



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

BRZDĚNÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE

BRAKING OF AN INDUCTION MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Mareček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Šimon Mareček

ID: 221246

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

**NÁZEV
TÉMATU:**

Brzdění asynchronního stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte měření elektrických a mechanických veličin při brzdění asynchronního motoru.
2. Proveďte simulace brzdění asynchronního motoru metodou konečných prvků.
3. Výsledky měření a simulací porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. Teorie elektrických strojů. Praha: SNTL, 1968. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] LYÓCSA, Štefan a Jozef GÜTTLER. Měření na asynchronním motoru. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1972. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493- 0004-5.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce je zaměřena na brzdění asynchronního motoru a rizika s ním spojené. V první části se čtenáři seznámí s technickými parametry motoru, který je použit pro simulace. Druhá část se zaměřuje na simulační program Ansys Maxwell a metodu konečných prvků. Ve třetí části je čtenářům představen obecný popis asynchronního stroje. Čtvrtou část tvoří brzdění protiproudem. Předposlední část je věnována dynamickému brzdění. Poslední část obsahuje krátké seznámení s generátorickým brzděním. Kapitoly zaměřené na brzdění jsou doplněny simulovanými průběhy.

Klíčová slova

Brzdění, asynchronní motor, brzdění protiproudem, dynamické brzdění, generátorické brzdění, Ansys Maxwell, metoda konečných prvků

Abstract

The work is focused on the braking of an induction engine and the risks associated with it. In the first part, there are readers acquainted with the technical parameters of the induction engine, which is used for simulations. The second part focuses on the simulation program Ansys Maxwell and the finite element method. In the third part, there are readers introduced to a general description of the induction machine. The fourth part consists of countercurrent braking. The penultimate part is devoted to dynamic braking. The last part contains a brief introduction to generator braking. The chapters focused on braking are supplemented by simulated waveforms.

Keywords

Braking, induction engine, countercurrent braking, dynamic braking, generator braking, Ansys Maxwell, finite element method

Bibliografická citace

Citace tištěné práce:

MAREČEK, Šimon. *Brzdění asynchronního stroje*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142765>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Citace elektronického zdroje:

MAREČEK, Šimon. *Brzdění asynchronního stroje* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142765>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Šimon Mareček*

VUT ID studenta: *221246*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Brzdění asynchronního stroje*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat útvarům R&D a QM Siemens Frenštát pod Radhoštěm za ochotu a spolupráci při poskytování materiálů potřebných pro simulování průběhů a také za provedená měření.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD	10
1. ANSYS MAXWELL A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	11
1.1 ANSYS MAXWELL	11
1.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	11
2. OBECNÝ POPIS ASYNCHRONNÍHO STROJE	12
2.1 MOMENT STROJE	13
2.2 SPOUŠTĚNÍ	15
2.3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU	16
2.3.1 Ztráty při zatíženém motoru	16
2.3.2 Ztráty při chodu naprázdno	16
2.3.3 Ztráty při chodu nakrátko	16
3. TECHNICKÉ PARAMETRY SIMULOVANÉHO MOTORU	18
3.1 ZÁTĚŽOVÝ TEST	20
3.2 ROZBĚH MOTORU	22
4. BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM	24
4.1 PRINCIP	24
4.2 RIZIKA SPOJENÁ S PROVOZEM ASYNCHRONNÍ BRZDY	24
4.3 SIMULACE BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI JMENOVITÝCH PARAMETRECH.....	26
4.4 BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI POLOVIČNÍM NAPÁJECÍM NAPĚTÍ	28
4.5 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM – BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI 160 V	30
4.5.1 Simulace.....	30
4.5.2 Měření.....	31
4.6 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM – BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI 100 V	34
4.6.1 Simulace.....	34
4.6.2 Měření.....	35
5. DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ	38
5.1 PRINCIP	38
5.2 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 400$ V	40
5.3 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 200$ V	41
5.4 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 400$ V A $J_S = 19,91$ KG.M ²	42
5.5 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM - DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI 5 V	43
5.5.1 Simulace.....	43
5.5.2 Měření.....	44
6. BRZDĚNÍ V REŽIMU GENERÁTOR	46
7. ZÁVĚR	47
LITERATURA	48

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	49
SEZNAM PŘÍLOH.....	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Asynchronní motor rozdělený na konečné prvky podle metody konečných prvků	11
Obrázek 2: Pracovní stavy asynchronního stroje, [7]	12
Obrázek 3: Náhradní obvodový model asynchronního stroje přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, [7].....	13
Obrázek 4: Momentová charakteristika, převzato z [5].....	15
Obrázek 5: Rozdělení ztrát v AM podle [6]	16
Obrázek 6: Asynchronní motor použitý pro měření, [8].....	18
Obrázek 7: Řez motorem.....	19
Obrázek 8: Rozběh motoru.....	22
Obrázek 9: Příklad prohození dvou fází	24
Obrázek 10: Úhlová rychlost v pracovních stavech AM, [7]	25
Obrázek 11: Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech	26
Obrázek 12: Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí.....	28
Obrázek 13: Simulace brzdění protiproudem při 160 V	30
Obrázek 14: Měření brzdění protiproudem při 160 V	31
Obrázek 15: Srovnání proudů při 160 V.....	32
Obrázek 16: Simulace brzdění protiproudem při 100 V	34
Obrázek 17: Měření brzdění protiproudem při 100 V	35
Obrázek 18: Srovnání proudů při 100 V.....	36
Obrázek 19: Zapojení AM pro dynamické brzdění; a) stator zapojen do hvězdy; b) stator zapojen do trojúhelníka; převzato z [3]	38
Obrázek 20: Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V	40
Obrázek 21: Dynamické brzdění při napájecím napětí 200 V	41
Obrázek 22: Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V a momentu setrvačnosti 19,91 kg.m ²	42
Obrázek 23: Simulace dynamického brzdění při 5 V	43
Obrázek 24: Měření dynamického brzdění při 5 V	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické parametry motoru.....	18
Tabulka 2: Rozměry kompletního motoru.....	18
Tabulka 3: Rozměry motoru bez vnější kostry.....	19
Tabulka 4: Porovnání proudů - Zátěžový test.....	20
Tabulka 5: Porovnání momentů - Zátěžový test.....	20
Tabulka 6: Porovnání ztrát v železe - Zátěžový test.....	20
Tabulka 7: Porovnání ztrát rotorové klece - Zátěžový test.....	21
Tabulka 8: Porovnání Jouleových ztrát ve vinutí statoru - Zátěžový test.....	21
Tabulka 9: Nejvyšší dosažené parametry při rozběhu motoru.....	22
Tabulka 10: Nejvyšší dosažené parametry při brzdění protiproudem ve jmenovitém stavu	27
Tabulka 11: Nejvyšší dosažené parametry - brzdění při polovičním napětí.....	28
Tabulka 12: Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 160 V	32
Tabulka 13: Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 100 V	36
Tabulka 14: Celkové srovnání brzdění protiproudem při různých napájecích napětí.....	36
Tabulka 15: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 400 V	40
Tabulka 16: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V	41
Tabulka 17: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V a momentu setrvačnosti 19,91 kg.m ²	42
Tabulka 18: Srovnání měření a simulací brzdění stejnosměrným proudem	44
Tabulka 19: Celkové srovnání stejnosměrného brzdění při různých vstupních parametrech	45

ÚVOD

Podle [7] patří indukční stroje k hojně používanému typu elektrických motorů v oblasti silnoproudé elektrotechniky i energetiky. Asynchronní motor je stroj, který mění elektrickou energii na energii mechanickou nebo případně mění elektrickou energii na energii elektrickou ale o jiných parametrech. Pokud motor pracuje v režimu jako generátor, pak mění mechanickou energii na energii elektrickou.

Z [5] je jasné, že podobně jako v případě spouštění asynchronních motorů se snažíme co nejvíce snížit hodnotu záběrného proudu, tak i při brzdění asynchronních motorů vznikají rizikové proudy, které mají za následek velké tepelné namáhání konstrukčních prvků motoru jako např. vinutí statoru, rotoru. Problematikou brzdění asynchronních motorů je dobré se zabývat hlavně proto, aby zkrácení doby doběhu motoru bylo co nejrychlejší a nejefektivnější. Další důvod co nejrychlejšího zabrzdění je bezpečnost práce a to např. v případě zdvihacích zařízení (jeřáby).

Podle [7] existuje více možností, jak v praxi realizovat brzdění asynchronních motorů, přičemž se jedná buď o brzdění mechanické nebo elektronické. Brzdění protiproudem není energeticky příliš výhodné. Generátorické brzdění je takový pracovní stav stroje, kdy otáčky rotoru dosahují vyšších hodnot než otáčky magnetického pole statoru. U dynamického brzdění se k zastavení stroje využívá přivedeného stejnosměrného napětí. S brzděním se dá setkat i u jiných typů točivých strojů jako jsou např. stejnosměrné stroje. U tohoto typu strojů závisí způsob brzdění na principu jejich buzení. Zatímco u derivačně buzených jsou možné všechny tři způsoby brzdění stejně jako u asynchronních strojů, tak u sériově buzených se uplatňuje pouze dynamické brzdění a protiproud. Generátorické brzdění zde nemůže nikdy nastat. Vychází to z toho principu, že jakmile se po připojení motoru ke zdroji v kotvě začne indukovat napětí, tak proud začne klesat. Ale tento proud nikdy neklesne až na nulu.

Práce je zaměřena na princip brzdění asynchronních motorů, problémy spojené s brzděním a také jejich řešení. Pro řešení a modelování je použit program Ansys Maxwell a metoda konečných prvků.

Grafy ve větší velikosti jsou součástí přílohy.

1. ANSYS MAXWELL A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Součástí práce je také simulování brzdění asynchronního stroje a výpočty prováděné metodou konečných prvků.

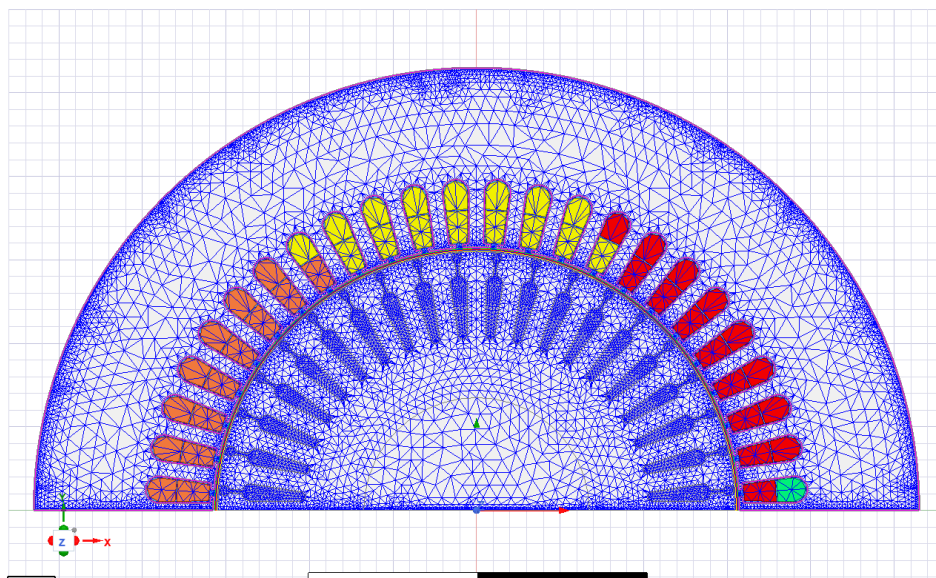
1.1 Ansys Maxwell

Podle [1] se jedná o program, který modeluje elektrické přístroje a elektrické stroje točivé i netočivé a umožňuje jejich elektromagnetický výpočet. Program umožňuje modelovat buď ve 2D i 3D rovině. Při řešení je využívána nízkofrekvenční elektromagnetická simulace. Díky simulování je možné předvídat, jak bude např. elektrický stroj pracovat v praxi. V náročnějších početních úlohách by byly ruční matematické výpočty příliš dlouhé a složité, proto se využívá různých počítačových programů jako např. Ansys Maxwell, které za pomoci metody konečných prvků provádějí výpočty.

1.2 Metoda konečných prvků

Z [2] je jasné, že díky metodě konečných prvků můžeme numericky řešit a vyhodnocovat parciální diferenciální rovnice. Princip této metody vychází z diskretizace oblasti řešení. Podstatou je rozdělit požadovanou oblast na mnoho prvků. Tyto rozdělené prvky mají jednoduché tvary a označují se jako konečné prvky. Vrchol každého prvku se nazývá uzel.

Tato práce je postavená na vytvoření fyzikálního a matematického modelu asynchronního stroje v programu Ansys Maxwell a následných výpočtech pomocí metody konečných prvků.



Obrázek 1: Asynchronní motor rozdělený na konečné prvky podle metody konečných prvků

2. OBECNÝ POPIS ASYNCHRONNÍHO STROJE

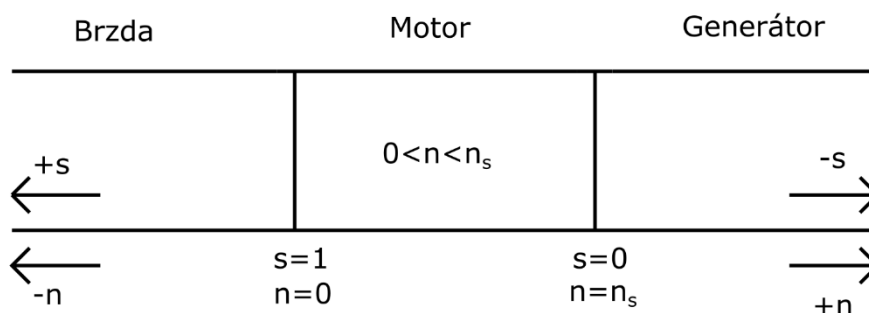
Kapitola je založena na teorii podle [7].

Asynchronní stroje se řadí mezi stroje točivé. Po připojení na elektrickou síť vznikne otáčivé magnetické pole statoru, díky kterému se začne mechanicky otáčet rotor stroje. Ale na rozdíl od synchronních strojů jsou zde otáčky rotoru zpožděny za otáčkami magnetického pole statoru o určitou hodnotu skluzu.

Díky tomu, že je jednoduchý na výrobu, nemá složitou údržbu, je ekonomicky výhodný a spolehlivý se jedná o nejrozšířenější typ točivého stroje. S příchodem frekvenčních měničů se také stal nejlépe regulovatelným v oblasti otáček, kdy do té doby byly za nejvíce regulovatelné považovány především stroje stejnosměrné.

Indukční stroje pracují tak, že energie akumulovaná ve vinutí statoru je přenesena na vinutí rotoru principem elektromagnetické indukce, tzn. nejsou vodivě spojeny.

Asynchronní stroj se ve většině případů používá jako poháněcí motor ($n < n_1$; $s = 0-100\%$), ale můžou nastat i případy, kdy se používá jako generátor ($n > n_1$; $-s$). Pokud se rotor otáčí stejnými otáčkami jako magnetické pole statoru, tak se jedná o synchronní stav, kdy $s = 0\%$.



Obrázek 2: Pracovní stavy asynchronního stroje, [7]

Kotvou je u asynchronních strojů vinutí v drážkách rotoru. Podle typu rotoru jsou asynchronní stroje rozděleny na stroje s kotvou nakrátko a kotvou kroužkovou. V případě kotvy nakrátko tvoří vinutí rotoru tyče, které jsou uloženy v drážkách. Všechny tyče jsou spojeny nakrátko na koncích rotoru. Naopak u kroužkové kotvy je uložení vinutí v drážkách rotoru podobné statorovému vinutí. Vývody tohoto vinutí jsou pak spojeny s kroužky na hřídeli.

2.1 Moment stroje

Podle [5] působí točivé magnetické pole spolu s rotorovými proudy, čímž vzniká moment stroje, který má za následek otáčení rotoru v takovém směru, v jakém se toto magnetické pole otáčí. Z [7] jde odvodit moment stroje:

$$P = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

$$P_\delta = M \cdot \omega_1 = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \quad (2)$$

$$P_{mech} = M \cdot \omega = M \cdot \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (3)$$

$$P_{el} = P_\delta - P_{mech} = M \cdot (\omega_1 - \omega) \quad (4)$$

Elektrický výkon spotřebovaný na činných odporech rotoru se nazývá také skluzový výkon, jelikož platí:

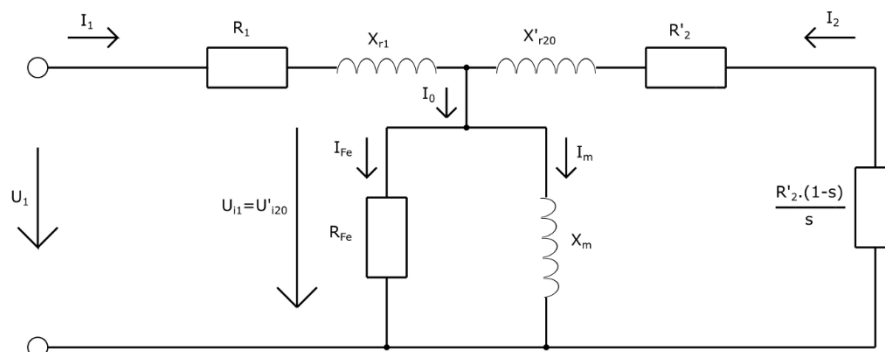
$$\frac{P_{el}}{P_\delta} = \frac{M \cdot (\omega_1 - \omega)}{M \cdot \omega_1} = s \quad (5)$$

$$P_{el} = s \cdot P_\delta \quad (6)$$

Jednou z možností řízení otáček asynchronního stroje je změna skluzového výkonu. Výkon na hřídeli se pak nebude rovnat celkovému mechanickému výkonu vytvářenému strojem, protože zde hrají roli také ztráty dodatečné a vlastní mechanické:

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (7)$$

K výpočtu mechanického výkonu potřebujeme znát náhradní schéma asynchronního stroje:



Obrázek 3: Náhradní obvodový model asynchronního stroje přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, [7]

$$P_{mech} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot (1 - s) \quad (8)$$

Obecně je mechanický moment zapsán následovně:

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad (9)$$

Úhlová rychlost točivého pole statoru se vypočte jako:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (10)$$

Úhlová rychlost rotoru se vypočítá jako rozdíl úhlových rychlostí točivých magnetických polí statoru a rotoru:

$$\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (11)$$

Z náhradního obvodu asynchronního stroje jde pak určit hodnota proudu:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2}} \quad (12)$$

Z vyjádřeného proudu je možné určit celkový mechanický moment stroje:

$$M_{mech} = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot \frac{R_2'}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2 \right]} \quad (13)$$

Záběrný moment je další veličina, kterou je potřeba definovat. Tento moment vzniká, jakmile je motor připojen k síti. V tomto okamžiku je skluz $s=1$ a tím pádem otáčky dosahují nulových hodnot:

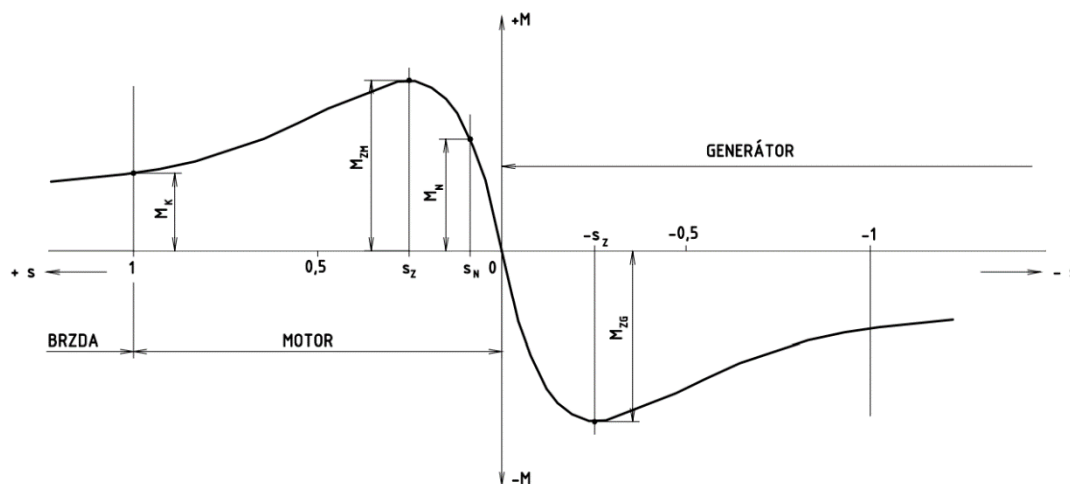
$$M_z = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot R_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R_2')^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2]} \quad (14)$$

Při určitých otáčkách dosáhne moment stroje své maximální hodnoty. Takovému momentu odpovídá i maximální hodnota skluzu:

$$s_{max} = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2}} \quad (15)$$

$$M_{max} = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2} \right]} \quad (16)$$

Maximální moment se nazývá také moment zvratu. Pokud zátěž motoru překročí hodnotu momentu zvratu, tak se motor zastaví. Moment zvratu se dá ovlivňovat změnou odporu fáze rotoru R'_2 . Moment zvratu nám rozděljuje momentovou charakteristiku na dvě části. Levá část se nazývá nestabilní a pravá část stabilní, někdy označována jako pracovní.



Obrázek 4: Momentová charakteristika, převzato z [5]

Nakonec je definována veličina momentová přetížitelnost, přičemž se jedná o poměr momentu zvratu ku jmenovitému momentu:

$$\frac{M_n}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s_{max}}{s} + \frac{s}{s_{max}}} \quad (17)$$

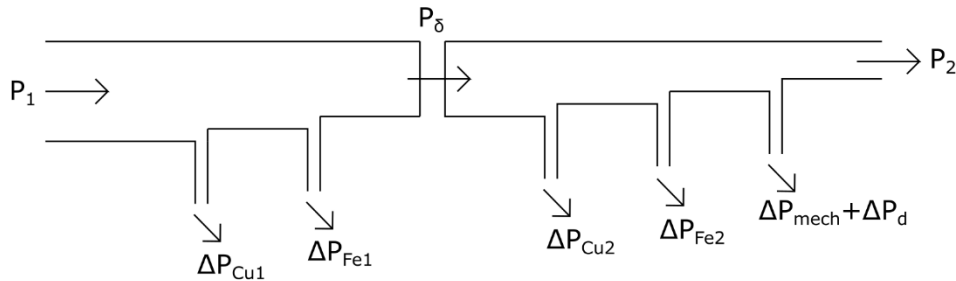
Momentová přetížitelnost podle [5] se v případě motorů s kroužkovým rotorem pohybuje v hodnotách od 1,6 – 2,5 a v případě motorů s kotvou nakrátko dosahuje až hodnoty 4. Jedná se tedy o veličinu závislou na konstrukci stroje, resp. jeho rotoru.

2.2 Spouštění

Spouštění asynchronních motorů se dost podobá brzdění. Podle [5] se opět jedná o přechodný děj. Tento přechodný děj je charakterizován rostoucími otáčkami z nuly (tedy od okamžiku připojení k síti) až do doby, kdy se dostane na své jmenovité otáčky. Nejrizikovější spouštění je u strojů, které mají vysokou frekvenci zapínání (např. jeřáby 600 – 900 spouštění během hodiny). Spouštění s sebou totiž nese velké výkyvy proudů a momentů, které ohrožují jednak motor a jednak také připojené poháněné zařízení.

2.3 Ztráty v asynchronním motoru

2.3.1 Ztráty při zatíženém motoru



Obrázek 5: Rozdělení ztrát v AM podle [6]

Jak uvádí [6], ztráty v motoru můžeme rozdělit na ztráty ve statoru a v rotoru, přičemž vždy se jedná o ztráty ve vinutí (Jouleovy ztráty) a také ztráty v železe. Konkrétně ztráty v železe rotoru by se daly zanedbat, protože jsou závislé na rotorové frekvenci, která je díky skluzu značně menší oproti síťové frekvenci. **Obrázek 5** ukazuje jednotlivé ztráty, které můžou v motoru vznikat. Například výkon přenesený přes vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem je zde označený jako P_δ a lze ho vyjádřit jako příkon odebíraný ze sítě zmenšený o ztráty ve statoru. V rotoru se pak vyskytují ještě mechanické a dodatečné ztráty. Jedná se například o ztráty třením nebo ztráty v ložiskách.

Podle [5] jsou ztráty v režimu generátor stejné jako v případě motoru. Rozdíl je akorát v tom, že jsou obrácené. Do sítě se dodává výkon, který je v tomto případě vyjádřen jako příkon hřídele zmenšený o výše uvedené ztráty.

2.3.2 Ztráty při chodu naprázdno

Z [6] je jasné, že motor není zatížen, takže má nulový výkon na hřídeli. Hlavní jsou ztráty v železe statoru. Ztráty v železe rotoru se dají opět zanedbat kvůli nízké rotorové frekvenci. Další neméně důležité jsou ztráty ve vinutí statoru způsobené proudem naprázdno, který se pohybuje kolem 20-60 % z proudu jmenovitého u malých strojů, u velkých strojů i pod 20 %. Nakonec se zde vyskytují ještě ztráty v ložiskách nebo ventilační ztráty.

2.3.3 Ztráty při chodu nakrátko

Podle [6] má rotor při tomto zapojení nulové otáčky, takže skluz je roven 1. A protože je skluz $s=1$, tak je rotorová frekvence stejná jako síťová frekvence ve statoru. Opět je zde nulový výkon na hřídeli. Hlavní ztrátovou složkou zde tvoří ztráty ve vinutí statoru a rotoru. Důležité jsou také ztráty v železe statoru a tentokrát i rotoru. Nepatrné ztráty vykazuje ještě kostra, hřídel a také ložiska v důsledku vířivých proudů. Proud nakrátko

se nazývá proud záběrný a zejména při rozběhu motoru dosahuje 3 až 7 násobku jmenovitého proudu (za předpokladu přímého připojení na napájecí síť).

3. TECHNICKÉ PARAMETRY SIMULOVANÉHO MOTORU

Tabulka 1: Technické parametry motoru

Typ motoru	1CV3317A	Počet pólů	2p = 2
Jmenovité napětí [V]	400	Jmen. příkon [kW]	326,019
Zapojení¹	D	Jmenovitý výkon [kW]	315
Jmenovitý proud [A]	550	Jmen. moment [N.m]	1007
Jmenovitý kmitočet [Hz]	50	Hmotnost [kg]	1510
Účinník [-]	0,87	Stupeň krytí	IP55
Účinnost [%]	96,62	Druh zatížení	S1
Jmenovité otáčky [ot/min]	2988	Typ konstrukce	IMB3

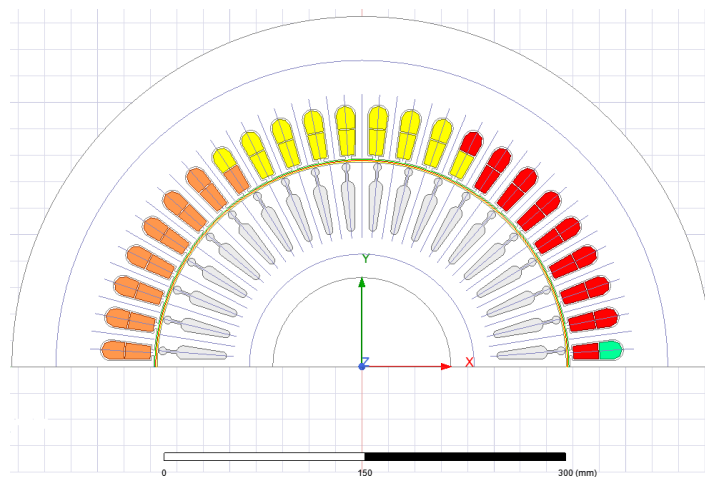
Tabulka 2: Rozměry kompletního motoru

Délka [mm]	1220
Šířka [mm]	620
Výška [mm]	720



Obrázek 6: Asynchronní motor použitý pro měření, [8]

¹ Motor je napájen z frekvenčního měniče



Obrázek 7: Řez motorem

Tabulka 3: Rozměry motoru bez vnější kostry

Průměr motoru bez vnější kostry [mm]	530,0
Výška statorových plechů [mm]	107,5
Průměr rotorových plechů [mm]	309,6

Simulování průběhů brzdění probíhalo na motoru zvoleném útvarem R&D a QM Siemens Frenštát pod Radhoštěm, kde bude probíhat i ověřování simulací brzdění pomocí měření. Simulace probíhaly při různých vstupních parametrech, kdy docházelo ke změnám vstupního napětí nebo momentu setrvačnosti. Z důvodu výskytu velkých proudů při brzdění bude měření realizováno při menším vstupním napětí v podsyceném stavu.

3.1 Zátěžový test

Simulace byly vytvořeny v programu Ansys Maxwell. Výsledná nasimulovaná data byla následně zaznamenána a pak vložena do programu Matlab, kde probíhalo vykreslování grafů.

Výsledky simulací ukazují pouze fázové hodnoty proudu, proto bylo potřeba je přepočítat na hodnoty síťové, aby se daly porovnávat s hodnotami měřenými.

Tabulka 4: Porovnání proudů - Zátěžový test

Výsledné hodnoty proudu po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [A]	Měření [A]	Rozdíl [%]
125 % P_n	2983,7	668,9	664,4	0,67
115,1 % P_n	2985,1	618,8	616,2	0,42
99,9 % P_n	2987,2	544,9	543,4	0,28
75 % P_n	2990,5	429,0	428,3	0,16
50,1 % P_n	2993,7	324,1	323,4	0,22
25,2 % P_n	2996,8	242,3	237,6	1,94

Tabulka 5: Porovnání momentů - Zátěžový test

Výsledné hodnoty momentu po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [N.m]	Měření [N.m]	Rozdíl [%]
125 % P_n	2983,7	1309,6	1260,3	3,8
115,1 % P_n	2985,1	1204,6	1160,2	3,7
99,9 % P_n	2987,2	1042,8	1006,7	3,5
75 % P_n	2990,5	781,0	754,6	3,4
50,1 % P_n	2993,7	520,1	503,4	3,2
25,2 % P_n	2996,8	261,1	253,2	3,0

Tabulka 6: Porovnání ztrát v železe - Zátěžový test

Výsledné ztráty v železe po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % P_n	2983,7	3531,1	3944,2	-11,70
115,1 % P_n	2985,1	3539,4	3951,9	-11,65
99,9 % P_n	2987,2	3540,3	3972,6	-12,21
75 % P_n	2990,5	3558,6	3983,2	-11,93
50,1 % P_n	2993,7	3575,0	4030,4	-12,74
25,2 % P_n	2996,8	3580,1	4069,0	-13,66

Tabulka 7: Porovnání ztrát rotorové klece - Zátěžový test

Výsledné ztráty v rotorové kleci po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % P_n	2983,7	2639,9	2178,3	17,49
115,1 % P_n	2985,1	2226,4	1831,3	17,75
99,9 % P_n	2987,2	1661,4	1365,6	17,80
75 % P_n	2990,5	941,0	754,1	19,86
50,1 % P_n	2993,7	433,4	330,7	23,70
25,2 % P_n	2996,8	134,1	81,9	38,93

Tabulka 8: Porovnání Jouleových ztrát ve vinutí statoru - Zátěžový test

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % P_n	2983,7	3315,2	3453,8	-4,18
115,1 % P_n	2985,1	2839,0	2965,7	-4,46
99,9 % P_n	2987,2	2200,7	2312,3	-5,07
75 % P_n	2990,5	1368,1	1435,7	-4,94
50,1 % P_n	2993,7	790,9	816,5	-3,24
25,2 % P_n	2996,8	446,3	439,2	1,59

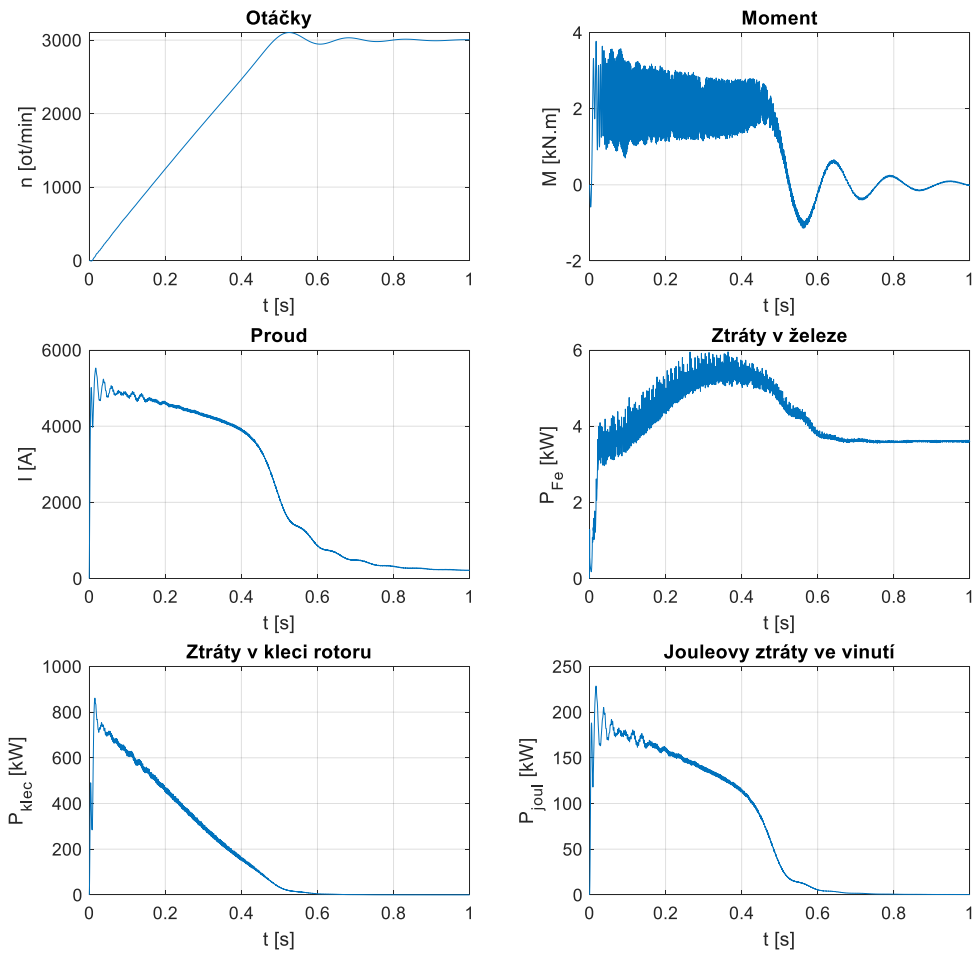
Na začátku byla provedena simulace zátěžového testu pro 6 bodů. Tyto body byly zadány otáčkami. Odečítání probíhalo z ustálení v čase 0,9 s až 1 s. Vždy se jedná o násobek jmenovitého výkonu $P_n = 315$ kW.

V případě momentu se uvažovaly ještě ztráty způsobené třením a větrem, které jsou zde započítány. Tyto ztráty činí po přepočtu na moment asi 6 N.m.

Účelem zátěžového testu je poukázat na chování motoru při různých hodnotách výkonu. Dalším důvodem provedení zátěžového testu je porovnání simulací a měření. V tabulkách jsou vypsány jak výsledky simulací, tak i měření. Zároveň je zde vždy ještě uvedena procentuální odchylka. Z tabulek se dá vyčíst, že hodnoty nikdy nejsou stejné a to i po zohlednění ztrátového momentu 6 N.m, protože simulace a měření si odpovídají jen přibližně.

Měření zátěžového testu nebylo součástí měření brzdění asynchronního stroje. Proběhly pouze simulace, které se následně porovnávaly s hodnotami měřenými útvarem R&D a QM Siemens Frenštát pod Radhoštěm.

3.2 Rozběh motoru



Obrázek 8: Rozběh motoru

Tabulka 9: Nejvyšší dosažené parametry při rozběhu motoru

Parametr	Hodnota parametru	Čas [s]
n [ot/min]	3102,9	0,525
M [N.m]	3771,3	0,01725
I_U [A]	4926,9	0,06925
I_V [A]	5562,7	0,01575
I_W [A]	5123,8	0,0225
P_{Fe} [W]	5952,9	0,36425
P_{klec} [kW]	861,2	0,01475
P_{Joul} [kW]	228,5	0,017

Simulace rozběhu motoru probíhaly při jmenovitých provozních parametrech. Jde vidět, že motor se rozběhne přibližně za 0,5 s. Z grafů rozběhu motoru se dá vypočítat, že když se otáčky začnou ustalovat, tak ve stejnou chvíli nastává ten samý proces i v případě ostatních veličin. Jakmile se otáčky ustálí, tak dojde k ustálení i ostatních hodnot. Je vidět, že proud i ztráty při rozběhu dosahují několikanásobně vyšších hodnot než po ustálení. Proud při rozběhu dosahuje efektivní fázové hodnoty 2844,5 A (fáze U), zatímco proud při ustálení má efektivní hodnotu 227,6 A (fáze U). Křivka znázorňující ztráty v železe je stejná jako část křivky v grafech brzdění protiproudem, která znázorňuje chování motoru od doby překročení nulových otáček až po úplné dosažení jmenovitých otáček, opačných vůči otáčkám původním. V případě brzdění protiproudem tato část křivky představuje v podstatě rozběh motoru. Nicméně tento průběh představuje pro využití v praxi riziko, protože úkolem tohoto typu brzdění je co nejdříve ubrzdit motor. Ale roztočením se na opačné otáčky by mohlo dojít k poškození poháněného zařízení.

Jouleovy ztráty, jejichž průběh je zobrazen v grafu rozběhu motoru a taky u simulací brzdění, představují ztráty pouze ve vinutí statoru.

Kapitola zaměřená na rozběh motoru není doložena měřením, jedná se především o seznámení čtenářů se strojem.

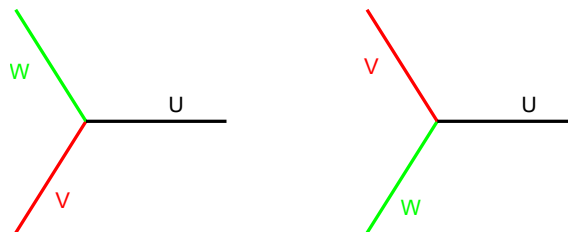
4. BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM

Podle [5] tento stav nastává, pokud se rotor začne otáčet proti směru otáčení magnetického pole statoru. V takovém případě je $s > 1$. V některých případech po odpojení motoru ze sítě nemůžeme čekat až se rotor dotočí, díky pasivním odporovým ztrátám způsobených třením by to trvalo dlouhou dobu. Takže jej potřebujeme rychle zastavit.

4.1 Princip

Z [5] jasně plyne, že se provádí tak, že prohodíme dvě libovolné fáze statoru. Výsledné točivé pole a proud rotoru na sebe navzájem působí a vytváří elektromagnetický moment, který stroj ubrdí. Motor odebírá ze sítě větší proud oproti proudu nakrátko. Stroj se tak dostane do oblasti záporných otáček, což jasně ukazuje **Obrázek 2**.

Je možné také rozšířit rozmezí, ve kterém bude stroj brzdít. Provádí se to zvětšením odporu rotoru, např. vřazením přídavného odporu. Rostoucí brzdná rychlost má za následek stoupání brzdné charakteristiky. Se změnou hodnoty vřazených odporů se dá měnit i výsledný brzdny moment



Obrázek 9: Příklad prohození dvou fází

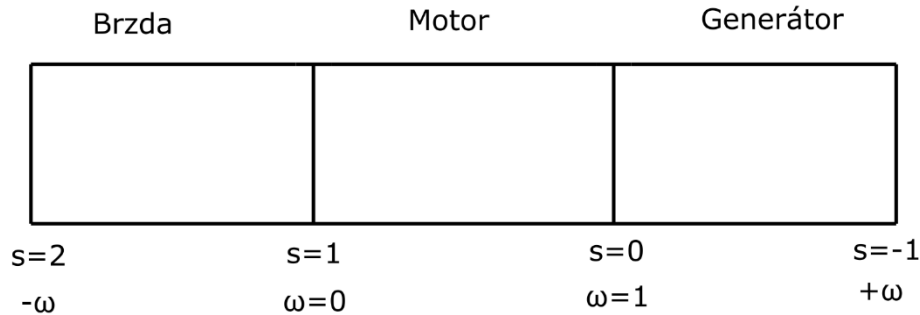
4.2 Rizika spojená s provozem asynchronní brzdy

Z [5] je jasné, že brzdění protiproudem je ze všech možností brzdění asynchronních motorů nejméně ekonomickým a kvůli ztrátám i nejhorším typem. Hlavním problémem je velký nárůst proudů jak ve statoru tak i v rotoru oproti proudům protékajícím za jmenovitého chodu. Podle [6] by se dal takový ztrátový proud přirovnat k proudu záběrnému, tedy až pětinasobku proudu jmenovitého. Ve vinutí hlavně rotoru pak vznikají Jouleovy ztráty, které motor zahřívají. Podle [4] se takový proud omezuje velkým odporem rotoru. V případě kroužkových motorů jsou použity železné kroužky a v případě klecových motorů jsou použity železné tyče.

V případě motorů s kroužkovým rotorem je možné snížit tyto proudy také vřazením přídavného odporu do obvodu rotoru. Tímto způsobem se dá docílit zkrácení doby

brzdění motoru. Zároveň se však sníží i Jouleovy ztráty ve vinutí, které mají vliv na oteplení motoru (menší ztráty znamenají menší oteplení).

Překreslením pracovních stavů viz **Obrázek 2** je možné získat nový obrázek, ze kterého je pak snadnější určit konkrétní úhlovou rychlost:



Obrázek 10: Úhlová rychlost v pracovních stavech AM, [7]

Dosazením příslušné úhlové rychlosti a skluzu do vzorce pro velikost ztrát energie se dají podle [5] vyjádřit výsledné ztráty spojené s brzděním jako:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{A-B}^2 \cdot (s_A^2 - s_B^2) \quad (18)$$

S tím, že skluzy se dají vyjádřit jako:

$$s_A = \frac{\omega_{A-B} - \omega_1}{\omega_{A-B}} \quad (19)$$

$$s_B = \frac{\omega_{A-B} - \omega_2}{\omega_{A-B}} \quad (20)$$

Pro rozběh motoru se dá ω_0 vyjádřit v hodnotách intervalu $(0, \omega)$ a skluz v hodnotách $(1, 0)$, potom dosazením do původního vzorce pro velikost ztrát energie platí:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (21)$$

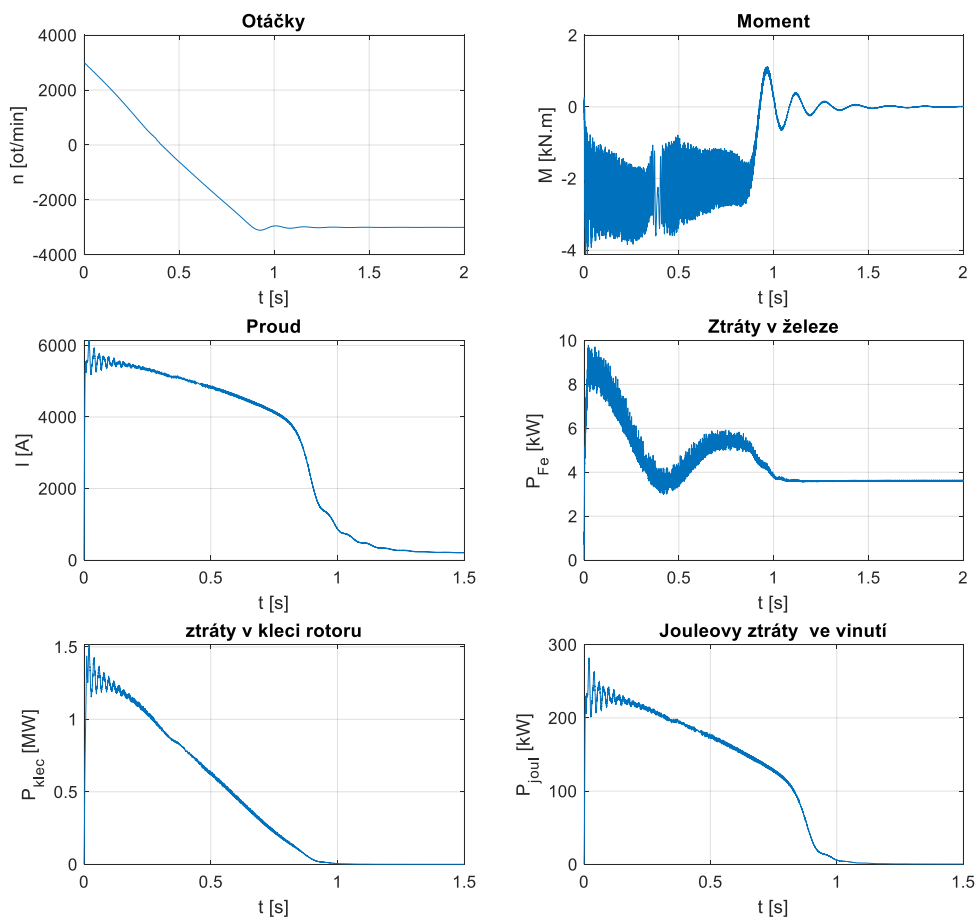
V brzděné oblasti naopak platí, že $\omega_0 \in (-\omega, 0)$ a $s \in (2, 1)$, takže dosazením se dojde ke vztahu:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \cdot (2^2 - 1^2) = \frac{3}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (22)$$

Z vyjádření je jasně vidět, že ztráty v železe rotoru při brzdění protiproudem dosahují třikrát větších hodnot oproti ztrátám při rozběhu motoru. Na tyto ztráty již nemá vliv velikost rotorového odporu.

Další problém s tímto typem brzdění vychází z toho, že jakmile se stroj dostane na nulové otáčky, tak se nezastaví, ale začne se otáčet na opačnou stranu. Přepólováním se tedy motor v podstatě neutlumí, ale pouze zapojí na opačný chod. V době, kdy motor dosáhne nulových otáček, je potřeba jej odpojit od sítě.

4.3 Simulace brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech



Obrázek 11: Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech

Tabulka 10: Nejvyšší dosažené parametry při brzdění protiproudem ve jmenovitém stavu

Parametr	Hodnota parametru	Čas [s]
M [N.m]	-4129,2	0,018
I_U [A]	5603,3	0,1295
I_V [A]	6137,8	0,0225
I_W [A]	5810,9	0,076
P_{Fe} [W]	9791,3	0,023
P_{klec} [kW]	1514,8	0,0205
P_{Joul} [kW]	281,8	0,01975

Při brzdění protiproudem dosáhne motor nulových otáček přibližně za 0,4 s, ale pak se začne točit zápornými otáčkami. Moment, který na motor působí je záporný, neboť se motor v okamžiku sepnutí začíná silou točit opačným směrem. Jedná se tedy o brzdny moment.

Z grafu otáček jde vyčíst, že motor se dostane na opačné otáčky po menším překmitu za přibližně 1,1 s, což je doba, kdy jsou ostatní veličiny opět ustálené.

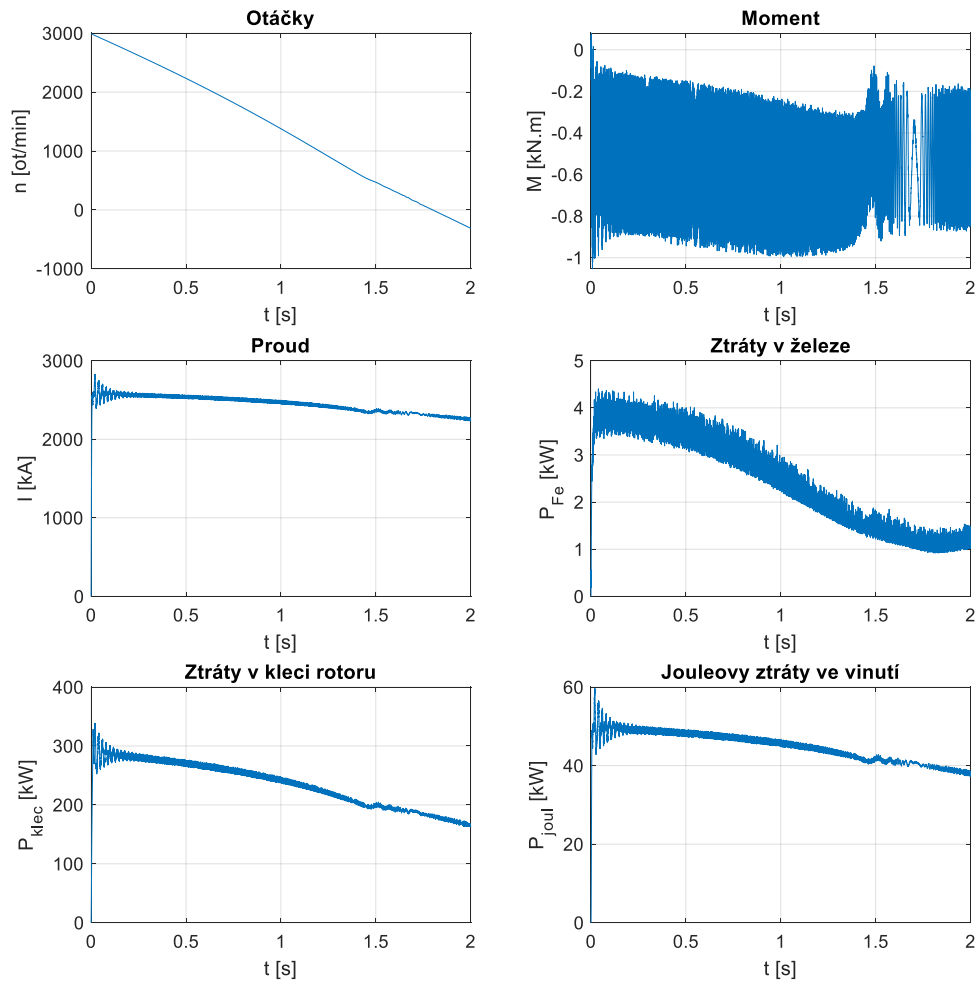
V grafu zobrazujícím moment stroje jde vidět překmit právě v čase 0,4 s, kdy stroj přechází nulové otáčky.

Zajímavý průběh má graf zobrazující ztráty v železe. Zde je vidět, že ztráty postupně padají, ale jakmile motor překoná hranici nulových otáček, tak začnou opět narůstat. Tato část křivky, kdy ztráty narůstají přesně kopíruje křivku při rozběhu motoru. Motor se tedy chová jako při běžném spouštění.

Největší problém a největší ztráty jsou spojeny s rotorovou klecí. Zde je vidět, že kdyby došlo k brzdění motoru při jmenovitých parametrech, tak by mohlo dojít ke zničení motoru, neboť na začátku děje se dostáváme na hodnotu přibližně 5x větší oproti jmenovitému výkonu stroje (tedy až do jednotek MW).

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru nedosahují tak vysokých hodnot jako ztráty v rotorové kleci, ale stejně se pohybují na vysoké úrovni.

4.4 Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí



Obrázek 12: Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí

Tabulka 11: Nejvyšší dosažené parametry - brzdění při polovičním napětí

Parametr	Hodnota parametru	Čas [s]
M [N.m]	-1053,7	0,00825
I_U [A]	2649,6	0,20925
I_V [A]	2760,8	0,02275
I_W [A]	2690,2	0,01625
P_{Fe} [W]	4404,0	0,03975
P_{klec} [kW]	338,4	0,0205
P_{Joul} [kW]	59,7	0,02

V této části má na brzdění protiproudem velký vliv kromě momentu setrvačnosti rotoru i změna napájecího napětí. Motor je napájen střídavým polovičním napětím, což je 200 V. V porovnání s brzděním při plném napětí, kdy otáčky dosáhly na nulu za 0,4 s, se zde motor dostane na nulové otáčky až za 1,8 s. Z grafů je taky vidět, že doba 2 sekundy zdaleka nestačí na to, aby došlo k ustálení, resp. aby se motor točil otáčkami opačnými. Brzdný moment stroje je tentokrát přibližně 4x menší s odchylkou 2,1 %. Je zde opět vidět překmit v čase nulových otáček.

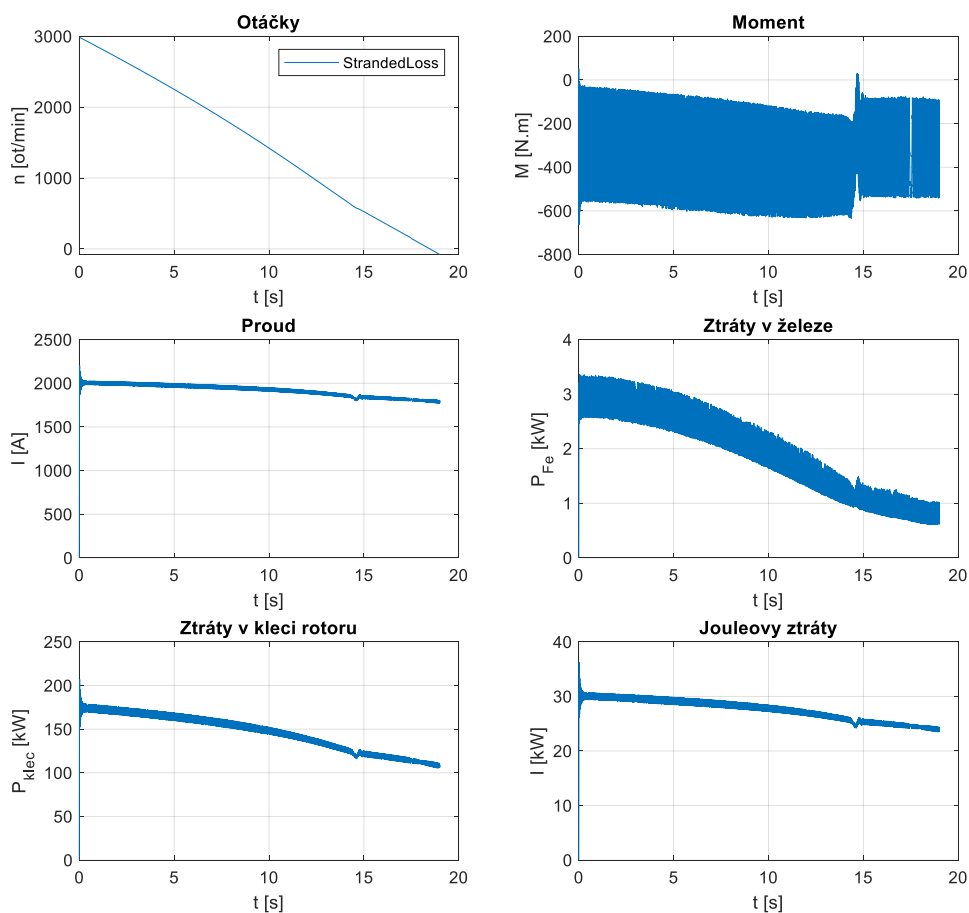
Ztráty v železe jsou taky menší a to asi o polovinu s odchylkou 2 %.

U proudu nastal podobný pokles a to přibližně 2,2x ve všech fázích.

Velký pokles zde zažily ztráty v rotorové kleci, které klesly přibližně 4,5x a Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, které klesly 4,7x. Tedy by se dalo říct, že měly podobný pokles. Změnou napájecího napětí tedy ovlivňujeme dobu ubrzdění i velikost ztrát, což může hrát v praxi důležitou roli.

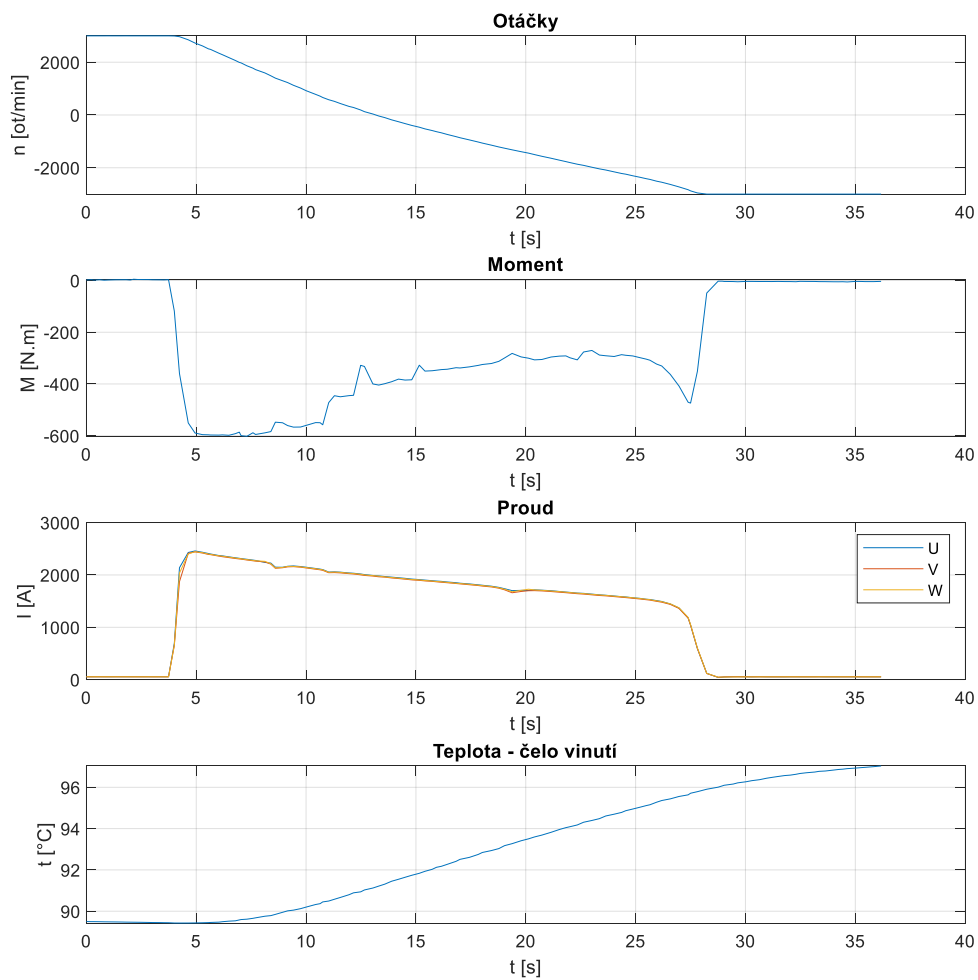
4.5 Ověření měřením – brzdění protiproudem při 160 V

4.5.1 Simulace



Obrázek 13: Simulace brzdění protiproudem při 160 V

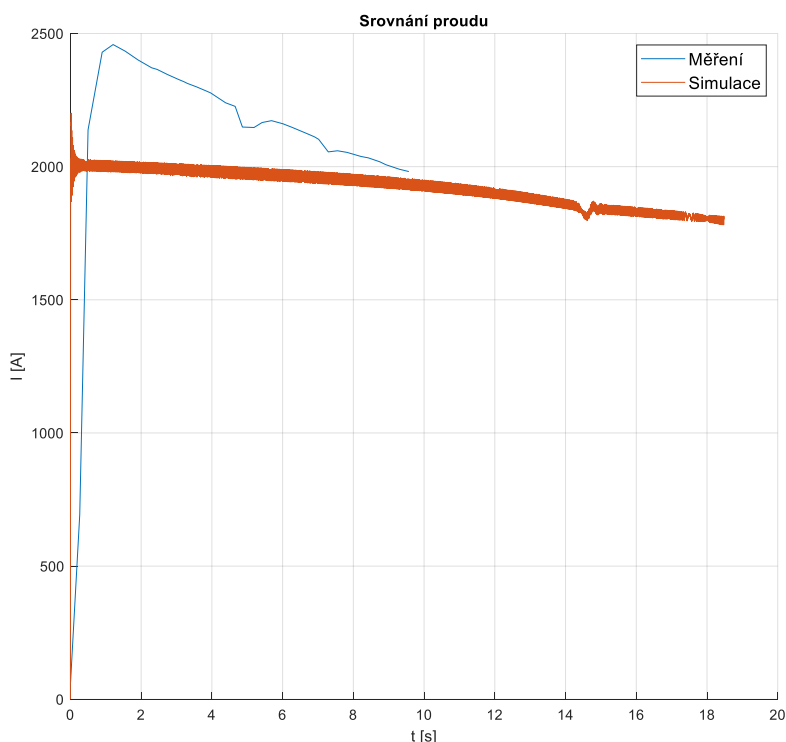
4.5.2 Měření



Obrázek 14: Měření brzdění protiproudem při 160 V

Tabulka 12: Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 160 V

Parametr	Simulace	Měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-661,7	-602,2	9,0
I_U [A]	2071,7	2458,4	-18,7
I_V [A]	2131,5	2441,4	-14,5
I_W [A]	2101,9	2443,6	-16,3
P_{Fe} [W]	3359,8	-	
P_{klec} [kW]	207,0	-	
P_{Joul} [kW]	36,2	-	



Obrázek 15: Srovnání proudů při 160 V

V této části práce proběhlo měření brzdění protiproudem při napájecím napětí 160 V. Porovnáním se dá zjistit, že se grafy liší v době ubrzdění motoru, tedy v čase, kdy motor dosáhne nulových otáček. Podle simulací dojde k ubrzdění za přibližně 18,5 s, zatímco podle měření nastane tento okamžik již za 9 s. Nicméně grafy naměřených hodnot zobrazují průběhy až do doby kompletního opačného chodu. **Tabulka 12** porovnává naměřené hodnoty proudů a momentu s hodnotami simulovanými. Vyšlo najevo, že simulace a měření si s malými odchylkami odpovídají. Opět je zde dokázáno, že simulace se jen přibližují skutečnému měření, neboť zde nejsou uvažovány ještě ztráty uvnitř motoru, které také zrychlují dobu ubrzdění.

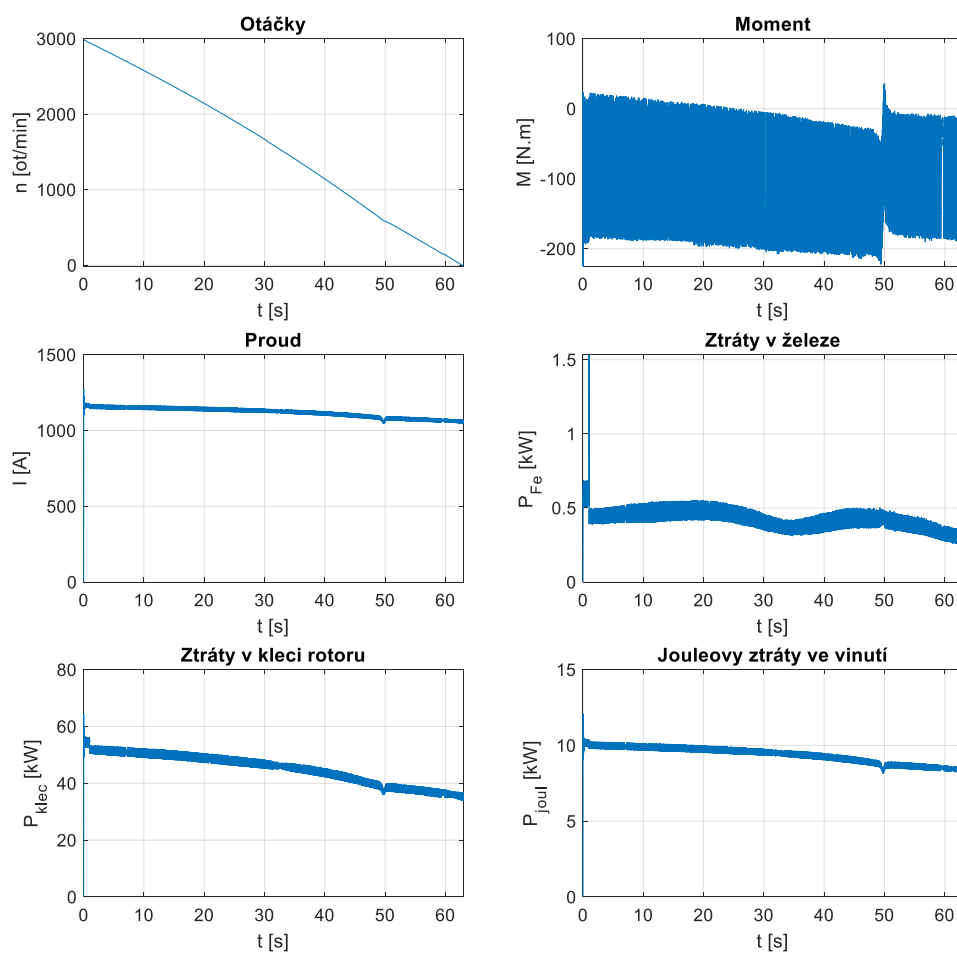
Simulace dále ukazují hodnoty ztrát, které opět klesly při srovnání s hodnotami u vyššího napájecího napětí. **Obrázek 14** zde zahrnuje také graf, kde je možné vidět, že teplota

začala narůstat v době, kdy se začal motor brzdít. Teplota během zkoumaného děje nedosáhla na vysokou nebo nebezpečnou úroveň, protože měření trvalo jen krátkou dobu. Teplotní nárůst se pohybuje pouze v řádu jednotek stupňů Celsia.

Obrázek 15 vykresluje srovnání proudu měřeného a simulovaného při 160 V. Z obrázku je patrné, že při měření dosahuje proud vyšší hodnoty než při simulaci. Nicméně oba dva průběhy dokazují, že nejdříve dochází ke strmému nárůstu proudu a během brzdění pak k mírnému poklesu. Dále je vidět, že proud v simulaci narostl přímo kolmě, ale proud měřený narostl s malou odchylkou. To je způsobeno tím, že simulace byly provedeny přímo z bodu jmenovitých otáček na rozdíl od měření, které proběhl nejdříve rozběh motoru a pak až nastalo brzdění. Graf zaznamenává průběh proudu do doby dosažení nulových otáček. Je z něj tedy patrné, že simulace brzdění trvala přibližně jedenkrát delší dobu oproti měření.

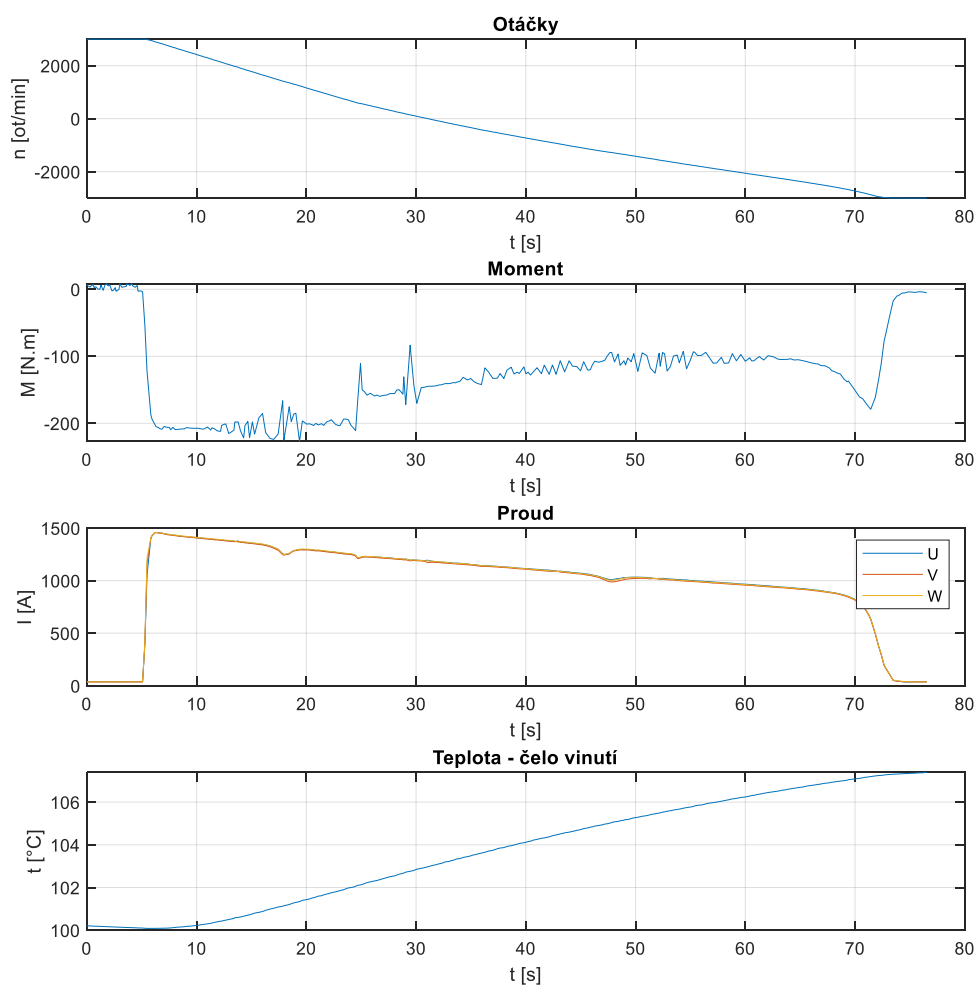
4.6 Ověření měřením – brzdění protiproudem při 100 V

4.6.1 Simulace



Obrázek 16: Simulace brzdění protiproudem při 100 V

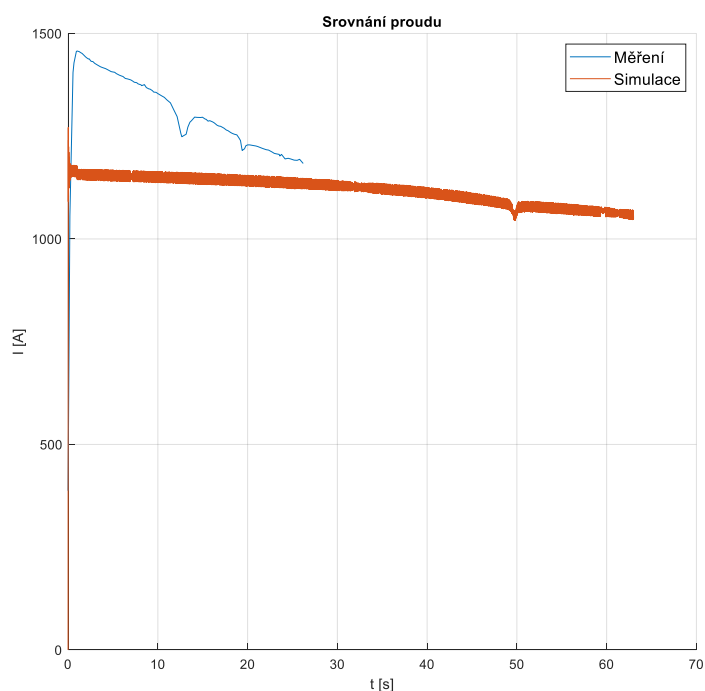
4.6.2 Měření



Obrázek 17: Měření brzdění protiproudem při 100 V

Tabulka 13: Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 100 V

Parametr	Simulace	Měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-224,7	-226,9	1,0
I _U [A]	1200,9	1457,3	-21,4
I _V [A]	1225,0	1457,2	-19,0
I _W [A]	1212,3	1457,0	-20,2
P _{Fe} [W]	1533,5	-	
P _{klec} [kW]	64,5	-	
P _{Joul} [kW]	12,1	-	



Obrázek 18: Srovnání proudů při 100 V

Tabulka 14: Celkové srovnání brzdění protiproudem při různých napájecích napětí

Parametr	400 V	200 V	160 V	100 V
M [N.m]	-4129,2	-1053,7	-661,7	-224,7
I _U [A]	4575,1	2163,4	2071,7	1200,9
I _V [A]	4848,9	2254,2	2131,5	1225,0
I _W [A]	4744,6	2196,5	2101,9	1212,3
P _{Fe} [W]	9791,3	4404,0	3359,8	1533,5
P _{klec} [kW]	1514,8	338,4	207,0	64,5
P _{Joul} [kW]	281,8	59,7	36,2	12,1

Nyní došlo ke snížení napětí na 100 V. Lze si všimnout, že moment klesl přibližně 3x oproti napájení při 160 V. Podle simulací dojde k ubrzdění za asi 63 s, zatímco podle měření nastane tento okamžik za 25,5 s. Výrazně se tedy prodloužila doba brzdění, i když došlo k poměrně malému poklesu napájecího napětí.

Tabulka 13 porovnává naměřené hodnoty proudů a momentu s hodnotami simulovanými a ukazuje, že simulace a měření si podobně jako v předchozím případě odpovídají až na malé odchylky.

Podle simulací klesly ztráty v kleci rotoru a Jouleovy ztráty ve vinutí statoru cca 3x oproti brzdění při 160 V, tedy stejně jako v případě momentu.

Obrázek 18 opět ukazuje srovnání proudů z měření a simulování, ale tentokrát provedeného při 100 V. Křivky mají podobný průběh jako při napájení 160 V. Je zde nicméně vidět, že doba brzdění se výrazně prodloužila.

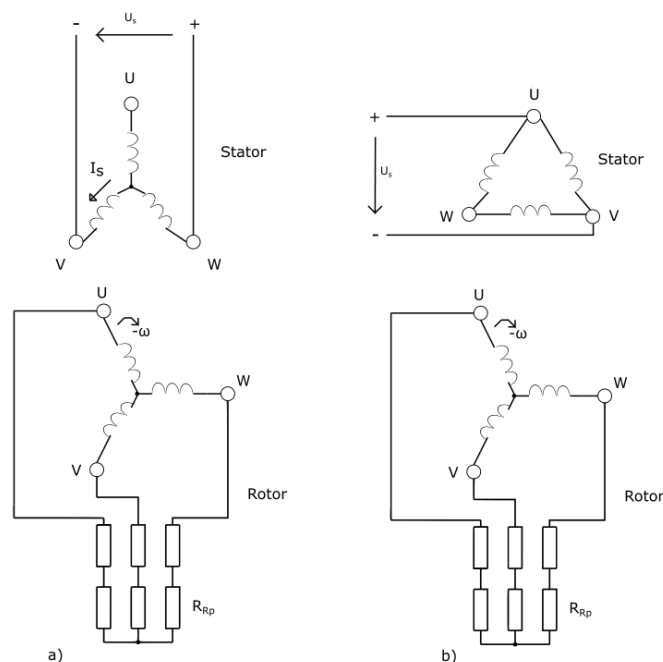
5. DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ

Je to další možný způsob, jak docílit zastavení motoru. Jedná se o brzdění stejnosměrným proudem. Podle [3] se jedná o elektrický způsob brzdění motoru. [3] Dále říká, že pokud není motor schopen reverzačního chodu (typicky stroje velkých výkonů), tak se jedná o jediné možné řešení, jak ubrzdít asynchronní motor. Tento způsob brzdění se využívá i v případě motorů synchronních. Ve srovnání s brzděním protiproudem vychází dynamické brzdění jako efektivnější a méně ztrátové. Dalším hlavním rozdílem je, že zatímco u protiproudu je nutné motor odpojit od sítě, aby nepřešel na reverzační chod, tak v případě dynamického brzdění se stroj úplně utlumí.

5.1 Princip

Z [3] je jasné, že princip dynamického brzdění vychází z toho, že z brzděného asynchronního motoru se stane synchronní generátor, který pohání klesající kinetická energie. Tato energie vzniká brzděním setrvačných hmot stroje. V podstatě dojde ke vzniku záporného brzdného momentu.

V praxi to znamená, že se odpojí motor ze třífázové sítě, přičemž na satorové vinutí se přivede stejnosměrný proud. Vinutí uložené v rotoru je možné buď spojit přes přidavné odpory s kroužky rotoru nakrátko anebo v případě klecové kotvy napřímo bez odporů.



Obrázek 19: Zapojení AM pro dynamické brzdění; a) sator zapojen do hvězdy; b) sator zapojen do trojúhelníka; převzato z [3]

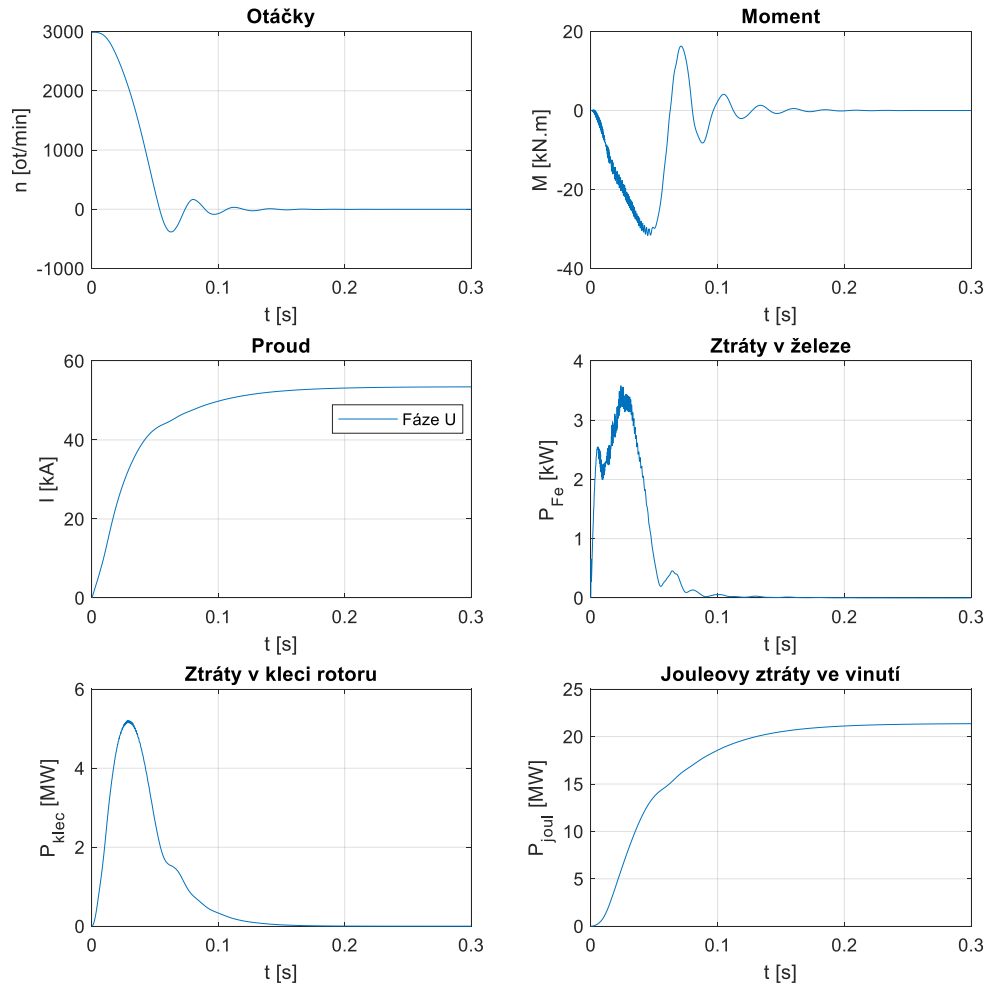
Podle způsobu zapojení statoru a rotoru se dají měnit i parametry stejnosměrného zdroje proudu a stejně tak i průběh brzdného momentu. Stejnosměrný proud vybudí ve vinutí statoru nepohyblivé magnetické pole. Toto magnetické pole ovlivňuje symetrické třífázové rotující vinutí rotoru tak, že začne indukovat střídavé proudy. Vlivem těchto proudů vznikne v rotoru i magnetomotorické napětí, které sice dosahuje stejné velikosti úhlové rychlosti jakou má rotor, ale směřované opačným směrem. Tyto úhlové rychlosti se vzájemně odečtou a tím pádem je výsledná úhlová rychlost v porovnání s vinutím statoru nulová. Díky tomu, jak na sebe magnetomotorické síly statoru i rotoru vzájemně působí vznikne elektromagnetický moment působící v opačném směru než v jakém se rotor otáčí. Vliv na brzdny moment mají v malé míře i mechanické ztráty a ztráty v železe. Důsledkem brzdění je snižování otáček rotoru až na nulu. Stejně tak frekvence rotoru se úplně utlumí. Vinutí rotoru začne být tepelně namáháno, díky naakumulované brzdné kinetické energii. V případě motorů s kroužkovým rotorem přechází toto teplo i do vřazených odporů.

S rostoucím účinkem výsledného brzdného momentu klesají otáčky stroje, ale zároveň se z proudu tekoucího statorovým vinutím stává magnetizační proud. V momentě, kdy utichnou přechodné děje a motor je zastaven, tak se ze statorového proudu již úplně stane proud magnetizační. Princip vychází z toho, že jakmile motor zpomaluje a otáčky klesají, tak dochází k nasycování magnetického obvodu. Nakonec dojde k úplnému přesycení. Toto přesycení je také ovlivněno tím, jak velký je zvolen napájecí stejnosměrný proud statoru. Obvykle se volí hodnota o něco málo větší oproti proudu jmenovitému.

Na dynamické brzdění se dá dívat jako na přechodný děj. Při tomto přechodném ději se z nasyceného stroje stává stroj přesycený. Tím pádem se mění magnetizační proud, reaktance i magnetický tok. Ve srovnání se zapínáním motoru je změna magnetického toku (stejně jako sycení motoru) při brzdění několikrát větší.

Další ovlivňování brzdění je důsledkem ztrát vznikajících kvůli zatížení motoru. To se nejvíce projeví u motorů vysokých otáček jako jsou dvoupólové nebo čtyřpólové. Díky těmto ztrátám se brzdění motoru urychlí. Stejně tak i větší hodnota momentu setrvačnosti prodlužuje dobu ubrzdění (např. připojením dynamometru).

5.2 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 400 \text{ V}$

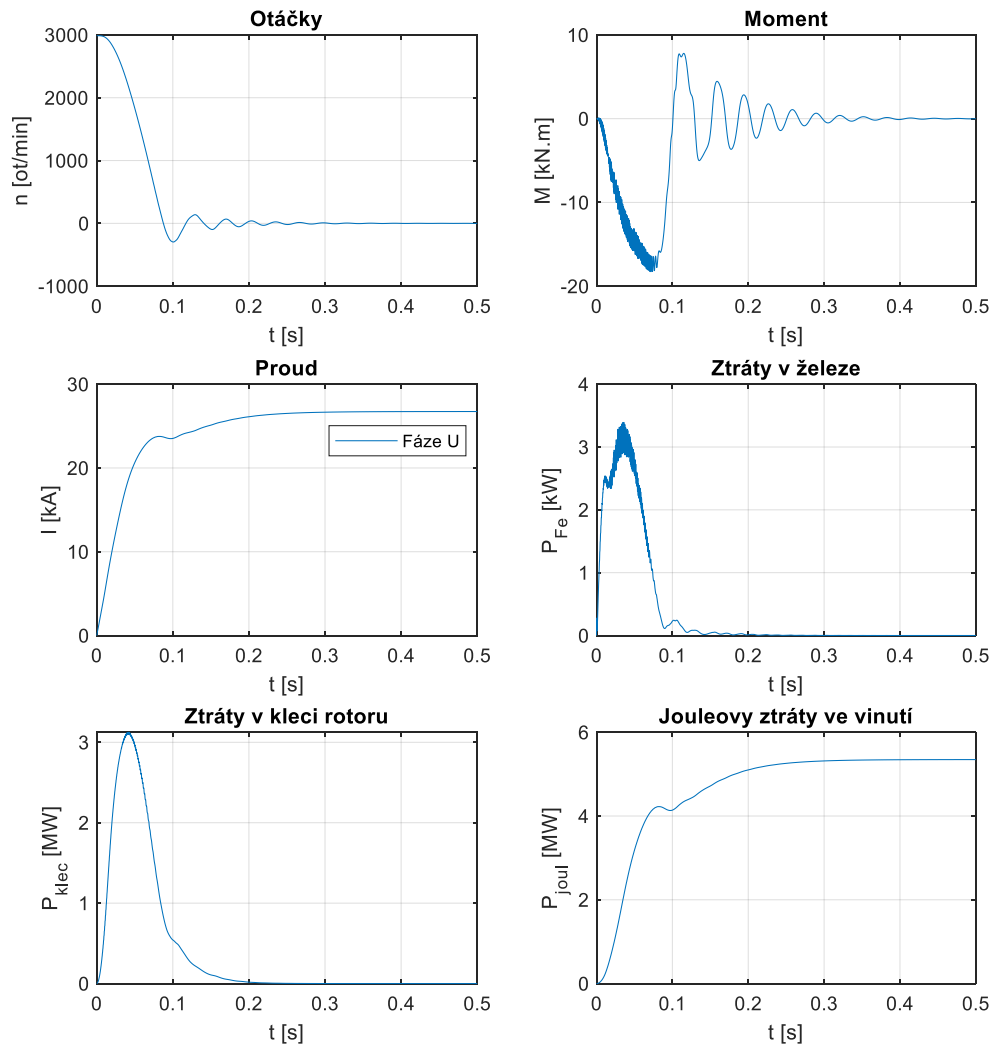


Obrázek 20: Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V

Tabulka 15: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 400 V

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
M [kN.m]	-31,6	0,045
I_U [kA]	53,4	0,3
P_{Fe} [kW]	3,6	0,02375
P_{klec} [MW]	5,2	0,02875
P_{Joul} [MW]	21,4	0,3

5.3 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 200 \text{ V}$

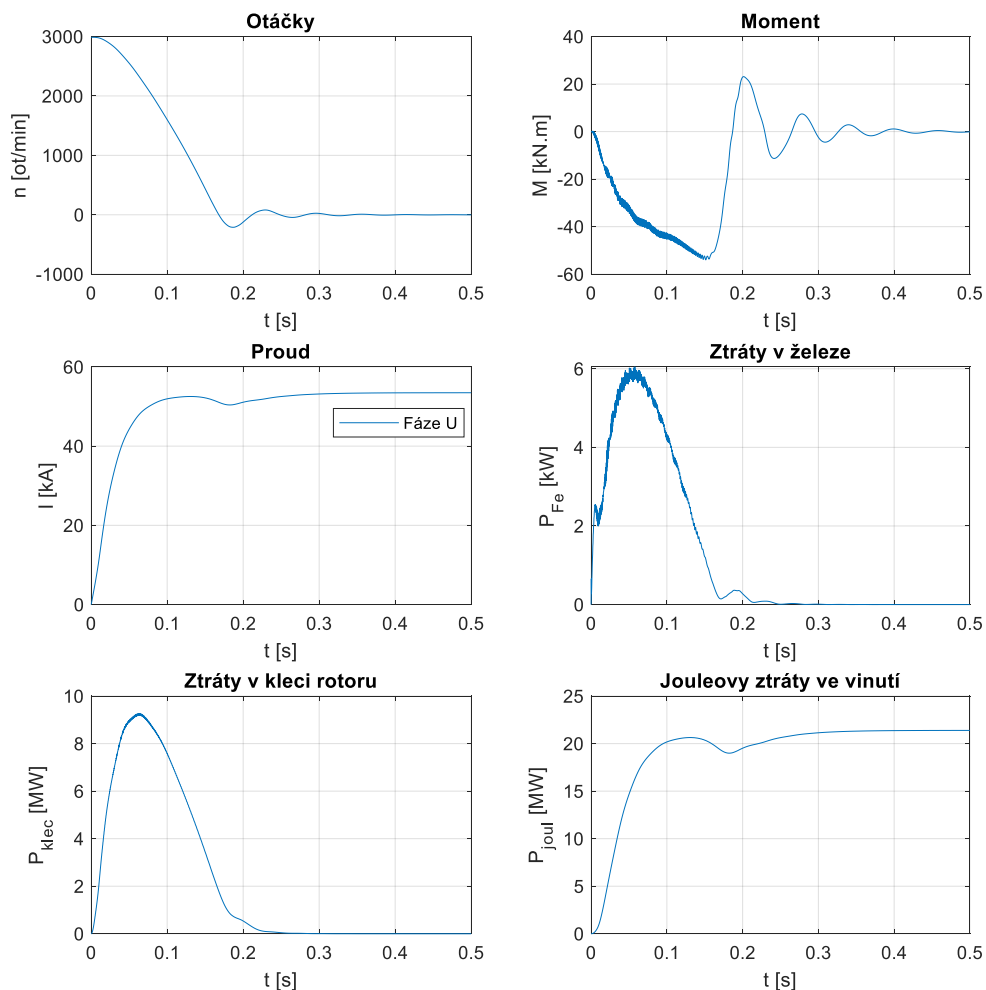


Obrázek 21: Dynamické brzdění při napájecím napětí 200 V

Tabulka 16: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V

Parametr	Hodnota parametru	Čas [s]
M [kN.m]	-18,3	0,07175
I_U [kA]	26,7	0,5
P_{Fe} [kW]	3,4	0,036
P_{klec} [MW]	3,1	0,042
P_{Joul} [MW]	5,3	0,5

5.4 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 400 \text{ V}$ a $J_S = 19,91 \text{ kg.m}^2$



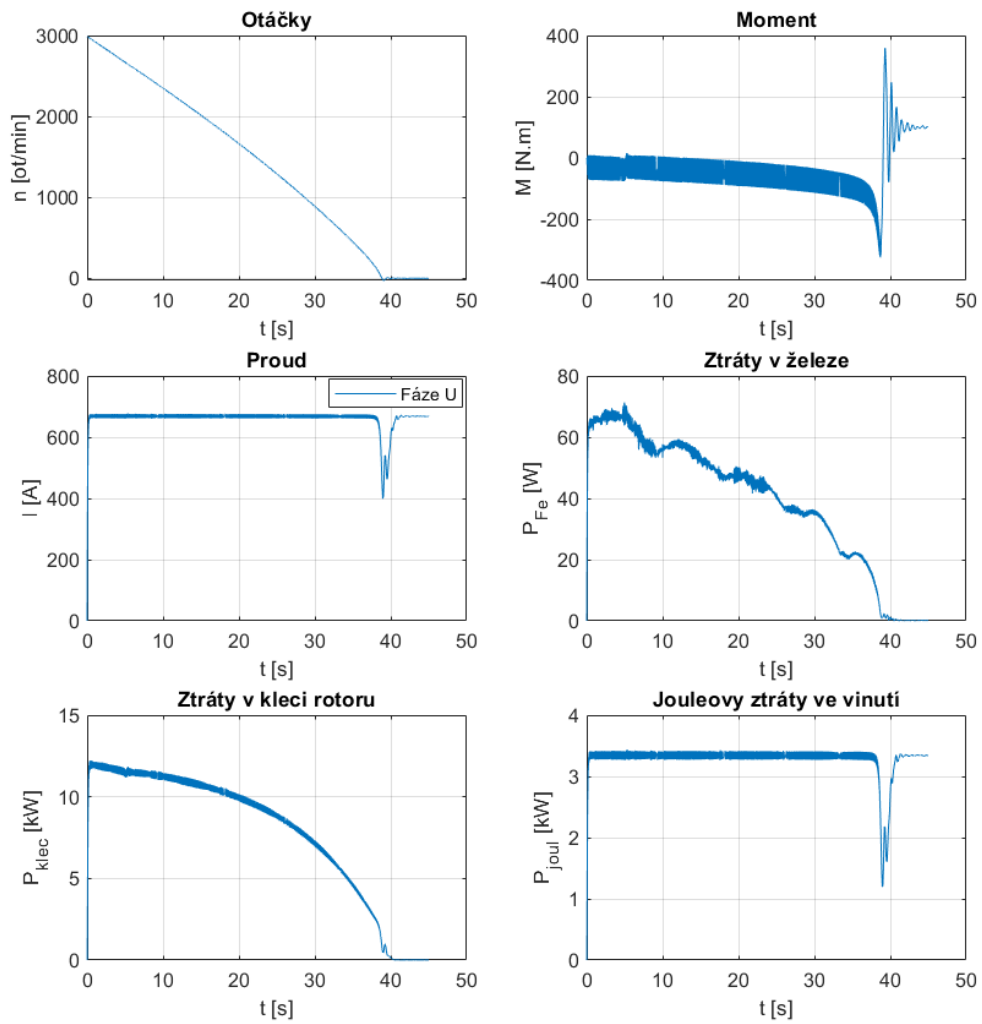
Obrázek 22: Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V a momentu setrvačnosti $19,91 \text{ kg.m}^2$

Tabulka 17: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V a momentu setrvačnosti $19,91 \text{ kg.m}^2$

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
M [kN.m]	-54,0	0,15125
I_U [kA]	53,5	0,5
P_{Fe} [kW]	6,0	0,05775
P_{klec} [MW]	9,3	0,06425
P_{Joul} [MW]	21,4	0,5

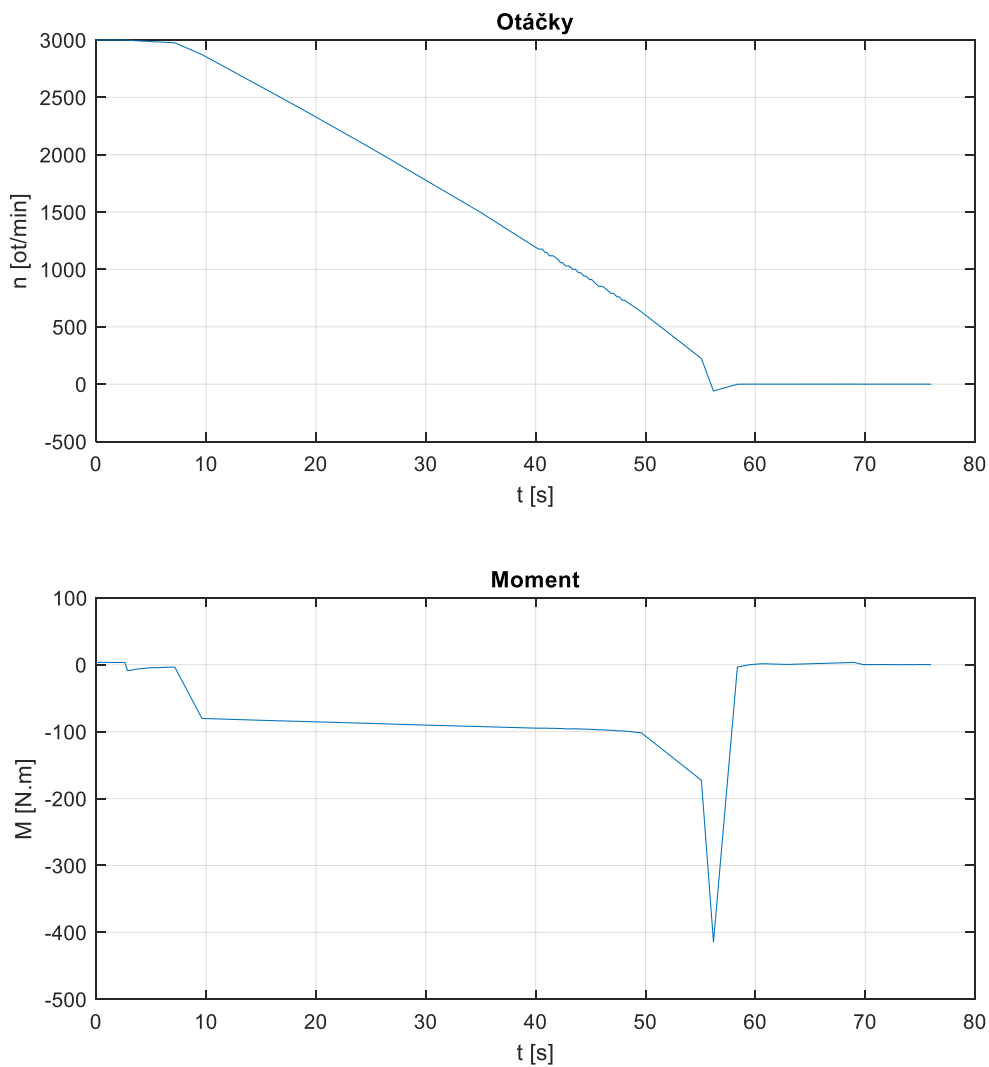
5.5 Ověření měřením - dynamické brzdění při 5 V

5.5.1 Simulace



Obrázek 23: Simulace dynamického brzdění při 5 V

5.5.2 Měření



Obrázek 24: Měření dynamického brzdění při 5 V

Tabulka 18: Srovnání měření a simulací brzdění stejnosměrným proudem

Parametr	Simulace	Měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-324,6	-414,5	27,7
I_U [A]	677,5	825,0	-21,8
P_{Fe} [W]	71,3	-	
P_{klec} [kW]	12,2	-	
P_{Joul} [kW]	3,4	-	

Tabulka 19: Celkové srovnání stejnosměrného brzdění při různých vstupních parametrech

Parametr	400 V	200 V	400 V; 19,91 kg.m ²	5 V; 19,91 kg.m ²
M [kN.m]	-31,6	-18,3	-54,0	-0,3246
I _U [kA]	53,4	26,7	53,5	0,6775
P _{Fe} [kW]	3,6	3,4	6,0	0,0713
P _{klec} [MW]	5,2	3,1	9,3	0,0122
P _{Joul} [MW]	21,4	5,3	21,4	0,0034

Jako další proběhly simulace brzdění stejnosměrným proudem, i když simulování probíhalo při napájení ze zdroje napětí. Nejdříve byly provedeny simulace při napájecím napětí 400 V. Motor se v tomto případě zabrzdí ani ne za 0,2 s. Nicméně toto napětí je nepřiměřeně velké, což dokazuje **Obrázek 20**. Proudový graf vyobrazuje pouze fázi U, protože zbylé dvě fáze jsou zkratovány. Proud v tomto případě naroste až na nereálnou hodnotu 53,4 kA. Ztráty v železe zůstávají nízké, ale dochází k velkému nárůstu ztrát v rotorové kleci a také Jouleových ztrát ve vinutí statoru, které jsou zde vyšší na rozdíl od brzdění protiproudem, kdy tomu bylo přesně naopak. Čísla se pohybují již v desítkách MW.

Zajímavé je porovnání grafu proudu a grafu Jouleových ztrát ve vinutí statoru. Zde je vidět, že křivky se kopírují. Je tedy dokázáno, že Jouleovy ztráty jsou závislé hlavně na proudu. Tyto dva parametry také zatěžují motor i v době, kdy jsou ostatní veličiny již utlumeny spolu s otáčkami motoru.

Následovaly simulace dynamického brzdění při polovičním stejnosměrném napětí oproti minulému případu, tedy $U_{DC} = 200$ V. Je vidět, že zmenšením napájecího napětí o polovinu se brzdňý děj prodlouží přímo úměrně také o polovinu. Proud klesl na 26,7 kA, což je přesně polovina z původní hodnoty. Jouleovy ztráty klesly přibližně 4x. Naopak ztráty v železe se téměř nezměnily, takže napájecí napětí v tomto případě nehraje až takovou roli.

Změna nastává také v případě, kdy se začne uvažovat moment setrvačnosti připojeného dynamometru, což představuje **Obrázek 22**. Napájecí napětí je zde ponecháno 400 V. Ve srovnání s napájením 400 V došlo k výraznému nárůstu brzdňého momentu. Proud se prakticky nezměnil. Ovlivněny jsou ale ztráty v železe. Ztráty v rotorové kleci také narostly.

Měření probíhalo na rozdíl od simulací při napájení ze zdroje stejnosměrného proudu. Tento proud dosahoval hodnoty asi 825 A. S ohledem na předchozí simulace byly zvoleny takové parametry, aby nedošlo k poškození stroje, nicméně to vedlo k velkému prodloužení doby ubrzdění stroje, které trvalo přibližně 52 s. Napájecímu proudu 825 A odpovídá cca 5 V.

6. BRZDĚNÍ V REŽIMU GENERÁTOR

Z [6] vyplývá, že stroj, který pracuje jako generátor dosahuje větších otáček než jsou otáčky synchronní. Takových otáček stroj dosáhne díky jinému připojenému poháněcímu stroji. **Obrázek 10** ukazuje, že chod v tomto režimu znamená zápornou hodnotu skluzu. V podstatě má stroj v režimu jako motor i generátor stejný skluz i proud, jediný rozdíl je ve znaménku.

Využívá se jako rekuperační brzdění, kdy generátor vrací do sítě činný výkon, zatímco jalový výkon, díky kterému dochází k magnetizaci stroje, je odebírán.

Tento generátor může být provozován i v ostrovním provozu. V tomto případě se generátor nemagnetizuje ze sítěového výkonu, ale bere si jalový výkon z kondenzátorů.

Podle [5] se tento režim využívá u zdvínání zátěže (jeřáby při spouštění zátěže dolů). Generátorické brzdění nepatří mezi často používané typy brzdění i přesto, že se jedná o jednoduchý způsob.

Asynchronní generátory nacházejí největší využití v menších elektrárnách (větrné, vodní).

Z [7] je jasné, že takto brzděný stroj se nedá nikdy úplně utlumit.

7. ZÁVĚR

Brzdění motoru je přechodný dynamický děj, kdy dochází k velkému proudovému nárůstu, což má za následek i velké ztráty ve vinutí.

Simulace hrají důležitou roli například při návrhu elektrických strojů, neboť se pomocí nich dá přibližně zobrazit, jak bude stroj pracovat. Ale vždy se jedná jen o přiblížení k reálné situaci. Nikdy se nedají napodobit podmínky, při kterých probíhá měření v praxi. Můžou zde hrát roli ještě mechanické ztráty (ztráty třením, ztráty v ložiskách) a jiné.

Jako další proběhla simulace rozběhu motoru. Ten trvá podle simulací asi 0,5 s, přičemž před ustálením na dané hodnotě dojde ještě k malému překmitu. Tento překmit je způsoben setrvačností točícího se rotoru.

Brzdění protiproudem má tu nevýhodu, že pokud se motor po dosažení nulových otáček neodpojí od zdroje napětí, začne se točit na druhou stranu. To ukazuje **Obrázek 11**. Při brzdění protiproudem dochází k vysokému nárůstu Jouleových ztrát ve vinutí statoru a ještě vyššímu nárůstu ztrát v rotorové kleci.

Dále probíhala simulace dynamického brzdění. Tento typ brzdění pracuje jiným způsobem než brzdění protiproudem. V obou případech sice vzniká záporný moment, který motor brzdí, avšak v případě dynamického brzdění dojde k úplnému zastavení motoru, což je výhoda, protože není nutné stroj v nulových otáčkách odpojovat ze sítě. V případě napájení 400 V a 200 V byl stroj zatěžován pouze momentem setrvačnosti rotoru, takže brzdny děj trval jen krátkou dobu. Ale došlo zde k obrovskému proudovému nárůstu doprovázenému vysokými ztrátami. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru jsou zde vyšší než ztráty v kleci rotoru. Ztráty v železe se příliš nemění ale jen do doby, než se zvýší moment setrvačnosti o hodnotu dynamometru $J = 16,71 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Podobně jako změna napájecího napětí tak i změna momentu setrvačnosti ovlivňuje výsledné dynamické charakteristiky. Doba brzdění se opět prodloužila. Moment stroje prudce narostl.

Zajímavé je také porovnání ztrát. U brzdění protiproudem byly ztráty v kleci rotoru značně vyšší než Jouleovy ztráty ve vinutí statoru. Ale u dynamického brzdění naopak Jouleovy ztráty ve vinutí statoru dosahovaly vyšších hodnot než ztráty v rotorové kleci. Protože změna momentu setrvačnosti u dynamického brzdění nemá vliv na výsledný proud, proto nemůže mít vliv ani na Jouleovy ztráty, které vychází z procházejícího proudu.

Při srovnávání měřených průběhů a simulovaných bylo potřeba dbát na správné porovnávání proudů. V případě měření se jednalo o sdružené hodnoty proudů, protože motor je zapojen do trojúhelníku. V případě simulování brzdění stejnosměrným proudem při 5 V je zde ještě uvažován brzdny moment vytvářený dynamometrem, který urychluje dobu ubrzdění.

LITERATURA

- [1] Ansys: Ansys Maxwell. Ansys [online]. 2021, 2021 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [2] BÁRTA, JAN, 2012. *Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru: Simulace a optimalizace elektrických strojů*. Brno, 55 s. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57269. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.
- [3] BENDL, Jiří a Josef PELIŠ. *Elektrodynamické brzdění asynchronních strojů*. Praha: Academia, 1990. Studie ČSAV. ISBN 80-200-0185-9.
- [4] HOMOLA, Ladislav. *Elektrické stroje na střídavý proud: příručka pro techniky a studující průmyslových škol*. 4. dopl. vyd. V Praze: I.L. Kober, 1947.
- [5] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-x.
- [6] KOBRLE, Pavel a Pavel KOBRLE. *Elektrické stroje: studijní text pro prezenční a kombinované studium*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta strojního inženýrství, 2017. ISBN 978-80-7561-079-9.
- [7] *Elektrické stroje* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2021, 114 s. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/325968/mod_resource/content/2/skripta_BESB.pdf
- [8] Siemens, s. r. o., *odštěpný závod Elektromotory Frenštát* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/spice/pcmplus/app/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AM	Asynchronní motor
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symbole:

$\cos\varphi$	Účinník	(-)
f_1	Frekvence statorového proudu	(Hz)
I	Proud	(A)
I'_2	Proud rotoru přepočtený na počet závitů stator. vinutí	(A)
I_0	Proud tekoucí příčnými parametry náhradního schématu	(A)
I_1	Proud jedné fáze statoru	(A)
I_2	Proud rotorem	(A)
I_{Fe}	Proud, který kryje ztráty v železe	(A)
I_m	Magnetizační proud	(A)
I_s	Stejnoseměrný proud	(A)
J	Moment setrvačnosti	(kg.m ²)
J_s	Celkový moment setrvačnosti	(kg.m ²)
M	Moment	(N.m)
m_1	Počet fází	(-)
M_{max}	Maximální moment stroje	(N.m)
M_{mech}	Mechanický moment stroje	(N.m)
M_n	Jmenovitý moment	(N.m)
M_z	Záběrný moment	(N.m)
n	Otáčky	(ot/min)
n_1	Otáčky magn. pole statoru	(ot/min)
p	Počet pólových dvojic	(-)
P_1	Příkon	(W)
P_2	Výkon na hřídeli	(W)
P_{el}	Elektrický výkon na činných odporech	(W)
P_{Fe}	Ztráty v železe	(W)
P_{joul}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	(W)
P_{klec}	Ztráty v kleci rotoru	(W)
P_{mech}	Mechanický výkon	(W)
P_n	Jmenovitý výkon	(W)
P_δ	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru	(W)

R'_2	Odpor vinutí rotoru	(Ω)
R_1	Odpor jedné fáze statoru	(Ω)
R_{Fe}	Odpor, který reprezentuje ztráty v železe	(Ω)
R_{Rp}	Přídavný rotorový odpor	(Ω)
s	Skluz	(%)
s_A	Skluz na začátku stavu	(-)
s_B	Skluz na konci stavu	(-)
s_{max}	Maximální skluz	(%)
s_n	Jmenovitý skluz	(%)
t	Čas	(s)
U, V, W	Fáze	(-)
U'_{i20}	Indukované napětí v rotoru při zastaveném rotoru	(V)
U_1	Napětí jedné fáze statoru	(V)
U_{DC}	Stejnoseměrné napětí	(V)
U_{i1}	Indukované napětí statorového vinutí	(V)
U_s	Stejnoseměrné napětí	(V)
X'_{R20}	Rozptylová reaktance rotor. vinutí při zastaveném rotoru	(Ω)
X_m	Magnetizační reaktance	(Ω)
X_{R1}	Rozptylová reaktance statorového vinutí	(Ω)
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty ve stroji	(W)
ΔE	Energetické ztráty	(J)
ΔP_{Cu1}	Ztráty ve vinutí statoru	(W)
ΔP_{Cu2}	Ztráty ve vinutí rotoru	(W)
ΔP_d	Dodatečné ztráty	(W)
ΔP_{Fe1}	Ztráty v železe statoru	(W)
ΔP_{Fe2}	Ztráty v železe rotoru	(W)
π	Pí	(-)
ω	Úhlová rychlost rotoru	(rad/s)
ω_1	Úhlová rychlost magn. pole statoru	(rad/s)
ω_2	Úhlová rychlost magnetického pole rotoru	(rad/s)
ω_{A-B}	Úhlová rychlost pro daný stav	(-)
$\frac{R'_2}{s}(1-s)$	Elektrický výkon, který se přemění v mechanický výkon	(-)
$\frac{M_n}{M_{max}}$	Momentová přetížitelnost	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou součástí přiloženého CD.

Příloha A – Grafy

Příloha B – Naměřené hodnoty