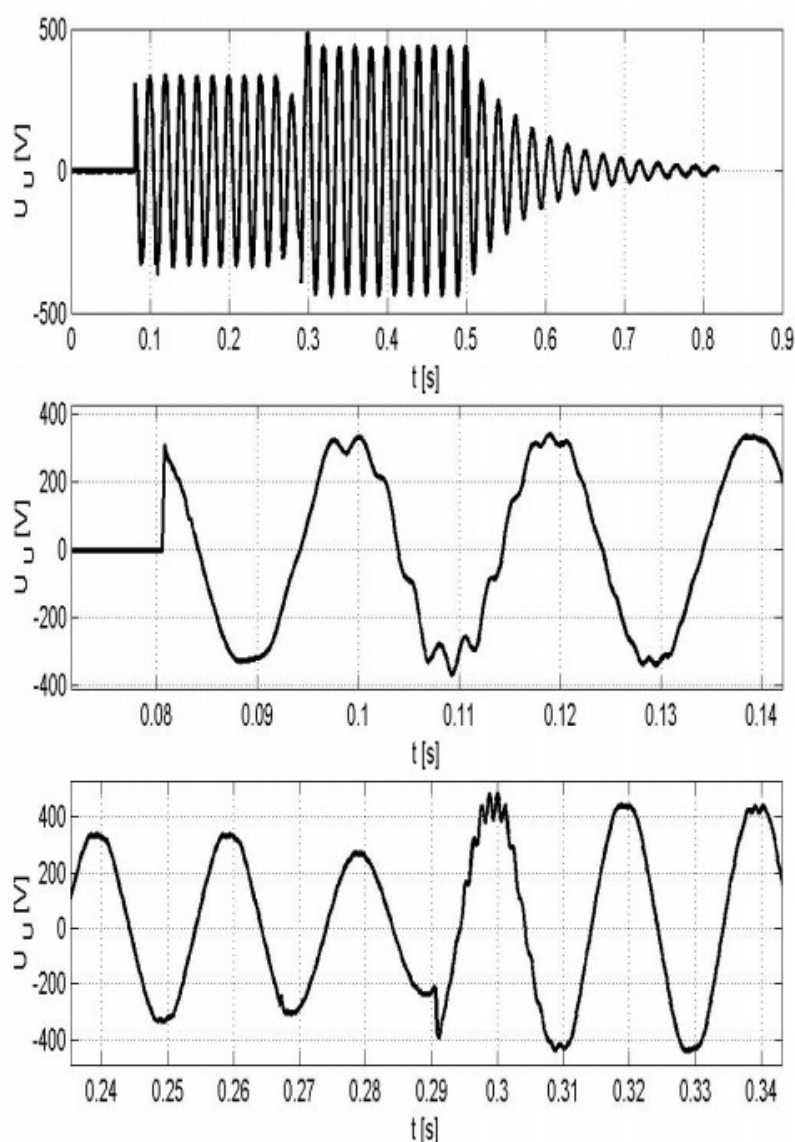
Na obrázku 4.7 jsou vidět průběhy stroje který byl připojen přímo na síť na napájení 420V v zapojení Y. Jelikož stroj je dimenzován na rozdílnou hodnotu napájecí frekvence než 50 Hz dochází kvůli tomu o rozběh se sníženým napětím. Odpojení stroje dochází v čase 0,267 sekundy a dochází k pozvolnému doběhu stroje. Po pár periodách sítě je však stroj v zapojení Y znovu připojen na napájení, a to na hodnotu 520V, která je pořád nižší než jmenovitá hodnota napětí stroje, tudíž se pořád jedná o rozběh se sníženým napětím.

Úplné vypnutí stroje nastává v čase 0,5 sekundy. Po kterém dochází s pozvolnému doběhu, a nakonec úplnému zastavení stroje.[5]



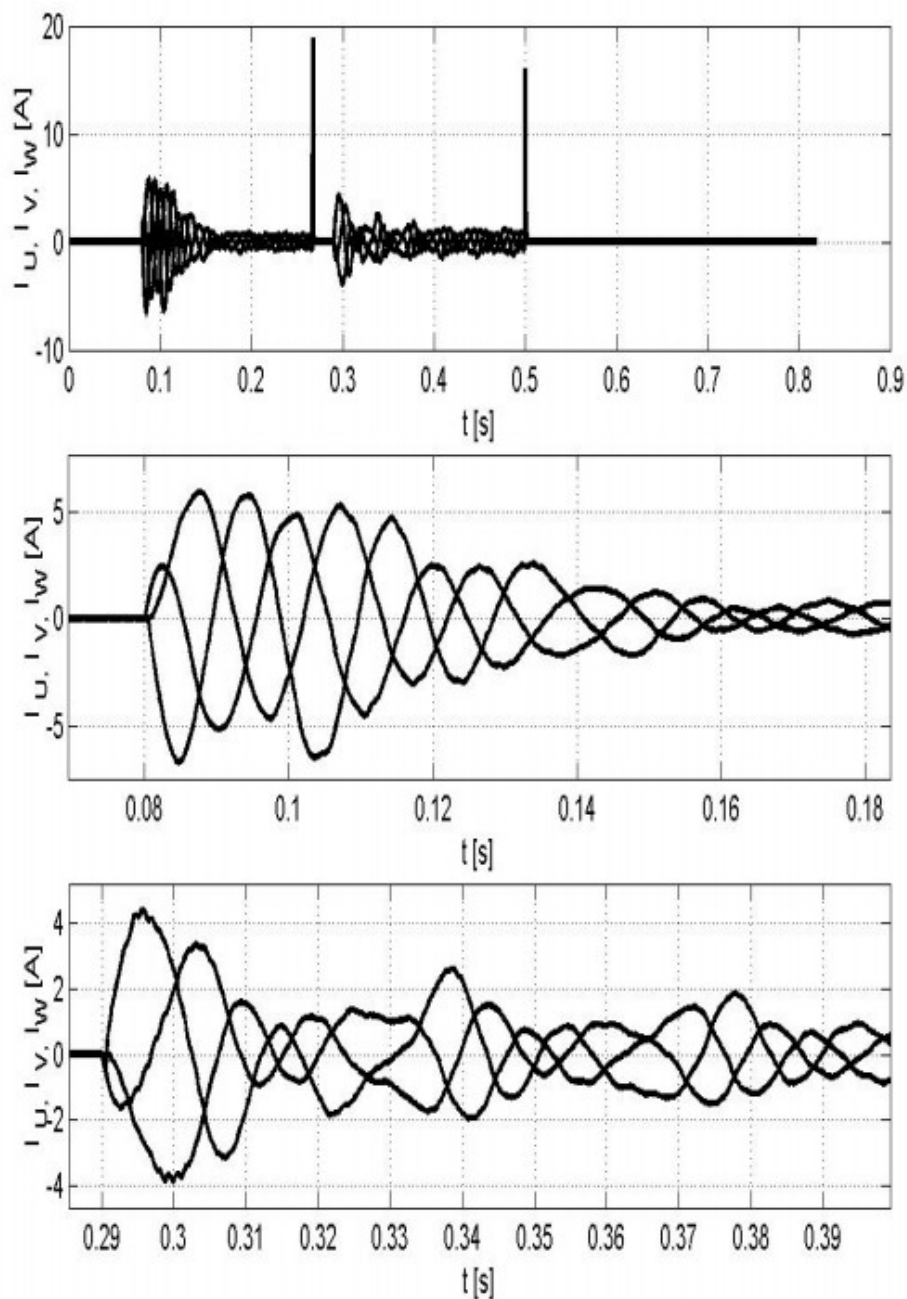
Obrázek 4.8: Detail průběhu rychlosti a dynamická momentová závislost

Ve vrchním a prostředním průběhu na obrázku 4.7 můžeme vidět impuls v hodnotách akceleračního momentu a zrychlení v čase 0,29 sekundy. Tento impuls vybudil kmitání stroje. Detail těchto kmitů je na středním průběhu na obrázku 4.8 a dolním grafu máme dynamickou momentovou závislost vykreslenou pro celý průběh. Jinými slovy pro obě zapnutí stroje. Kmitání stroje můžeme vidět na dynamické momentové závislosti jako skupinu kružnic se středem v rychlosti 1500 ot*min⁻¹. [5]



Obrázek 4.9: Průběh napětí ve stroji a detaily průběhů napětí jednotlivých zannutí

Popis elektrických veličin je na obrázku 4.9. Prostřední průběh je detail prvotního zapnutí stroje. Prostřední průběh naopak popisuje opětovné připojení stroje po prvotním vypnutí. Na tomto průběhu můžeme, vidět že svorkové napětí je po odpojení stroje téměř stejně velké jako napájecí napětí. Po opětovném připojení došlo k vybuzení proudu a vytvoření kmitů. U proudů dochází při každém vypnutí stroje k vytvoření oblouku, který po několika chvilkách zanikne. Kmitání se projevuje změnou fází proudů, jak je patrné z dolního průběhu na obrázku 4.10. [5]



Obrázek 4.10: Průběhy elektrických proudů ve stroji

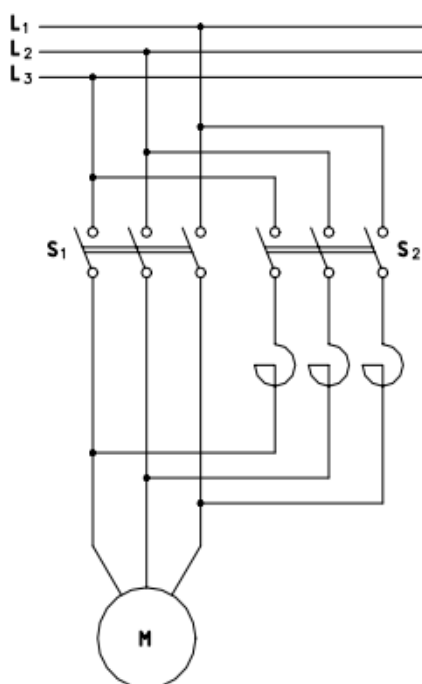
4.2.4 Spouštění se sníženým napětím

Jelikož celá momentová charakteristika je závislá na velikosti napětí, můžeme omezit momentové rázy při spouštění motoru omezením napětí. Tého metody se využívá u motorů, u kterých není požadován plný záběrný výkon hned po rozběhu.[1]

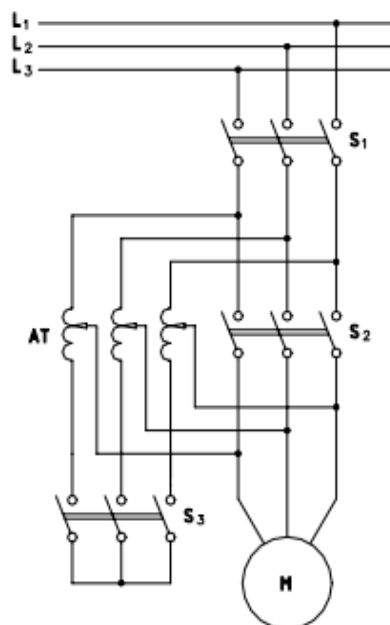
Snížení napětí můžeme dosáhnout několika způsoby. Prvním je možnost zapojením předřadného odporu nebo tlumivky k vinutí statoru. Dále můžeme použít pro spouštění autotransformátor, na kterém plynule měníme napětí. A posledním způsobem je přepínač mezi zapojením statorového vinutí mezi hvězdou a trojúhelníkem.[1]

Zapojením s využitím spouštěcí tlumivky je na obrázku 4.11. Tlumivka má za úkol snížit spouštěcí napětí o 30-40%. Při spouštění první spínáme spínač S_2 a pak S_1 . Napětí se rozdělí v poměru reaktance tlumivky a reaktance vinutí statoru.[1]

Na obrázku 4.12 je zapojení, při kterém využíváme autotransformátoru pro rozběh motoru. První sepnutý spínač je S_3 následně S_1 přičemž dochází k roztáčení motoru. Po roztočení se S_3 rozpojuje a autotransformátor začíná pracovat jako tlumivka. Rozběh se dokončí sepnutím spínače S_2 . Napětí se pomocí autotransformátoru snižuje většinou od 25-40%. [1]



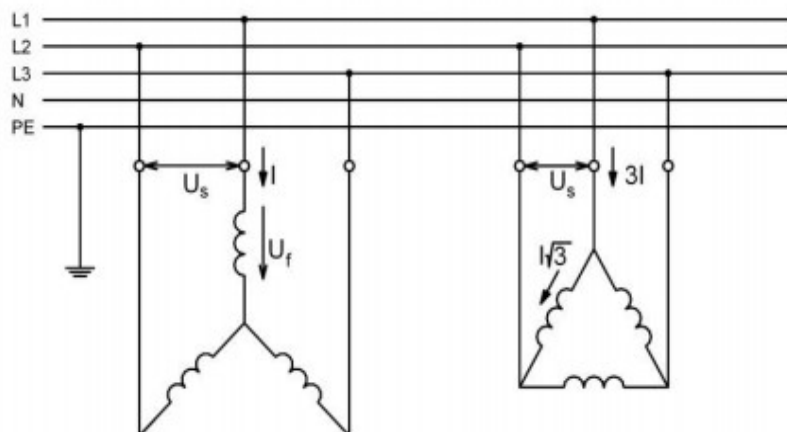
Obrázek 4.11: Zapojení motoru se spouštěcí tlumivkou



Obrázek 4.12: Zapojení motoru se spouštěcím autotransformátorem

4.2.5 Spouštěním přepínačem hvězda trojúhelník

Tento způsob spouštění je podmíněný tím, že na svorkovnici musí být 6 vývodů vinutí a motory musí být pro provozní napětí zapojeny do trojúhelníka. Jedná se o velmi rozšířený způsob spouštění motorů a používá se u malých a středních motorů ve výkonovém rozsahu od 15kW do 20kW. Principem je využívání vztahů mezi zapojením hvězdy a trojúhelníku, kde při spouštění máme motor zapojený do hvězdy a tím snížíme fázové napětí o $\sqrt{3}$ a tím snižujeme záběrový proud na $1/3$ původní hodnoty. Záběrový moment tedy taky snižujeme na $1/3$ původní hodnoty. Při přepnutí do trojúhelníka tedy je na každé fázi $\sqrt{3}$ krát větší napětí než ve hvězdě a proudy, které jsou 3x větší. To má za následek trojnásobný růst výkonu. Při nevhodném času přepnutí z hvězdy do trojúhelníka může stále docházet k proudovým rázům. Tento způsob se využívá u zařízeních, která jsou při rozběhu odlehčená, nejsou tedy zatížena momentem zátěže. Další možností je využití rozběhové spojky, která připojí motor k poháněnému zařízení až po dosažení jmenovitých otáček.[5]



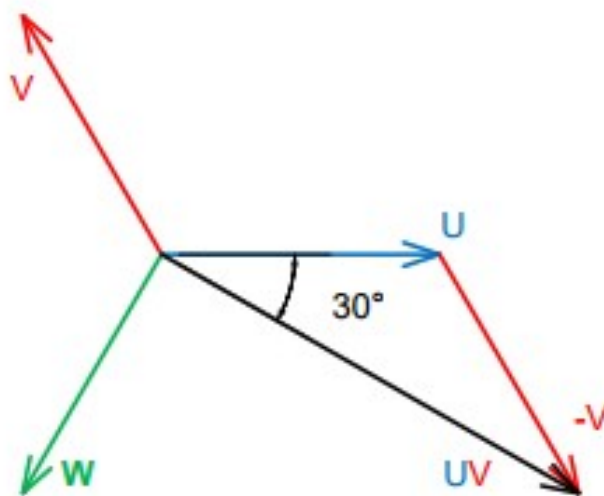
Obrázek 4.13: Vztah mezi napětími a proudy v D a Y

I po snížení napětí při rozběhu, se ale nedokážeme úplně zbavit proudových a momentových rázů, které vznikají přepojením do trojúhelníka. Při přepojování do trojúhelníka vlastně dochází k opětovnému zapnutí stroje, který ale není v klidu. Mezi důvody vzniku těchto rázů spadá například fázový posun a změna velikosti systémových fázových a sdružených napětí při přepojování z hvězdy do trojúhelníka. Dále to může být

způsobeno opětovným zapnutím stroje po přerušení napájení, který má však v jádře pořád magnetický tok, což má za následek, že na svorkách stroje je pořád napětí. Dalším důvodem je spouštění, kterému se ještě točí rotor. Posledním důvodem může být opětovné zapnutí stroje bez odpojení napájení, čehož se v nějakých speciálních případech využívá. Abychom omezili tyto rázy a při přepínání zabránili zkratu stykače a přepínače Y-D mají vždy určitou prodlevu, která bývá kolem několika period sítě (většinou 50ms).[5]

Při přepínání z hvězdy do trojúhelníka může nastat několik stavů, které jsou závislé na čase, kdy k přepnutí dojde a na zpoždění, které mají stykače a přepínače v obvodu. [5]

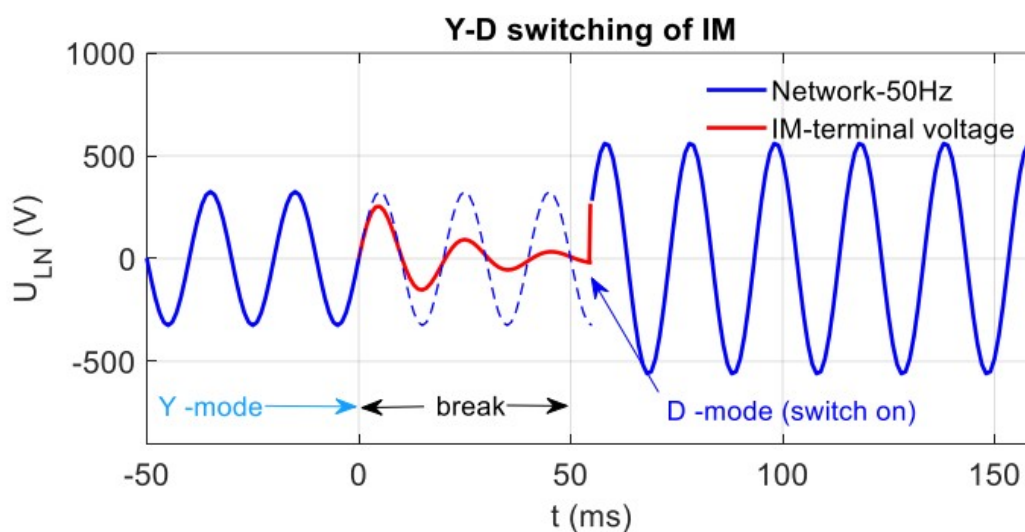
a) Sdružené napětí se rovná fázorovému součtu fázových napětí stroje. To má za následek posunutí fázorového diagramu u určitý fázový posuv, nejčastěji +/-30 stupňů. Velikost sdružených hodnot je oproti fázovým o $\sqrt{3}$ krát větší.[5]



Obrázek 4.14: Systém fázových napětí U-V-W a jednoho sdruženého napětí UV

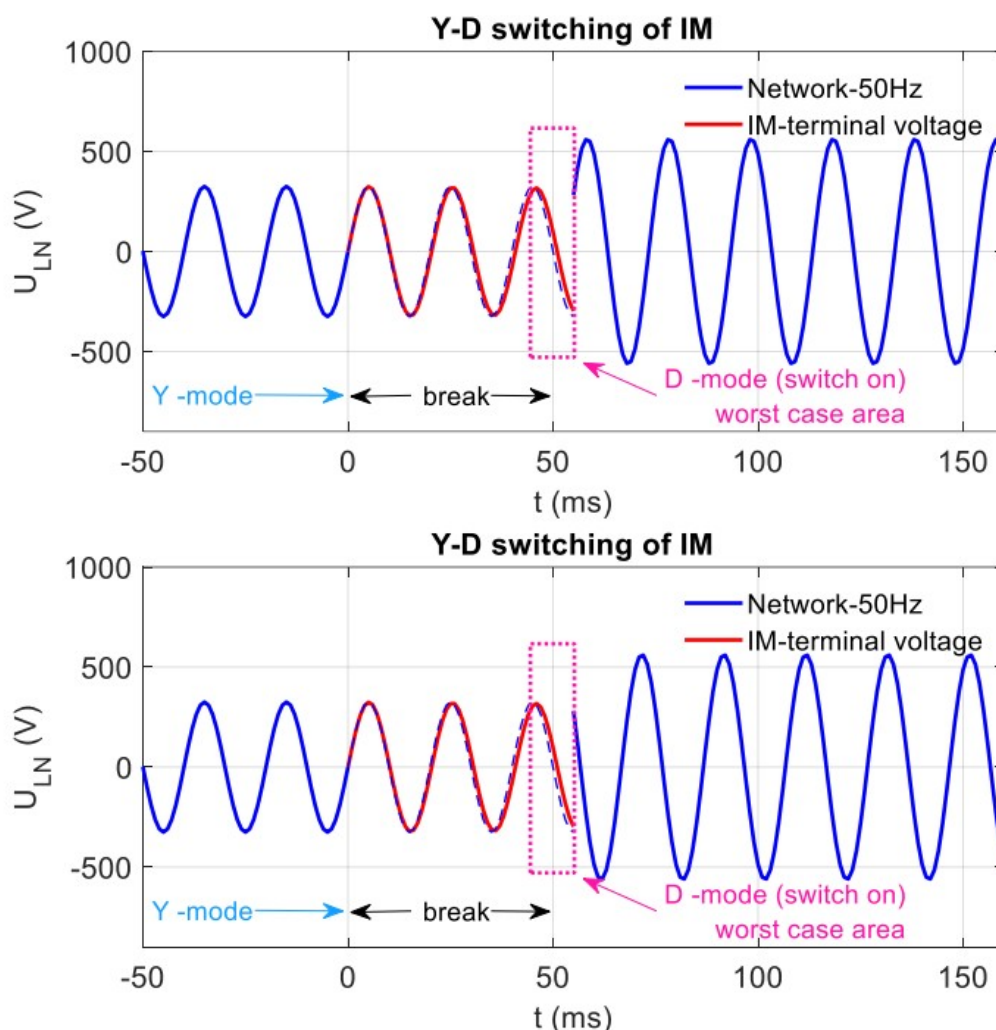
b) Zapnutí roztočeného stroje, ve kterém je indukované napětí a magnetický tok už téměř nulový. Díky tomu, že magnetický tok už téměř zanikl tak na svorkách i odpojeného stroje už není téměř žádné napětí. Průběh opětovného zapnutí stroje v tomto stavu můžeme vidět na obrázku 4.15. Po rozběhu do Y dojde v čase 0 k odpojení stroje a k postupnému zániku napětí a magnetického toku v sledujících 55ms. Tento čas se odvíjí od zpoždění spínacími zařízeními a stykači v zapojení zařízení. Po uplynutí tohoto zpoždění dojde k opětovnému zapojení stroje, tentokrát do D. Následující průběh po připojení do D závisí na

načasování sinusového průběhu. Mohou nastat dva extrémní případy, které se odvíjejí od toho, v jaké části průběhu se stroj znovu zapne. Prvním z nich je zapnutí stroje když sinusový průběh prochází nulou, to má za následek, že se vytvoří maximální stejnosměrná složka a vznikne nejhorší možný proudový a momentový ráz, který je způsobeným přesycením magnetického obvodu. Druhý extrém je, že se stroj zapne v momentu kdy sinusový průběh má svou amplitudu. V ten moment vznikne nejmenší možný proudový a momentový ráz, tento ráz ale není nulový.[5]



Obrázek 4.15: Opětné zapnutí stroje z Y do D, při kterém dojde k téměř úplnému zániku svorkového napětí

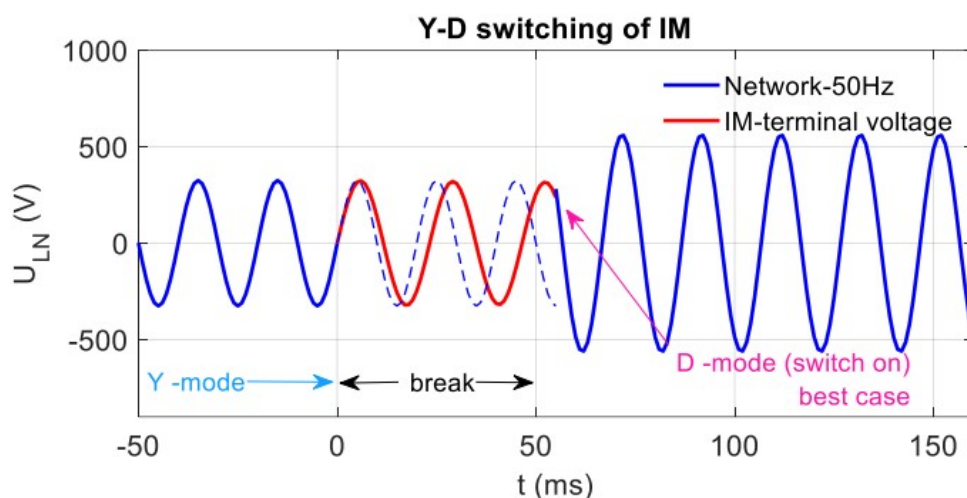
c) Ve stroji v momentu opětovného připojení k napájení je na svorkách stroje nebezpečné dotykové napětí vytvářené doznívajícím magnetickým tokem s dlouhou časovou konstantou. Po prvotním odpojení stroje se stroj začne chovat jako asynchronní generátor, který je buzen doznívajícím magnetickým tokem. Jelikož se stroj chová jako generátor má nenulový skluz a kryje veškeré vlastní ztráty a i příkon zátěže. To má za následek snížení energie z momentu setrvačnosti rotujících hmot, což znamená snížení rychlosti. Generované napětí se od síťového napětí kvůli tomu liší svou frekvencí. U velkých strojů se snažíme snížení rychlosti co nejvíce omezit, a to má za následek že se generované napětí spíš liší svou fází nežli frekvencí. Kvůli změně frekvence, popřípadě změně fáze po tom, co budeme uvažovat ještě posun fáze způsobených přepnutím do zapojení D je pravděpodobnost, že motor budeme zapínat do plného protinapětí. V tomto nejhorším případě vznikne silný proudový a momentový ráz.[5]



Obrázek 4.16: Nejhorší možný okamžik pro přepojení stroje do zapojení D

Na obrázku 4.16 můžeme vidět průběhy dvou zapojení. Tyto zapojení se liší svým způsobem zapojení, a to má za následek jiný fázový posun způsobený přepojením do D. Obvyklý trojúhelník má fázový posun sdružených napětí -30 stupňů a neobvyklý trojúhelník má $+30$ stupňů. V průběhu můžeme vidět nejnepríznivější moment připojení stroje do D a to když napětí jsou v protifázi.[5]

Když nastane stav, ve kterém spojíme stroj do D a napětí se budou měnit pouze svojí velikostí a budou ve fázi dostaneme tak neideálnější stav, ve kterém vytvořený proudový a momentový ráz je minimální, ale není nulový. Tento stav je na obrázku 4.17.[5]



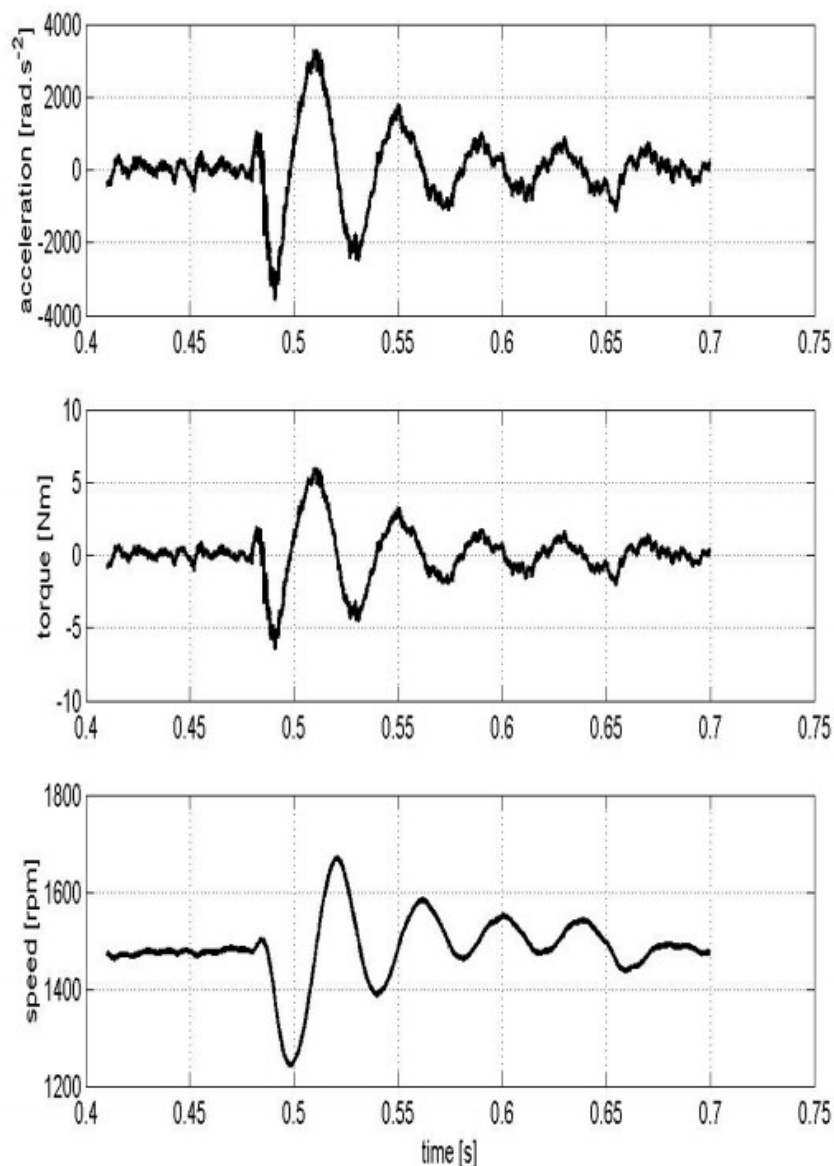
Obrázek 4.17: Nejideálnější okamžik pro přepojení stroje do zapojení D

d) Existují i speciální případy kde se provádí přepojení mezi Y a D bez přerušení proudu. Mezi tyto speciální případy patří rotační UPS zdroje. Při výpadku má rotační UPS vysoké otáčky a je zapojen do D. Po určité době klesnou otáčky generátoru natolik že se nedostatek napětí kompenzuje přepojením generátoru do Y. I u těchto aplikací vznikají momentové a proudové rázy, které nedokážeme úplně omezit.[5]

4.2.6 Přepínání Y-D s časovou prodlevou

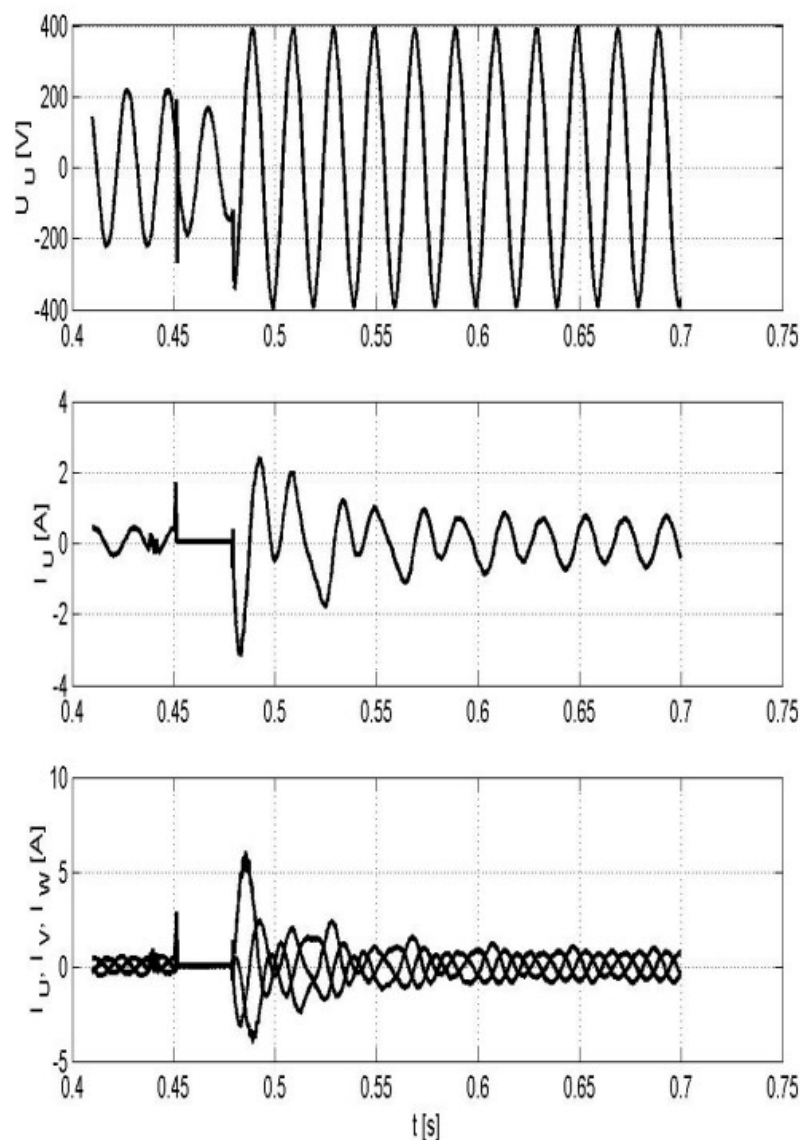
Jak bylo už předem zmíněno existují dvě zapojení, jak je možno zapojit trojúhelník. Tyto zapojení se liší v tom, jaký fázový posun mají jejich sdružená napětí. Zapojení, které označujeme za obvyklý trojúhelník má fázový posun -30 stupňů, a naopak zapojení označené za neobvyklý trojúhelník má fázový posun $+30$ stupňů.[5]

Při zapojení do obvyklého trojúhelníka dochází k přepnutí k posunutí pole o 30 stupňů proti směru působení pole. To je způsobeno, že pole rotoru v motorickém stavu a při nenulovém skluzu je zpožděné za tím statorovým. U neobvyklého trojúhelníka dochází ke skoku od 30 stupňů vpřed. Tohoto jevu se využívá u generátorického brzdění, kdy skluz je záporný.[5]



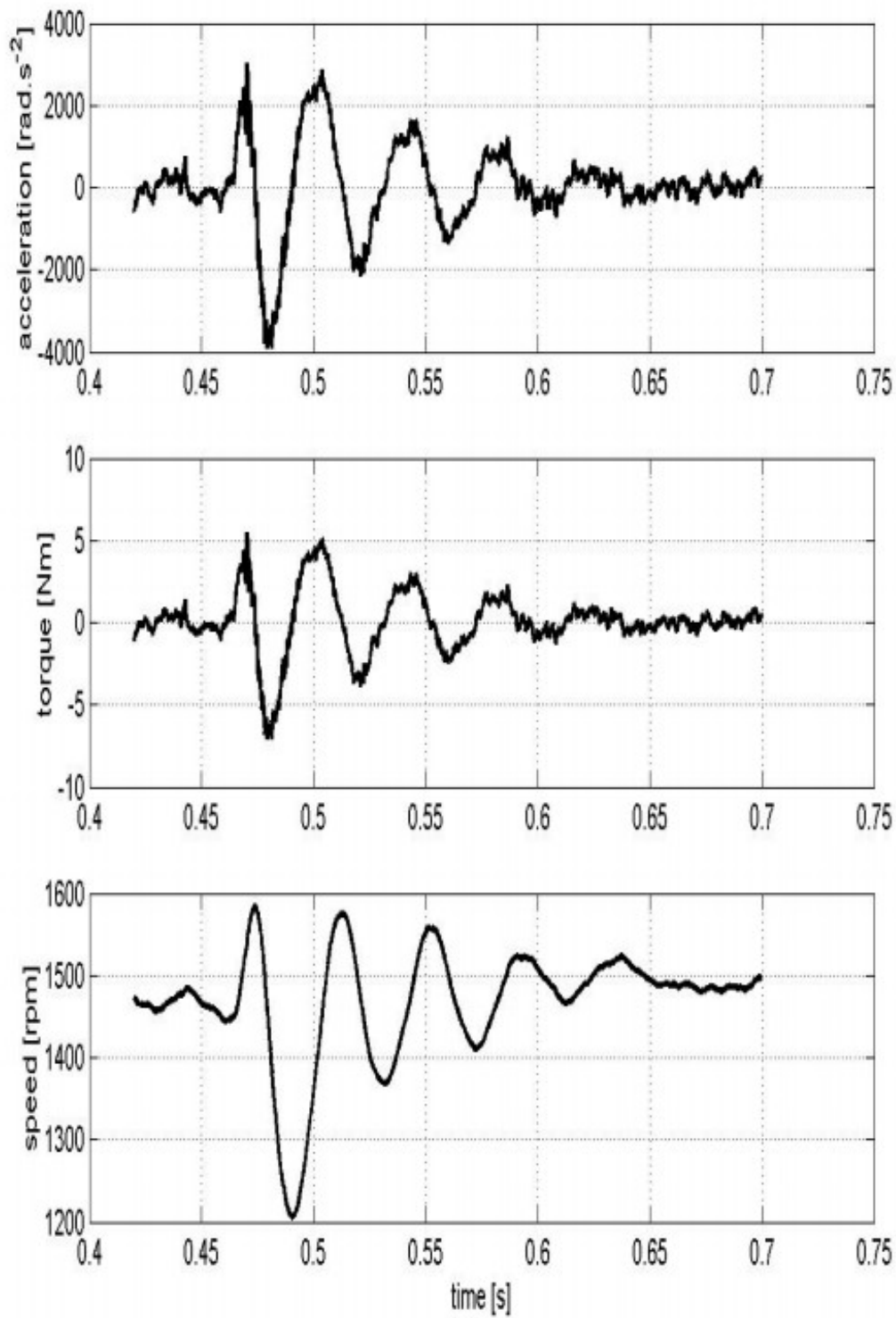
Obrázek 4.18: Průběhy mechanických veličin při zapojení do obvyklého trojúhelníka

Na obrázku 4.18 můžeme vidět záporný momentový pulz způsobený přepojením stroje do zapojení D. Zpoždění způsobené časovým relém je u tohoto zapojení asi 23 milisekund. To je také čas, kdy došlo k opětovnému připojení stroje do zapojení D. Tento momentový pokles se projevil i na rychlosti, která klesla téměř na hodnotu 1250 ot*min⁻¹. Na obrázku 4.19 jsou průběhy napětí na kterých můžeme vidět jak změnu velikost napětí po přepnutí stroje, tak i fázový posun způsobený přepnutím stroje do D.[5]

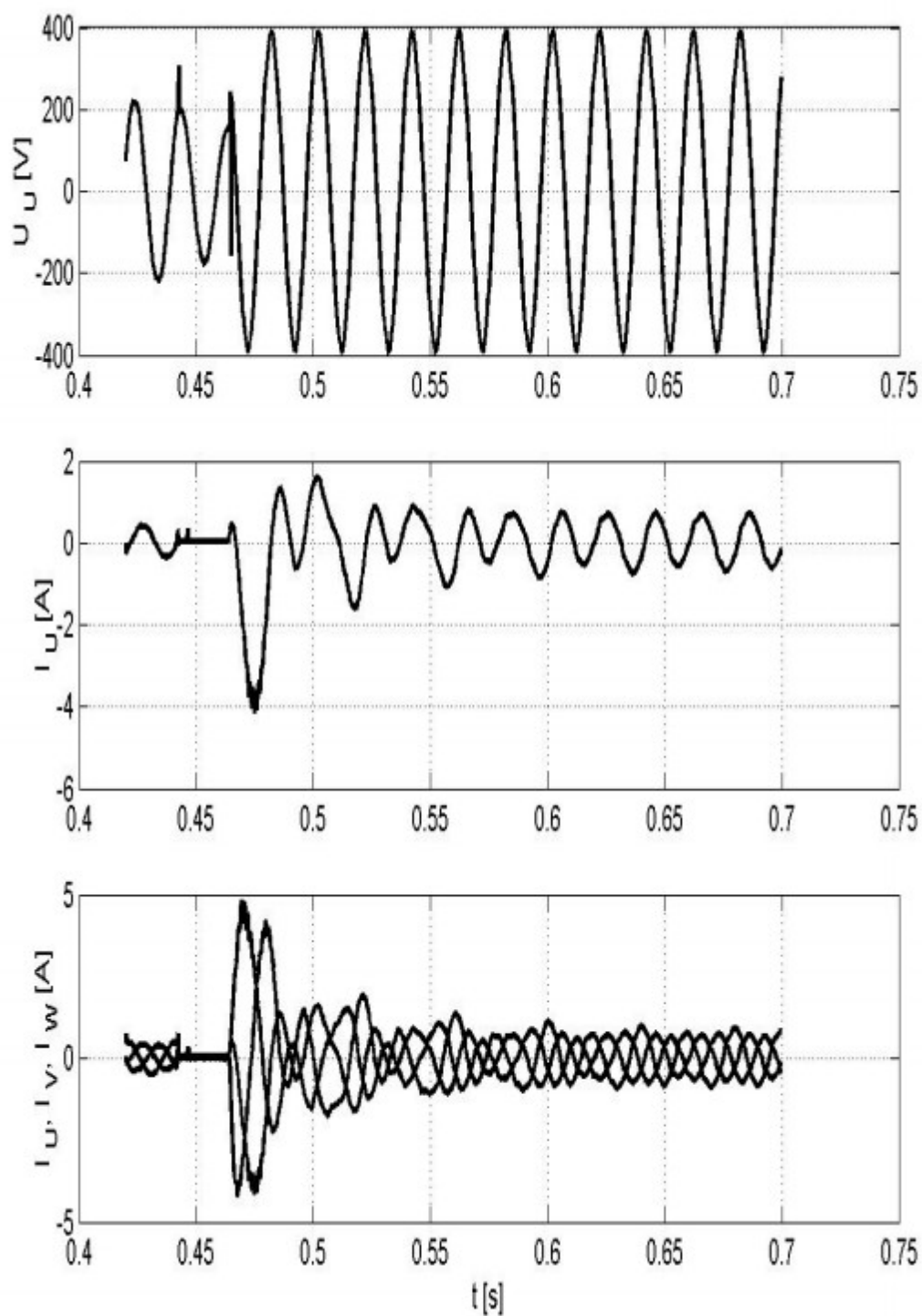


Obrázek 4.19: Průběhy elektrických veličin při zapojení do obvyklého trojúhelníka

Změřené průběhy pro zapojení do neobvyklého trojúhelníka jsou na obrázcích 4.20 a 4.21. Jediný rozdíl od předchozích průběhů je že fázový posun napětí je +30 stupňů. Pole rotoru tedy předbíhá pole statoru a dochází k vytvoření kladného momentového impulzu a k růstu rychlost téměř na hodnotu $1600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Všechny tyto průběhy byly změřeny na sníženém napětí o hodnotě 280V oproti jmenovité hodnotě 367V, abychom omezili účinky momentových impulzu na stroj. Stroj měl stejné parametry jako stroj který byl využit při měření opětovného připojení přímo na síť.[5]



Obrázek 4.20: Průběh mechanických veličin pro zapojení do neobvyklého trojúhelníka

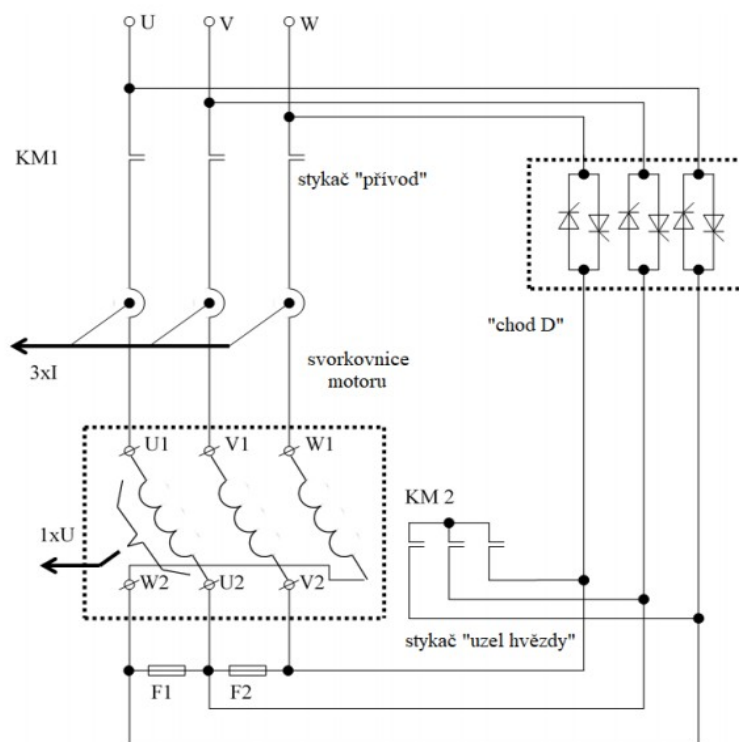


Obrázek 4.21: Průběh elektrických veličin při zapojení do neobvyklého trojúhelníka

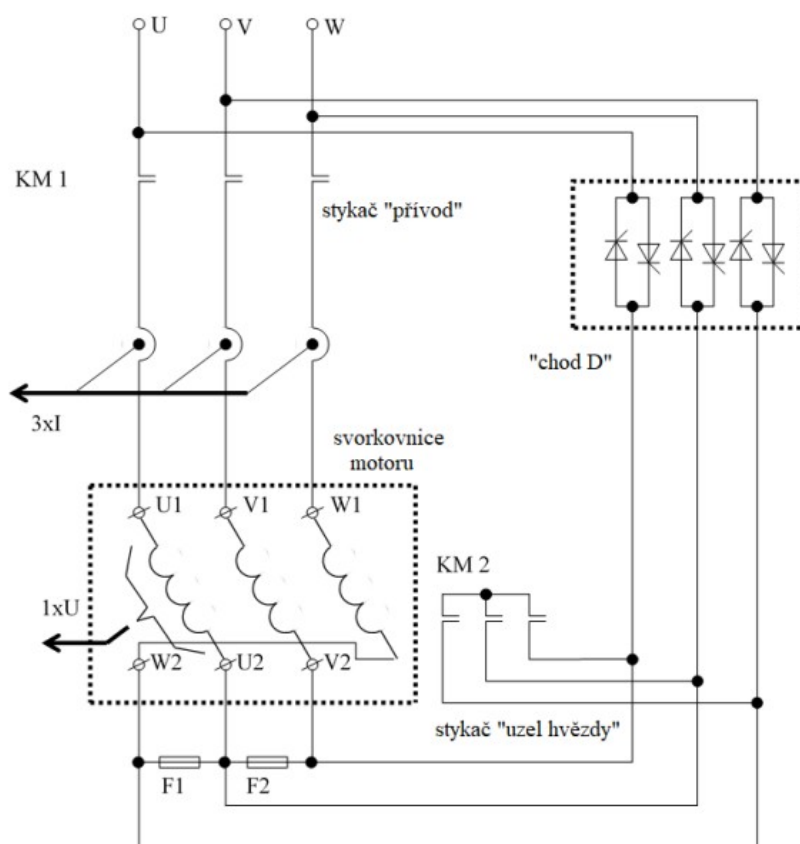
4.2.7 Přepínání Y-D bez časové prodlevy

Jak už bylo předem zmíněno, tak časová prodleva mezi přepínáním mezi zapojením Y a D se do obvodu zavádí z důvodu zamezení možného vzniku zkratu při přepnutí zapojení a k snížení svorkového protinapětí, které je vytvářeno zanikajícím zbytkovým magnetickým tokem. Omezením protinapětí se snažíme potlačit proudové a momentové rázy při přepnutí do D. Většinou se do obvodu přidává časové relé se zpožděním 50 ms, pokud ani takové zpoždění nestačí na dostatečné omezení proudových a momentových rázů přidávají se další časová relé.[5]

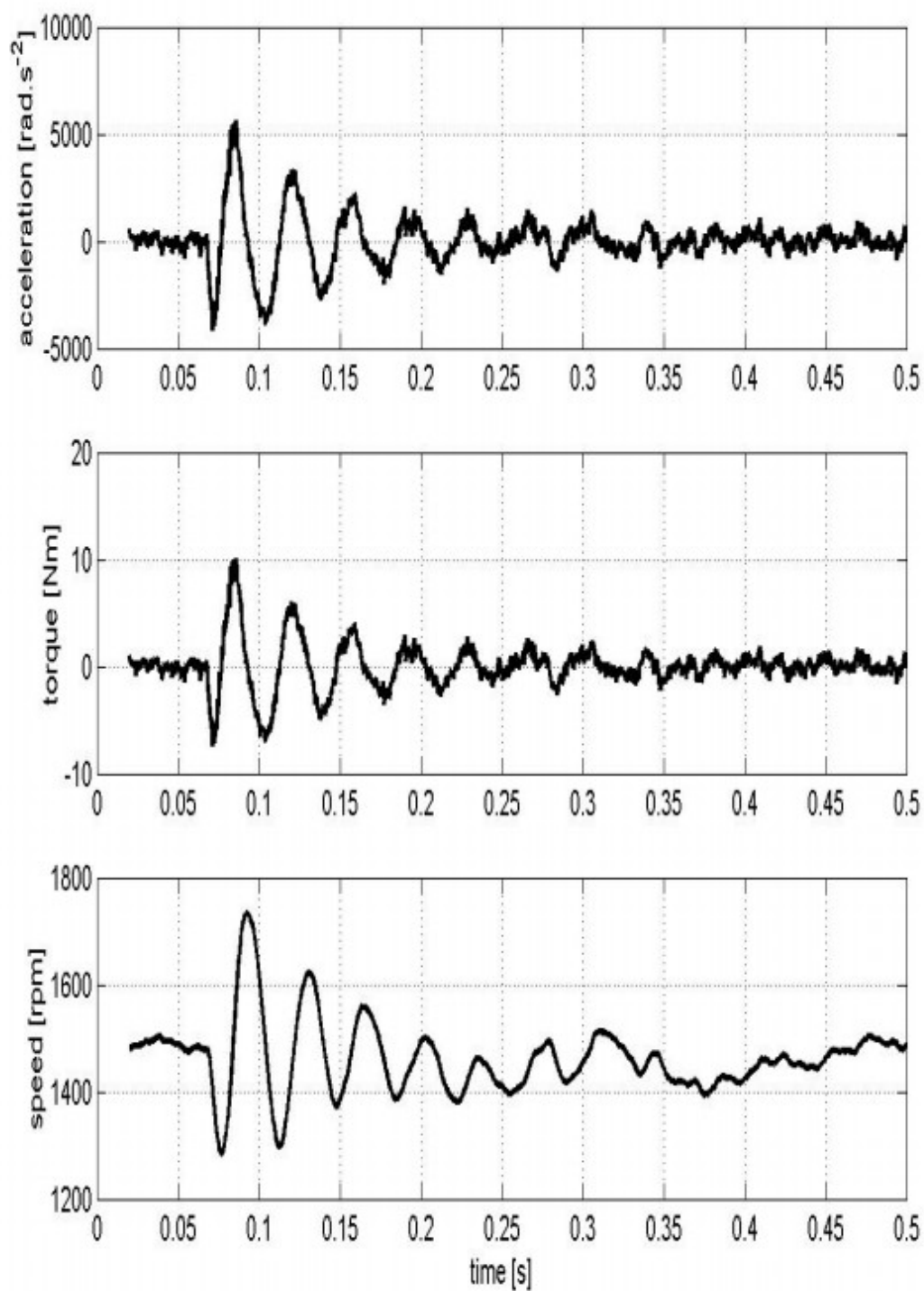
Existují však také speciální případy, kdy se využívá přepojení mezi zapojeními Y a D zcela bez přerušení proudu. To znamená přepínání zcela bez jakéhokoliv zpoždění. Mezi tyto speciální případy patří rotační zdroje UPS. Pro změření přepínání bez časové prodlevy potřebujeme speciální zapojení motoru, které je na obrázku 4.22 pro obvyklý trojúhelník a 4.23 pro neobvyklý trojúhelník. Veškerá měření byla provedena při sníženém napájení ($U_s=320V$) z důvodu omezení momentových a proudových rázů. Jak můžeme z obrázků vidět místo stykače pro přepínání do zapojení D byla použita tyristorová spínací sada, která umožňuje spínání v předem definovaném okamžiku průběhu napětí. Dále je zapojení obohaceno o 2 pojistky jistící stykač pro přepnutí do Y. Pojistky mají za úkol po dokončení rozběhu a dostatečném poklesu proudu převzít proud stroje. Přepnutím bez časové prodlevy dosáhneme tím, že přepálením pojistek dojde k okamžitému přechodu do zapojení D. Obdobně je provedeno zapojení do neobvyklého trojúhelníka s jediným rozdílem, a to prohození vodičů připojující tyristorovou sadu. Podle zapojení jsou na průbězích patrné opět záporné pro obvyklý trojúhelník a kladné pro neobvyklý trojúhelník impulzy akceleračního momentu a zrychlení, které ovlivňují rychlost stroje. Dále můžeme vidět na průběhu proudu, že opravdu nedošlo k jeho přerušení mezi přepínáním. V dynamické momentové charakteristice můžeme vidět dva středy kružnic jeden pro nižší rychlost, který odpovídá zapojení Y a druhý pro vyšší rychlost pro zapojení D. Kmitavý děj je pak zobrazen mezi těmito dvěma ustálenými stavy.[5]



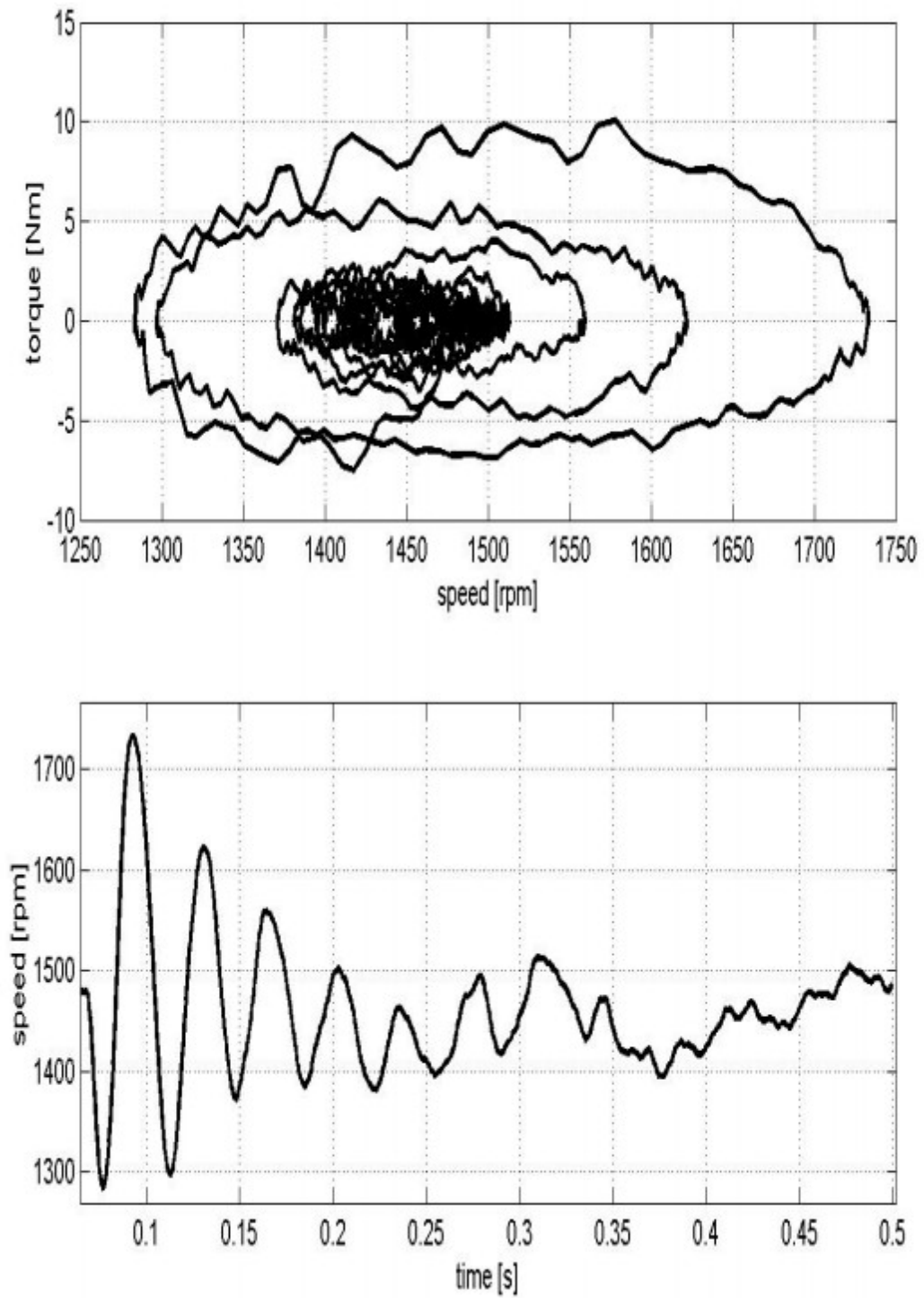
Obrázek 4.22: Speciální zapojení pro měření přepínání Y-D bez časové prodlevy jako obvyklý trojúhelník



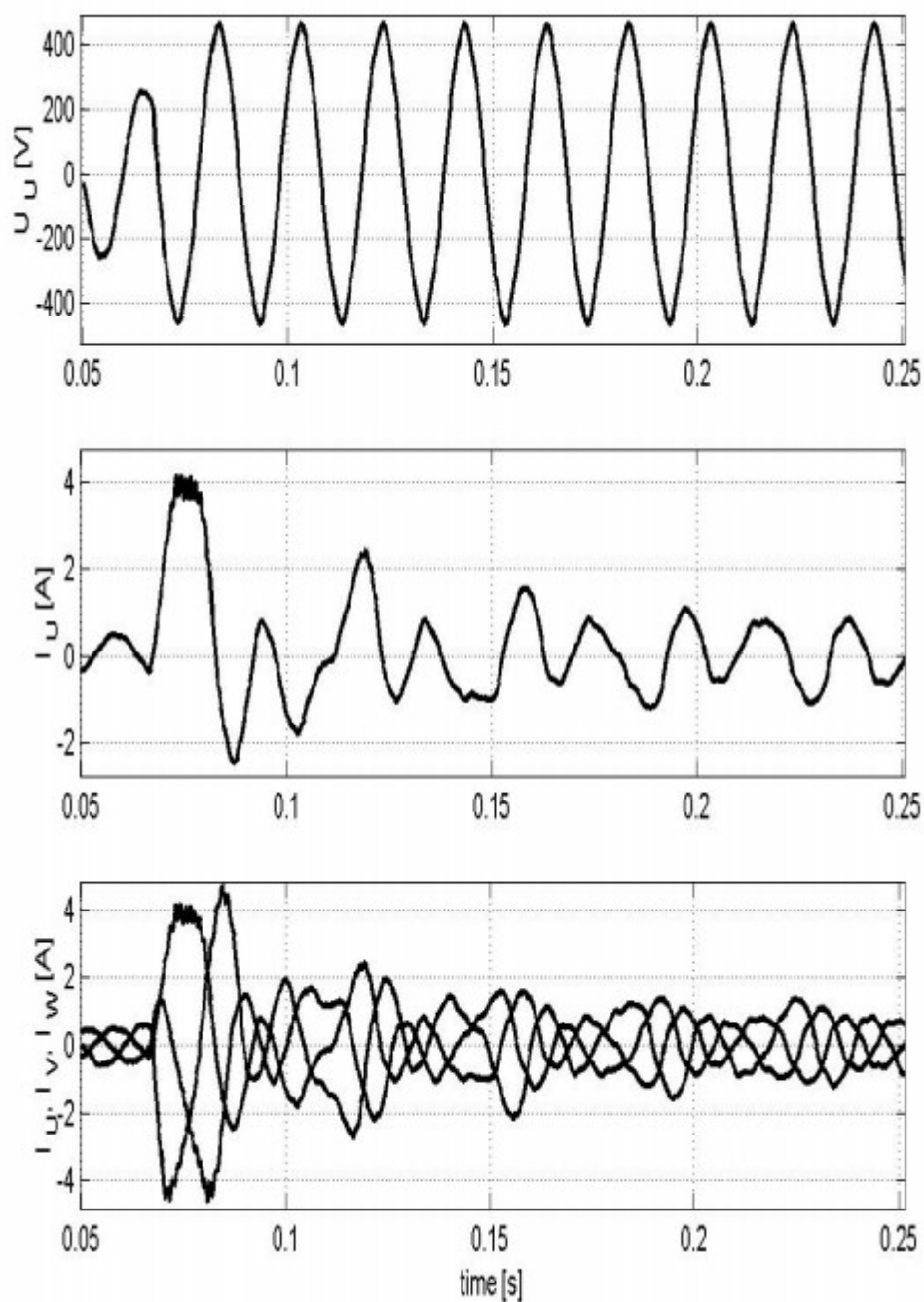
Obrázek 4.23: Speciální zapojení pro měření přepínání Y-D bez časové prodlevy jako neobvyklý trojúhelník



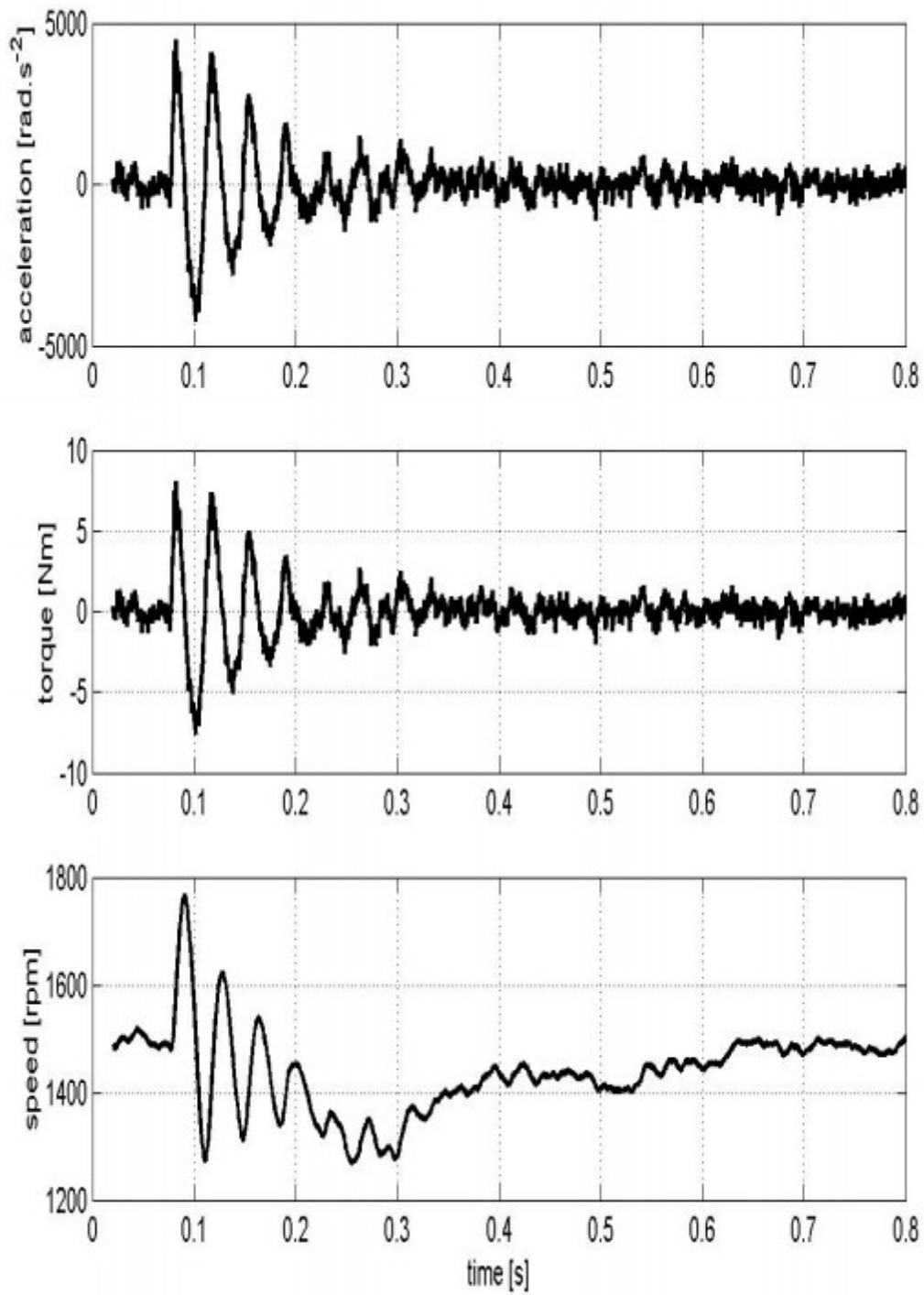
Obrázek 4.24: Průběhy mechanických veličin při přepínání Y-D bez časové prodlevy v zapojení obvyklého trojúhelníka



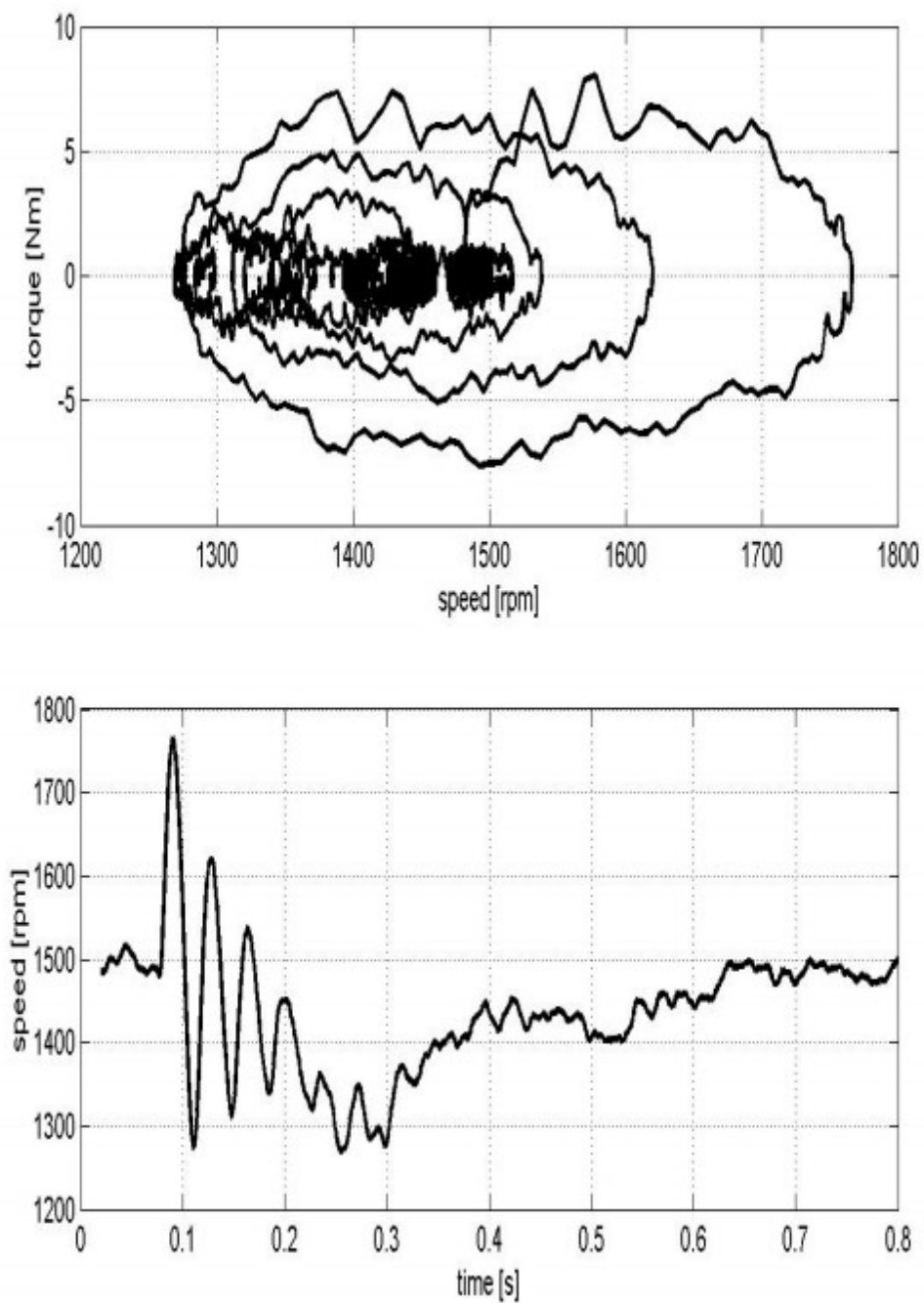
Obrázek 4.25: Dynamická momentový závislost a detail kmitů rychlosti stroj v zapojení obvyklého trojúhelníka



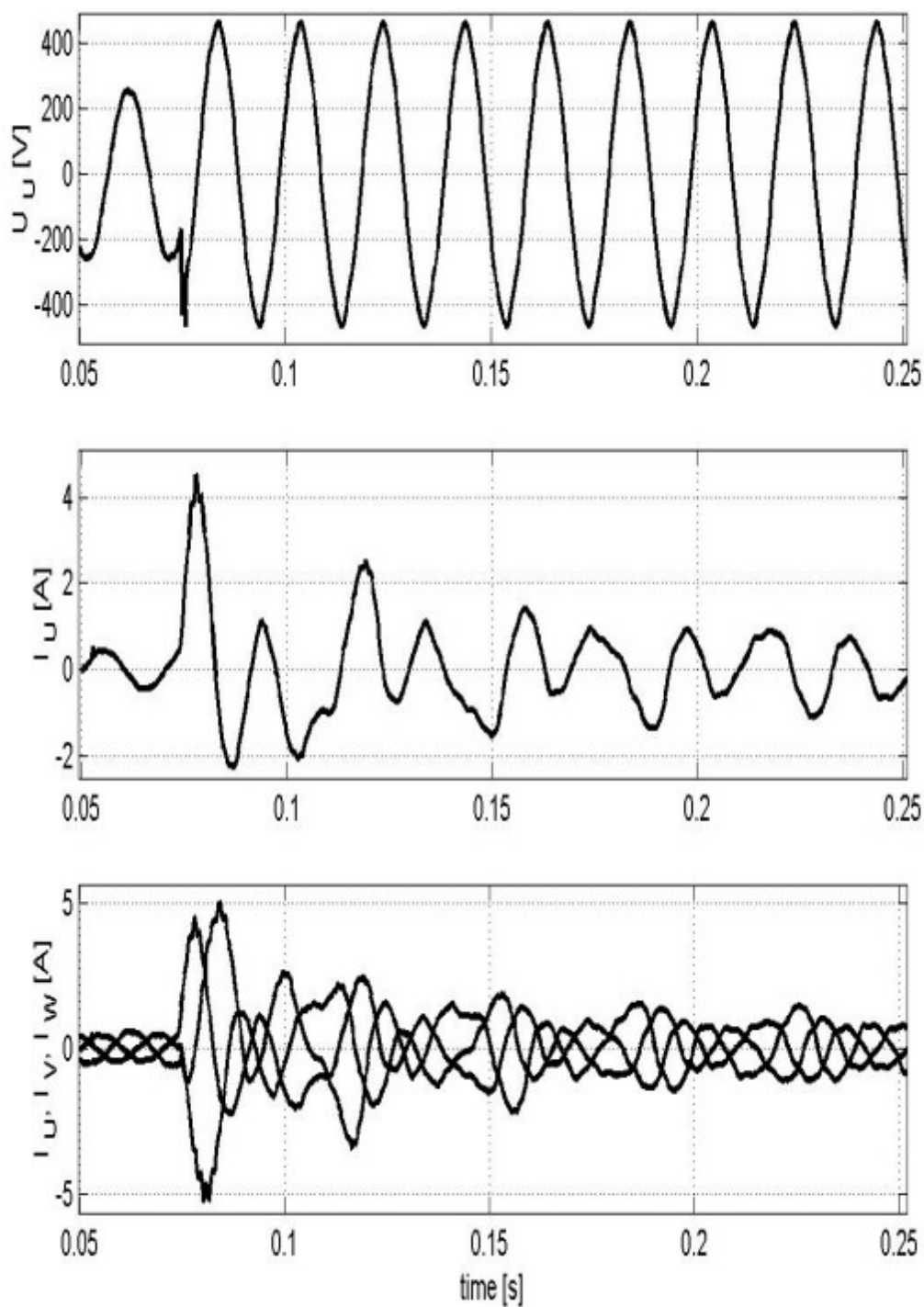
Obrázek 4.26: Průběhy elektrických veličin při přepínání Y-D bez časové prodlevy v zapojení obvyklého trojúhelníka



Obrázek 4.27: Průběhy mechanických veličin při přepínání Y-D bez časové prodlevy v zapojení neobvyklého trojúhelníka



Obrázek 4.28: Dynamická momentový závislost a detail kmitů rychlosti stroj v zapojení neobvyklého trojúhelníka



Obrázek 4.29: Průběhy elektrických veličin při přepínání Y-D bez časové prodlevy v zapojení neobvklého trojúhelníka

4.2.8 Spouštění asynchronních motorů se speciálním vinutím rotoru

U motorů s klecí na krátko můžeme dosáhnout zlepšení rozběhových vlastností za pomoci speciálně konstruovaného rotoru. Můžeme tak měnit při rozběhu jeho odpor i reaktanci. Existuje několik provedení, jak tohoto můžeme docílit. U odporových klecích dosahujeme zvětšení odporu provede tak, že se přidají tyče z odporového materiálu nebo se rozřezají spojovací kruhy klece. U klecí vírových se využívá hlubokých a úzkých drážek různých tvarů, jak je vidět na obrázku 4.30.[1][3]



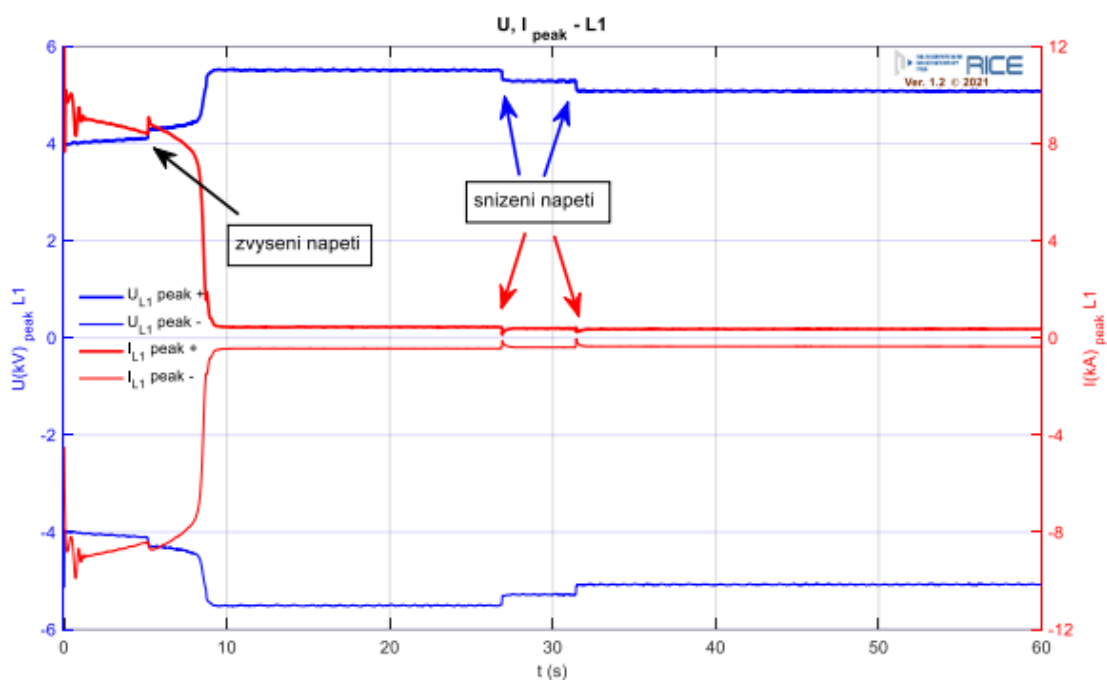
Obrázek 4.30: Speciální provedení klece vírové

Při rozběhu dochází k tomu, že se frekvence na obou částech motoru téměř rovnají, to způsobuje že se v tyčích působením rozptylového toku indukují vířivé proudy. Dolní část tyče je spojena s největším a horní část s nejmenším rozptylovým tokem. V dolní část se indukují velké indukované napětí, a naopak v horní části zase malé, to má za následek nerovnoměrné rozložení proudu. Proud je vytlačen do vrchní vrstvy což má za následek zvětšení odporu rotoru. Postupně během rozběhu dochází ke změně frekvencí a tím pádem dochází k zmenšování nerovnoměrného rozložení proudu.[1][3]

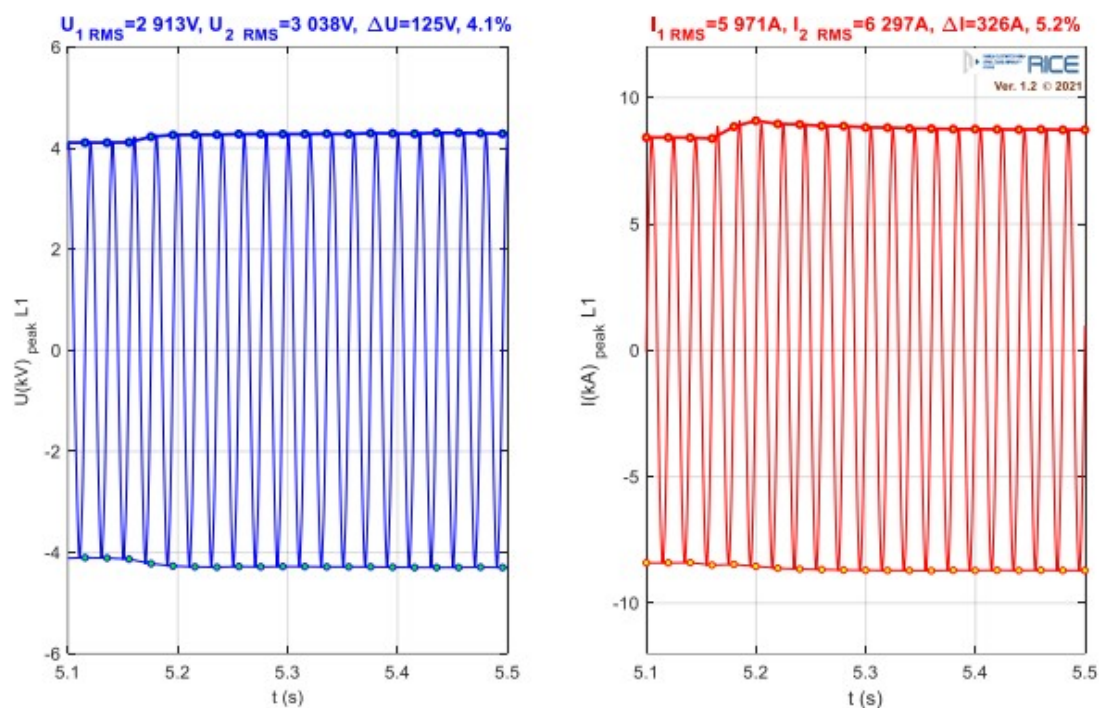
Dvojitě klece se skládají jak ze dvou samostatných klecí s rozdílným odporem. Při rozběhu se využívá vlivu indukčnost a proudu teče převážně horní rozběhovou klecí, která má velký činný odpor. To má za následek velký moment při poměrně malém napětí. Při přechodu do pracovního stavu začíná převládat reaktance a činný odpor je minimální, díky tomu má motor dobrou účinnost.[1][3]

4.2.9 Změna napětí při rozběhu a chodu naprázdno

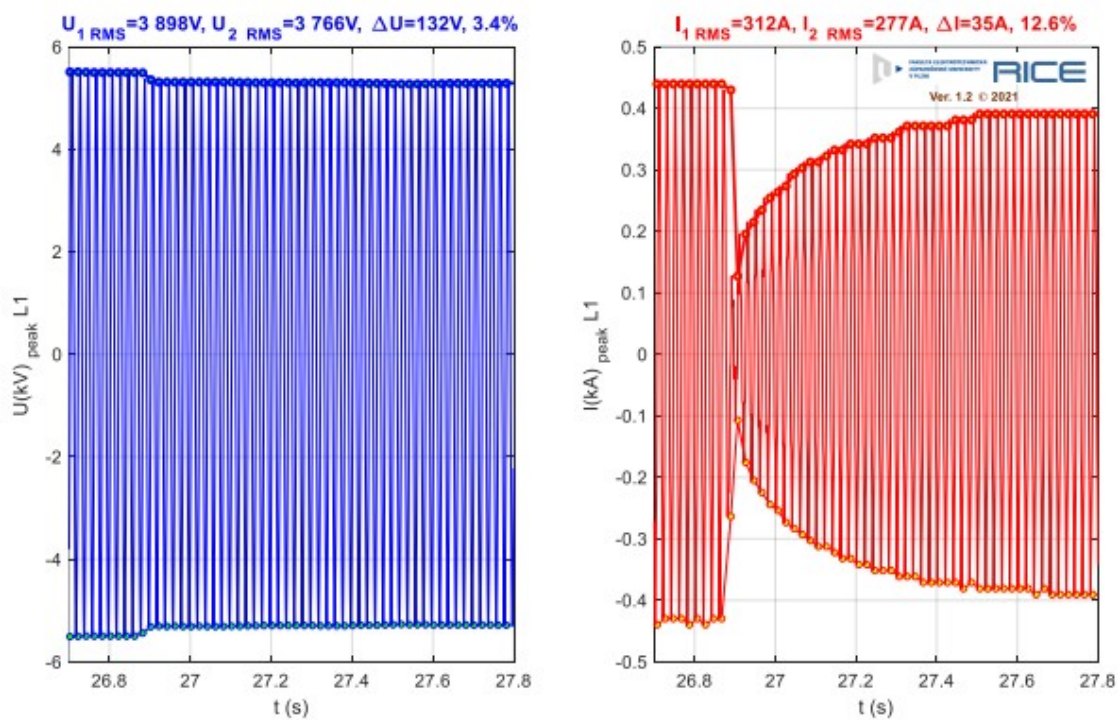
Vrátíme-li se zpět k přímému připojení stroje k síti, tak je možné s využitím vlastního transformátoru rozbíhat stroj přímým připojením na síť stroje o výkonu, který se rovná až 50% jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru. Při přímém připojení na síť vznikají ve stroji momentové a proudové rázy, které mají za následek pokles napětí ve stroji. Tento pokles se může regulovat pomocí předřadného transformátoru pomocí přepínání odboček na vinutí transformátoru. Při rozběhu dochází k přepínání odboček na vyšší napětí a po dokončení rozběhu se přepne zpět na odbočku s nižším napětím. Na motoru o napětí 6kV a výkonu 8MW byly změřeny průběhy napětí a proudu. Při rozběhu docházelo k přepínání odboček transformátoru. Na obrázku 4.31 můžeme vidět obálkovou funkci průběhu jak proudu, tak napětí. Na následujících průbězích, které jsou na obrázcích 4.32, 4.33 a 4.34 můžeme vidět detaily jednotlivých změn napětí a následné změny velikosti proudu jako odezvy na změnu napětí při přepnutí odbočky transformátoru.[5]



Obrázek 4.31: Amplituda/Obálková funkce průběhu napětí a proudu s využitím transformátoru

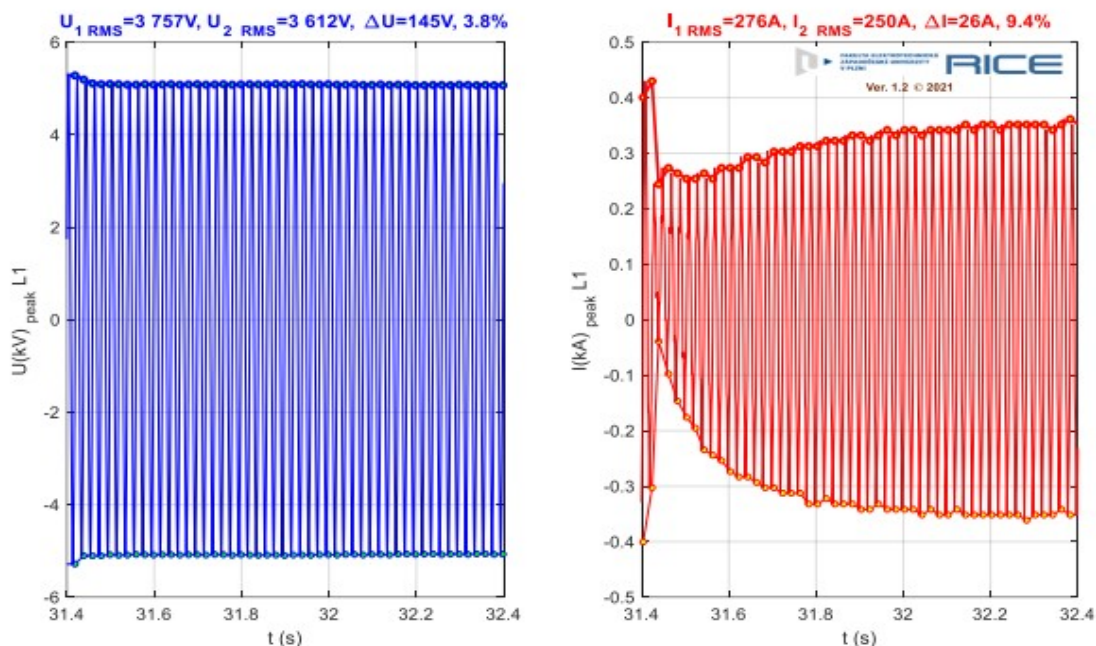


Obrázek 4.32: Detail průběhu napětí a proudu při zvýšení napětí při rozběhu

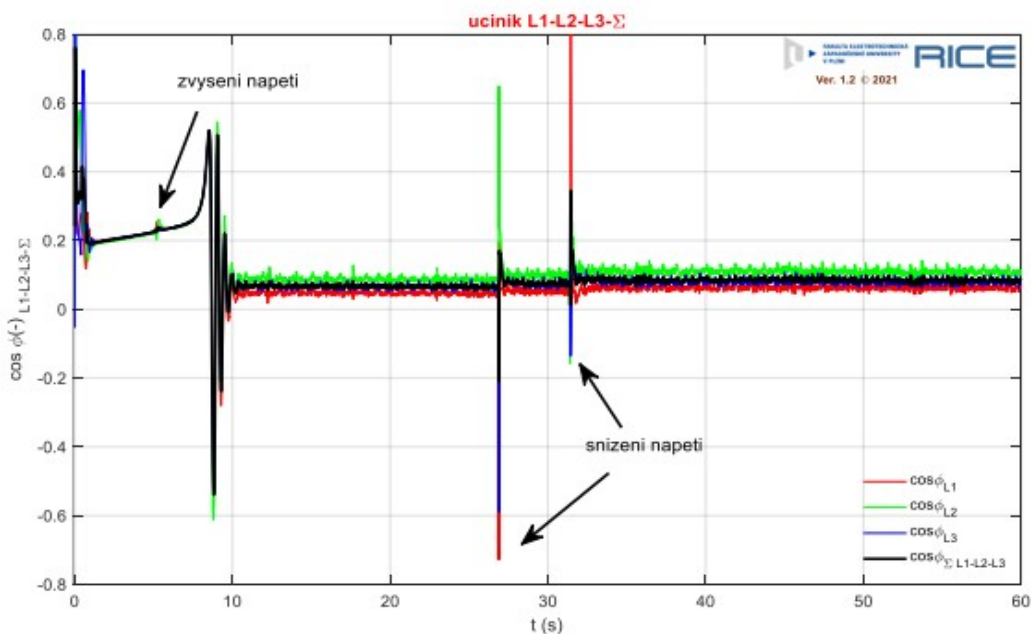


Obrázek 4.33: Detail průběhu napětí a proudu při prvním poklesu napětí při rozběhu

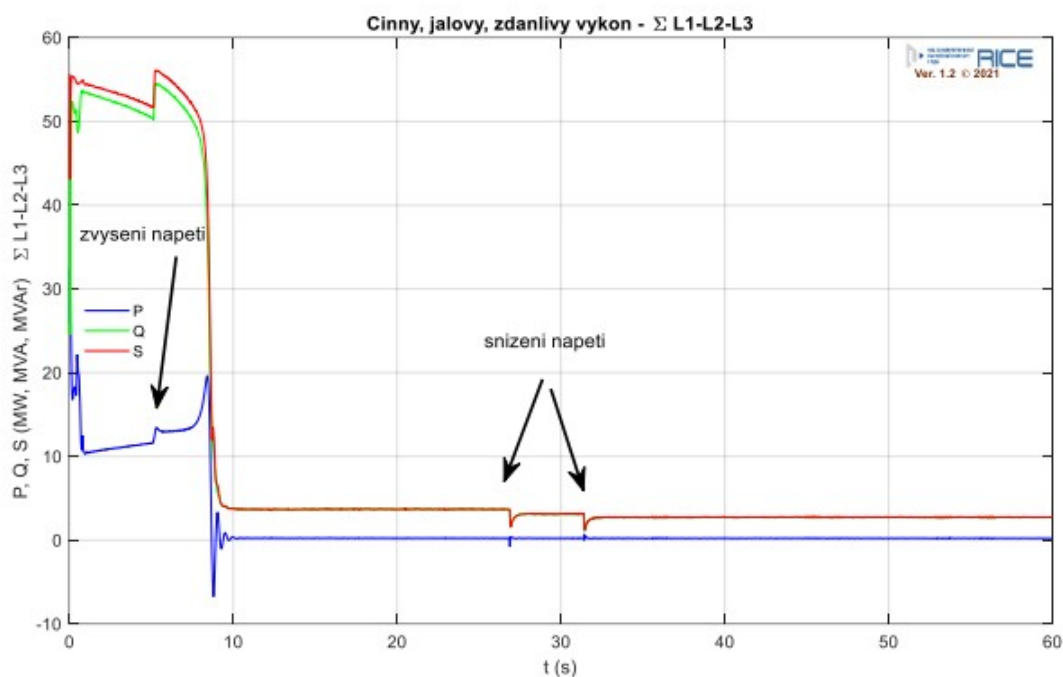
Dále můžeme usoudit, že stroj byl při měření značně nabuzen jelikož při přepnutí jedné odbočky dojde ke snížení napětí jen o 3-4% oproti proudu, který klesne až o 9-12%. Toto tvrzení můžeme potvrdit nízkým účínkem v chodu naprázdno. Průběhy celkového účínku a účínku jednotlivých fází jsou na obrázku 4.35. S účínkem souvisí i činný příkon stroje. Průběhy činného příkonu stroje jsou na obrázku 4.36 a jak můžeme vidět, tak jednotlivé příkony ve fázích se mohou od sebe velmi lišit. [5]



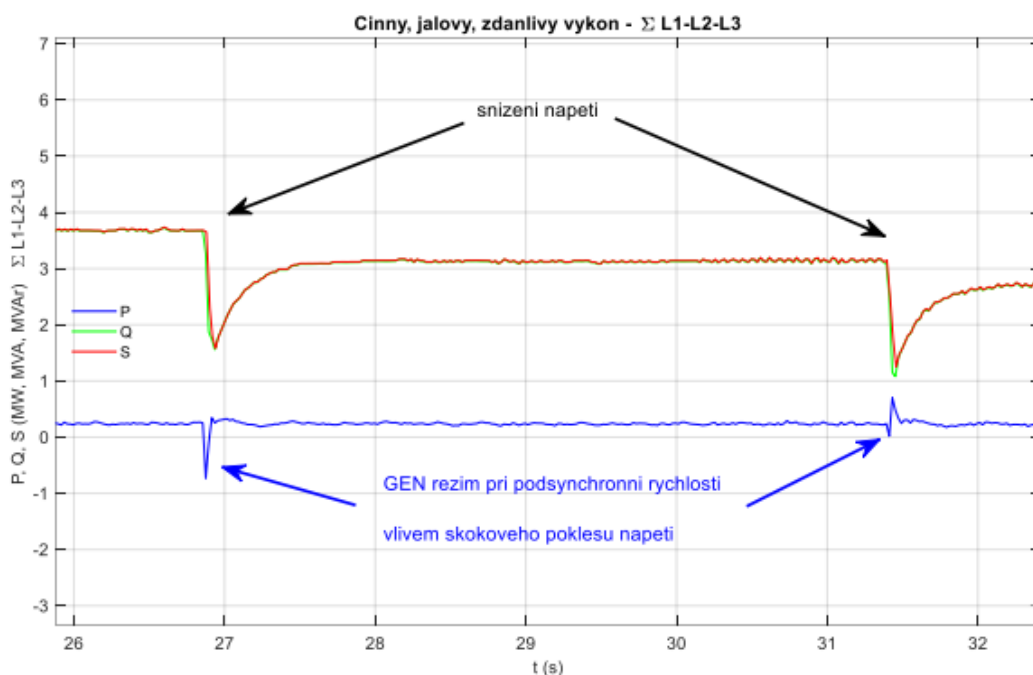
Obrázek 4.34: Detail průběhu napětí a proudu při druhém poklesu napětí při rozběhu



Obrázek 4.35: Průběhy celkového účínku a účínku jednotlivých fází při rozběhu ve stavu naprázdno



Obrázek 4.36: Průběhy činného příkonu ve stroji při rozběhu

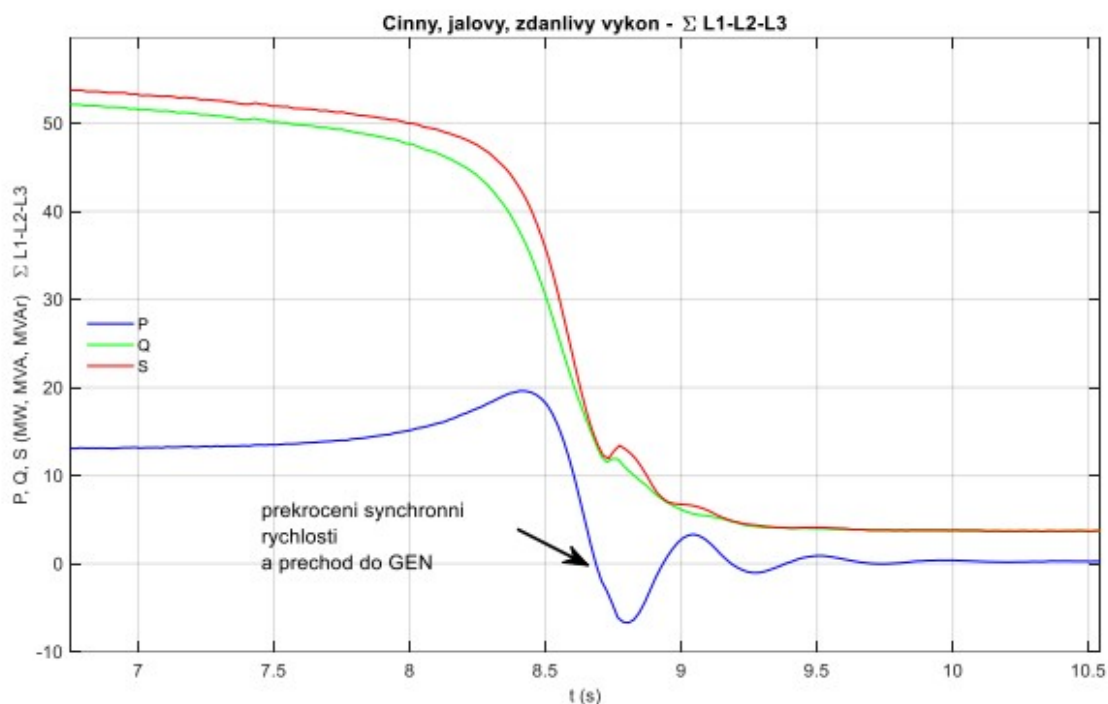


Obrázek 4.37: První i druhý pokles napětí a přechod stroje do generátorického režimu z důvodu snížení napětí

Při poklesu napětí dochází k okamžitému propadu hodnoty proudu, která po určité době začne znovu růst. Tento děj je způsoben, že stroj je přebuzen, neboli v magnetickém obvodu stroje je velký magnetický tok, který vytváří indukované napětí. V okamžiku kdy, dojde k poklesu napětí na svorkách má indukované napětí větší hodnotu a stroj začne

pracovat jako generátor do té doby, dokud se neodbudí a hodnota napětí na svorkách bude větší než indukované napětí ve stroji v ten moment se hodnota proudu opět zvýší. Na obrázku 4.37 vidíme detail poklesu napětí ve stroji a následného přechodu stroje do generátorického režimu, který je ve stavu naprázdno v podsynchronní rychlosti.[5]

Při rozběhu stroje také záleží na momentu setrvačnosti rotujících hmot. Pokud je tento moment dostatečný, tak při rozběhu může dojít k dosáhnutí a někdy i k překročení synchronní rychlosti. Při překročení synchronní rychlosti dochází k přechodu stroje do generátorického režimu a následnému zpomalování až do té doby, dokud neklesne rychlost zpět pod rychlost synchronní, kde stroj začne znovu zrychlovat. Tento děj se může i několikrát opakovat a vytvářet tak kmitavý přechodový děj.[5]



Obrázek 4.38: Kmitavý přechodový děj vznikající po dokončení rozběhu

4.2.10 Spouštění střídavým měničem napětí

Vedle standardních způsobů rozběhu motorů můžeme využít i měničů pro start motoru. Využívá se střídavých měničů napětí tzv. softstartéry. Za pomoci tohoto měniče můžeme regulovat plynule napětí díky čemuž můžeme dosáhnout plynulého rozběhu. Dále můžeme ovlivňovat dobu rozběhu, proudové omezení a je i možno brzdění motoru, kdy se z měniče stane usměrňovač a dodává do statorového vinutí stejnosměrný proud.[1]

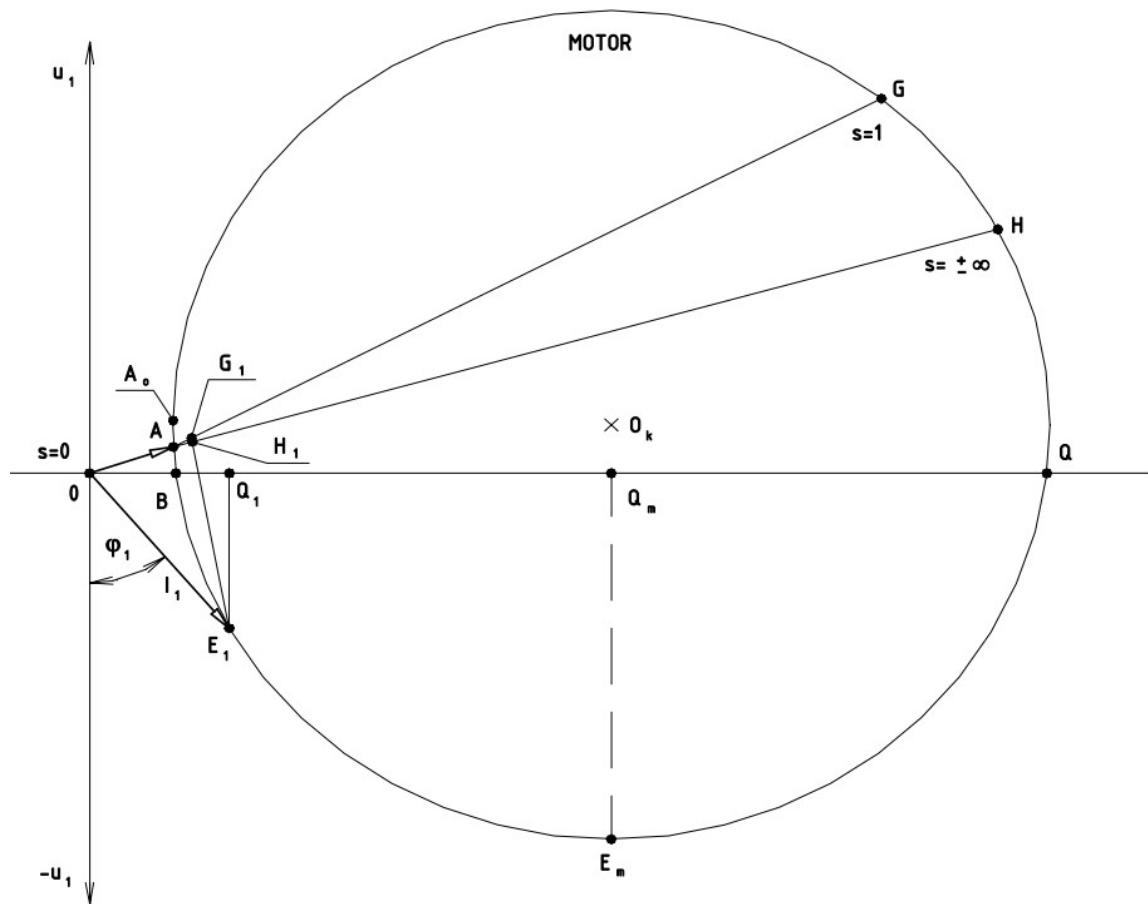
5 Asynchronní generátor

Pokud chceme provozovat asynchronní stroj jako generátor potřebujeme splnit jednu z těchto podmínek. Prvním způsobem provozu asynchronního generátoru je že se otáčky stroje zvýší poháněcím zařízením nad otáčky synchronní. Druhým způsobem je, že asynchronní stroj provozujeme paralelně se zdrojem jalového výkonu potřebného pro vytvoření magnetického pole ve stroji.[1]

I přes to, že se asynchronní generátor používá jen zřídka, tak je normálně používán u zdvihacích zařízeních. Rozbor práce můžeme popsat kruhovým diagramem na obrázku 5.1. Hlavní výhodou asynchronních generátorů je jejich jednoduchost, jelikož k připojení na síť není potřeba žádné synchronizační zařízení.[1]

„Bod A_0 odpovídá chodu naprázdno asynchronního motoru, bod A synchronním otáčkám – v tomto případě se však stroj může otáčet synchronně pouze tehdy, je-li poháněn. Při dalším zvýšení otáček nad otáčky synchronní pracuje stroj se skluzem menším než 0. Při skluzu odpovídajícím bodu B odebírá stroj ze sítě pouze jalový výkon, přičemž všechny ztráty jsou hrazeny mechanickou energií dodávanou pohonným zařízením. Při dalším zvýšení momentu pohonného zařízení začne stroj dodávat do sítě činný výkon odpovídající úsečce O_1E_1 v měřítku momentu. Přímka BQ je přímkou činného výkonu asynchronního generátoru. V bodě E_m bude činný výkon maximální. Oblast diagramu od E_m do H nemá již praktický význam, neboť odpovídá již příliš velkým otáčkám. Přímka AH je přímkou momentů. Přímka AG je přímkou mechanického příkonu, který je nutno přivést na hřídel generátoru. Skluz je tedy záporný a čte se na stupnici skluzu prodloužené vlevo od tečny v bodě A_0 . [1]“

Asynchronní generátor je možné provozovat i samostatně do sítě, ale musí mít speciální budič nebo vlastní buzení zbytkovým polem rotoru pomocí kondenzátorů připojeným ke svorkám statoru, aby bylo možné stroj nabudit musí mít zbytkový magnetismus. [1]



Obrázek 5.1: kruhový diagram pro popis chodu asynchronního generátoru

Závěr

Cílem této práce bylo přiblížit problematiku opětného zapnutí asynchronních strojů k síti. S tím bylo spjaté objasnit i jejich klasické a speciální konstrukční provedení, funkci, stavy provozu, a hlavně jejich způsoby rozběhu, které se liší podle typu provedení stroje. V práci je také popsáno jaké okolnosti a parametry mají vliv na velikost zapínacích proudů při opětovném zapnutí stroje. Snažil jsem se co nejlépe nastínit ten fakt, že neexistuje žádný způsob, jak rozbíhat asynchronní stroj s ideálními parametry, které bychom si přáli. Existuje však spousta jiných způsobů, které se liší svými vlastnostmi, cenou a využitím. Většinou se snažíme najít způsob rozběhu, který vyhovuje konkrétním podmínkám a použití. Mezi tyto podmínky může spadat cena, počet opětovného sepnutí stroje nebo mechanické a elektrické parametry. Jedním z uplatnění mohou být samo najížděcí pohony v elektrárnách nebo jiném průmyslu. Náběh těchto pohonů může být problematický z důvodu přetěžování napájecího transformátoru a z toho důvodu se provádí jako menší celky, které spouštíme postupně.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-X.
- [2] BARTOŠ V, 1935, Červený J, Hruška J, Kotlanová A, Skala B. *Elektrické stroje*. 1. vyd. ed. V Plzni: Západočeská univerzita; 2006.
- [3] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [4] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-447-3.
- [5] Materiály pro předmět KEV/EST2, dostupné na CW ZCU