



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Matematický model řízení dvojité napájeného asynchronního generátoru

Štěpán Otépka

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Otépka** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **465840**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrické pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Matematický model řízení dvojitě napájeného asynchronního generátoru

Název diplomové práce anglicky:

Model of Double Fed Induction Generator

Pokyny pro vypracování:

- 1) V prostředí Matlab/Simulink vytvořte matematický model dvojitě napájeného asynchronního generátoru
- 2) Model parametrujte podle asynchronního stroje a měniče v laboratoři H26
- 3) Navrhněte regulační strukturu pro řízení výkonu generátoru

Seznam doporučené literatury:

- [1] QUANG, Nguyen P. a Jörg-Andreas DITTRICH. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
[2] B.K. Bose, Modern power electronics and AC drives, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Štěpán Otépka

Poděkování

Moc rád bych poděkoval rodině za jejich dlouhodobou podporu, která mi dala svobodu investovat svůj čas do vzdělávání, které mi každý den zlepšuje život na té podivné kouli upalující závratnou rychlostí bůh ví kam. Děkuji Aničce a kamarádům za morální podporu a možnost do nekonečna společně dumat a diskutovat.

Velké poděkování patří také doc. Bauerovi za přijetí mé žádosti o vedení práce, vymyšlení skvělého tématu přesně dle mých představ a svobodného způsobu vedení. Děkuji mu také za dlouhodobé vedení katedry, během kterého vždy hájí zájmy studentů na jejichž úspěchu mu autenticky záleží.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem matematického modelu dvojitě napájeného asynchronního generátoru poháněného větrnou turbínou implementovaného v simulačním programu Matlab Simulink. Parametry asynchronního stroje a měniče odpovídají výukovému motoru v laboratoři Katedry elektrických pohonů ČVUT FEL v Praze, aby simulační model mohl sloužit jako výuková pomůcka.

V první části práce je vybudován teoretický základ větrné energie, větrné turbíny, větrné elektrárny, asynchronního stroje, napěťového měniče, dvojitě napájeného asynchronního generátoru a jeho vektorové regulace.

V druhé části práce je prezentován simulační model DFIG poháněného větrnou turbínou sestavený v prostředí Matlab Simulink a výsledky simulací včetně komentáře.

V závěru je provedeno shrnutí a okomentování práce.

Klíčová slova

dvojitě napájený asynchronní generátor, DFIG, asynchronní stroj, větrná elektrárna, větrná energie, větrná turbína, výkonový měnič, napěťový střídač, napěťový usměrňovač, vektorové řízení, vektorová regulace, Matlab, Simulink, simulační model

Abstract

This thesis deals with the design of a mathematical model of a doubly fed asynchronous generator driven by a wind turbine implemented in Matlab Simulink. The parameters of the asynchronous machine and the inverter correspond to the teaching motor in the laboratory of the Department of Electric Drives of the CTU FEL in Prague, so that the simulation model can serve as a teaching aid.

In the first part of the thesis, the theoretical basis of wind power, wind turbine, wind turbine, asynchronous machine, voltage converter, doubly fed asynchronous generator and its vector control is built.

In the second part of the paper, the simulation model of DFIG driven by wind turbine built in Matlab Simulink environment and the simulation results including comments are presented.

Finally, the paper is summarized and commented.

Keywords

doubly fed induction generator, DFIG, induction machine, wind power plant, wind energy, wind turbine, power converter, voltage inverter, voltage rectifier, vector control, Matlab, Simulink, simulation model

Obsah

1	ÚVOD	1
2	VĚTRNÁ ENERGIE	2
2.1	ÚVOD.....	2
2.2	VÝKON VĚTRU	2
2.3	VÝKON VĚTRNÉ TURBÍNY	2
2.4	KOEFICIENT VÝKONU VĚTRNÉ TURBÍNY.....	3
2.5	MOMENT VĚTRNÉ TURBÍNY.....	5
2.6	KOEFICIENT MOMENTU VĚTRNÉ TURBÍNY	5
3	VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA	7
3.1	ÚVOD.....	7
3.2	VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA S FIXNÍ RYCHLOSTÍ (FSWT = FIXED SPEED WIND TURBINE).....	8
3.3	VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA S VARIABILNÍ RYCHLOSTÍ (VSWT = VARIABLE SPEED WIND TURBINE)	9
3.4	ŘÍZENÍ PITCH	12
3.5	ŘÍZENÍ PASSIVE STALL.....	13
3.6	ŘÍZENÍ ACTIVE STALL	14
4	ASYNCHRONNÍ STROJ	15
4.1	ÚVOD.....	15
4.2	MATEMATICKÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE	15
4.2.1	<i>Předpoklady matematického modelu</i>	15
4.2.2	<i>Odvození matematického modelu</i>	16
4.2.3	<i>Clark transformace</i>	19
4.2.4	<i>Park transformace</i>	23
4.2.5	<i>Matematický model v dvouosé soustavě souřadnic</i>	24
4.3	PARAMETRY ASYNCHRONNÍHO STROJE	26
5	DFIG	29
5.1	ÚVOD.....	29
5.2	SÍŤOVÝ MĚNIČ	32
5.2.1	<i>Matematický model obvodu síťového měniče</i>	32
5.2.2	<i>Regulace síťového měniče</i>	35
5.3	ROTOROVÝ MĚNIČ	37
5.3.1	<i>Matematický model</i>	37
5.3.2	<i>Regulace rotorového měniče</i>	40
5.3.3	<i>MPPT</i>	43
6	SIMULAČNÍ MODEL V MATLAB SIMULINK	45
6.1	KOMPLETNÍ MODEL DFIG HNANÝ VĚTRNOU TURBÍNOU	45
6.2	MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY.....	45
6.3	MODEL ROTOROVÉHO MĚNIČE	45
6.3.1	<i>Model řízení rotorového měniče</i>	46
6.3.2	<i>Model MPPT</i>	47
6.3.3	<i>Výpočet úhlu transformace rotorového měniče</i>	47
6.3.4	<i>Cross terms rotorového měniče</i>	47
6.4	MODEL SÍŤOVÉHO MĚNIČE.....	47
6.4.1	<i>Model řízení síťového měniče</i>	48
6.4.2	<i>Výpočet úhlu transformace síťového měniče</i>	49
6.4.3	<i>Cross terms síťového měniče</i>	49
7	SIMULACE	50
7.1	POPIS SIMULACÍ.....	50
7.2	VÝSLEDKY SIMULACÍ	51
7.2.1	<i>Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti</i>	51

7.2.2	Činný a jalový výkon	52
7.2.3	Rotorové proudy.....	53
7.2.4	Proudy síťového měniče	54
7.2.5	Napětí a proudy statoru	56
7.2.6	U_{DC} složky d a q proudu síťového měniče	58
7.2.7	Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti.....	59
7.2.8	Účinnost a jouleovy ztráty.....	60
8	ZÁVĚR	61
9	ZDROJE.....	63
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	65

Seznam grafů

Graf 1: Příklad závislosti koeficientu výkonu na součiniteli rychloběžnosti třílísté větrné turbíny	4
Graf 2: Závislost výkonu větrné turbíny FWST na rychlosti rotace turbíny	8
Graf 3: Závislost výkonu větrné turbíny v závislosti na rotační rychlosti pro různé rychlosti větru	9
Graf 4: Závislost koeficientu výkonu na součiniteli rychloběžnosti různých typů větrných turbín	11
Graf 5: Závislost výkonu větrné turbíny FSWT s pitch control na rychlosti větru a úhlu náběhu	12
Graf 6: Závislost výkonu větrné turbíny FSWT s passive stall control na rychlosti větru	13
Graf 7: Porovnání řízení úhlu náběhu u pitch a active stall control v závislosti na rychlosti větru	14
Graf 8: Třífázové harmonické napětí	19

Seznam obrázků

Obrázek 1: Typy větrných turbín dle osy rotace a způsobu zachycení větru	7
Obrázek 2: Podélný řez větrnou elektrárnou s horizontální osou rotace	10
Obrázek 3: Schéma uspořádání vinutí statoru a rotoru asynchronního stroje	16
Obrázek 4: Rovinná tříosá soustava abc	19
Obrázek 5: Příklad zobrazení třífázového harmonického napětí v rovinné soustavě abc	20
Obrázek 6: Rovinná tříosá soustava abc s vloženou dvouosou soustavou xy	20
Obrázek 7: Odvození transformace $\alpha\beta \rightarrow dq$ (upraveny indexy zdrojového obrázku)	23
Obrázek 8: Schéma uspořádání větrné elektrárny s DFIM (Dvojité Napájený Asynchronní Stroj)	29
Obrázek 9: Čtyři kvadranty pracovních režimů DFIM	30
Obrázek 10: Schéma uspořádání DFIM (Dvojité Napájeného Asynchronního Stroje)	31
Obrázek 11: Toky činných výkonů v DFIM při podsynchronních a nadsynchronních otáčkách	31
Obrázek 12: Ideální obvod 1 fáze síťového měniče, filtru a elektrické sítě	32
Obrázek 13: Orientace prostorového vektoru síťového napětí do osy d rotující soustavy dq	34
Obrázek 14: Schéma řízení síťového měniče	36
Obrázek 15: Blokové schéma vektorové regulace GSC (síťový měnič) orientované na síťové napětí	37
Obrázek 16: Ekvivalentní obvod matematického modelu asynchronního stroje v synchronní soustavě dq	39
Obrázek 17: Orientace prostorového vektoru \mathcal{V}_s do osy d synchronně rotující soustavy dq	40
Obrázek 18: Blokové schéma kompletního vektorového řízení DFIG („v“ a „V“ značí napětí)	42
Obrázek 19: Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 0$	51
Obrázek 20: Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 1000$	51
Obrázek 21: Činný a jalový výkon – $Q_{GSC} = 0$	52
Obrázek 22: Činný a jalový výkon – $Q_{GSC} = 1000$	52
Obrázek 23: Rotorové proudy – $Q_{GSC} = 0$	53
Obrázek 24: Rotorové proudy – $Q_{GSC} = 1000$	53
Obrázek 25: Proudby síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$	54
Obrázek 26: Proudby síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$, $v_{wind}=12$ m/sec	54
Obrázek 27: Proudby síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$	55
Obrázek 28: Proudby síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$, $v_{wind}=12$ m/sec	55
Obrázek 29: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 0$	56
Obrázek 30: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 0$, $v_{wind}=12$ m/sec	56
Obrázek 31: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 1000$	57
Obrázek 32: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 1000$, $v_{wind}=12$ m/sec	57
Obrázek 33: U_{DC} , složky d a q proudy síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$	58
Obrázek 34: U_{DC} , složky d a q proudy síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$	58
Obrázek 35: Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 0$	59
Obrázek 36: Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 1000$	59
Obrázek 37: Účinnost a jouleovy ztráty – $Q_{GSC} = 0$	60
Obrázek 38: Účinnost a jouleovy ztráty – $Q_{GSC} = 1000$	60

Seznam rovnic

Rovnice 1: Výkon větru.....	2
Rovnice 2: Výkon větrné turbíny	3
Rovnice 3: Součinitel rychloběžnosti	3
Rovnice 4: Koeficient výkonu větrné turbíny	4
Rovnice 5: Teoretické maximum koeficientu výkonu (Betzovo pravidlo)	4
Rovnice 6: Výkon větrné turbíny pomocí momentu a úhlové rychlosti	5
Rovnice 7: Moment větrné turbíny na hřídeli.....	5
Rovnice 8: Vztah mezi koeficient momentu a koeficientem výkonu	5
Rovnice 9: Teoretické maximum koeficientu momentu	5
Rovnice 10: Soustava analytických rovnic pro získání C_p větrné turbíny.....	6
Rovnice 11: Napěťová rovnice jedné fáze vinutí	16
Rovnice 12: Rovnice spřaženého magnetického toku pomocí indukčnosti	17
Rovnice 13: Vektor spřažených magnetických toků	17
Rovnice 14: Matice indukčností	17
Rovnice 15: Vektor proudů.....	17
Rovnice 16: Spřažený magnetický tok fáze a statoru.....	17
Rovnice 17: Spřažený magnetický tok fáze b statoru.....	17
Rovnice 18: Spřažený magnetický tok fáze c statoru	17
Rovnice 19: Spřažený magnetický tok fáze A rotoru	17
Rovnice 20: Spřažený magnetický tok fáze B rotoru	17
Rovnice 21: Spřažený magnetický tok fáze C rotoru	17
Rovnice 22: Sudost funkce cosinus.....	18
Rovnice 23: Nulový součet proudů statoru a rotoru	18
Rovnice 24: Zjednodušení rovnice spřaženého magnetického toku.....	18
Rovnice 25: Výsledná indukčnost fáze statoru.....	18
Rovnice 26: Soustava rovnic spřažených magnetických toků statoru.....	18
Rovnice 27: Výsledná indukčnost fáze statoru.....	18
Rovnice 28: Soustava rovnic spřažených magnetických toků rotoru	18
Rovnice 29: Výsledná indukčnost fáze rotoru	18
Rovnice 30: Soustava rovnic třífázového harmonického napětí.....	19
Rovnice 31: Vektor napětí v soustavě abc.....	20
Rovnice 32: Výpočet složky x dvouosé rovinné soustavy z tříose rovinné soustavy	21
Rovnice 33: Výpočet složky y dvouosé rovinné soustavy z tříose rovinné soustavy	21
Rovnice 34: Prostorový vektor U^{xy}	21
Rovnice 35: Matice Clark transformace	21
Rovnice 36: Matice zpětné Clark transformace	21
Rovnice 37: Výkon v soustavě abc.....	22
Rovnice 38: Výkon v soustavě $\alpha\beta$	22
Rovnice 39: Matice Clark transformace včetně transformačního koeficientu	22
Rovnice 40: Matice zpětné Clark transformace včetně transformačního koeficientu.....	22
Rovnice 41: Výpočet složek transformace $\alpha\beta \rightarrow dq$	23
Rovnice 42: Výpočet složky d	23
Rovnice 43: Výpočet složky q	23
Rovnice 44: Matice Park transformace.....	24
Rovnice 45: Matice zpětné Park transformace	24
Rovnice 46: Prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s	24
Rovnice 47: Prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s	25
Rovnice 48: Prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq rotující ω_s	25
Rovnice 49: Prostorový vektor rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s	25
Rovnice 50: Poměr závitů statoru a rotoru	27
Rovnice 51: Přepočet odporu rotoru vzhledem k statoru.....	28
Rovnice 52: Přepočet rozptylové indukčnosti rotoru vzhledem k statoru	28
Rovnice 53: Elektrický skluz DFIG.....	30
Rovnice 54: Soustava napěťových rovnic obvodu síťového měniče, filtru a sítě	33
Rovnice 55: Transformace napětí síťového měniče ze soustavy abc do $\alpha\beta$	33
Rovnice 56: Složky $\alpha\beta$ prostorového vektoru výstupního napětí síťového měniče.....	33

Rovnice 57: Prostorový vektor výstupního napětí síťového měniče v soustavě $\alpha\beta$	33
Rovnice 58: Transformace napětí síťového měniče ze soustavy $\alpha\beta$ do dq	34
Rovnice 59: Složky dq prostorového vektoru výstupního napětí síťového měniče.....	34
Rovnice 60: Prostorový vektor výstupního napětí síťového měniče v soustavě dq rotující rychlostí ω_k	34
Rovnice 61: Matematický model obvodu síťového měniče, filtru a sítě v soustavě dq rotující rychlostí ω_s sítě...	35
Rovnice 62: Odvození činného výkonu sítě za filtrem	35
Rovnice 63: Odvození jalového výkonu sítě za filtrem	35
Rovnice 64: Koeficienty vektorové regulace P_g a Q_g	37
Rovnice 65: Korekční členy složek zadaných napětí dq	37
Rovnice 66: Prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s	37
Rovnice 67: Prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s	38
Rovnice 68: Prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq rotující ω_s	38
Rovnice 69: Prostorový vektor rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s	38
Rovnice 70: Složky d a q rotorového napětí v synchronní soustavě dq	39
Rovnice 71: Koeficient rozptylu stroje	39
Rovnice 72: Složky d a q prostorového vektoru statorového toku orientovaného do osy d	40
Rovnice 73: Složky d a q statorového proudu	40
Rovnice 74: Složky d a q prostorového vektoru napětí statoru	41
Rovnice 75: Činný a jalový výkon statoru pomocí složek d a q statorového proudu a napětí.....	41
Rovnice 76: Činný a jalový výkon statoru pomocí složek d a q rotorového proudu	41
Rovnice 77: Elektromagnetický moment asynchronního stroje pomocí q složky rotorového proudu.....	41
Rovnice 78: Podmínky pracovního bodu s maximálním výkonem (MPPT).....	43
Rovnice 79: Optimální moment větrné turbíny na hřídeli	43
Rovnice 80: Převodový poměr větrné turbíny a DFIG.....	44

Seznam tabulek

Tabulka 1: Štítkové parametry asynchronního stroje	26
Tabulka 2: Naměřené parametry asynchronního stroje	27
Tabulka 3: Průběh simulace $Q_{GSC} = 0$	50
Tabulka 4: Průběh simulace $Q_{GSC} = 1000$	50

1 Úvod

V posledních letech dochází k silnému pronikání obnovitelných zdrojů energie do energetické sítě. V evropském kontextu je například Německo zemí, která dlouhodobě a rapidně rozvíjí produkci elektřiny z obnovitelných intermitentních zdrojů – zejména solární a větrné elektrárny. Na konci roku 2022 byl celkový instalovaný výkon Německa 225 GW z toho 66 GW solárních elektráren a 64 GW větrných elektráren (součet onshore a offshore), což je dohromady 58 % celkového instalovaného výkonu. Každý ze zdrojů tvoří přibližně 29 % celku.¹ Výroba solární i větrné energie hraje a v příštích letech bude hrát velmi důležitou roli. Tato práce se zaměří na větrnou energii, protože středobodem práce je simulační model DFIG.

Asynchronní generátor s dvojitým napájením (DFIG = Doubly Fed Induction Generator) je speciální provedení asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou. Hlavní charakteristikou DFIG je, že rotor je připojen ke stejnému napájení jako stator ale přes dva back-to-back třífázově měniče s napěťovým meziobvodem. Stator je připojen přímo k napájení, kterým je typicky třífázová elektrická soustava.

DFIG je oblíbenou technologií používanou ve větrných elektrárnách zejména díky schopnosti dodávat do sítě elektrickou energii stálých parametrů bez ohledu na rychlost otáčení rotoru a schopnosti kontrolovaně dodávat jalový výkon do sítě přes rotor, který je se sítí spojen přes AC-DC-AC výkonový měniče. Dodávat do sítě elektrickou energii stálých parametrů je možné právě díky měničům v rotorovém obvodu, které umí měnit frekvenci i sled třífázového napájení rotoru podle měnící se rychlosti otáčení větrné turbíny spojené s rotorem stroje. DFIG tedy umí pracovat v generátorovém režimu i při podsynchronních rychlostech, což je pro větrnou elektrárnu klíčové, protože rychlost větru je proměnlivá a pro maximalizaci vyrobené elektrické energie se musí rychlost otáčení turbíny příslušně měnit tak, aby elektrárna neustále pracovala ve svém optimálním pracovním bodě. DFIG umožňuje nejenom měnit rychlost otáčení stroje podle potřeby pro maximalizaci výroby, ale současně zachovat konstantní parametry výstupní elektrické energie.

Kromě toho se jedná ekonomická, účinná a spolehlivá řešení. Má mnoho podobností s asynchronním strojem s klecí na krátko (SCIM = Squirrel Cage Induction Machine), ale díky speciálnímu napájení má natolik jedinečné vlastnosti, že si zaslouží zvláštní pozornost. Důkazem je masivní adopce tohoto stroje právě v rapidně se rozvíjejícím oboru větrných elektráren.

V první části práce se vybuduje teoretický základ větrné energie, větrných elektráren a DFIG. V praktické části se vytvoří simulační model malé větrné elektrárny s malým DFIG připojeným k elektrické síti v programu Simulink pro výukové potřeby Katedry elektrických pohonů a trakce ČVUT FEL v Praze.

¹ Installed power. Energy-Charts [online]. Mnichov, Německo: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2023 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://www.energy-charts.info/>

2 Větrná energie

2.1 Úvod

Základní princip fungování větrné turbíny spočívá ve zpomalování vzduchu proudícího přes listy rotoru, což má otáčivý účinek na rotor a představuje to přeměnu části kinetické energie vzduchu na kinetickou rotační energii rotoru.

Díky zákonu zachování hybnosti lze vysvětlit, jak větrné turbíny získávají kinetickou energii z větru jednoduchým způsobem založeným na energetických bilancích a aplikaci Bernoulliho rovnice. Na rotor neboli zařízení zachycující vítr se pohlíží jako na porézní disk, který způsobuje pokles hybnosti proudu vzduchu, který jím prochází. To má za následek tlakový skok na čelních plochách disku a vychýlení proudění vzduchu za rotorem.

Teorie hybnosti se používá k analýze chování větrných turbín a vychází z určitých předpokladů, jako je nestlačitelnost vzduchu, ustálený pohyb tekutiny a stejná hodnota sledovaných veličin v celém úseku proudové trubice vzduchu. Bernoulliho rovnice se pak používá k určení změny tlaku a rychlosti proudu vzduchu při jeho průchodu rotorem. Smyslem práce není detailní odvození rovnic větrné elektrárny, a proto se z většiny omezí na již odvozené vztahy.

2.2 Výkon větru

Výkon obsažený ve formě kinetické energie větru procházejícího plochou A rychlostí V_v lze vyjádřit vztahem

Rovnice 1: Výkon větru²

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad [W]$$

kde

P_v – výkon větru procházejícího plochou A rychlostí V_v [W],

ρ – hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$],

A – plocha kolmá na směr proudění vzduchu [m^2],

V_v – průměrná rychlost větru v ploše A [$m \cdot s^{-1}$].

2.3 Výkon větrné turbíny

Výkon větru lze chápat jako vstup, který se větrná turbína snaží co nejefektivněji přeměnit na výkon na hřídeli. Nedokonalost přeměny reflektuje koeficient výkonu C_p . Obecnou plochu A lze pro větrnou turbínu nahradit plochou kruhu.

² ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Rovnice 2: Výkon větrné turbíny³

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p \quad [W]$$

kde

P_t – výkon větrné turbíny [W],

ρ – hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$],

R – délka listu rotoru (poloměr rotoru) [m],

V_v – průměrná rychlost větru v čelní ploše rotoru [$m \cdot s^{-1}$],

C_p – koeficient výkonu [-].

2.4 Koeficient výkonu větrné turbíny

C_p je koeficient výkonu, což je bezrozměrný parametr vyjadřující, jak efektivně větrná turbína získává užitečnou mechanickou energii na své hřídeli z kinetické energie procházejícího větru. Hodnota C_p závisí na několika faktorech:

- charakteristika dané větrné turbíny,
- rychlost větru V_v ,
- úhlová rychlost turbíny Ω_t ,
- úhel náběhu β .

Charakteristika větrné turbíny je daná především geometrií listů, která je na míru navržena pro danou aplikaci, kde hlavními parametry jsou:

- vlastnosti místa instalace,
- jmenovitý výkon,
- typ řízení (*stall* nebo *pitch*),
- rotační rychlost (fixní nebo proměnlivá).

Úhel náběhu β je definován jako úhel mezi vektorem rychlosti větru a tětivou listu rotoru. Rychlost větru, rychlost rotace turbíny a poloměr rotoru se dohromady vztahují pomocí tzv. součinitele rychloběžnosti λ

Rovnice 3: Součinitel rychloběžnosti⁴

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad [-]$$

kde

λ – součinitel rychloběžnosti [-],

R – délka listu rotoru (poloměr rotoru) [m],

Ω_t – úhlová rychlost rotoru [$rad \cdot s^{-1}$],

V_v – průměrná rychlost větru v čelní ploše rotoru [$m \cdot s^{-1}$].

³ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

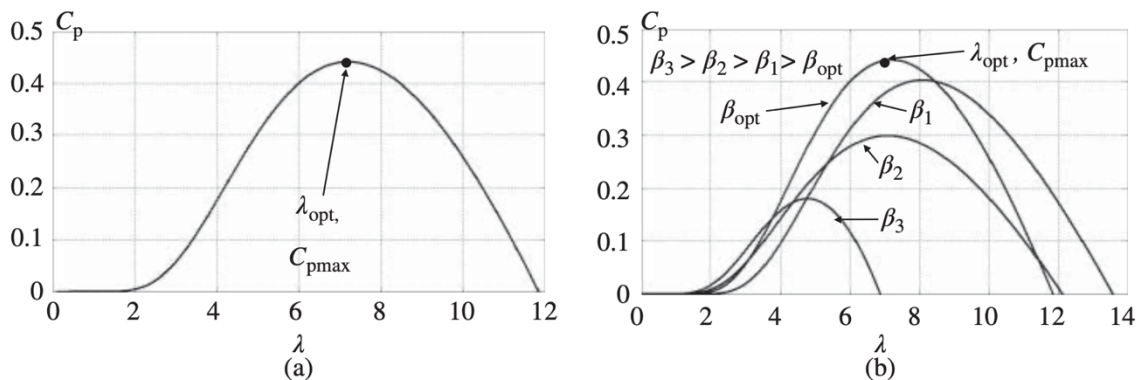
⁴ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Součin $R\Omega_t$ je obvodová rychlost konců listů rotoru. Součinitele rychloběžnosti λ je tedy prostý podíl obvodové rychlosti konce listu rotoru a průměrné rychlosti větru. Obecně lze tedy shrnout, že koeficient výkonu C_p pro danou větrnou turbínu je funkcí dvou proměnných λ a β .

Rovnice 4: Koeficient výkonu větrné turbíny⁵

$$C_p = f(\lambda, \beta) \quad [-]$$

Graf 1: Příklad závislosti koeficientu výkonu na součiniteli rychloběžnosti třílisté větrné turbíny⁶



Na výše uvedených grafech je příklad závislost koeficientu výkonu C_p na součiniteli rychloběžnosti λ a úhlu náběhu β . Graf (a) vykresluje závislost pro $\beta = \text{konstantní}$. Graf (b) ukazuje, jak se může měnit závislost se změnou úhlu náběhu β . Z grafů je zřejmé, že existují jejich globální extrémy, ve kterých funkce dosahují maxima. Z toho vyplývá, že vždy existuje optimální hodnota λ_{opt} pro kterou je C_p maximální a tedy i výkon na hřídeli turbíny je maximální. Součinitel rychloběžnosti λ je závislý na poloměru rotoru (fixní), rychlosti větru (nekontrolovatelné) a úhlové rychlosti rotoru (kontrolovatelné). Z toho vyplývá, že vhodná regulace větrné elektrárny nastavuje úhlovou rychlost rotoru turbíny podle aktuální rychlosti větru tak, aby se pracovní bod nacházel na maximu závislost $C_p = f(\lambda, \beta)$. Tomuto úkolu se věnuje část práce o tzv. MPPT neboli Maximum Power Point Tracking. Německý fyzik Albert Betz v roce 1919 odvodil teoretickou maximální hodnotu koeficientu výkonu C_p .

Rovnice 5: Teoretické maximum koeficientu výkonu (Betzovo pravidlo)⁷

$$C_{p_max} = \frac{16}{27} = 59,3 \%$$

⁵ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁶ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁷ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

2.5 Moment větrné turbíny

Rovnice momentu větrné turbíny lze získat jednoduše z již odvozené rovnice výkonu větrné turbíny prostým vydělením úhlovou rychlostí což vychází z klasické rovnice pro výkon jako součin momentu a úhlové rychlosti. Souběžně lze navíc odvodit koeficient momentu produkovaného větrnou turbínou na nízkou rychlostní hřídeli.

Rovnice 6: Výkon větrné turbíny pomocí momentu a úhlové rychlosti

$$P_t = T_t \Omega_t \quad [W]$$

Rovnice 7: Moment větrné turbíny na hřídeli⁸

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 V_v^3}{\Omega_t} C_p = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^3 V_v^2}{\lambda} C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_v^2 C_t \quad [Nm]$$

kde

T_t – moment větrné turbíny na hřídeli [Nm],

P_t – výkon větrné turbíny [W],

Ω_t – úhlová rychlost rotoru [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

R – délka listu rotoru (poloměr rotoru) [m],

V_v – průměrná rychlost větru v čelní ploše rotoru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

λ – součinitel rychloběžnosti [–],

C_p – koeficient výkonu [–],

C_t – koeficient momentu [–].

Vztah pro moment větrné turbíny je důležitý, protože pomocí něj lze například vytvořit model větrné elektrárny v prostředí Simulink viz praktická část práce.

2.6 Koeficient momentu větrné turbíny

Koeficienty výkonu C_p i momentu C_t jsou vzájemně propojeny přes součinitel rychloběžnosti λ .

Rovnice 8: Vztah mezi koeficientem momentu a koeficientem výkonu⁹

$$C_t(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad [–]$$

Obdobně i pro koeficient momentu existuje odvozený teoretický limit.

Rovnice 9: Teoretické maximum koeficientu momentu¹⁰

$$C_{t_max} = 1 = 100 \%$$

⁸ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

¹⁰ JUST, Jan. AERODYNAMIKA AXIÁLNÍCH VĚTRNÝCH TURBÍN [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-01-05].

Při modelování větrné elektrárny je výstupem bloku větrné turbíny moment na hřídeli (vyvozený větrem), který je vstupem bloku DFIG (dvojitě napájeného asynchronního generátoru) a proto je nutné znát závislost $C_t(\lambda)$ dané turbíny. Stačí i znalost závislosti $C_p(\lambda)$, protože $C_p(\lambda) = \lambda C_t(\lambda)$. Určení těchto závislostí konkrétní větrné turbíny je velmi náročné a vyžaduje buď složitý aeroelastický software nebo přesné experimentální měření. Naštěstí existuje soustava dvou analytických rovnic, pomocí kterých lze iterativně závislosti koeficientů aproximovat. Vstupy rovnice jsou konstanty k_1 až k_8 , které definují vlastnosti dané turbíny a poté proměnné λ a β .

Rovnice 10: Soustava analytických rovnic pro získání C_p větrné turbíny¹¹

$$C_p = k_1 \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6 \right) e^{\frac{k_7}{\lambda_i}}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} - \frac{k_9}{\beta^3 + 1}$$

Konstanty k_1 až k_8 lze většinou získat pouze od výrobce konkrétní větrné turbíny. Závislost $C_p(\lambda)$ se pomocí rovnic vygeneruje iterativně. Výsledkem jsou dvě datové řady – C_p a λ . Během simulace chodu větrné elektrárny se hodnota koeficientu výkonu C_p pro aktuální součinitel rychloběžnosti λ získá interpolací datových řad. Míra přesnosti a simulační náročnosti závisí na velikosti iteračního kroku. Volí se individuálně dle konkrétní aplikace.

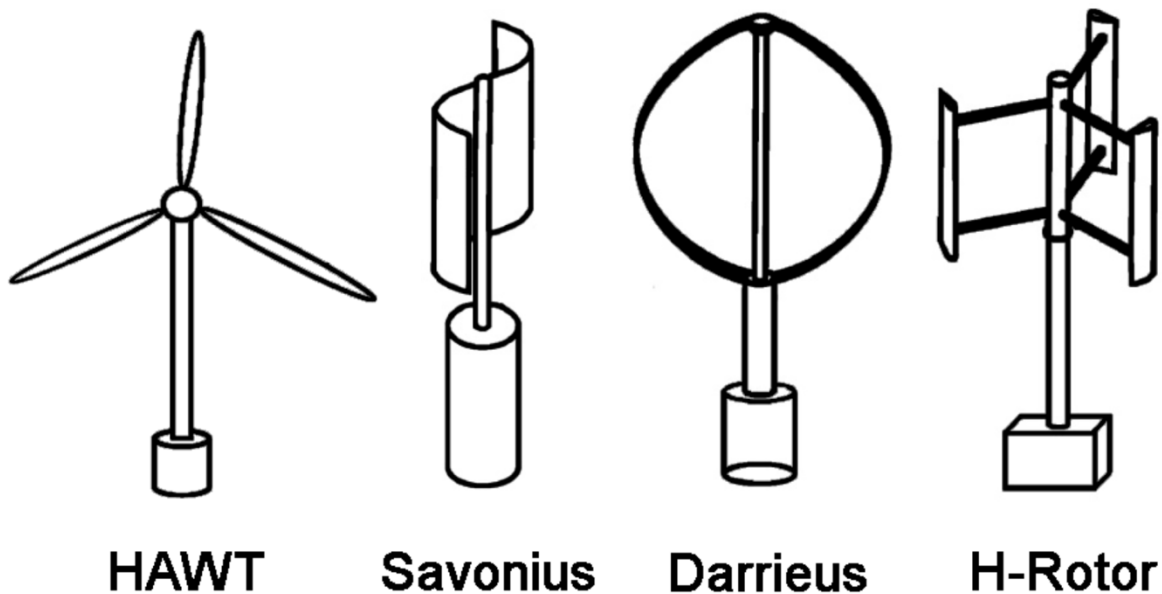
V simulačním modelu, který je hlavním výstupem této práce, byly použity konstanty k_1 až k_8 z knihy Doubly Fed Induction Machine: Modelling and Control for Wind Energy Generation (přesná citace viz poznámka pod čarou nebo Seznam zdrojů na konci práce). Autorům knihy se podařilo získat konstanty reálné větrné elektrárny s výkonem 2 MW a poloměrem rotoru 42 m. Hodnoty konstant jsou $k_1 = 0,46$; $k_2 = 151$; $k_3 = 0,58$; $k_4 = 0,002$; $k_5 = 2,14$; $k_6 = 13,2$; $k_7 = -18,4$; $k_8 = 0,02$ a $k_9 = 0,003$. V simulačním modelu se uvažuje konstantní natočení listů rotoru tedy konstantní úhel náběhu β pro jeho zjednodušení, protože zaměřením práce je samotný DFIG.

¹¹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

3 Větrná elektrárna

3.1 Úvod

Obrázek 1: Typy větrných turbín dle osy rotace a způsobu zachycení větru¹²



Existuje několik typů větrných elektráren podle orientace osy otáčení – horizontální nebo vertikální – a podle aerodynamického principu (způsobu zachycení energie z větru) na odporové a vztakové. Nejpoužívanějším typem je HAWT z anglického Horizontal Axis Wind Turbine tedy větrná turbína z horizontální osou otáčení, která využívá vztakového principu. Turbína tohoto typu má dnes téměř vždy 3 listy (výjimečně více, pouze turbíny malých výkonů v řádu jednotek kW) jejichž profil je podobný profilu křídla letadla. Důvodem je, že nejvyšší účinnosti přeměny kinetické energie vzduchu na rotační kinetickou energii turbíny nabízí právě princip obtékání listu vzduchem za vytvoření pozitivního tlakového rozdílu mezi přední a zadní částí listu, který má v důsledku otáčivý účinek na rotor. Na listy lze nahlížet jako na křídla, u kterých síla působící díky tlakovému rozdílu místo vztaku působí rotačně. Tato práce se zaměřuje výhradně na vztakovou větrnou turbínu s horizontální osou otáčení a 3 listy.

Tento typ turbíny lze dále rozdělit dle rychlosti rotace a způsobu řízení. Existují turbíny s fixní a variabilní rychlostí rotace turbíny. Technologie fixní rychlosti je nejstarším typem větrné turbíny a dnes již minimálně používaná u větších výkonů. Historicky měla opodstatnění díky své jednoduché konstrukci. Naproti tomu turbíny s variabilní rychlostí rotace dnes dominují, zejména u instalací větších výkonů, kde se větší efektivita díky schopnosti maximalizovat výrobu pro každou rychlost větru vyplatí i přes nutně komplexnější konstrukci a tím pádem větší cena. Nakonec se dělí turbíny

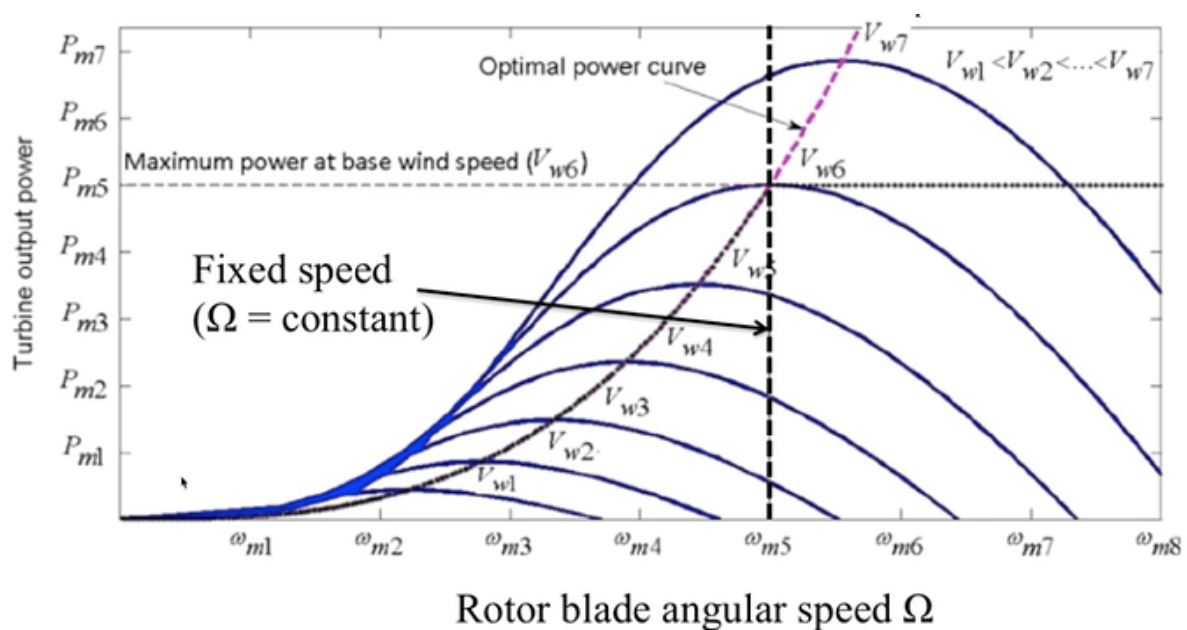
¹² KOZAK, Peter. EFFECTS OF UNSTEADY AERODYNAMICS ON VERTICAL-AXIS WIND TURBINE PERFORMANCE [online]. Illinois, 2014 [cit. 2023-01-05].

podle způsobu řízení: pitch (natáčení listů), passive stall a active stall. Pitch řízení využívá natáčení listů kolem své podélné osy pro maximalizaci výkonu, passive stall využívá fixních listů s vhodným aerodynamickým profilem, který od určené rychlosti záměrně začne automaticky svým tvarem ztrácet aerodynamickou účinnost a tím dodávaný výkon a active stall kombuje oboje, ale oproti pitch se listy při překročení jmenovitého výkonu otáčejí opačným směrem pro snížení aerodynamické účinnosti a omezení výkonu.¹³

3.2 Větrná elektrárna s fixní rychlostí (FSWT = Fixed Speed Wind Turbine)

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší typ. Protože tyto elektrárny obsahují asynchronní generátor s klecí nakrátko (nebo kroužkovou kotvou) a jsou připojeny přímo na elektrickou síť, je téměř fixní úhlová rychlost rotoru nutnou podmínkou, aby vyráběná elektřina měla parametry shodné se sítí, do které dodávají. Turbína je navržena, aby dosahovala maximálního výkonu při pouze jedné rychlosti větru a po celou dobu rotovala s téměř neměnnou rychlostí. Je to logické, protože se změnou rychlosti větru se mění součinitel rychloběžnosti λ a tím pádem se mění koeficient výkonu C_p . Vrátit C_p na původní optimální hodnotu je možné pouze změnou rychlosti otáčení rotoru, což zde není možné.

Graf 2: Závislost výkonu větrné turbíny FWST na rychlosti rotace turbíny¹⁴



Modré křivky se mění v závislosti na rychlosti větru. Fialová přerušovaná křivka protíná maxima výkonu turbíny pro každou rychlost větru V_w , každému takovému pracovnímu bodu odpovídá jiná úhlová rychlost rotoru Ω , při které je součinitel rychloběžnosti λ optimální. Přerušovaná černá čára kolmá na osu x reprezentuje fixní úhlovou rychlost Ω FSWT a průsečíky s modrými křivkami definují pracovní body pro různé rychlosti

¹³Power Control of Wind Turbines. Windpower.org [online]. Denmark, 2003 [cit. 2023-01-05].

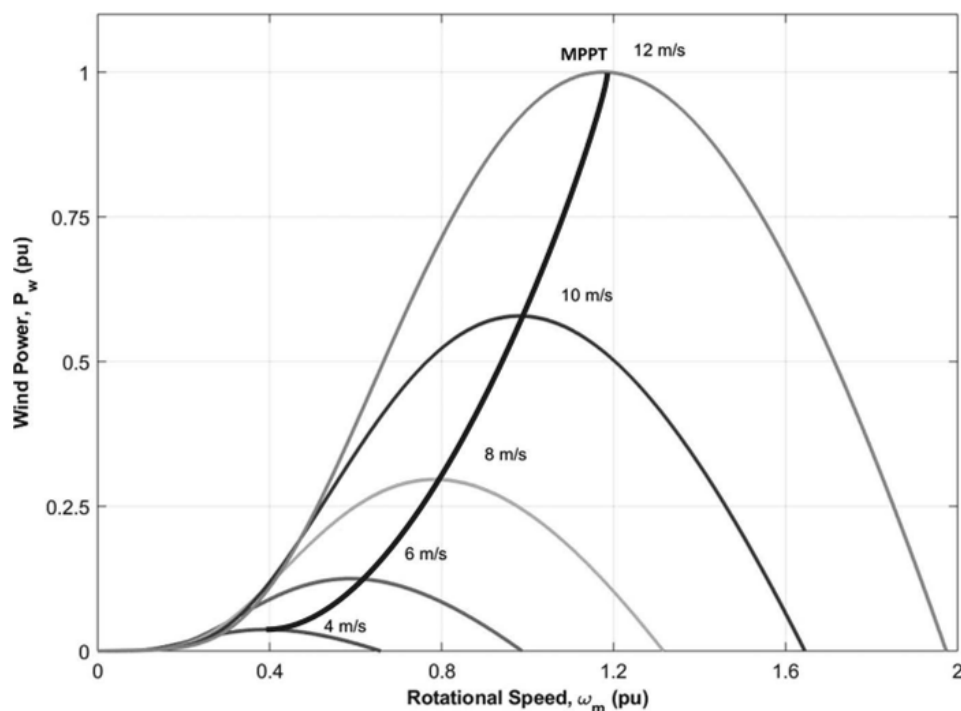
¹⁴JIANG, Yanda. Fixed speed wind turbine power curve. In: NREL Forum [online]. 2019 [cit. 2023-01-05].

větru V_v . Je zřejmé, že pouze jeden z pracovních bodů FSWT je ztotožněn s maximem výkonu. FSWT existují se všemi způsoby řízení: pitch control, passive stall control a active stall control. Přestože tedy nelze řídit rotační rychlost, lze řízeně měnit pracovní bod natáčením listů rotoru u pitch a active stall control viz další části práce. Do sítě jsou připojeny přes soft startér a kondenzátorovou baterii pro kompenzaci jalového výkonu.

3.3 Větrná elektrárna s variabilní rychlostí (VSWT = Variable Speed Wind Turbine)

Z názvu je zřejmé, že VSWT umožňuje měnit rychlost rotace turbíny podle aktuální rychlosti větru V_v pro dosažení optimální hodnoty součinitele rychloběžnosti λ a tím pádem dosažení pracovního bodu s maximálním výkonem P_t .

Graf 3: Závislost výkonu větrné turbíny v závislosti na rotační rychlosti pro různé rychlosti větru¹⁵

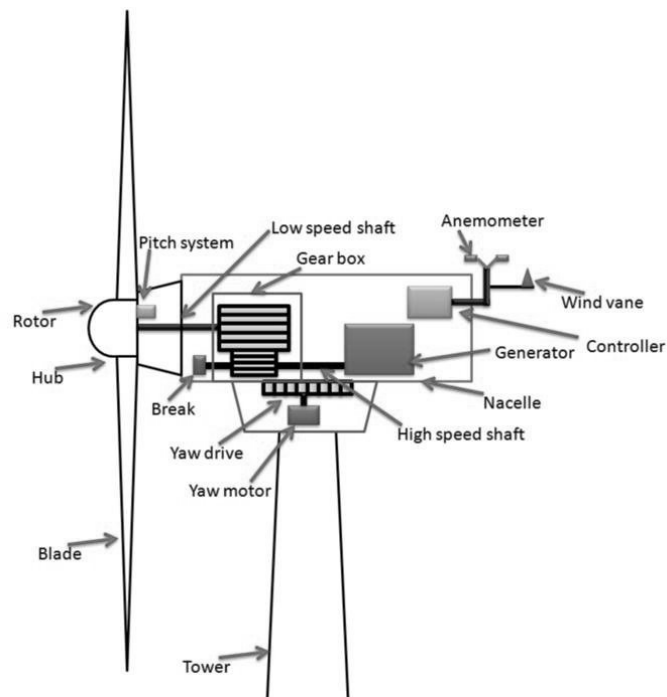


V grafu jsou vyneseny křivky závislosti výkonu turbíny na rotační rychlosti pro různé rychlosti větru. Je vidět, že rotační rychlost odpovídající maximu výkonu klesá s klesající rychlostí větru. VSWT to umí reflektovat regulací své rotační rychlosti a udržet pracovní bod v optimu. Všechny tyto optimální pracovní body na grafu spojuje křivka MPPT (Maximum Power Point Tracking). Tématu MPPT se práce ještě bude věnovat.

Schopnost měnit rychlost rotace je podmíněna přítomností AC-DC-AC měniče ve satorovém nebo rotorovém obvodu, podle typu pohonu. Přítomností je myšleno, že sator nebo rotor je spojen s elektrickou sítí přes zmíněný měnič. Lze použít asynchronní nebo synchronní stroj.

¹⁵Fixed-Speed Wind Energy Conversion Systems. Ebrary.net [online]. [cit. 2023-01-05].

Obrázek 2: Podélný řez větrnou elektrárnou s horizontální osou rotace¹⁶



Nízko rychlostní hřídel (Low speed shaft) přenáší celý výkon z rotoru větrné turbíny do převodovky (Gearbox), která je nutnou součástí elektrárny kvůli velkému rozdílu rychlost rotace větrné turbíny a rotoru elektrického generátoru (Generator). Otáčky velkých větrných turbín s výkonem vyšších stovek MW až jednotky GW se pohybují v rozmezí od 5 do 20 otáček za minutu, zatímco pracovní otáčky elektrického generátoru jsou 1000, 1500 nebo 3000 otáček za minutu. Z toho vyplývá potřeba velkého převodového poměru běžně 1/100 a přenesení výkonu v řádu MW. Na to je vhodná několikastupňová planetová převodovka, která je spojena s generátorem přes rychle otáčivou hřídel (High speed shaft) pomocí spojky (není na obrázku) a kotoučová třecí brzdy (Break). Spojka tlumí rázy od větrných poryvů. Třecí kotoučová brzda slouží jako bezpečnostní prvek – pro zamezení pohybu rotoru po dobu vypnutí elektrárny a po zastavení rotoru v případě hrozícího překročení kritické rotační rychlosti rotoru, což nastane pouze pokud selže aktivní i pasivní řízení rotoru turbíny.

Rychle otáčivá hřídel je samozřejmě pevně spojena s rotorem generátoru. Používají se dva základní typy generátorů: synchronní a asynchronní. Oba vyžadují použití AC-DC-AC měniče, aby šlo měnit rychlost rotoru turbíny a tedy i rotoru generátoru podle rychlosti větru a zároveň se zachovaly potřebné parametry generované elektrické energie dodávané do sítě.

Synchronní generátor s permanentními magnety má stator připojen do elektrické sítě přes zmíněný AC-DC-AC měnič. U asynchronního generátoru lze tento měnič zapojit taktéž mezi stator a elektrickou síť, ale také mezi rotor a elektrickou síť. Takovému

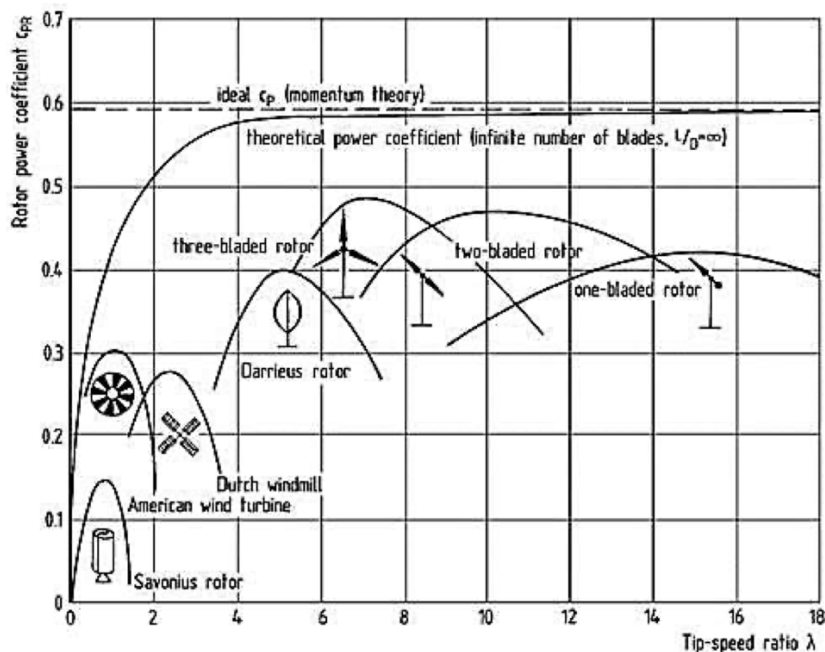
¹⁶ CASTILLO, John. Wind Turbine Components Market Estimated To Experience A Hike In Growth By 2024. TMR Blog [online]. Albany NY, 2019 [cit. 2023-01-05].

uspořádání se říká DFIG (Doubly Fed Induction Generator) v překladu Dvojitě Napájený Asynchronní Generátor. Toto uspořádání umožňuje dodávat činný a jalový výkon do sítě i z rotoru. Díky tomu lze zvýšit účinnost generátoru, protože činný výkon rotoru je využit a zároveň lze zlepšit účinník dodáním jalového výkonu do sítě, protože asynchronní generátor je charakteristický relativně vysokým odběrem jalového výkonu a to relativně nezávisle na svém zatížení. Simulační model malé větrné elektrárny s DFIG je předmětem této práce.

Zajištění ideálního natočení rotoru turbíny vůči větru zajišťuje dedikovaný elektromotor (Yaw motor), převodové ústrojí (Yaw drive), anemometr (Anemometer) a větrná lopatka (Wind vane). Všechny tyto prvky vyhodnocuje řídicí systém který následně otáčí celou strojovnu uloženou na kuličkovém ložisku. Strojovna je schována ve vnějším kompozitním plášti, kterému se říká gondola (Nacelle). Otáčí se společně se strojovnou.

Rotor je tvořen nejčastěji třemi listy, protože horizontální větrné turbíny se třemi listy nabízejí nejvyšší účinnost na základě své konstrukce a Betzova zákona, který definuje maximální teoretický konverzní faktor mezi kinetickou energií větru a rotační kinetickou energií absorbovanou listy turbíny. Každý typ konstrukce větrné turbíny, ať už se jedná o dvoulistovou nebo více listovou vertikální osu, má různé koeficienty omezené samotnou konstrukcí větrné turbíny. Jak je uvedeno v grafu, nejlepší konstrukcí podle fyzikálních zákonů je třílistový model horizontální větrné turbíny. Jedná se o celosvětově nejběžnější a nejrozšířenější konstrukci. Listy jsou vyráběny z kompozitních materiálů.¹⁷

Graf 4: Závislost koeficientu výkonu na součiniteli rychloběžnosti různých typů větrných turbín¹⁸



¹⁷ ENAIR ENERGY S.L. User Manual E70 PRO Wind Turbine [online]. Španělsko, 2022 [cit. 2023-01-05].

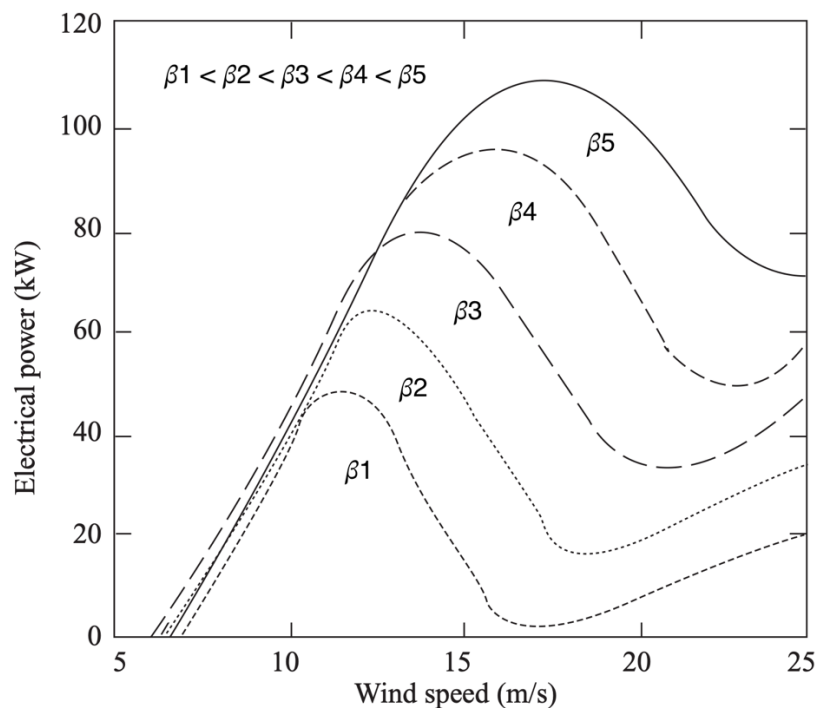
¹⁸ ENAIR ENERGY S.L. User Manual E70 PRO Wind Turbine [online]. Španělsko, 2022 [cit. 2023-01-05].

3.4 Řízení pitch

Řízení úhlu náběhu neboli pitch control využívá natáčení listů rotoru kolem své podélné osy. Listy rotoru jsou uchyceny v hlavě rotoru na otočném mechanismu, pomocí kterého řídicí systém může otáčet celými listy rotoru podle aktuální rychlosti větru. Regulátor natáčení listů vyhodnocuje několikrát za sekundu, jestli aktuální výkon turbíny odpovídá teoretickému maximálnímu výkonu pro aktuální rychlost větru a podle toho nastavuje požadavek na změnu úhlu náběhu. Mechanismus pro natáčení listů rotoru bývá hydraulický. Toto řešení významně zvětšuje komplexnost celého systému.

Výhodami jsou větší účinnost přeměny kinetické energie vzduchu na elektrickou energii, minimalizace nežádoucích vibrací, minimalizace mechanického namáhání listů a jejich uchycení v hlavě rotoru, možnost významně omezit rychlost rotace rotoru při vysokých rychlostech větru a tím udržovat výkon turbíny na maximální trvale přípustné hodnotě. Nevýhodami jsou významně větší náročnost návrhu a výroby elektrárny a tím pádem větší výrobní i provozní výdaje. Výhodnost tohoto provedení je nutno posoudit individuálně dle konkrétní aplikace.

Graf 5: Závislost výkonu větrné turbíny FSWT s pitch control na rychlosti větru a úhlu náběhu¹⁹



¹⁹ BURTON, Tony et. al. Wind Energy Handbook. Velká Británie: John Wiley, 2001. ISBN 0471489972.

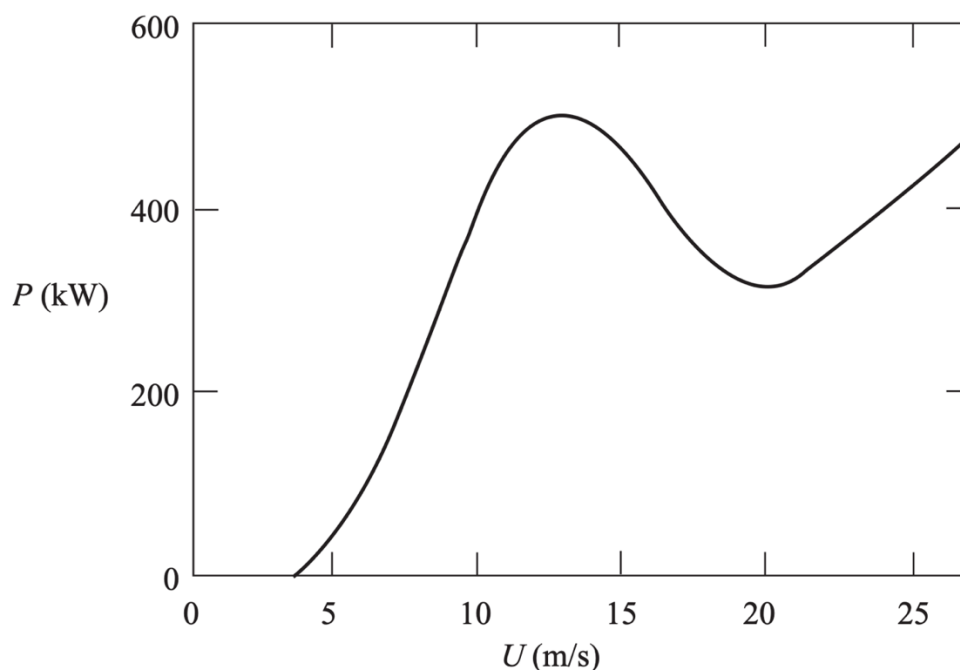
3.5 Řízení passive stall

Řízení passive stall je nejjednodušším způsobem řízení výkonu produkovaném větrnou turbínou, protože je zcela pasivní a konstrukčně nejjednodušší.

Listy rotoru jsou spojeny s hlavou rotoru fixně bez možnosti jejich natočení kolem své podélné osy jako u pitch control. Aerodynamický profil listu je navržen, aby optimálního pracovního bodu dosáhl pouze při jedné rychlosti větru V_v . Pro všechny ostatní není pracovní bod v maximu křivky $C_p = f(\lambda)$. A zároveň list záměrně od určité rychlosti větru V_v ztrácí aerodynamickou účinnost, čímž se automaticky chrání proti přetížení, díky vzniku turbulencí na straně listů odvrácených od větru, které zapříčiní odtrhávání vzduchu od listu, což snižuje rozdíl tlaků a tedy hnací sílu.

Výhodami řízení passive stall je jednoduchá konstrukce, větší spolehlivost, nižší pořizovací i provozní výdaje a jednodušší řízení. Nevýhodami jsou menší účinnost přeměny větrné energie na elektrickou, větší namáhání ve vypnutém stavu a náchylnost k škodlivým vibracím.

Graf 6: Závislost výkonu větrné turbíny FSWT s passive stall control na rychlosti větru²⁰

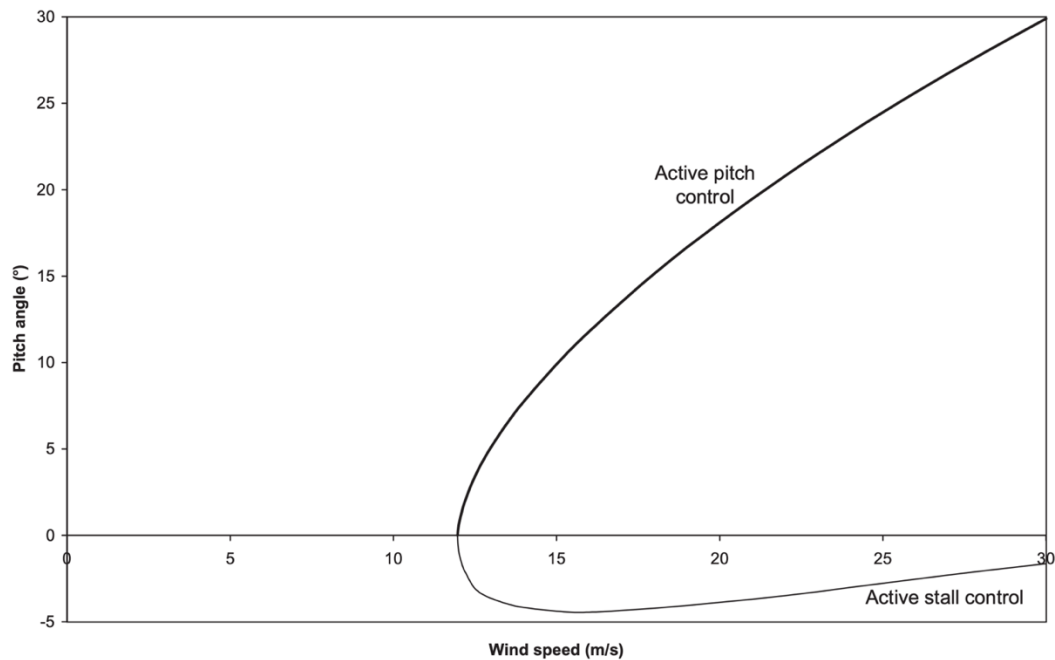


²⁰ BURTON, Tony et. al. Wind Energy Handbook. Velká Británie: John Wiley, 2001. ISBN 0471489972.

3.6 Řízení active stall

Jedná se o kombinace pitch control a passive stall control. Tedy listy rotoru se řízeně natáčí kolem své podélné osy a aerodynamický profil listů se více blíží koncepci passive stall. Velkým rozdílem oproti pitch control je, že od rychlosti větru větší než jmenovité, se listy rotoru natáčí opačným směrem. Proto bývá někdy nazývána jako negative pitch control.

Graf 7: Porovnání řízení úhlu náběhu u pitch a active stall control v závislosti na rychlost větru²¹



²¹ BURTON, Tony et. al. Wind Energy Handbook. Velká Británie: John Wiley, 2001. ISBN 0471489972.

4 Asynchronní stroj

4.1 Úvod

Asynchronní stroj je jedním z nejpoužívanějších elektrických točivých strojů, díky své jednoduchosti, vysoké efektivitě a rozumné ceně. Přestože se jedná o více než 100 let starou technologii, nadále nachází své uplatnění i v moderních produktech jako např. elektromobil Škoda Enyaq²², nebo dvojitě napájené asynchronní generátory od výrobce ABB dosahujících výkonů až 6 MW.²³

V rámci této práce bude vytvořen simulační model větrné elektrárny, která jako generátor využívá dvojitě napájený asynchronní stroj. Cílem je vytvořit budoucí pomůcku pro výuku na Katedře elektrických pohonů a trakce ČVUT FEL v Praze. Parametry asynchronního stroje použitého v modelu odpovídají parametrům výukového stroje v laboratoři Katedry. V následujících částech bude odvozen matematický model asynchronního stroje, některé speciální transformace a stanoví se všechny potřebné parametry laboratorního stroje.

4.2 Matematický model asynchronního stroje

Následující odvození matematického modelu asynchronního stroje je z velké části převzato z výukových materiálů od Ing. Pavel Kobrle, Ph.D. pro předmět Elektrické pohony a trakce vyučovaném na Fakultě elektrotechnické ČVUT v zimním semestru akademického roku 2019/20, kterému bych tímto rád poděkoval za výborně zpracované studijní materiály.²⁴

4.2.1 Předpoklady matematického modelu

Nejprve je nutné stanovit všechny předpoklady matematického modelu. Indexem malým písmenem se značí hodnoty statoru jako např. odpor vinutí fáze a statoru R_a a indexem velkým písmenem pak hodnoty rotoru jako např. odpor vinutí fáze A rotoru R_A . Následuje souhrn všech předpokladů.:

- souměrná vinutí statoru tedy shodné odpory a vlastní i vzájemné indukčnosti všech fází
 - $R_a = R_b = R_c = R_s$
 - $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{ss}$
 - $L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = M_s$
- souměrná vinutí rotoru tedy shodné odpory a vlastní i vzájemné indukčnosti všech fází
 - $R_A = R_B = R_C = R_R$
 - $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_{RR}$
 - $L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = M_R$

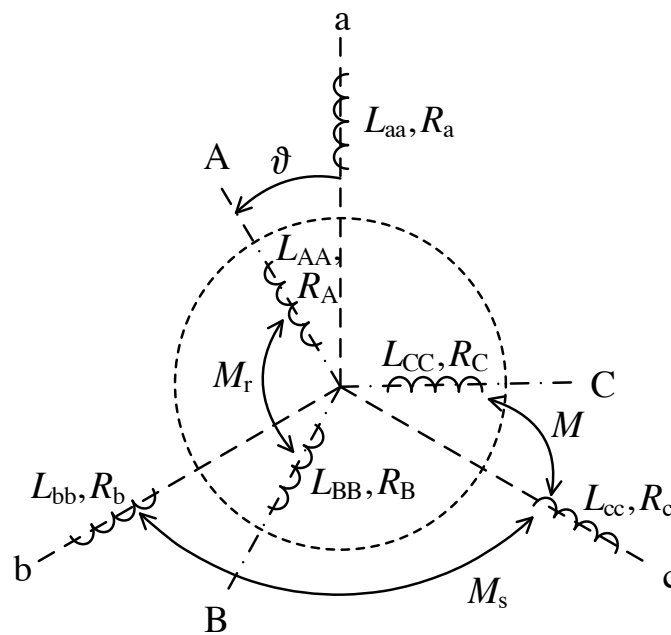
²² ŠKODA ENYAQ iV. Skoda-storyboard.com [online]. Mladá Boleslav, 2022 [cit. 2023-01-05].

²³ Doubly-fed generators. ABB.com [online]. Švýcarsko, 2023 [cit. 2023-01-05].

²⁴ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

- sinusové rozložení vinutí po obvodu, jednotlivé fáze uloženy vzájemně posunutě o $120^\circ = 2\pi/3$, M je maximum vzájemné indukčnosti statoru a rotoru
 - $L_{aA} = L_{bB} = L_{cC} = M \cos \vartheta$
 - $L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = M \cos \vartheta$
 - $L_{aB} = L_{bC} = L_{cA} = M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3})$
 - $L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} = M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3})$
 - $L_{aC} = L_{bA} = L_{cB} = M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3})$
 - $L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} = M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3})$
- konstantní šířka vzduchová mezera po obvodu
- zanedbání sycení magnetických obvodů
- zanedbání ztrát v železe

Obrázek 3: Schéma uspořádání vinutí statoru a rotoru asynchronního stroje²⁵



4.2.2 Odvození matematického modelu

Prvním krokem je obecná napěťová rovnice vinutí jedné fáze. Napětí se rovná součtu úbytku na rezistoru a indukovanému napětí změnou spřaženého magnetického toku.

Rovnice 11: Napěťová rovnice jedné fáze vinutí

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad [V], \quad k = a, b, c, A, B, C$$

Spřažený magnetický tok je definován jako vektor, jehož složky odpovídají velikostem spřažených magnetických toků v jednotlivých fázích vinutí statoru a rotoru. Získá se součinem matice indukčností a transponovaným vektorem proudů.

²⁵ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

Rovnice 12: Rovnice spřaženého magnetického toku pomocí indukčnosti

$$\vec{\psi} = \vec{L} \cdot \vec{i} \quad [Wb]$$

Rovnice 13: Vektor spřažených magnetických toků

$$\vec{\psi} = (\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c \quad \psi_A \quad \psi_B \quad \psi_C)^T$$

Rovnice 14: Matice indukčností

$$\vec{L} = \begin{pmatrix} L_{ss} & M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(-\frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta) & M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_s \cos(-\frac{2\pi}{3}) & L_{ss} & M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta) & M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(-\frac{2\pi}{3}) & L_{ss} & M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\vartheta) \\ M \cos(-\vartheta) & M \cos(-\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & M \cos(-\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & L_{rr} & M_r \cos(\frac{2\pi}{3}) & M_r \cos(-\frac{2\pi}{3}) \\ M \cos(-\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(-\vartheta) & M \cos(-\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & M_r \cos(-\frac{2\pi}{3}) & L_{rr} & M_r \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ M \cos(-\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & M \cos(-\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(-\vartheta) & M_r \cos(\frac{2\pi}{3}) & M_r \cos(-\frac{2\pi}{3}) & L_{rr} \end{pmatrix} \quad [H]$$

Rovnice 15: Vektor proudů

$$\vec{i} = (i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_A \quad i_B \quad i_C)^T \quad [A]$$

Celkem 6 výsledných napěťových rovnic (3 fáze rotoru a 3 fáze statoru) vyžaduje 36 členů v matici indukčností, protože je nutné zahrnout vzájemné vazby všech fází vinutí (dvě vazby na zbylé fáze statoru/rotoru a tři vazby na fáze rotoru/statoru). Roznásobením se získá 6 rovnic spřažených magnetických toků.

Rovnice 16: Spřažený magnetický tok fáze a statoru

$$\psi_a = i_a L_{ss} + i_b M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) + i_c M_s \cos(-\frac{2\pi}{3}) + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + i_C M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3})$$

Rovnice 17: Spřažený magnetický tok fáze b statoru

$$\psi_b = i_a M_s \cos(-\frac{2\pi}{3}) + i_b L_{ss} + i_c M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) + i_A M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_B M \cos(\vartheta) + i_C M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3})$$

Rovnice 18: Spřažený magnetický tok fáze c statoru

$$\psi_c = i_a M_s \cos(\frac{2\pi}{3}) + i_b M_s \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_c L_{ss} + i_A M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + i_B M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_C M \cos(\vartheta)$$

Rovnice 19: Spřažený magnetický tok fáze A rotoru

$$\psi_A = i_a M \cos(\vartheta) + i_b M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_c M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + i_A L_{rr} + i_B M_r \cos(\frac{2\pi}{3}) + i_C M_r \cos(-\frac{2\pi}{3})$$

Rovnice 20: Spřažený magnetický tok fáze B rotoru

$$\psi_B = i_a M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + i_b M \cos(\vartheta) + i_c M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_A M_r \cos(-\frac{2\pi}{3}) + i_B L_{rr} + i_C M_r \cos(\frac{2\pi}{3})$$

Rovnice 21: Spřažený magnetický tok fáze C rotoru

$$\psi_C = i_a M \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + i_b M \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + i_c M \cos(\vartheta) + i_A M_r \cos(\frac{2\pi}{3}) + i_B M_r \cos(-\frac{2\pi}{3}) + i_C L_{rr}$$

Roznásobené rovnice spřažených magnetických toků lze zjednodušit s využitím následujících vztahů. Součet proudů roven nule platí pro vinutí bez vyvedeného uzlu.

Rovnice 22: Sudost funkce cosinus

$$\begin{aligned}\cos(\vartheta) &= \cos(-\vartheta) \\ \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) &= \cos\left(-\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) &= \cos\left(-\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Rovnice 23: Nulový součet proudů statoru a rotoru

$$\begin{aligned}i_a + i_b + i_c &= 0 \\ i_A + i_B + i_C &= 0\end{aligned}$$

Ukázka postupného zjednodušení na rovnici fáze **a** statoru.

Rovnice 24: Zjednodušení rovnice spřaženého magnetického toku

$$\begin{aligned}\psi_a &= i_a L_{ss} + i_b M_s \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c M_s \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_a &= i_a L_{ss} + (-i_b - i_c) \frac{M_s}{2} + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_a &= i_a L_{ss} + i_a \frac{M_s}{2} + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_a &= i_a L_s + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Rovnice 25: Výsledná indukčnost fáze statoru

$$L_s = L_{ss} + \frac{M_s}{2}$$

Po zjednodušení všech šesti rovnic se získají následující soustavy rovnic, které v společně s napěťovými rovnicemi definují matematický model asynchronního stroje.

Rovnice 26: Soustava rovnic spřažených magnetických toků statoru

$$\begin{aligned}\psi_a &= i_a L_s + i_A M \cos(\vartheta) + i_B M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_b &= i_b L_s + i_A M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_B M \cos(\vartheta) + i_C M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_c &= i_c L_s + i_A M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_B M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C M \cos(\vartheta)\end{aligned}$$

Rovnice 27: Výsledná indukčnost fáze statoru

$$L_s = L_{ss} + \frac{M_s}{2}$$

Rovnice 28: Soustava rovnic spřažených magnetických toků rotoru

$$\begin{aligned}\psi_A &= i_a M \cos(\vartheta) + i_b M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_A L_R \\ \psi_B &= i_a M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_b M \cos(\vartheta) + i_c M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_B L_R \\ \psi_C &= i_a M \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_b M \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_c M \cos(\vartheta) + i_C L_R\end{aligned}$$

Rovnice 29: Výsledná indukčnost fáze rotoru

$$L_R = L_{RR} + \frac{M_r}{2}$$

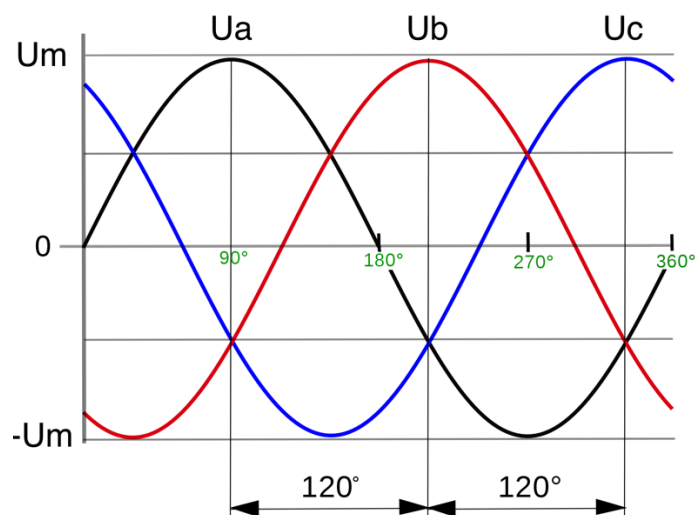
4.2.3 Clark transformace

Třífázové vinutí statorové vinutí asynchronního stroje je typicky napájeno třífázovým síťovým napětím, které lze zobrazit např. jako funkci úhlu, kdy grafem budou tři funkce sinus posunuté o 120° .

Rovnice 30: Soustava rovnic třífázového harmonického napětí

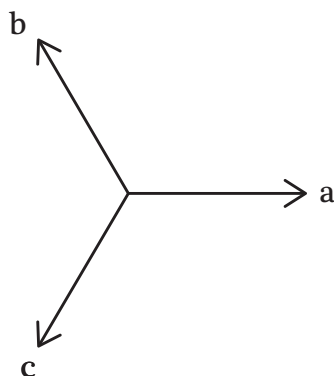
$$\begin{aligned}u_a &= U_m \sin(\omega t) \\u_b &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\u_c &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Graf 8: Třífázové harmonické napětí²⁶



Lze jej však zobrazit i v rovinné třiosé soustavě abc , která má své osy vzájemně posunuté o 120° .

Obrázek 4: Rovinná třiosá soustava abc

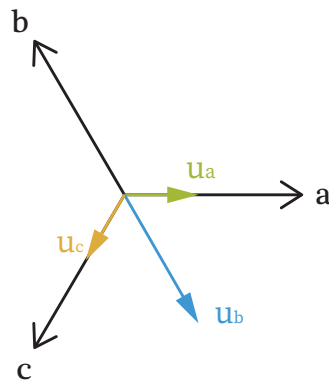


Napětí příslušné fáze pak bude zobrazeno vektorem, který leží ve stejnojmenné ose a v čase mění pouze svoji velikost od $-U_m$ do $+U_m$. Pro kladné hodnoty svírá vektor

²⁶ Mathematics of three-phase electric power. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-01-05].

napětí dané fáze s příslušnou osou úhel 0° a pro záporné hodnoty 180° . Tedy vždy je s osou rovnoběžný.

Obrázek 5: Příklad zobrazení třífázového harmonického napětí v rovinné soustavě abc



Velikosti vektorů napětí pro $\omega t = \frac{\pi}{6}$:

$$\begin{aligned} u_a &= 0,5 \cdot U_m \\ u_b &= -1,0 \cdot U_m \\ u_c &= 0,5 \cdot U_m \end{aligned}$$

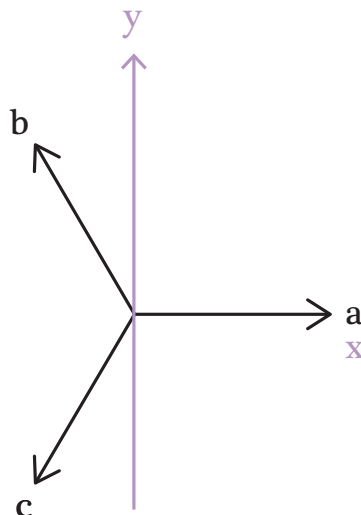
Protože v třiosé rovinné soustavě abc vystupují napětí jako vektory, lze je také vektorově sčítat a získat výsledný vektor napětí v soustavě abc. Horní index udává, v jaké souřadnicové soustavě je vektor zapsaný.

Rovnice 31: Vektor napětí v soustavě abc²⁷

$$\vec{U}^{abc} = \vec{u}_a + \vec{u}_b + \vec{u}_c \quad [V]$$

Pokud by se do třiosé soustavy vhodně vložila kartézská soustava souřadnic, šlo by výsledný vektor napětí vyjádřit pomocí pouze dvou souřadnic místo tří. Dvouosý systém se umístí tak, že se ztotožní počátky a osy a, x obou systémů.

Obrázek 6: Rovinná třiosá soustava abc s vloženou dvouosou soustavou xy



²⁷ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

Díky tomu budou průměty vektorů u_a , u_b a u_c do osy x rovny kosinu jejich úhlu s osou x a do osy y rovny sinu jejich úhlu s osou y . Výsledný vektor napětí pak lze zapsat v soustavě xy .

Rovnice 32: Výpočet složky x dvouosé rovinné soustavy z tříosé rovinné soustavy

$$u_x = u_a \cos(0^\circ) + u_b \cos(120^\circ) + u_c \cos(-120^\circ) = u_a - \frac{1}{2}u_b - \frac{1}{2}u_c$$

Rovnice 33: Výpočet složky y dvouosé rovinné soustavy z tříosé rovinné soustavy

$$u_y = u_a \sin(0^\circ) + u_b \sin(120^\circ) + u_c \sin(-120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2}u_b - \frac{\sqrt{3}}{2}u_c$$

Rovnice 34: Prostorový vektor U^{xy} ²⁸

$$\vec{U}^{xy} = (u_{ax} + u_{bx} + u_{cx}, u_{ay} + u_{by} + u_{cy}) = (u_x, u_y) = \vec{U}^{abc}$$

Výsledný vektor napětí U^{xy} se nazývá prostorový vektor. Oba vektory napětí U^{abc} a U^{xy} jsou totožné, pouze jsou vyjádřené v různých souřadnicových soustavách, které jsou vůči sobě stojící. Soustava abc je stojící vůči statoru a proto i soustava xy . V elektrotechnice se používá označení $\alpha\beta$ místo xy . Výsledný vektor napětí bude mít konstantní velikost a v čase (úhlu) bude rotovat proti směru hodinových ručiček konstantní rychlostí (platí pro harmonické napětí konstantní amplitudy a frekvence). Transformaci z tříosé do dvouosé soustavy se říká Clark transformace v symetrickém systému. Lze ji zapsat maticově.

Rovnice 35: Matice Clark transformace²⁹

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix}$$

Regulace elektrických pohonů často vyžaduje i opačnou transformaci tedy z $\alpha\beta$ do abc neboli zpětnou Clark transformaci. Protože matice (přímé) Clark transformace má nenulový determinant, existuje její inverze, která odpovídá zpětné Clark transformaci.

Rovnice 36: Matice zpětné Clark transformace³⁰

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix}$$

²⁸ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

²⁹ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

³⁰ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

Rovnice 37: Výkon v soustavě abc³¹

$$\begin{aligned}
 p_{abc} &= u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \\
 p_{abc} &= U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t + \varphi) + U_m \sin(\omega t - 120^\circ) I_m \sin(\omega t - 120^\circ + \varphi) \\
 &\quad + U_m \sin(\omega t + 120^\circ) I_m \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi) \\
 p_{abc} &= \frac{3}{2} U_m I_m \quad [W]
 \end{aligned}$$

Rovnice 38: Výkon v soustavě $\alpha\beta$ ³²

$$\begin{aligned}
 p_{\alpha\beta} &= u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta \\
 p_{\alpha\beta} &= \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t) \frac{3}{2} I_m \sin(\omega t + \varphi) - \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t) \left(-\frac{3}{2}\right) I_m \cos(\omega t + \varphi) \\
 p_{\alpha\beta} &= \frac{9}{4} U_m I_m \quad [W]
 \end{aligned}$$

Výkon v soustavě $\alpha\beta$ je 3/2krát větší než v soustavě abc a proto Clark transformace není výkonově invariantní. Vynásobením transformační matice koeficientem $K = \sqrt{2/3}$ se docílí výkonové invariantnosti. Důvodem odmocniny je transformace napětí a proudu a tedy výskyt K^2 v rovnici výkonu díky součinu napětí a proudu. Koeficient K může nabývat i jiných hodnot. Např. pro $K = 2/3$ bude velikost prostorového vektoru $U^{\alpha\beta}$ rovna amplitudě fázového napětí v soustavě abc, a protože je osa α ztotožněná s osou α , odpovídá časový průběh u_α průběhu u_a . Obecná přímá a zpětná Clark transformace včetně transformačního koeficientu K má následující maticové tvary.³³

Rovnice 39: Matice Clark transformace včetně transformačního koeficientu³⁴

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix}$$

Rovnice 40: Matice zpětné Clark transformace včetně transformačního koeficientu³⁵

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix}$$

³¹ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

³² KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

³³ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

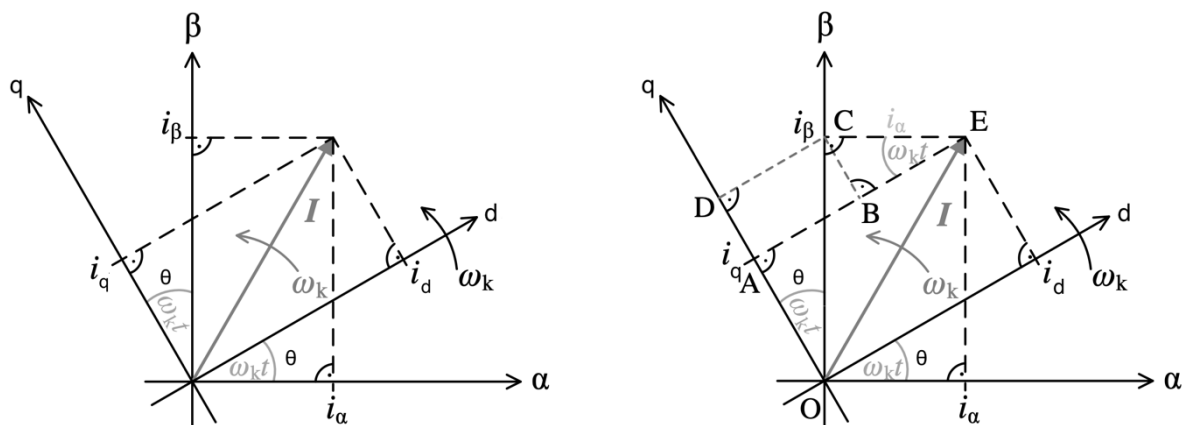
³⁴ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

³⁵ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

4.2.4 Park transformace

Existuje ještě jedna velmi užitečná transformace souřadnic. Pro regulaci elektrických strojů je velmi výhodné využít soustavu souřadnic, ve které mají regulované veličiny menší nebo dokonce nulovou frekvenci. Je prostě snadnější regulovat konstantní nebo pomalu kmitající signál. Např. třífázový harmonický proud konstantní amplitudy i frekvence vyjádřený prostorovým vektorem proudu $I^{\alpha\beta}$ v dvouosé soustavě souřadnic $\alpha\beta$ stojící vůči zemi (tedy i statoru elektrického stroje) nemění svoji velikost a rotuje konstantní rychlostí proti směru hodinových ručiček. Pokud by i soustava souřadnic $\alpha\beta$ rotovala proti směru hodinových ručiček stejnou rychlostí, prostorový vektor proudu $I^{\alpha\beta}$ by byl konstantní – neměnil by svoji velikost ani polohu.

Obrázek 7: Odvození transformace $\alpha\beta \rightarrow dq$ (upraveny indexy zdrojového obrázku)³⁶



Na obrázku výše jsou vhodně naznačeny trojúhelníky, ze kterých lze pomocí goniometrických funkcí odvodit po částech vzorce transformace do souřadnic dq .

Rovnice 41: Výpočet složek transformace $\alpha\beta \rightarrow dq$ ³⁷

$$\begin{aligned} |AB| &= |DC| = i_\beta \sin \theta \\ |AD| &= |BC| = i_\alpha \sin \theta \\ |BE| &= i_\alpha \cos \theta \\ |OD| &= i_\beta \cos \theta \end{aligned}$$

Sečtením příslušných částí se získají rovnice pro výpočet složek d a q .

Rovnice 42: Výpočet složky d

$$i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta$$

Rovnice 43: Výpočet složky q

$$i_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta$$

³⁶ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

³⁷ KOBRLÉ, Pavel. Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic. Praha: ČVUT FEL, 2019.

Obdobně jako u Clark transformace je výhodné zapsat výslednou podobu transformace do matice, která je opět čtvercová a má nulový determinant, a proto existuje její inverze, která definuje zpětnou Park transformaci.

Rovnice 44: Matice Park transformace³⁸

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}$$

Rovnice 45: Matice zpětné Park transformace³⁹

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}$$

Park transformace pouze rotuje osy soustavy $\alpha\beta$ a proto je transformace výkonově invariantní a ani nemění amplitudy transformovaných veličin. Tedy transformační koeficient stačí ošetřit u Clark transformace.

4.2.5 Matematický model v dvouosé soustavě souřadnic

S využitím Eulerova vztahu $e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)$ a odvozených transformací Clark a Park lze převést dříve odvozené rovnice matematického modelu asynchronního stroje v soustavě abc do soustavy dq rotující rychlostí ω_s vůči zemi a tedy vůči statoru. Z původní soustavy 12 rovnic (6 napěťových a 6 tokových) se stane soustava 4 rovnic prostorových vektorů: napětí statoru, napětí rotoru, spřažený tok statoru, spřažený tok rotoru.

Rovnice 46: Prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s ⁴⁰

$$\vec{U}_s^a = R_s \vec{I}_s^a + \frac{d\vec{\psi}_s^a}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s^a \quad [V]$$

$\vec{U}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s

$R_s \rightarrow$ činný odpor statorového vinutí

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového proudu v soustavě dq rotující ω_s

$\vec{\psi}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq rotující ω_s

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu statoru

³⁸ TEXAS INSTRUMENTS. Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx. Texas, USA, 1997.

³⁹ TEXAS INSTRUMENTS. Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx. Texas, USA, 1997.

⁴⁰ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

Rovnice 47: Prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s ⁴¹

$$\vec{U}_r^a = R_r \vec{I}_r^a + \frac{d\vec{\psi}_r^a}{dt} + j\omega_r \vec{\psi}_r^a \quad [V]$$

$\vec{U}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s

$R_r \rightarrow$ činný odpor rotorového vinutí

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq rotující ω_s

$\vec{\psi}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s

$\omega_r \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu rotoru

Rovnice 48: Prostorový vektor spřaženého satorového toku v soustavě dq rotující ω_s ⁴²

$$\vec{\psi}_s^a = L_s \vec{I}_s^a + L_m \vec{I}_r^a \quad [Wb]$$

$\vec{\psi}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého satorového toku v soustavě dq

$L_s \rightarrow$ výsledná indukčnost fáze satoru

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor satorového proudu v soustavě dq

$L_m \rightarrow$ magnetizační indukčnost

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu satoru

Rovnice 49: Prostorový vektor rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s ⁴³

$$\vec{\psi}_r^a = L_r \vec{I}_r^a + L_m \vec{I}_s^a \quad [Wb]$$

$\vec{\psi}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého satorového toku v soustavě dq

$L_r \rightarrow$ výsledná indukčnost fáze rotoru

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq

$L_m \rightarrow$ magnetizační indukčnost

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor satorového proudu v soustavě dq

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu satoru

⁴¹ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁴² ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁴³ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

4.3 Parametry asynchronního stroje

Předmětem práce je simulace DFIM hnaného větrnou turbínou a zapojeného do sítě. Strojem v DFIM je třífázový asynchronní stroj s kroužkovou kotvou se satorovým i rotorovým vinutím zapojeným do hvězdy. Satorové vinutí je připojeno na třífázový harmonický napájecí zdroj s frekvencí 50 [Hz] a sdruženým napětím mezi fázemi 380 [V]. Rotor je přes AC-DC-AC výkonový měnič připojen na stejný napájecí zdroj jako sator viz část o DFIM. Štítkové parametry stroje jsou následující:

Tabulka 1: Štítkové parametry asynchronního stroje

P_n	3,6 kW
I_n	11,5 A
U_n	380 V
f_n	50 Hz
$\cos\varphi_n$	0,8
n_n	935 min ⁻¹
p_p	3
u	1

- P_n je jmenovitý výkon stroje [W],
- I_n je jmenovitý fázový proud stroje (efektivní hodnota) [A],
- U_n je jmenovité sdružené napětí stroje [V],
- f_n je jmenovitá napájecí frekvence stroje [Hz],
- $\cos(\varphi_n)$ je jmenovitý účinnost stroje [-],
- n_n jsou jmenovité otáčky stroje [min⁻¹],
- p_p je počet pól párů stroje [-],
- u je poměr závitů satoru a rotoru [-].

Následující parametry stroje pro simulační model byly získány standartními zkouškami naprázdno a nakrátko, kromě momentu setrvačnosti, jehož hodnotu nelze změřit, protože simulovaný pohon ve skutečnosti neexistuje – neexistuje simulovaná větrná turbína. Jedná se (prozatím) o teoretické cvičení s cílem sestavit simulační model pro výukové účely Katedry elektrických pohonů a trakce. Model implementuje asynchronní stroj stejných parametrů jako výukový motor v laboratoři Katedry. Použité parametry větrné turbíny odpovídají zmenšené verzi reálné turbíny výkonu 2 MW. Pro potřeby této práce byl poloměr lopatek zmenšen z 42,0 m na 1,7 m, aby výkon turbíny odpovídal výkonu asynchronního stroje. Tedy skutečně existuje pouze použitý asynchronní stroj. Určení momentu setrvačnosti přepočtem z reálné větrné elektrárny o výkonu 2 MW (viz část o modelu větrné elektrárny) podle výkonu je možné, ale pro potřeby práce by přesto vyšel relativně veliký a prodlužoval by trvání simulací. Vzhledem k omezenému výpočetnímu výkonu (běžný notebook) pro simulace byl zvolen menší moment setrvačnosti odpovídající asynchronnímu stroji s výkonem 12 kW, modelovaném na předmětu EPT1 v zimním semestru akademického roku

2021/22, u kterého byl moment setrvačnosti zjištěn doběhovou metodou. Tedy dostatečně malá hodnota pro přijatelné doby simulací, ale stále větší hodnota než pouze moment setrvačnosti samotného asynchronního stroje z laboratoře s výkonem 3,6 kW. Menší moment setrvačnosti se kromě kratších dob přechodů mezi ustálenými stavy může projevit větší kmitavostí některých simulovaných veličin kvůli menší setrvačnosti hmot a tedy menšímu stabilizujícímu vlivu. Pokud bude soustava dosahovat přijatelných vlastností i s malým momentem setrvačnosti, s realistickou hodnotou by byla kvalita regulace pravděpodobně větší. Parametry stroje jsou:

Tabulka 2: Naměřené parametry asynchronního stroje

R_1	1,688 Ω
R_2	3,500 Ω
$L_{1\sigma}$	11,96 mH
$L_{2\sigma}$	12,98 mH
L_m	173,50 mH
L_1	185,46 mH
L_2	186,48 mH
J	0,4 kg·m ²

- R_1 je odpor statorového vinutí [Ω],
- R_2 je odpor rotorového vinutí [Ω],
- $L_{1\sigma}$ je rozptylová indukčnost statoru [H],
- $L_{2\sigma}$ je rozptylová indukčnost rotoru [H],
- L_m je magnetizační indukčnost [H],
- L_1 je indukčnost statoru [H],
- L_2 je indukčnost rotoru [H],
- J je moment setrvačnosti [kg·m²].

Model asynchronního stroje použitý v simulačním modelu v programu Matlab Simulink (viz praktická část práce) pracuje s parametry rotoru přepočtenými vzhledem ke statoru. Následující rovnice definují jak přepočet provést. Z rovnic vychází, že pro poměr závitů statoru a rotoru $u = 1$ jsou přepočtené hodnoty nezměněné, což je případ laboratorního stroje.

Rovnice 50: Poměr závitů statoru a rotoru

$$u = \frac{N_s}{N_r} \quad [-]$$

u – poměr závitů statoru a rotoru

N_s – počet závitů statoru

N_r – počet závitů rotoru

Rovnice 51: Přepočítání odporu rotoru vzhledem k statoru⁴⁴

$$R_r = R'_r u^2 \quad [\Omega]$$

R_r – odpor rotoru vztažený ke statoru

R'_r – odpor rotoru

u – poměr závitů statoru a rotoru

Rovnice 52: Přepočítání rozptylové indukčnosti rotoru vzhledem k statoru⁴⁵

$$L_{\sigma r} = L'_{\sigma r} u^2 \quad [\Omega]$$

$L_{\sigma r}$ – rozptylová indukčnost rotoru vztažená ke statoru

$L'_{\sigma r}$ – rozptylová indukčnost rotoru

u – poměr závitů statoru a rotoru

⁴⁴ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

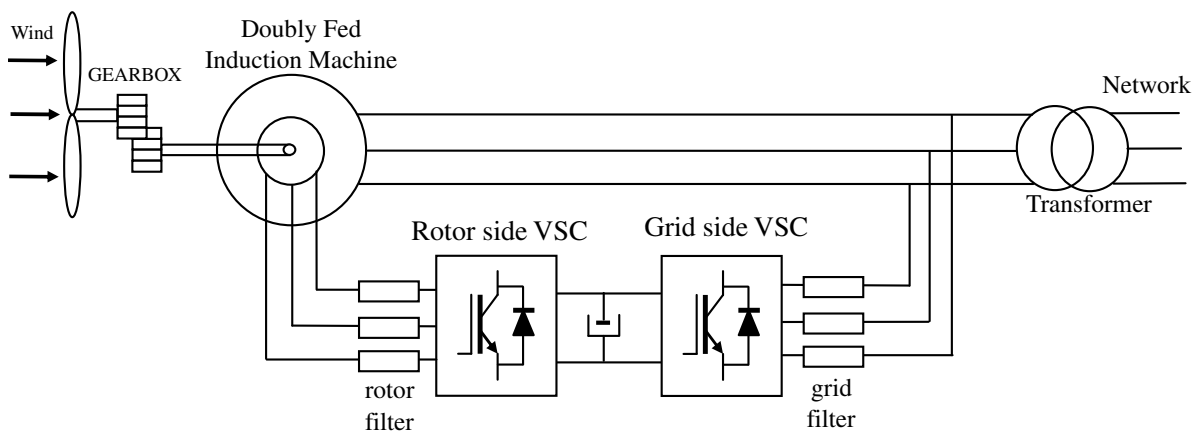
⁴⁵ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

5 DFIG

5.1 Úvod

Dvojitě napájený asynchronní generátor (DFIG = Doubly Fed Induction Generator) je asynchronní generátor s kroužkovou kotvou, která je připojená k napájení (typicky elektrická síť) přes AC-DC-AC výkonový měnič a statorovým vinutím přímo připojeným ke stejnému napájení. Díky obousměrnému výkonovému měniči může asynchronní stroj pracovat v motorovém i generátorovém režimu v podsynchronních i nadsynchronních úhlových rychlostech a také dodávat činný P i jalový Q výkon do napájení přes rotor. Umístění měniče v rotorovém obvodu umožňuje použít výrazně menší a levnější měnič, protože přes rotor teče max cca 25 % jmenovitého výkonu.

Obrázek 8: Schéma uspořádání větrné elektrárny s DFIM (Dvojitě Napájený Asynchronní Stroj)⁴⁶



DFIM je zkratka pro Doubly Fed Induction Machine neboli Dvojitě Napájený Asynchronní Stroj. DFIM a DFIG lze považovat za téměř synonyma. Název DFIM klade větší důraz na schopnost motorického i generátorového režimu. Zkoumané uspořádání umí oba pracovní režimy, přesto je používán název DFIG, protože hlavním smyslem aplikace je generátorový režim.

Schopnost práce v generátorovém a motorovém režimu v podsynchronních i nadsynchronních úhlových rychlostech rotoru zajišťuje rotorový měnič, který vhodně mění amplitudu a frekvenci svého výstupního napětí, kterým napájí rotorový obvod. S poklesem mechanické úhlové rychlosti rotoru do podsynchronní oblasti lze zvýšením frekvence výstupního napětí střídače docílit zvýšení elektrické úhlové rychlosti proudu/napětí v rotoru tak, aby součet elektrické úhlové rychlosti rotoru a elektrické úhlové rychlosti proudu/napětí rotoru byl větší než elektrická úhlová rychlost statoru a pohon tedy pracoval v generátorovém režimu přesto, že mechanická úhlová rychlost rotoru (a tedy i elektrická úhlová rychlost rotoru) je podsynchronní. Ve své podstatě rotorový měnič umožňuje měnit „elektrický skluz“, který si autor této práce definoval sám pro vlastní potřebu pochopení principu řízení viz následující rovnice, protože

⁴⁶ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

definici nenašel ve studované literatuře, což samozřejmě vůbec neznamená, že pojem již není běžně používán a definovaný někým jiným.

Rovnice 53: Elektrický skluz DFIM

$$s_e = \frac{\omega_s - (\omega_r + \omega_m)}{\omega_s} \quad [-]$$

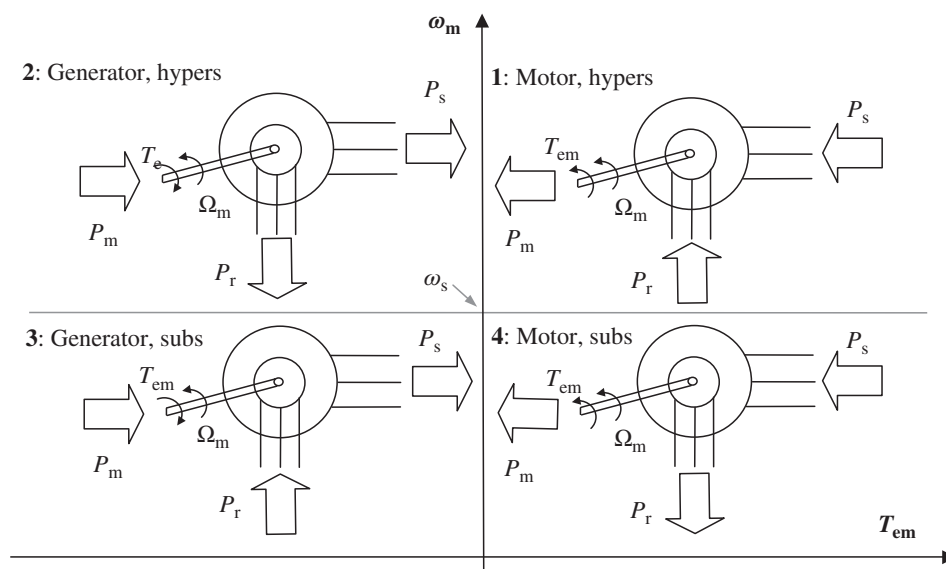
ω_s – elektrická úhlová rychlost proudu/napětí statoru

ω_r – elektrická úhlová rychlost proudu/napětí rotoru

ω_m – elektrická úhlová rychlost rotoru

Pracovní bod DFIM nastavit nezávisle (samozřejmě neplatí absolutně) na elektrické úhlové rychlosti rotoru ω_m (nebo ekvivalentně na mechanické úhlové rychlosti rotoru Ω_m , protože jsou vzájemně pevně svázány přes počet pól párů p_p vztahem $\Omega_m = p_p \omega_m$). Reálný pracovní rozsah mechanické úhlové rychlosti DFIM bývá 50 až 150 % synchronní otáček.⁴⁷

Obrázek 9: Čtyři kvadranty pracovních režimů DFIM⁴⁸



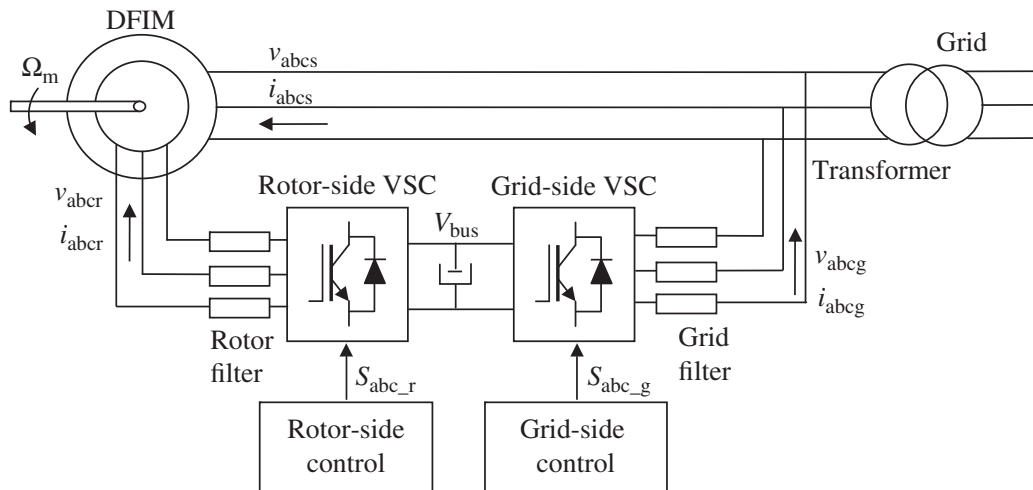
Schopnost DFIM dodávat činný P i jalový Q výkon do zdroje napájení (typicky elektrická síť) přes rotor zajišťuje síťový měnič ve spolupráci s rotorovým měničem. Síťový měnič udržuje stabilní hodnotu DC napětí meziobvodu, kterým zajišťuje stabilní tok činného výkonu oběma směry – v podsynchronních otáčkách rotor odeberá činný výkon z napájení, v nadsynchronních naopak dodává. Díky možnosti řídit jalový výkon lze optimalizovat účinek celého pohonu, což je pro asynchronní stroj velmi výhodné, protože je magnetizován z napájecího zdroje, což je v kontextu DFIM většinou

⁴⁷ M. WILAMOWSKI, Bogdan a J. David IRWIN. Power Electronics and Motor Drives: The Industrial Electronics Handbook. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-138-07747-8.

⁴⁸ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

elektrická síť, a provozovatelé sítě mohou klást požadavky na kompenzaci odebraného jalového výkonu.

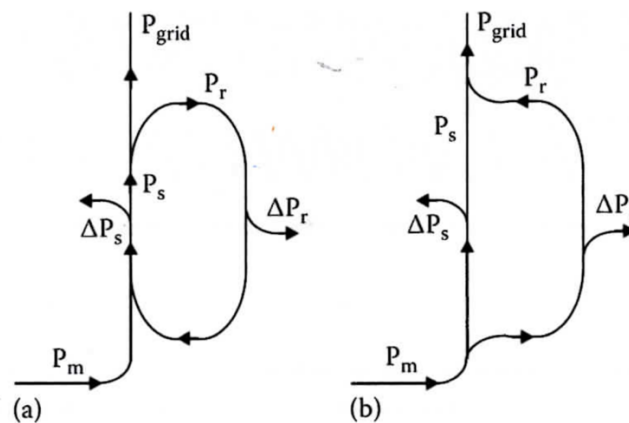
Obrázek 10: Schéma uspořádání DFIM (Dvojitě Napájeného Asynchronního Stroje)⁴⁹



Další velkou výhodou umístění výkonového měniče AC-DC-AC do rotorového obvodu místo statorového je výrazně menší výkon, na který musí být dimenzován. Přes rotor totiž poteče max pouze cca 25 až 30 % jmenovitého výkonu stroje.⁵⁰ Díky tomu lze použít menší a levnější měnič.

Za zmínku stojí přehled toků výkonu při podsynchronních a nadsynchronních otáčkách. Mění se totiž směr toku výkonu rotoru. Při podsynchronních otáčkách rotorový obvod činný výkon P_r odebírá z činného výkonu P_s dodávaného statorem. Činný výkon dodaný do sítě P_{grid} je tedy ponížen mimo jouleových ztrát také o činný výkon rotoru P_r . Při nadsynchronních otáčkách naopak rotor činný výkon P_r dodává do sítě.

Obrázek 11: Toky činných výkonů v DFIM při podsynchronních a nadsynchronních otáčkách⁵¹



⁴⁹ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁵⁰ M. WILAMOWSKI, Bogdan a J. David IRWIN. Power Electronics and Motor Drives: The Industrial Electronics Handbook. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-138-07747-8.

⁵¹ M. WILAMOWSKI, Bogdan a J. David IRWIN. Power Electronics and Motor Drives: The Industrial Electronics Handbook. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-138-07747-8.

P_{grid} – výkon dodávaný do sítě
 P_r – výkon dodávaný/odebíraný rotorem
 ΔP_s – jouleovy ztráty ve statoru
 P_s – výkon dodávaný státorem
 ΔP_r – jouleovy ztráty v rotoru
 P_m – mechanický výkon na hřídeli DFIM

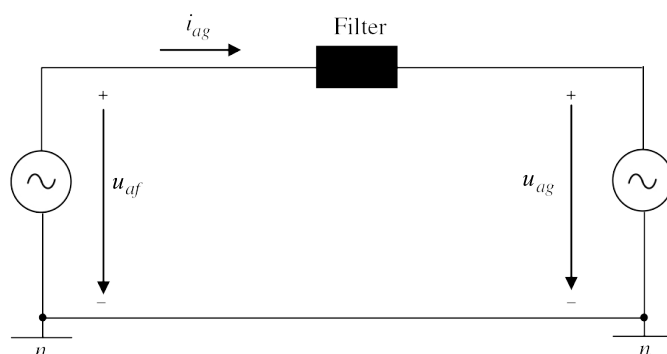
5.2 Síťový měnič

V této části se popíše síťový měnič spojený s elektrickou sítí přes L filtr na jedné straně a s DC meziobvodem na druhé straně. Úkolem síťového měniče je udržovat konstantní DC napětí kondenzátoru v meziobvodu výkonového AC-DC-AC měniče v rotoru DFIM, zajistit nerušený tok činného výkonu a regulovat tok žádaného jalového výkonu. Síťový měnič je třífázový dvouúrovňový napěťový střídač nebo usměrňovač, podle aktuální potřeby – tedy obousměrný měnič – řízený sinusovou pulsně-šířkovou modulací (PWM). Síťový filtr je obyčejný L filtr na fázi. Síťové napětí je standardní třífázové harmonické konstantní amplitudy a frekvence.

5.2.1 Matematický model obvodu síťového měniče

Idealizovaný obvod síťového měniče je tvořen zdrojem napětí proměnlivé amplitudy a frekvence modelující měnič, indukčností a parazitním odporem modelující pasivní L filtr a zdrojem harmonického napětí konstantní amplitudy i frekvence modelující síť.

Obrázek 12: Idealizovaný obvod 1 fáze síťového měniče, filtru a elektrické sítě⁵²



Na základě idealizovaného obvodu výše lze sestavit rovnici pro výstupní napětí síťového měniče fáze a. A pro fáze b a c budou rovnice shodné kromě indexů.

⁵² ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Rovnice 54: Soustava napěťových rovnic obvodu síťového měniče, filtru a sítě⁵³

$$\begin{aligned}u_{af} &= R_f i_{ag} + L_f \frac{di_{ag}}{dt} + u_{ag} \\u_{bf} &= R_f i_{bg} + L_f \frac{di_{bg}}{dt} + u_{bg} \\u_{cf} &= R_f i_{cg} + L_f \frac{di_{cg}}{dt} + u_{cg}\end{aligned}$$

u_{af}, u_{bf}, u_{cf} – výstupní napětí síťových měničů [V]

R_f – parazitní odpor síťového filtru [Ω]

i_{af}, i_{bf}, i_{cf} – výstupní proudy síťových měničů [A]

L_f – indukčnost síťového filtru [H]

u_{ag}, u_{bg}, u_{cg} – napětí elektrické sítě [V]

Protože bude využívána vektorová regulace, je nutné transformovat napětí ze soustavy abc do rovinné stojící dvouosé soustavy $\alpha\beta$, ve které se ze soustavy napětí stane prostorový vektor. Regulace pracuje se složkami prostorového vektoru. Pomocí Clark transformace se transformuje ze soustavy abc do $\alpha\beta$.

Rovnice 55: Transformace napětí síťového měniče ze soustavy abc do $\alpha\beta$

$$\begin{pmatrix} u_{\alpha f} \\ u_{\beta f} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{af} \\ u_{bf} \\ u_{cf} \end{pmatrix}$$

Po transformaci se získají dvě složkové rovnice, které jsou vlastně totožné s původními v soustavě abc kromě indexů. Lze je zapsat jednou rovnicí prostorového vektoru v soustavě statoru neboť soustava $\alpha\beta$ je stojící vůči statoru.

Rovnice 56: Složky $\alpha\beta$ prostorového vektoru výstupního napětí síťového měniče⁵⁴

$$\begin{aligned}u_{\alpha f} &= R_f i_{\alpha g} + L_f \frac{di_{\alpha g}}{dt} + u_{\alpha g} \\u_{\beta f} &= R_f i_{\beta g} + L_f \frac{di_{\beta g}}{dt} + u_{\beta g}\end{aligned}$$

Rovnice 57: Prostorový vektor výstupního napětí síťového měniče v soustavě $\alpha\beta$ ⁵⁵

$$\vec{u}_f^s = R_f \vec{i}_g^s + L_f \frac{d\vec{i}_g^s}{dt} + \vec{u}_g^s$$

Po Clark transformaci je nutné aplikovat Park transformaci pro převod do soustavy dq rotující obecnou úhlovou rychlostí ω_k , která se následně zvolí tak, aby se výsledný matematický model co nejvíce zjednodušil.

⁵³ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁵⁴ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁵⁵ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Rovnice 58: Transformace napětí síťového měniče ze soustavy $\alpha\beta$ do dq

$$\begin{pmatrix} u_{df} \\ u_{qf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{\alpha f} \\ u_{\beta f} \end{pmatrix}$$

Transformací se opět u všech členů změní indexy, ale navíc přibude člen respektující napětí indukované druhou složkou proudu přes indukčnost filtru.

Rovnice 59: Složky dq prostorového vektoru výstupního napětí síťového měniče⁵⁶

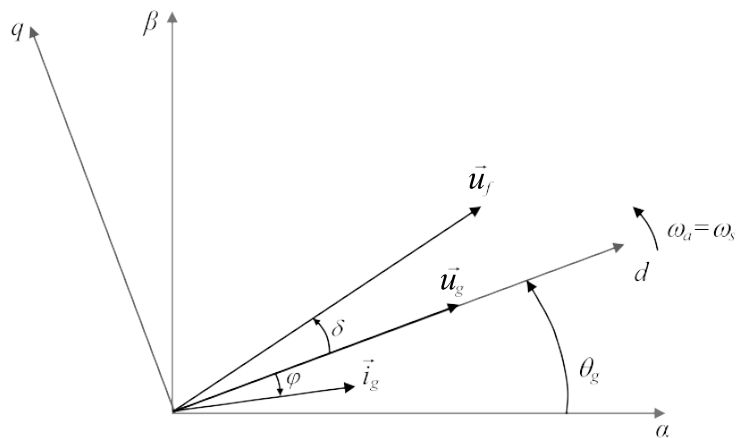
$$\begin{aligned} u_{df} &= R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + u_{dg} - \omega_k L_f i_{qg} \\ u_{qf} &= R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + u_{qg} + \omega_k L_f i_{dg} \end{aligned}$$

Rovnice 60: Prostorový vektor výstupního napětí síťového měniče v soustavě dq rotující rychlostí ω_k ⁵⁷

$$\vec{u}_f^k = R_f \vec{i}_g^k + L_f \frac{d\vec{i}_g^k}{dt} + \vec{u}_g^k + j\omega_k L_f \vec{i}_g^k$$

Ve výsledné rovnici prostorového vektoru je zvolena soustava dq rotující obecnou úhlovou rychlostí ω_k . Pro regulaci měniče je výhodné zvolit úhlovou rychlost ω_s síťového napětí, protože prostorový vektor síťového napětí se ztotožní s osou d . Díky tomu složka d síťového napětí se stane konstantou $u_{dg} = \text{konstantní}$ a q složka bude nulová $u_{qg} = 0$.

Obrázek 13: Orientace prostorového vektoru síťového napětí do osy d rotující soustavy dq ⁵⁸



Záměnou ω_s za ω_k a vynulováním členu v_{qg} se získají výsledné rovnice složek d a q výstupního napětí síťového měniče ve zjednodušeném tvaru.

⁵⁶ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁵⁷ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁵⁸ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Rovnice 61: Matematický model obvodu síťového měniče, filtru a sítě v soustavě dq rotující rychlostí ω_s sítě⁵⁹

$$u_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + u_{dg} - \omega_s L_f i_{qg}$$

$$u_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_f i_{dg}$$

Kromě zjednodušení napěťových rovnic zvolená orientace soustavy dq výrazně zjednodušuje regulaci činného P a jalového Q výkonu. Je to patrné z rovnic pro výpočet P a Q.

Rovnice 62: Odvození činného výkonu sítě za filtrem⁶⁰

$$P_g = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\vec{u}_g \cdot \vec{i}_g^*\} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{(u_{dg} + ju_{qg}) \cdot (i_{dg} - ji_{qg})\} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{(u_{dg}i_{dg} + u_{qg}i_{qg}) + j(u_{qg}i_{dg} - u_{dg}i_{qg})\}$$

$$P_g = \frac{3}{2} (u_{dg}i_{dg} + u_{qg}i_{qg})$$

$$P_g = \frac{3}{2} u_{dg}i_{dg}$$

Rovnice 63: Odvození jalového výkonu sítě za filtrem⁶¹

$$Q_g = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{u_g \cdot \vec{i}_g^*\} = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{(u_{dg} + ju_{qg}) \cdot (i_{dg} - ji_{qg})\} = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{(u_{dg}i_{dg} + u_{qg}i_{qg}) + j(u_{qg}i_{dg} - u_{dg}i_{qg})\}$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (u_{qg}i_{dg} - u_{dg}i_{qg})$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} u_{dg}i_{qg}$$

Při pohledu na odvozené vztahy vyplývá, že umožňují skutečně nezávislou regulaci činného P a jalového Q výkonu síťového měniče za filtrem. Jedinou společnou proměnnou obou vzorců je člen u_{dg} , tedy d složka síťového napětí, které má konstantní amplitudu a frekvenci a tím pádem i konstantní velikost prostorového vektoru, a protože je vektor ztotožněn s osou d , která rotuje úhlovou rychlostí síťového napětí ω_s , bude i amplituda $u_{dg} =$ konstantní. Díky tomu závisí P_g pouze na i_{dg} a Q_g pouze na i_{qg} .

5.2.2 Regulace síťového měniče

V této části se částečně odvodí a popíše způsob regulace síťového měniče, která je založena na vektorové regulaci. S regulovanými veličinami je pracováno v rotující soustavě souřadnic dq. Úhlová rychlost soustavy dq odpovídá úhlové rychlosti síťového napětí ω_s , jehož prostorový vektor je tak ztotožněn s osou d . Díky této konfiguraci je oddělená regulace činného výkonu P a jalového výkonu Q síťového měniče za filtrem. Výsledkem je schopnost udržovat stabilní hodnotu DC napětí

⁵⁹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁶⁰ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

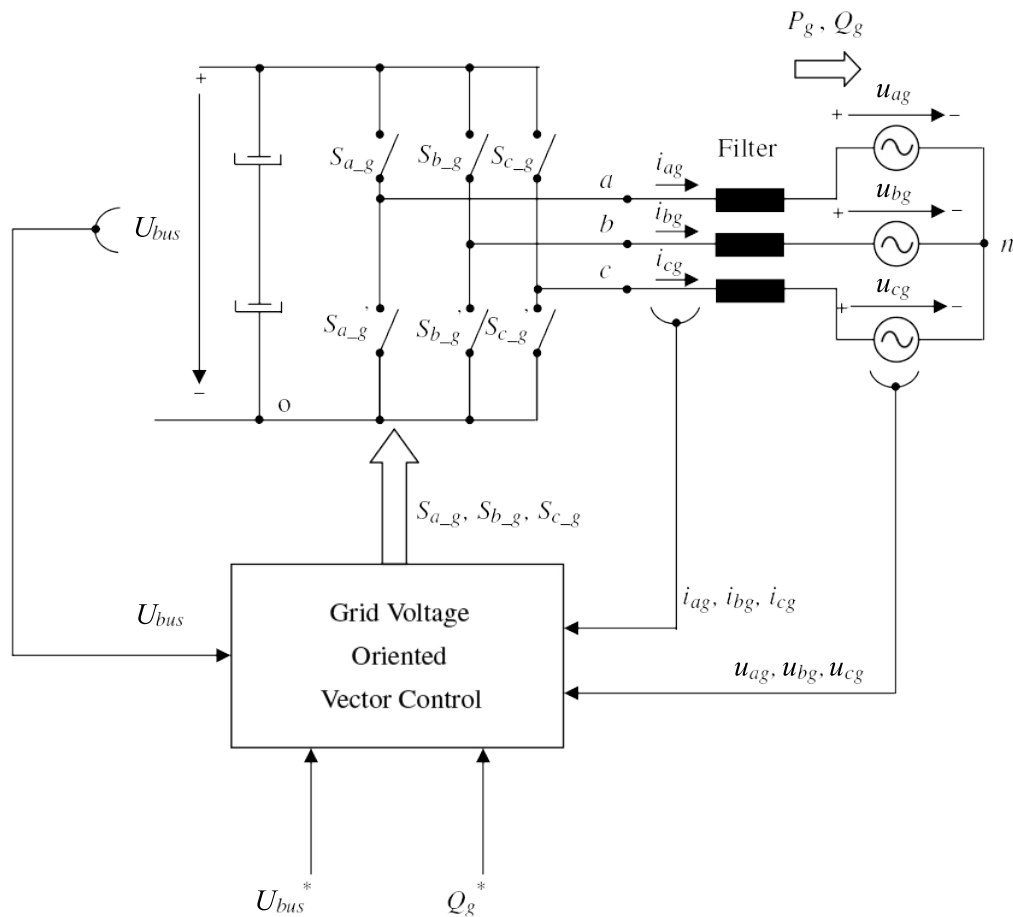
⁶¹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

kondenzátoru v meziobvodu měničů, zajistit nerušený tok činného výkonu a regulovat přenos jalového výkonu ze síťového měniče do sítě pro optimalizaci účinníku DFIG.

Použitým měničem je standartní třífázový napěťový dvouúrovňový měnič (střídač/usměřovač podle režimu provozu). Měnič je řízený šesti logickými pulsními signály s hodnotami 0 nebo 1, které spínají nebo rozepínají šest spínačů. Řídící signály jsou produkovány tak, aby se regulovalo DC napětí meziobvodu měniče a jalový výkon Q_g dodaný do sítě na žádané hodnoty.

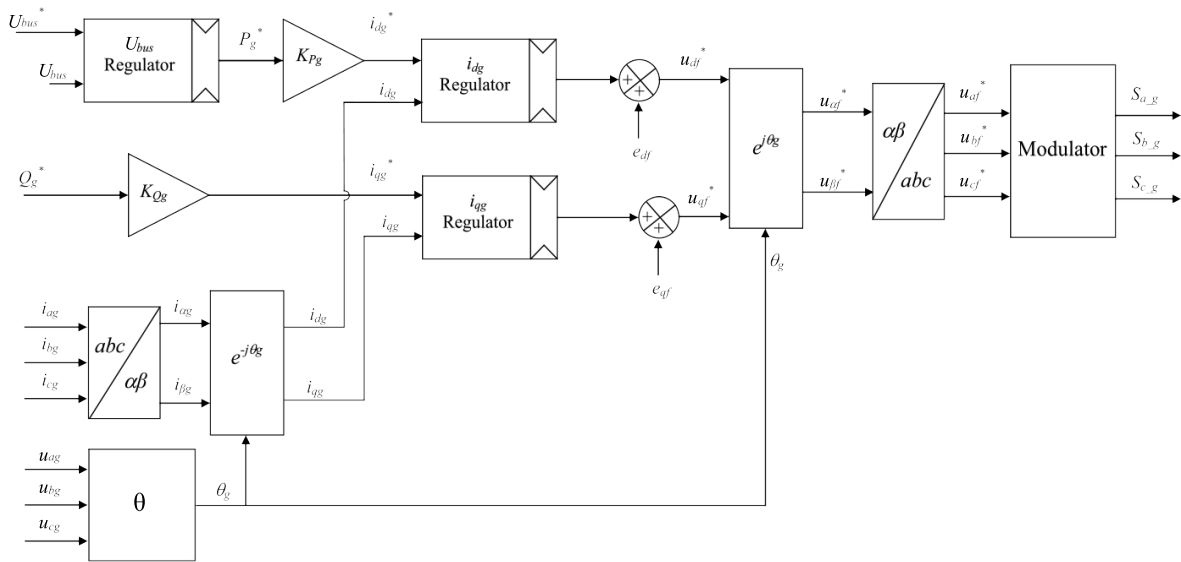
Tato regulace vyžaduje měření síťových napětí, síťových proudů a DC napětí meziobvodu. Řídícími vstupy jsou žádané hodnoty U_{DC} a Q_g , výstupem jsou pulsy pro měnič.

Obrázek 14: Schéma řízení síťového měniče⁶²



⁶² ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Obrázek 15: Blokové schéma vektorové regulace GSC (síťový měnič) orientované na síťové napětí⁶³



Rovnice 64: Koeficienty vektorové regulace P_g a Q_g ⁶⁴

$$K_{Pg} = \frac{1}{\frac{3}{2} v_{dg}}, \quad K_{Qg} = -\frac{1}{\frac{3}{2} v_{dg}}$$

Rovnice 65: Korekční členy složek žádaných napětí dq⁶⁵

$$e_{df} = -\omega_s L_f i_{qg}, \quad e_{qf} = \omega_s L_f i_{dg}$$

5.3 Rotorový měnič

5.3.1 Matematický model

Pro potřeby regulace DFIM je vhodné vyjádřit matematický model asynchronního stroje v synchronně rotujícím referenčním systému, který byl již odvozen v kapitole o asynchronním stroji, ale je uveden znovu níže.

Rovnice 66: Prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s ⁶⁶

$$\vec{U}_s^a = R_s \vec{I}_s^a + \frac{d\vec{\psi}_s^a}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s^a \quad [V]$$

$\vec{U}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového napětí v soustavě dq rotující ω_s

$R_s \rightarrow$ činný odpor statorového vinutí

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového proudu v soustavě dq rotující ω_s

$\vec{\psi}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq rotující ω_s

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu statoru

⁶³ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁶⁴ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁶⁵ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁶⁶ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

Rovnice 67: Prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s ⁶⁷

$$\vec{U}_r^a = R_r \vec{I}_r^a + \frac{d\vec{\psi}_r^a}{dt} + j\omega_r \vec{\psi}_r^a \quad [V]$$

$\vec{U}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového napětí v soustavě dq rotující ω_s

$R_r \rightarrow$ činný odpor rotorového vinutí

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq rotující ω_s

$\vec{\psi}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s

$\omega_r \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu rotoru

Rovnice 68: Prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq rotující ω_s ⁶⁸

$$\vec{\psi}_s^a = L_s \vec{I}_s^a + L_m \vec{I}_r^a \quad [Wb]$$

$\vec{\psi}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq

$L_s \rightarrow$ výsledná indukčnost fáze statoru

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového proudu v soustavě dq

$L_m \rightarrow$ magnetizační indukčnost

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu statoru

Rovnice 69: Prostorový vektor rotorového toku v soustavě dq rotující ω_s ⁶⁹

$$\vec{\psi}_r^a = L_r \vec{I}_r^a + L_m \vec{I}_s^a \quad [Wb]$$

$\vec{\psi}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor spřaženého statorového toku v soustavě dq

$L_r \rightarrow$ výsledná indukčnost fáze rotoru

$\vec{I}_r^a \rightarrow$ prostorový vektor rotorového proudu v soustavě dq

$L_m \rightarrow$ magnetizační indukčnost

$\vec{I}_s^a \rightarrow$ prostorový vektor statorového proudu v soustavě dq

$\omega_s \rightarrow$ elektrická úhlová rychlost napětí/proudu statoru

Vhodnou úpravou modelu lze získat rovnice složek d a q rotorového napětí, jejichž znalost je nutná pro implementaci vektorového řízení, protože řízení probíhá přes napěťový střídač, který generuje žádané napájecí třífázové napětí rotoru. Aby střídač věděl, jaké napětí má produkovat, musí obdržet na vstupu referenční napětí, kterému

⁶⁷ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁶⁸ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁶⁹ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

se bude snažit co nejvíc přiblížit vhodným spínáním základních 8 vektorů výstupního napětí. Vstupní referencí je napětí žádané regulátory, které na výstupu regulátorů je právě ve složkách u_{dr} a u_{qr} . Výstupy regulátorů se zkorigují členy viz následující rovnice. Poté se transformují do soustavy abc a jsou předány jako referenční vstupy PWM bloku produkujícímu spínací pulsy třífázového můstku.

Rovnice 70: Složky d a q rotorového napětí v synchronní soustavě dq ⁷⁰

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d|\vec{\Psi}_s|}{dt}$$

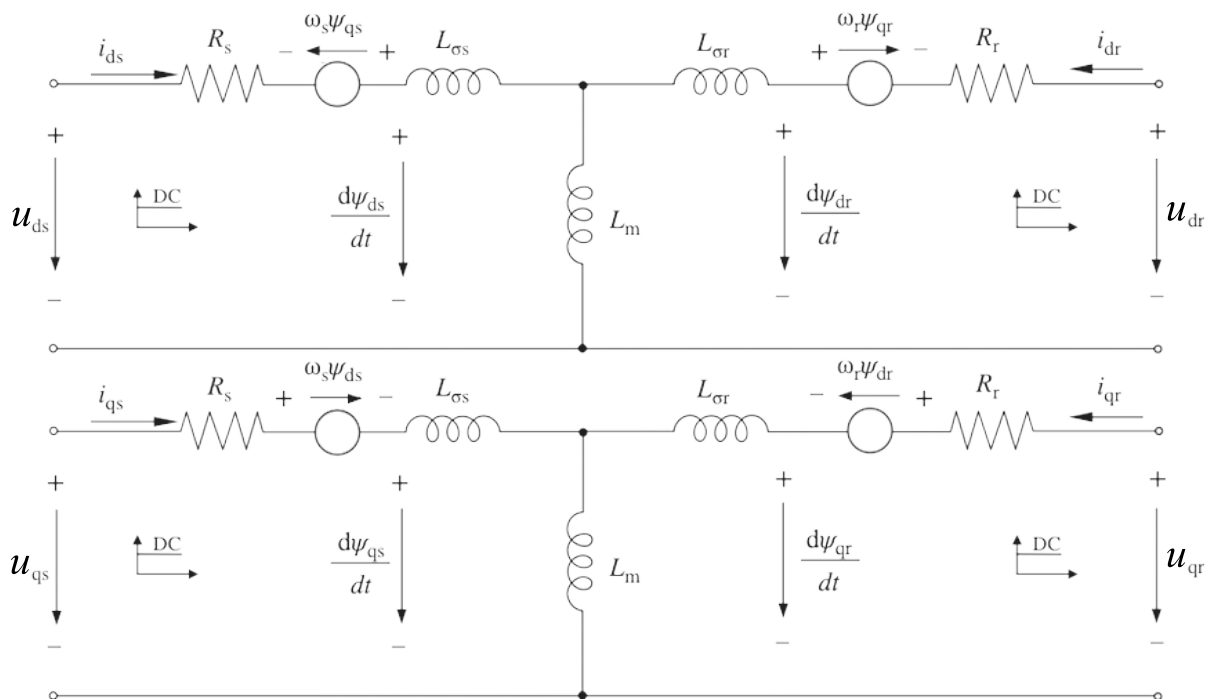
$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} |\vec{\Psi}_s|$$

Rovnice 71: Koeficient rozptylu stroje⁷¹

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Ze složkových napěťových rovnic lze sestavit následující ekvivalentní obvod.

Obrázek 16: Ekvivalentní obvod matematického modelu asynchronního stroje v synchronní soustavě dq ⁷²



⁷⁰ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁷¹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

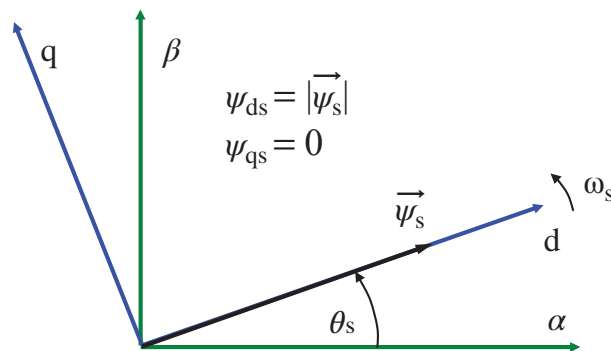
⁷² ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

5.3.2 Regulace rotorového měniče

Dvojitě napájený asynchronní generátor lze řídit vektorovou regulací nebo přímým řízením momentu. Tato práce se zaměřuje na vektorovou regulaci, kterou následně implementuje v simulačním modelu. Základní kritický koncept vektorové regulace obecně je ve zvolení vhodné dvouosé referenční soustavy a ve vhodné orientaci prostorových vektorů regulovaných veličin. Příkladem budiž regulace síťového měniče z předchozí podkapitoly, ve které se orientací prostorového vektoru statorového napětí do osy d rotující úhlovou rychlostí síťového napětí ω_s docílilo osamostatnění regulace činného P a jalového Q výkonu síťového měniče – regulace P neovlivňuje Q a naopak.

Vektorová regulace DFIM reguluje rotorové proudy a využívá synchronně rotující referenční soustavu dq , kde prostorový vektor statorového toku $\vec{\Psi}_s$ se orientuje do osy d , což umožní nezávisle řídit toky činného P , resp. jalového Q výkonu nezávisle na sobě pomocí q složky, resp. d složky rotorového proudu.

Obrázek 17: Orientace prostorového vektoru $\vec{\Psi}_s$ do osy d synchronně rotující soustavy dq ⁷³



V této soustavě se zjednoduší rovnice pro složky d a q vektoru statorového toku.

Rovnice 72: Složky d a q prostorového vektoru statorového toku orientovaného do osy d ⁷⁴

$$\begin{aligned}\Psi_{ds} &= i_{ds}L_s + i_{dr}L_m = |\vec{\Psi}_s| \\ \Psi_{qs} &= i_{qs}L_s + i_{qr}L_m = 0\end{aligned}$$

Ze složkových rovnic lze vyjádřit vztahy pro složkové d a q statorového proudu.

Rovnice 73: Složky d a q statorového proudu

$$\begin{aligned}i_{ds} &= \frac{|\vec{\Psi}_s|}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{qr}\end{aligned}$$

V rámci zjednodušení odvození se pro další krok předpokládá ustálený stav a nulový úbytek napětí na statorovém odporu. Díky tomu se zjednoduší složky d a q prostorového vektoru statorového napětí, protože vektor se ztotožní s osou q a díky

⁷³ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

⁷⁴ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

tomu jeho d složka bude nulová a dále lze uvažovat, že velikost q složky přibližně odpovídá součinu elektrické úhlové rychlosti statoru a spřaženého toku statoru.

Rovnice 74: Složky d a q prostorového vektoru napětí statoru⁷⁵

$$u_{ds} = 0$$

$$u_{qs} = |\vec{U}_g| \approx \omega_s |\vec{\Psi}_s|$$

V dalším kroku se využijí vzorce pro činný P a jalový Q výkon statoru pomocí napětí a proudů ve složkách d a q. Díky $u_{ds} = 0$ se vzorce zjednoduší na jeden součin a docílí se tvaru, ve kterém činný P, resp. jalový Q výkon statoru odpovídá i_{qs} , resp. i_{ds} .

Rovnice 75: Činný a jalový výkon statoru pomocí složek d a q statorového proudu a napětí⁷⁶

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) = \frac{3}{2} u_{qs} i_{qs}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}) = \frac{3}{2} u_{qs} i_{ds}$$

Posledním krokem je dosadit za i_{qs} a i_{ds} vyjádření pomocí složek rotorového proudu a získají se rovnice výkonů, ze kterých je zřejmé, že činný P, resp. jalový Q výkon statoru lze řídit rotorovým proudem i_{qr} , resp. i_{dr} .

Rovnice 76: Činný a jalový výkon statoru pomocí složek d a q rotorového proudu⁷⁷

$$P_s = -\frac{3}{2} |\vec{U}_g| \frac{L_m}{L_s} i_{qr}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{|\vec{U}_g|^2}{\omega_s L_s} - |\vec{U}_g| \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \right)$$

Díky orientaci statorového toku do osy d lze získat jednoduchý vzorec pro výpočet žádaného elektromagnetického momentu stroje – konstantou násobená q složka rotorového proudu. Tedy regulací rotorového proudu lze řídit moment stroje. Pomocí žádaného momentu lze navíc implementovat vnější rychlostní regulační smyčku.

Rovnice 77: Elektromagnetický moment asynchronního stroje pomocí q složky rotorového proudu⁷⁸

$$T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{|\vec{U}_g| L_m}{\omega_s L_s} i_{qr} = K_T i_{qr}$$

⁷⁵ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁷⁶ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

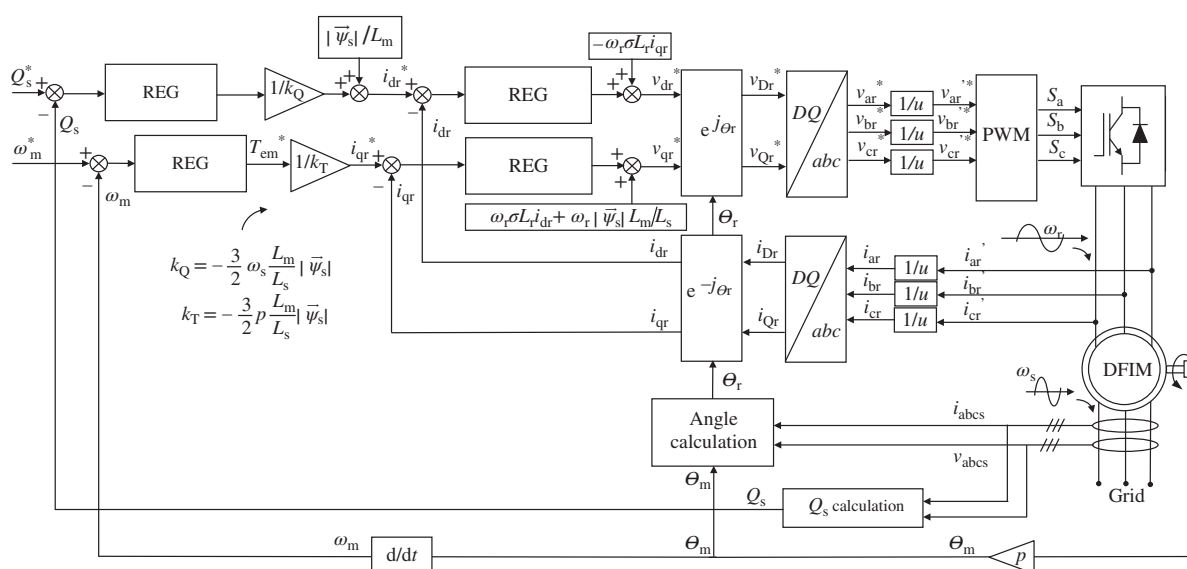
⁷⁷ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁷⁸ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Výsledné regulační schéma vyžaduje znalost transformačního úhlu θ_r , protože regulace probíhá v synchronně rotující referenční soustavě, ale výstupy regulace jsou převáděny zpět do referenční soustavy rotující elektrickou úhlovou rychlostí rotoru ω_m . Jedním ze způsobů odhadu úhlu je spočítat úhel prostorového vektoru statorového napětí, od něho odečíst $\pi/2$, čímž se získá úhel θ_s . Od něho se odečte elektrický úhel rotoru a výsledkem transformačního úhel θ_r .

V reálné větrné elektrárně s DFIM je rychlostní regulační smyčka modifikovaná implementací MPPT = Maximum Power Point Tracking tedy systémem na udržování soustavy v pracovním bodě s maximální vyráběným výkonem. Požadavkem regulaci tedy není udržovat konstantní rychlost bez ohledu na rychlost větru, ale naopak automaticky měnit otáčky podle aktuální rychlosti větru.

Obrázek 18: Blokové schéma kompletního vektorového řízení DFIM („v“ a „V“ značí napětí)⁷⁹



⁷⁹ ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & SonsLTD, 2014. ISBN 9781118634035.

5.3.3 MPPT

MPPT (Maximum Power Point Tracking) je obecně způsob řízení, jehož cílem je maximalizovat výrobu daného systému. V kontextu této práce jde o maximalizaci výkonu produkovaného DFIM z větrné energie.

V pracovním bodě s maximálním výkonem turbíny platí, že koeficient výkonu a součinitel rychloběžnosti nabývá optimální hodnoty, pro kterou je koeficient výkonu maximální. Proto v bodě maxima výkonu bude platit:

Rovnice 78: Podmínky pracovního bodu s maximálním výkonem (MPPT)⁸⁰

$$C_p = C_{p_max} \quad [-]$$

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_t}{V_v} = \text{konstantní} \quad [-]$$

kde

λ_{opt} – optimální součinitel rychloběžnosti [-],

R – délka listu rotoru (poloměr rotoru) [m],

Ω_t – optimální mechanická úhlová rychlost turbíny [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

V_v – průměrná rychlost větru v čelní ploše rotoru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Přestože cílem je nastavit výkon P turbíny na maximum, MPPT bude ve skutečnosti nastavovat optimální elektromagnetický moment DFIM, protože ten lze řídit ve vektorové regulaci viz předchozí podkapitola. Rovnice optimálního momentu je:

Rovnice 79: Optimální moment větrné turbíny na hřídeli⁸¹

$$T_{t_opt} = \frac{P_{t_max}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho\pi R^2 V_v^3}{\Omega_t} C_{p_max} = \frac{1}{2} \frac{\rho\pi R^3 V_v^2}{\lambda_{opt}} C_{p_max} = \frac{1}{2} \frac{\rho\pi R^5 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^3} \Omega_t^2 \quad [Nm]$$

$$T_{t_opt} = k_{opt_t} \Omega_t^2$$

kde

T_{t_opt} – optimální moment větrné turbíny na hřídeli [Nm],

k_{opt_t} – koeficient MPPT turbíny,

P_{t_max} – max výkon větrné turbíny [W],

Ω_t – mechanická úhlová rychlost turbíny [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

R – délka listu rotoru (poloměr rotoru) [m],

V_v – průměrná rychlost větru v čelní ploše rotoru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

λ_{opt} – optimální součinitel rychloběžnosti [-],

C_{p_max} – max koeficient výkonu [-].

⁸⁰ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

⁸¹ ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

Součástí větrné elektrárny je také převodovka, který spojuje nízkorychlostní hřídel větrné turbíny s vysokorychlostní hřídelí DFIG s převodovým poměrem N . Pro převod rychlostí lze psát

Rovnice 80: Převodový poměr větrné turbíny a DFIG⁸²

$$N = \frac{\Omega_m}{\Omega_t}$$

$$N = -\frac{T_t}{T_{em}}$$

T_t – moment větrné turbíny na hřídeli [Nm]

T_{em} – elektromagnetický moment DFIG [Nm]

Ω_t – mechanická úhlová rychlost turbíny [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

Ω_m – mechanická úhlová rychlost DFIG [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

Dosazením rovnic 80 do rovnice 79 se získá výsledný tvar pro žádaný moment DFIG:

$$T_{em} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^3 N^3} \Omega_m^2 \quad [Nm]$$

$$T_{em} = -k_{opt} \Omega_m^2 \quad [Nm]$$

kde

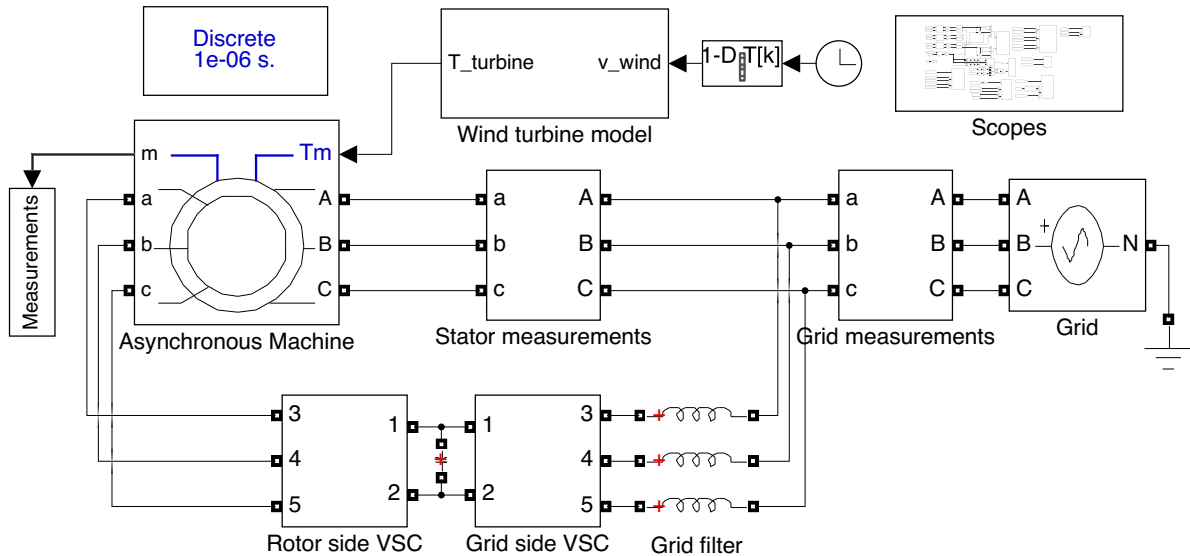
k_{opt} – koeficient MPPT DFIG.

⁸² ABAD, Gonzalo et. al. DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION. New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.

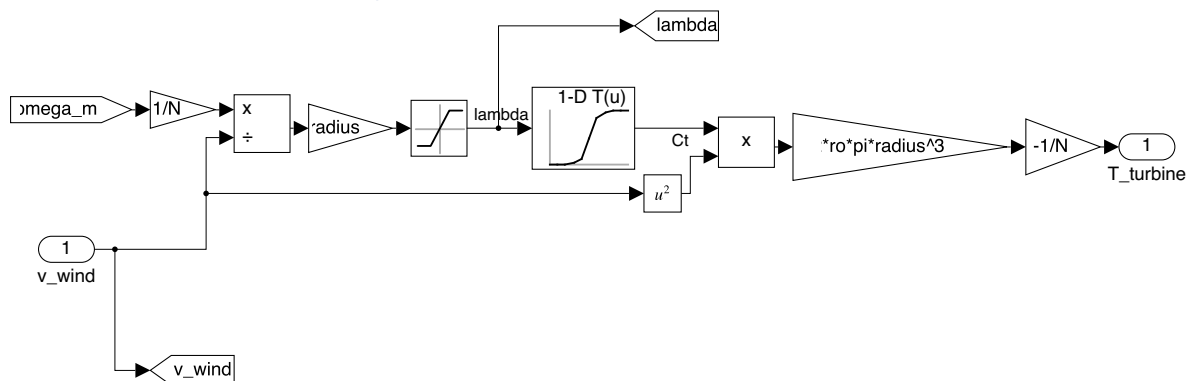
6 Simulační model v Matlab Simulink

V této kapitoly jsou uvedeny obrázky simulačního modelu DFIG poháněného větrnou turbínou sestaveného dle teoretické části této práce. Jsou vybrány pouze ty nejdůležitější/nejzajímavější části pro úsporu místa.

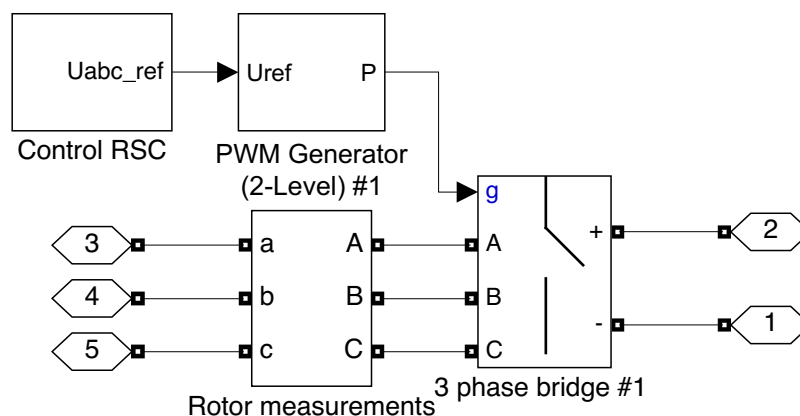
6.1 Kompletní model DFIG hnaný větrnou turbínou



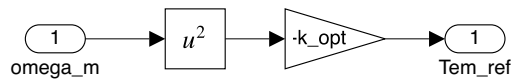
6.2 Model větrné turbíny



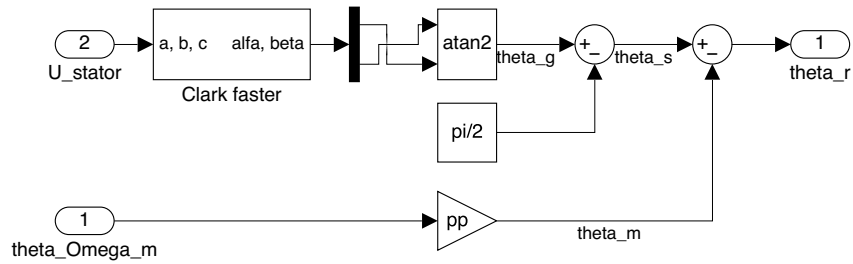
6.3 Model rotorového měniče



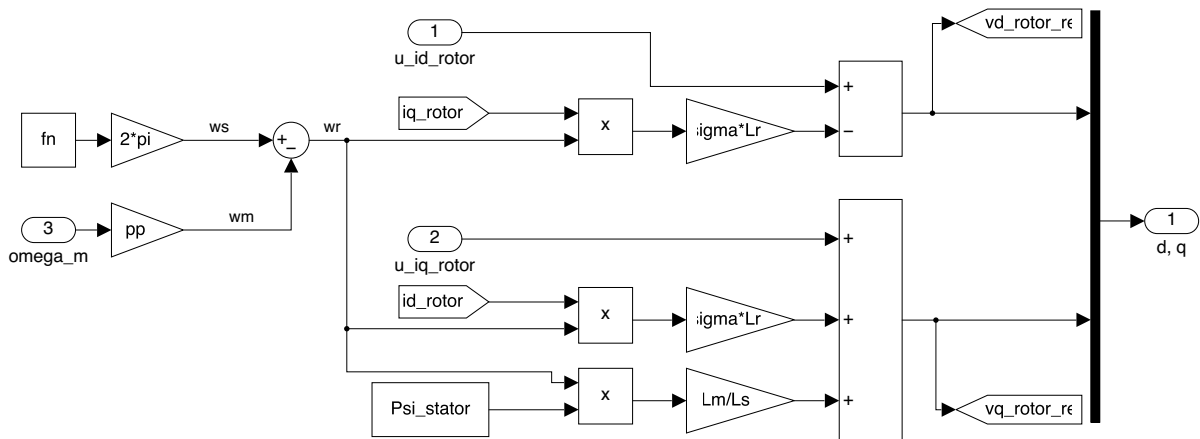
6.3.2 Model MPPT



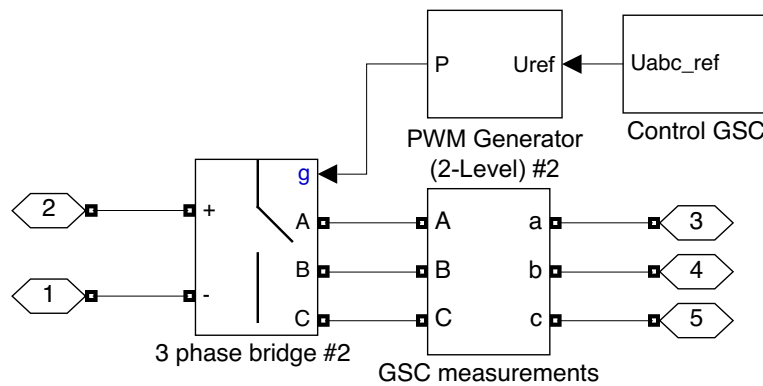
6.3.3 Výpočet úhlu transformace rotorového měniče



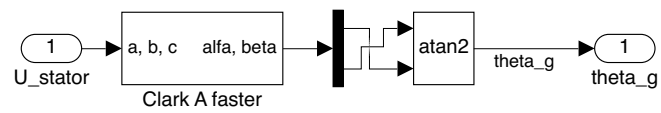
6.3.4 Cross terms rotorového měniče



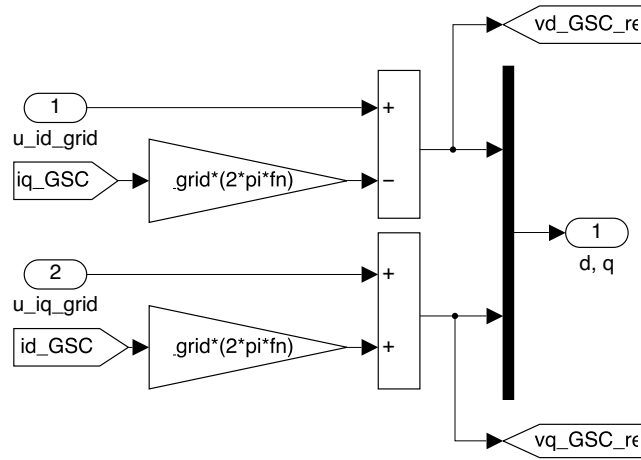
6.4 Model síťového měniče



6.4.2 Výpočet úhlu transformace síťového měniče



6.4.3 Cross terms síťového měniče



7 Simulace

7.1 Popis simulací

Jsou prezentovány a porovnány výsledky 2 simulací lišící se pouze v množství dodávaného jalového výkonu Q síťovým měničem do sítě. Doba trvání simulací je 12 sec. Na začátku je pohon v klidu a vítr nefouká (pouze 0,1 m/sec). V čase $t=0,0$ sec se DFIG začne rozbíhat na synchronní otáčky pomocí PI regulátoru. V čase $t=2,0$ sec, když už je nezatížený pohon rozběhnutý na synchronní otáčky a všechny přechodné děje už odezněly, skokově se zvětší rychlost větru na 12,0 m/sec a souběžně se zapne řízení MPPT. DFIG reaguje zvyšováním otáček, aby dosáhl maximálního výkonu. Po přibližném ustálení přechodných dějů se opět skokově změní rychlost větru tentokrát na pouhých 5,0 m/sec a DFIG opět reaguje díky MPPT řízení. Nyní otáčky snižuje. Po přibližném ustálení přechodných dějů proběhne poslední změna rychlosti větru a to skokově navýšení na 8 m/sec. DFIG zvyšuje otáčky a opět hledá bod maxima výkonu. V čase $t=12,0$ sec je simulace ukončena. Průběhy zásadních hodnot během simulace je zaznamenány v tabulkách pro oba typy simulace.

Počáteční podmínky jsou pouze dvě: $s = 1$ a $U_{c_DC} = U_{DC}$. Jednotkový skluz znamená rozběh z klidu a druhá podmínka říká, že kondenzátor meziobvodu měničů je od počátku nabitý na ustálenou hodnotu. Všechny ostatní veličiny jsou v počátku simulace nulové.

Tabulka 3: Průběh simulace $Q_{GSC} = 0$

t [sec]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v_vítr [m/sec]	0,1	0,1	12,0	12,0	12,0	5,0	5,0	5,0	5,0	8,0	8,0	8,0
MPPT zapnuto	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
PI reg nn zapnuto	ANO	ANO	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Ω_m^*	1000	1000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Q_s^* [kVAR]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_{GSC}^* [kVAR]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

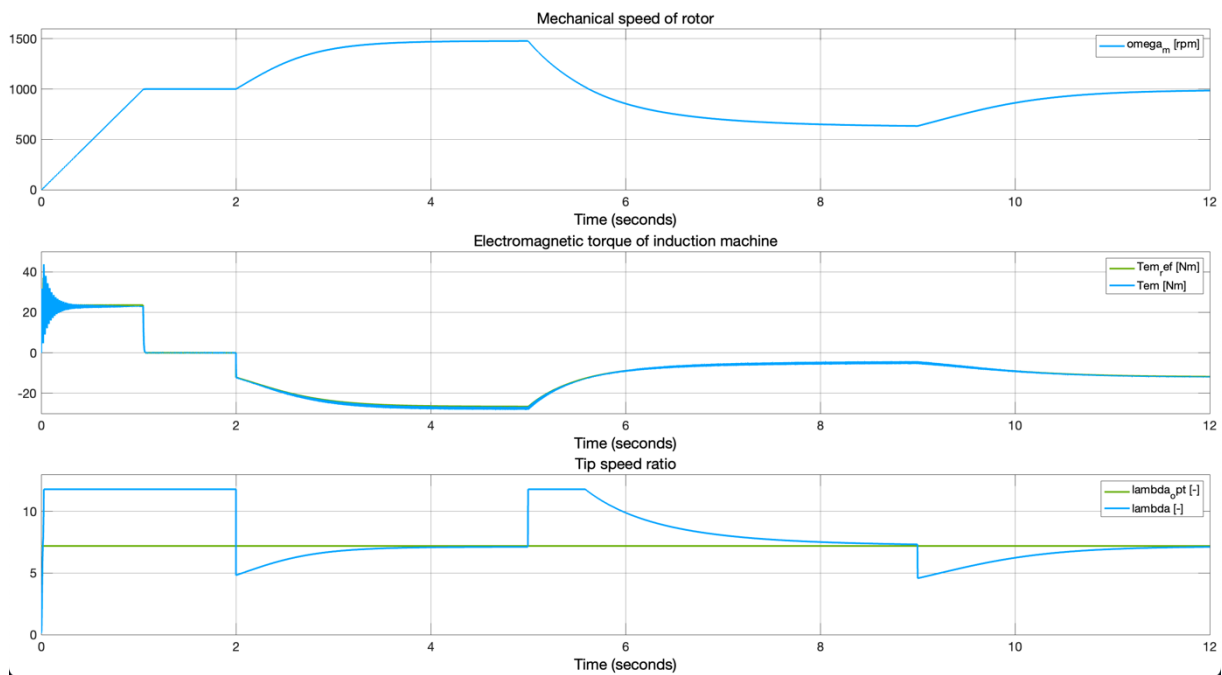
Tabulka 4: Průběh simulace $Q_{GSC} = 1000$

t [sec]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v_vítr [m/sec]	0,1	0,1	12,0	12,0	12,0	5,0	5,0	5,0	5,0	8,0	8,0	8,0
MPPT zapnuto	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
PI reg nn zapnuto	ANO	ANO	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Ω_m^*	1000	1000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Q_s^* [kVAR]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_{GSC}^* [kVAR]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

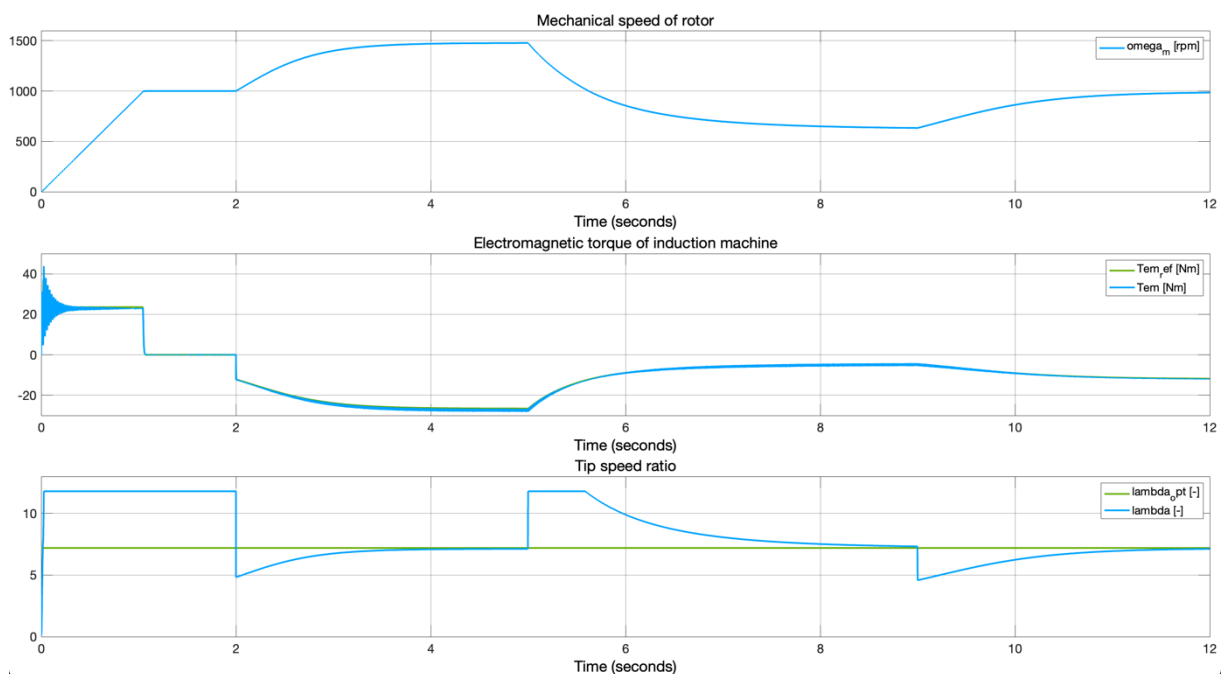
7.2 Výsledky simulací

7.2.1 Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti

Obrázek 19: Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 0$



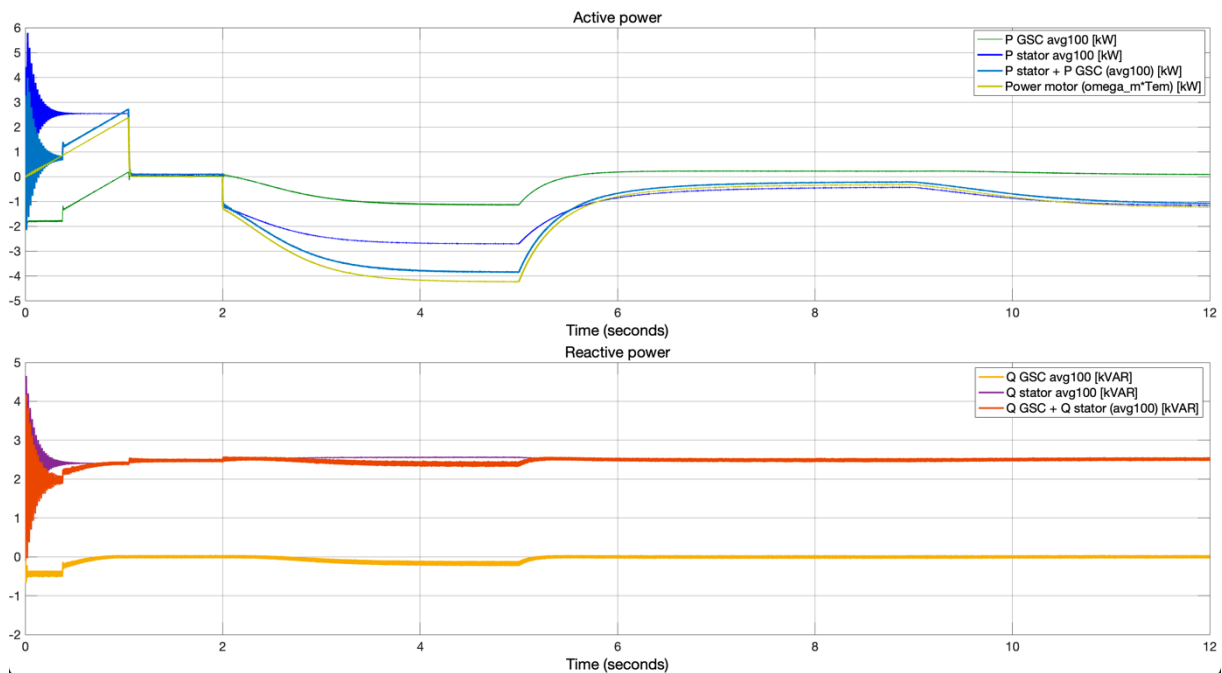
Obrázek 20: Otáčky, moment, součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 1000$



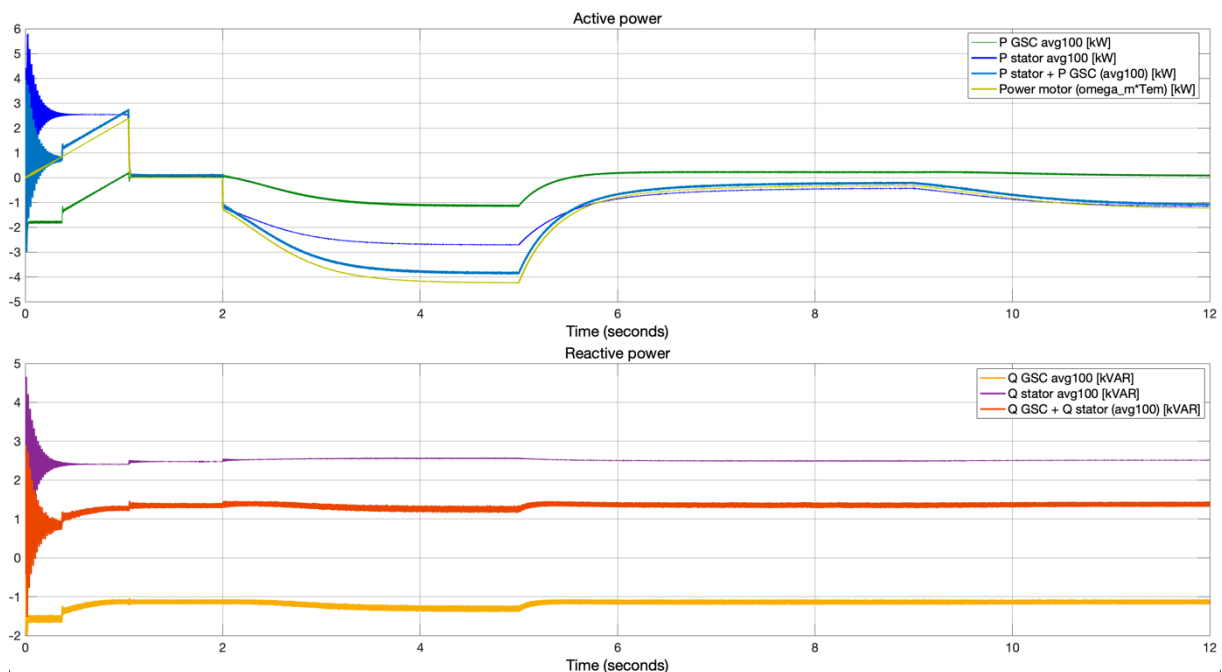
Rozběh DFIG proběhl konstantním tempem do žádaných synchronních otáček. Následně otáčky správně reagují růstem, resp. poklesem při nárůstu, resp. poklesu rychlosti větru. Elektromagnetický moment DFIG kopíruje žádanou hodnotu. Po každé změně větru se λ navrácí k optimu což značí správnou funkci MPPT. Zvýšení Q_{GSC} nemá zjevný vliv.

7.2.2 Činný a jalový výkon

Obrázek 21: Činný a jalový výkon – $Q_{GSC} = 0$



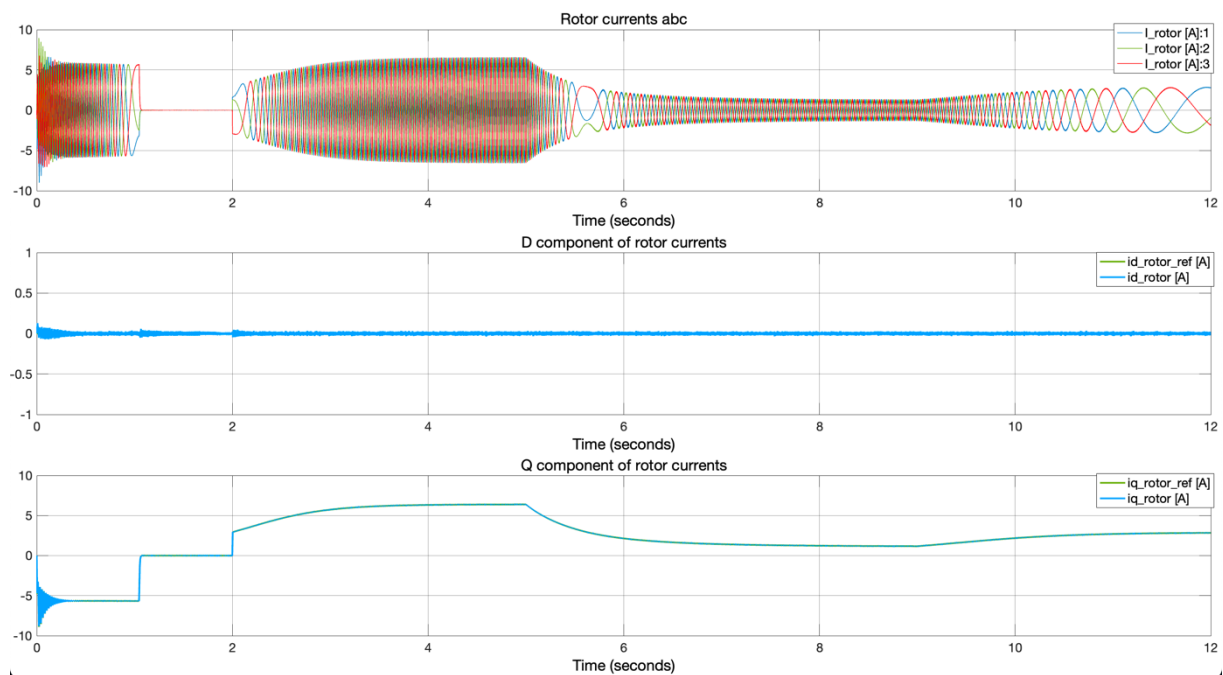
Obrázek 22: Činný a jalový výkon – $Q_{GSC} = 1000$



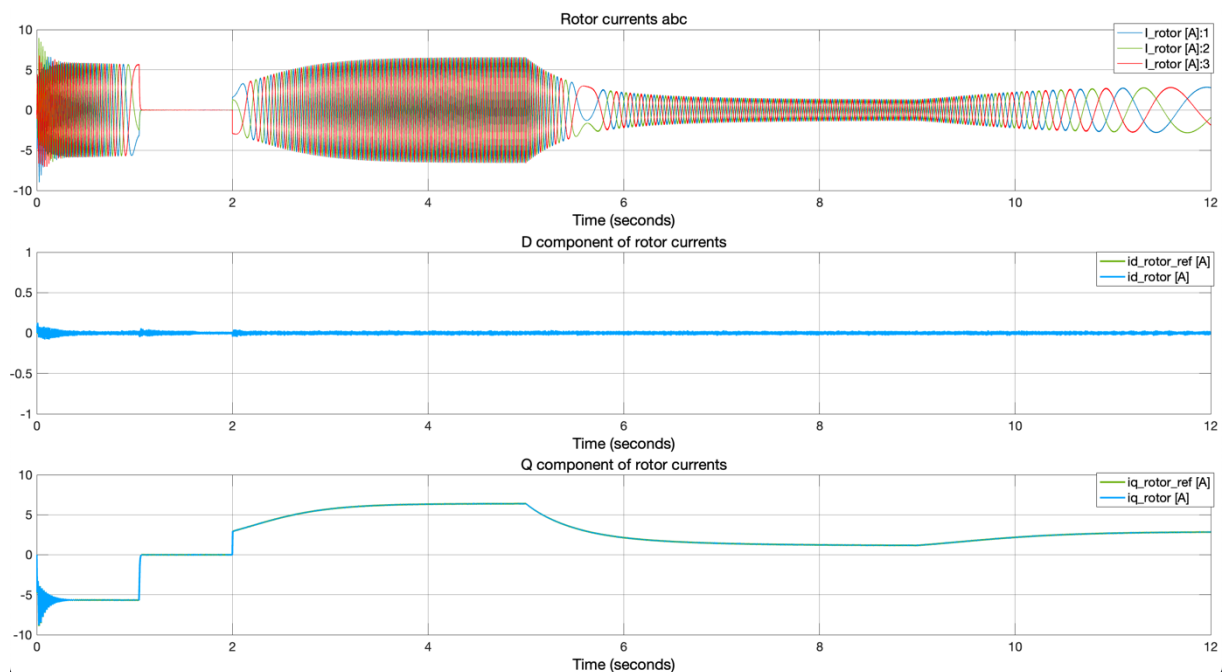
Při rozběhu DFIG jsou všechny P výkony (kromě P_{GSC}) kladné (odebírány). Následně během ustáleného stavu synchronních otáček jsou nulové. Při $v_w=12$ m/sec jsou všechny P výkony záporné (dodávány do sítě). Velikost součtu P_{stator} a P_{GSC} je správně menší než P_{motor} . Při podsynchronních otáčkách je P_{GSC} kladný (odebírány). Zvýšení Q_{GSC} nemá vliv na P. Odpovídá teorii. Jalové výkony jsou téměř konstantní, pouze při $v_w=12$ m/sec vzroste dodávka Q_{GSC} . Zvětšení požadovaného Q_{GSC} skutečně zvětší dodávaný Q do sítě, o který poklesne celkový odebraný Q ze sítě. Opět odpovídá teorii. Více než Q_{GSC} tento DFIG nezvládne. Nelze bohužel dosáhnout účinníku 100%.

7.2.3 Rotorové proudy

Obrázek 23: Rotorové proudy – $Q_{GSC} = 0$



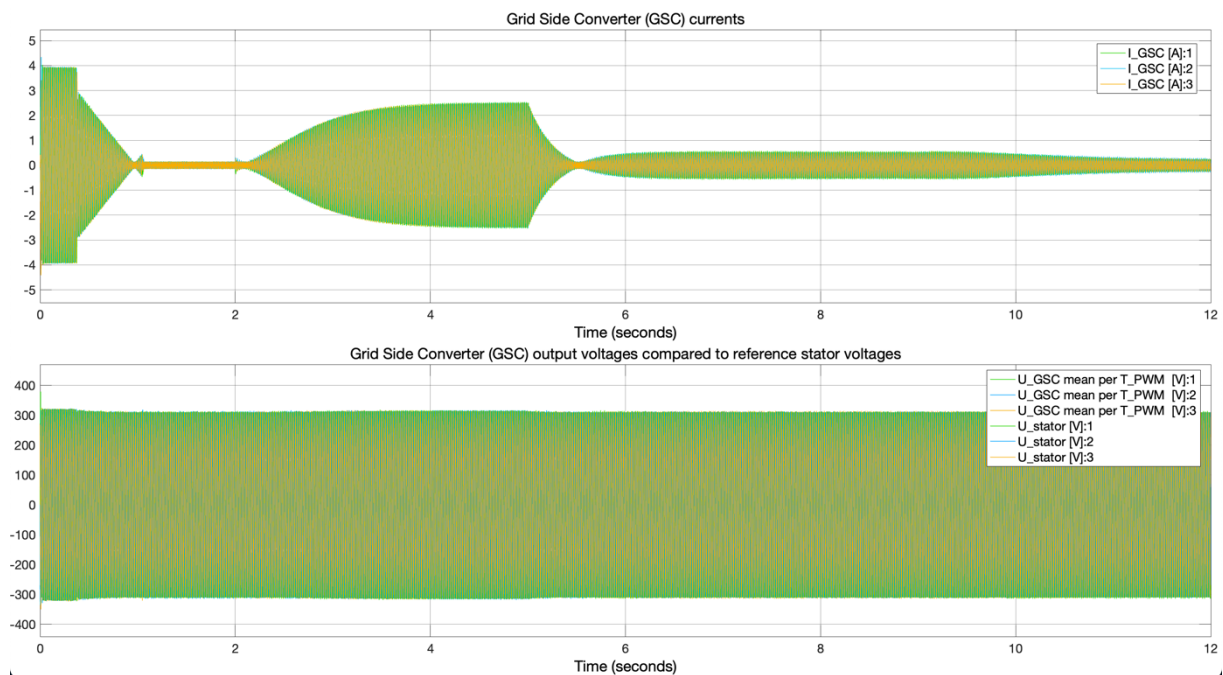
Obrázek 24: Rotorové proudy – $Q_{GSC} = 1000$



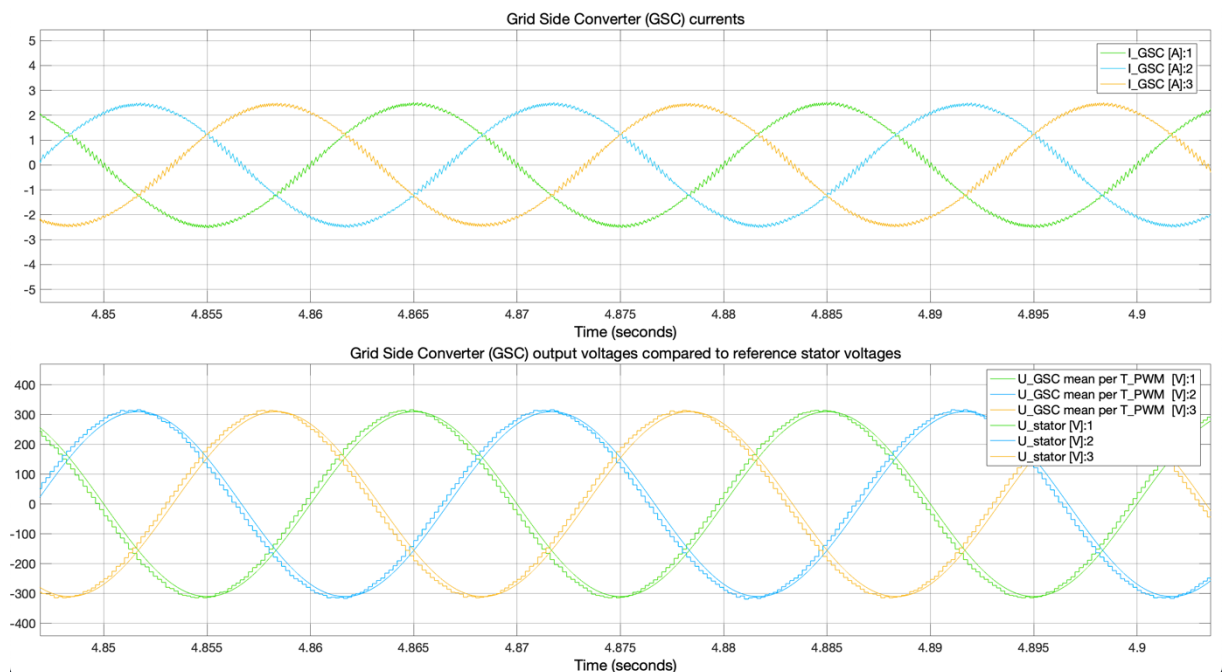
Na průbězích rotorových proudů je patrné, že z rostoucím rozdílem elektrické úhlové rychlosti rotoru a elektrické úhlové rychlosti napětí/proudů statoru roste elektrická úhlová rychlost proudů rotoru – rotorový měnič dle očekávání to tím kompenzuje. Zároveň při přechodu přes synchronní otáčky se změní sled fází. D složka rotorového proudu je správně regulována na 0. Q složka dle očekávání koresponduje s momentem DFIG. Q_{GSC} nemá zjevný vliv.

7.2.4 Proudý síťového měniče

Obrázek 25: Proudý síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$

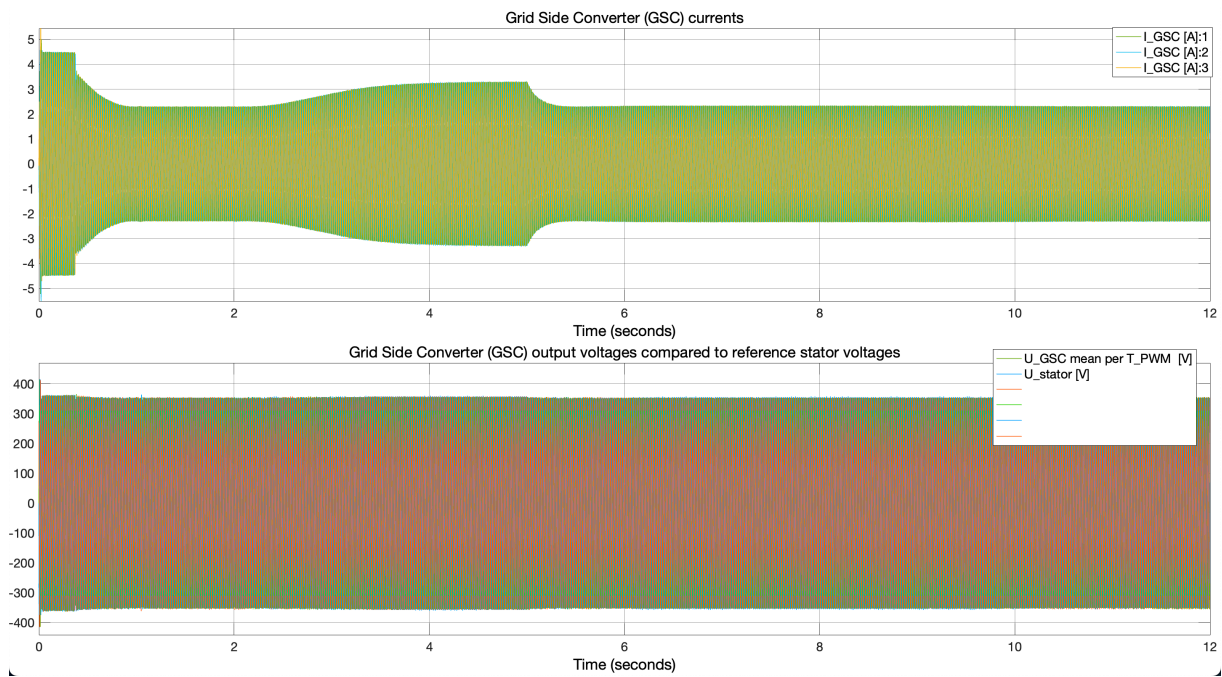


Obrázek 26: Proudý síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$, $v_{wind} = 12$ m/sec

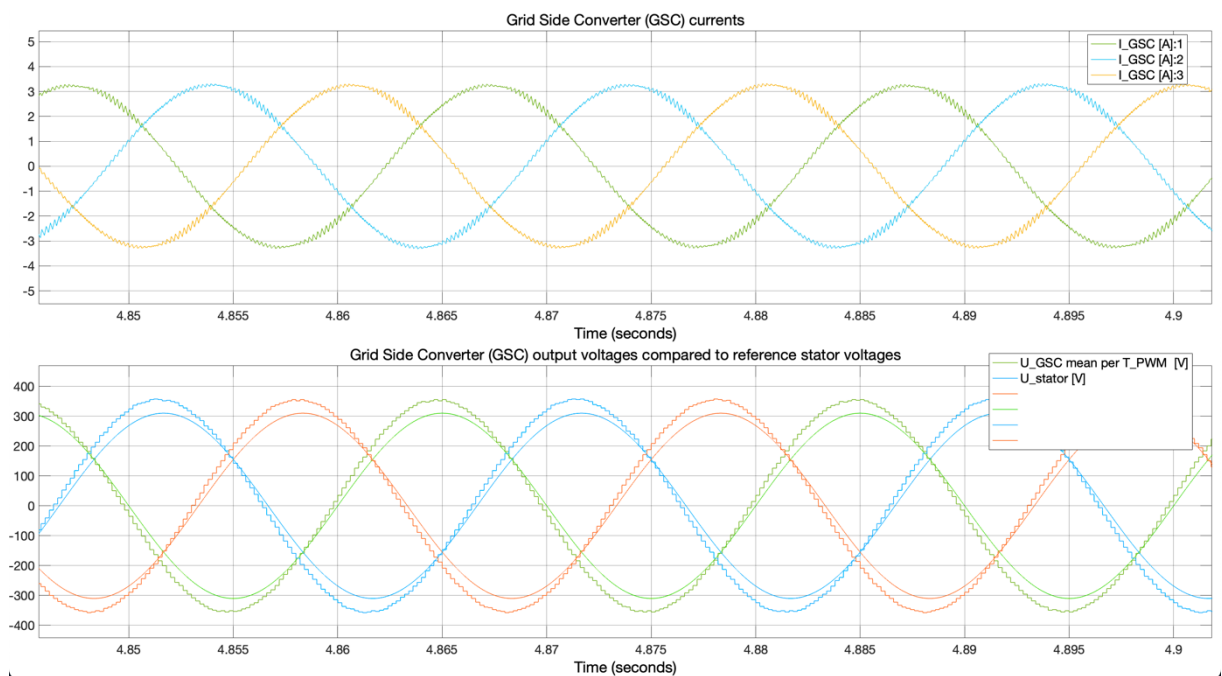


Je patrné, že velikost výstupního proudu síťového měniče koresponduje s rychlostí větru – čím rychleji fouká, tím větší proud. Průběh proudů má harmonický charakter, což je jedním z cílů. Výstupní napětí měniče odpovídá s mírnou odchylkou danou úbytkem na filtru referenčnímu síťovému napětí.

Obrázek 27: Proudový síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$



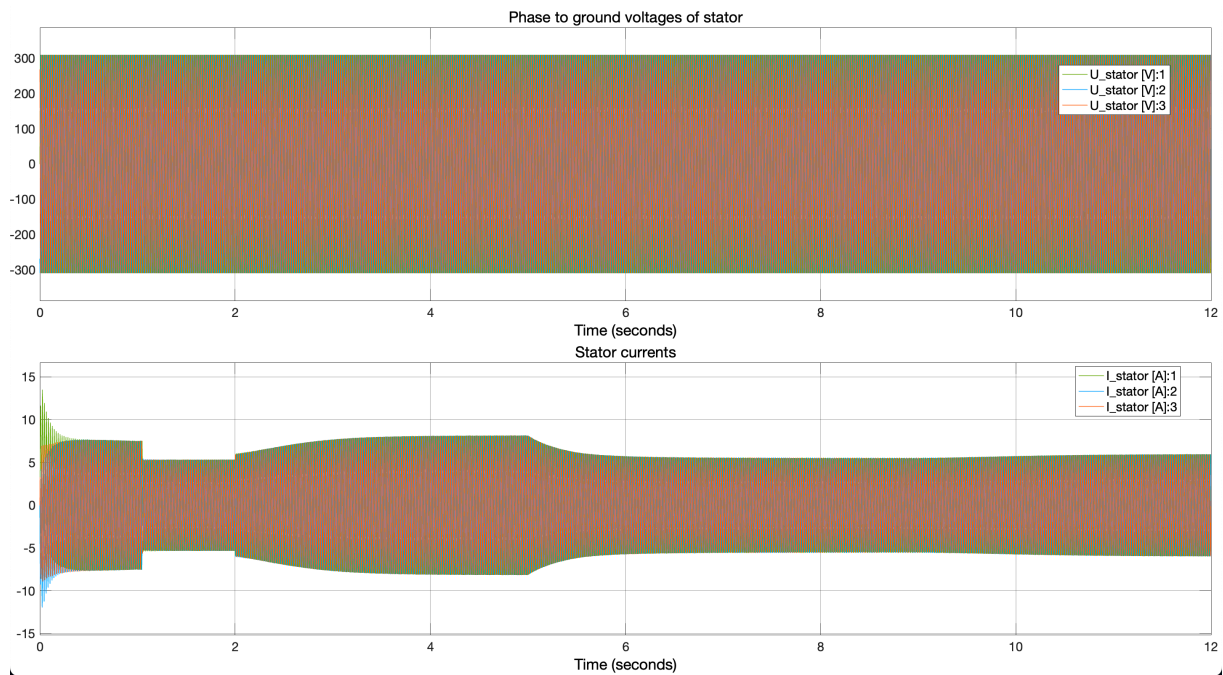
Obrázek 28: Proudový síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$, $v_{wind} = 12$ m/sec



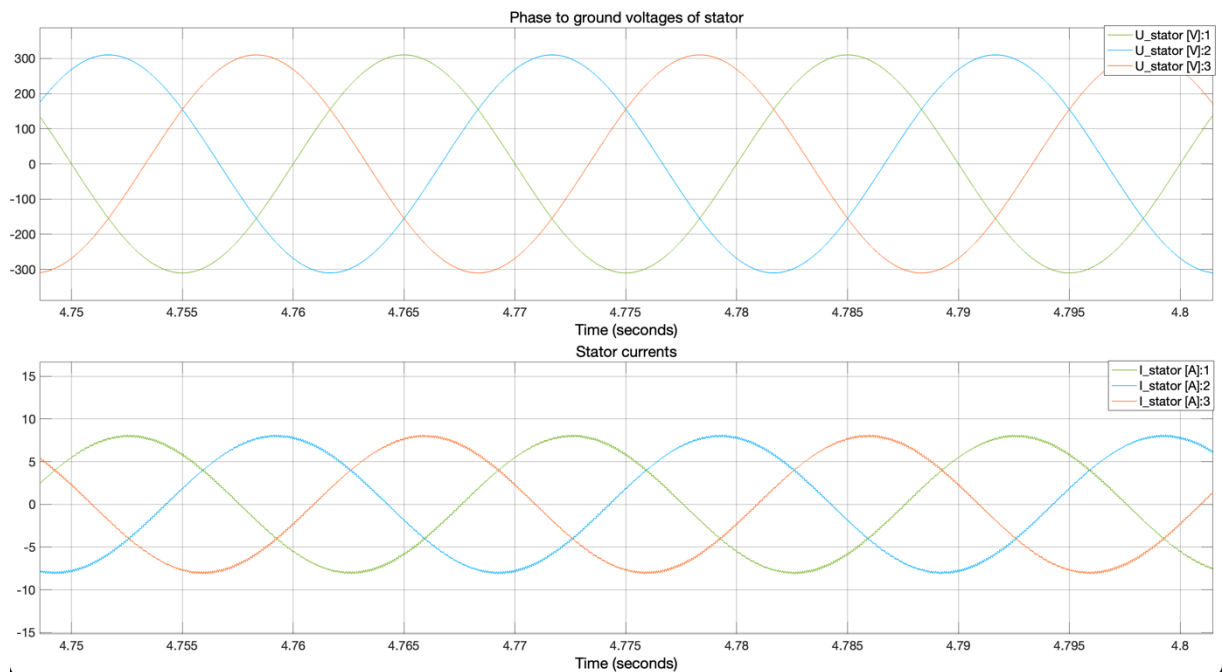
Zvětšení Q_{GSC} má velký vliv na výstupní proud síťového měniče, jak je patrné z průběhu. Po celou dobu neklesá pod cca 2,0 A a při $v_w = 12$ m/sec se ještě zvětší. Odpovídá to většímu dodávanému výkonu. Vliv Q_{GSC} je zřejmý také na výstupním napětí měniče, jehož amplituda je nyní zřetelně větší než referenčního síťového napětí právě díky požadavku na dodání $Q_{GSC} = 1000$ VAR.

7.2.5 Napětí a proudy statoru

Obrázek 29: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 0$

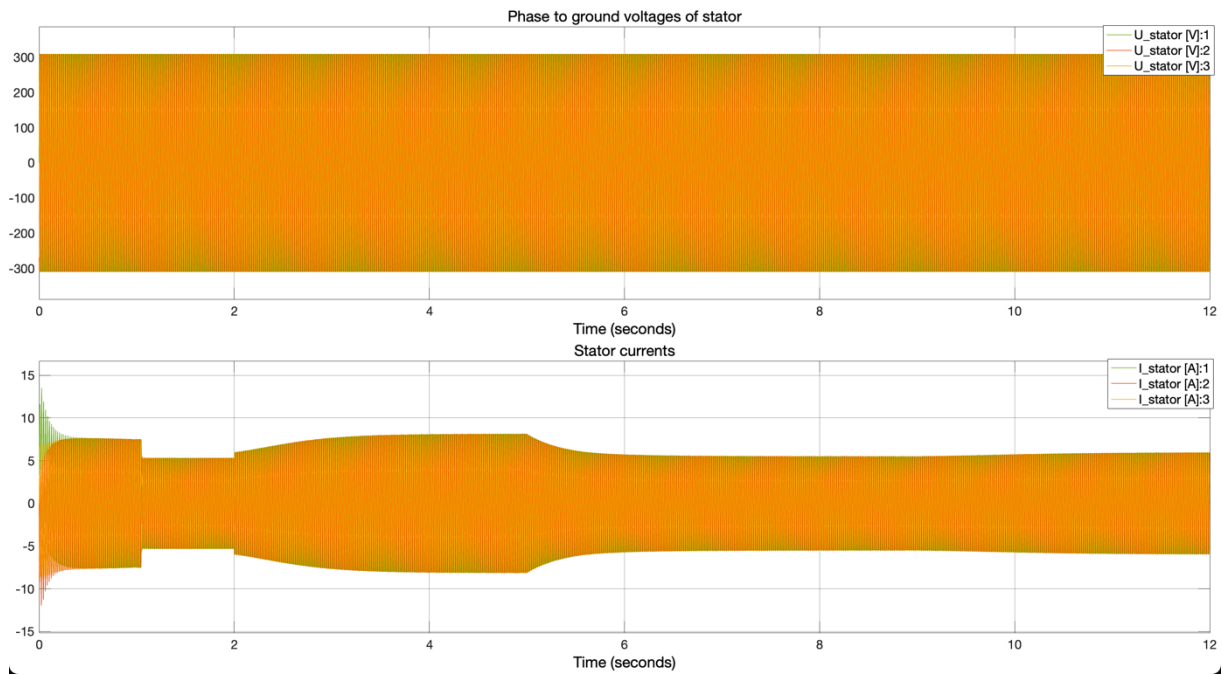


Obrázek 30: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 0$, $v_{wind} = 12$ m/sec

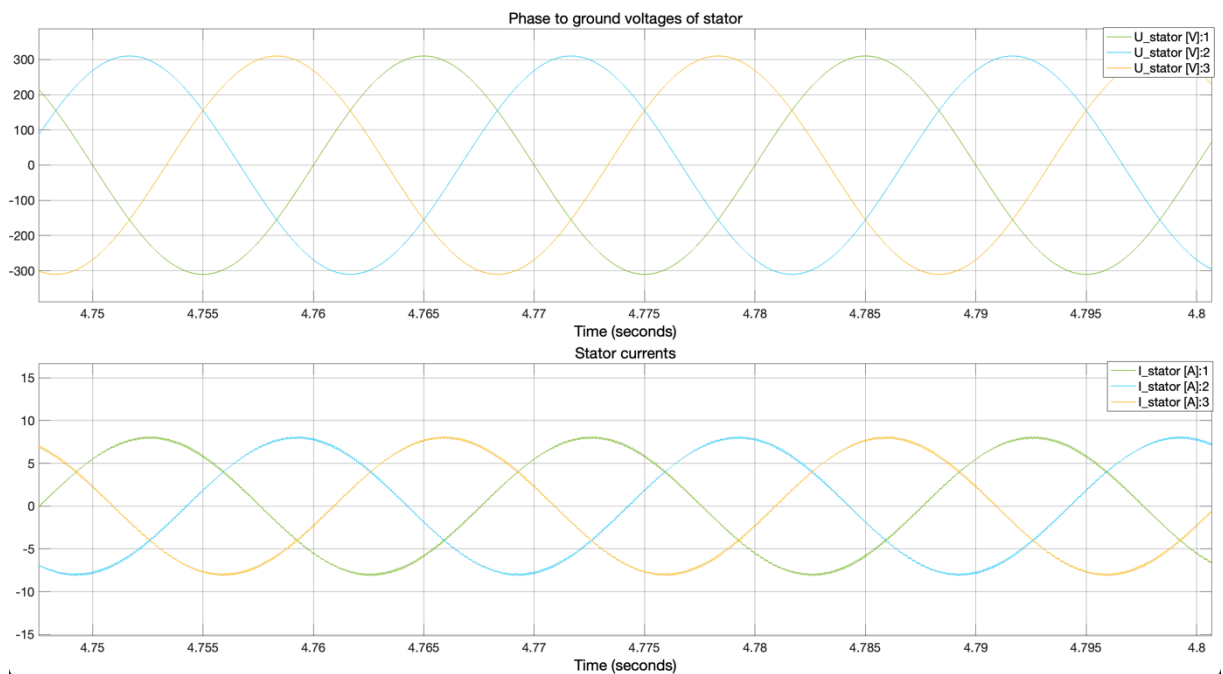


Napětí statoru je samozřejmě neměnné protože se uvažuje tvrdá síť. Statorový proud se výrazněji mění při vyšší rychlost větru. Vyšší ustálená hodnota odpovídá, protože stroj je magnetován ze sítě a má relativně veliké indukčnosti. Statorový proud si i při maximálním zatížení zachovává sinusový charakter.

Obrázek 31: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 1000$



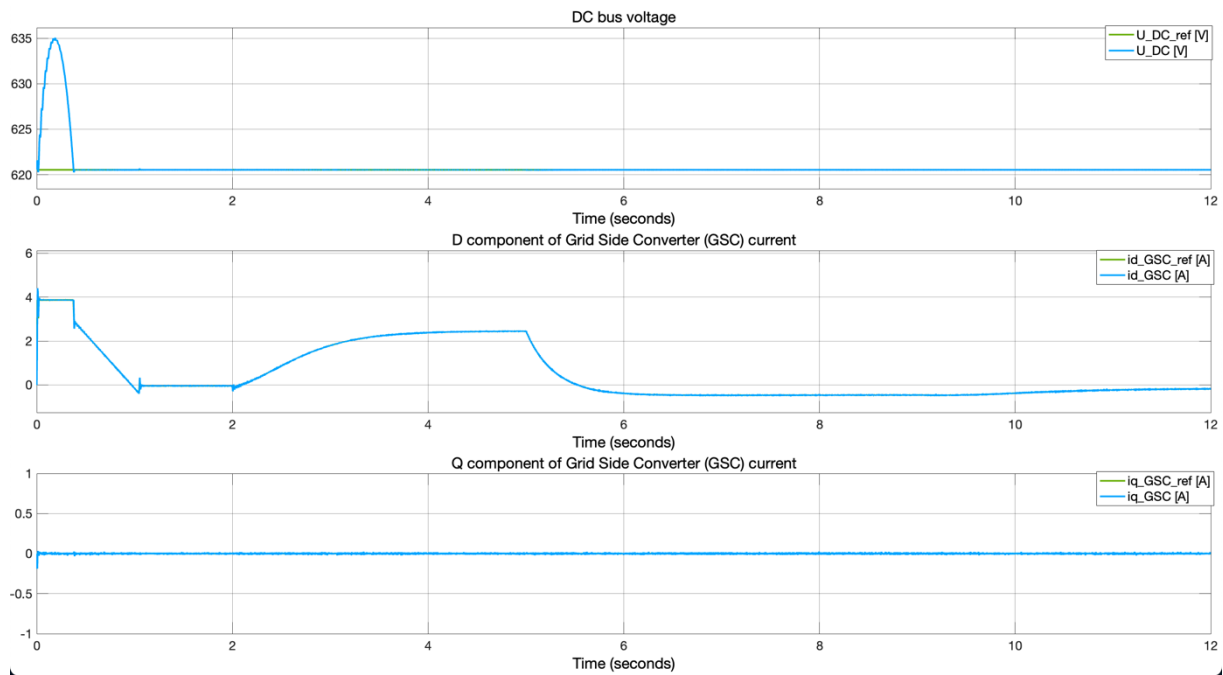
Obrázek 32: Napětí a proudy statoru – $Q_{GSC} = 1000$, $v_{wind}=12$ m/sec



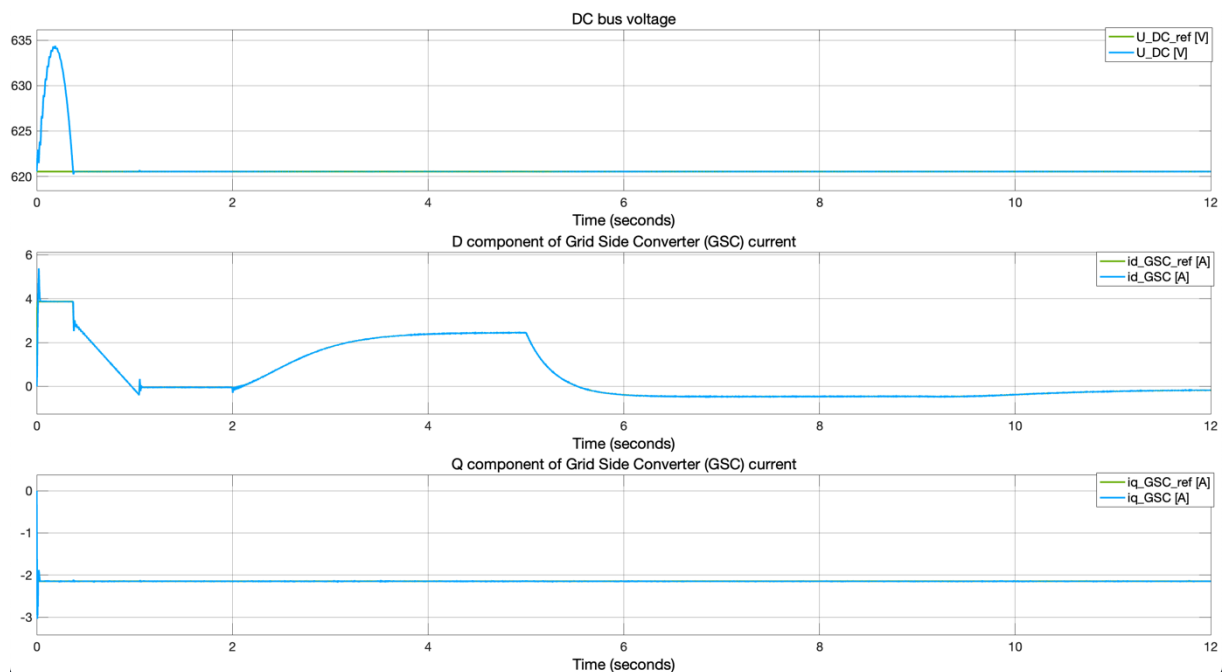
Dle předpokladů nemá zvýšená dodávka Q_{GSC} zřejmý významný vliv na statorové proudy ani napětí, protože je Q_{GSC} regulováno nezávisle na statoru.

7.2.6 U_{DC} , složky d a q proudu síťového měniče

Obrázek 33: U_{DC} , složky d a q proudu síťového měniče – $Q_{GSC} = 0$



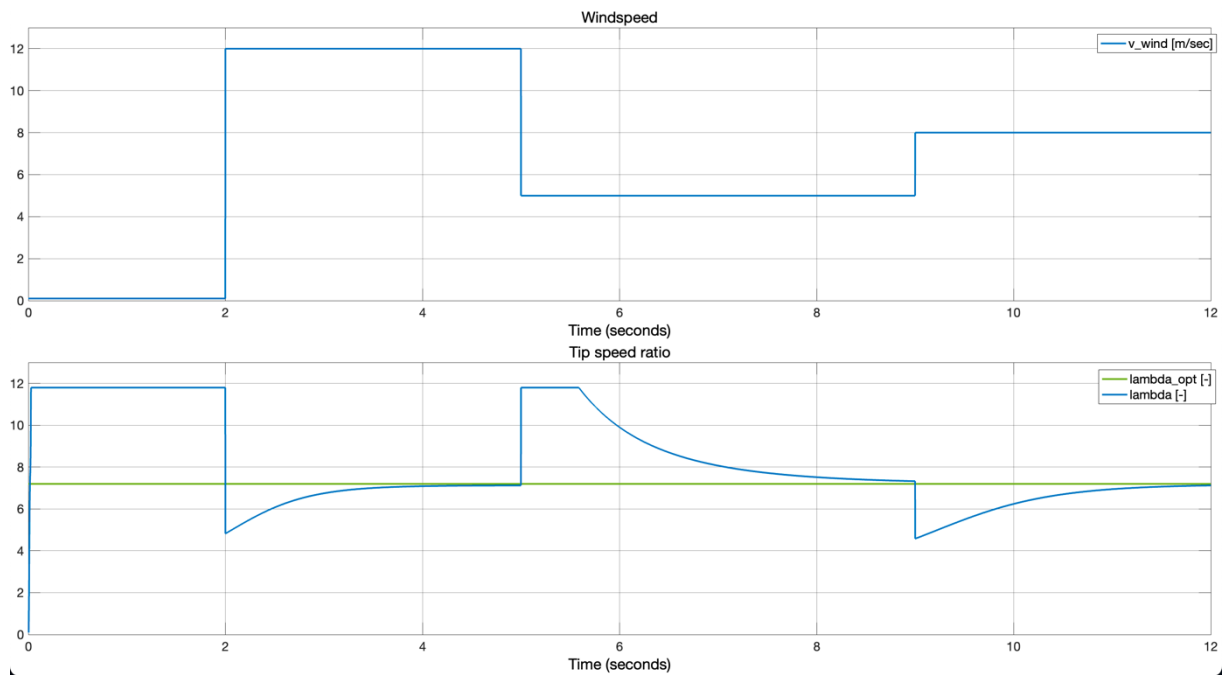
Obrázek 34: U_{DC} , složky d a q proudu síťového měniče – $Q_{GSC} = 1000$



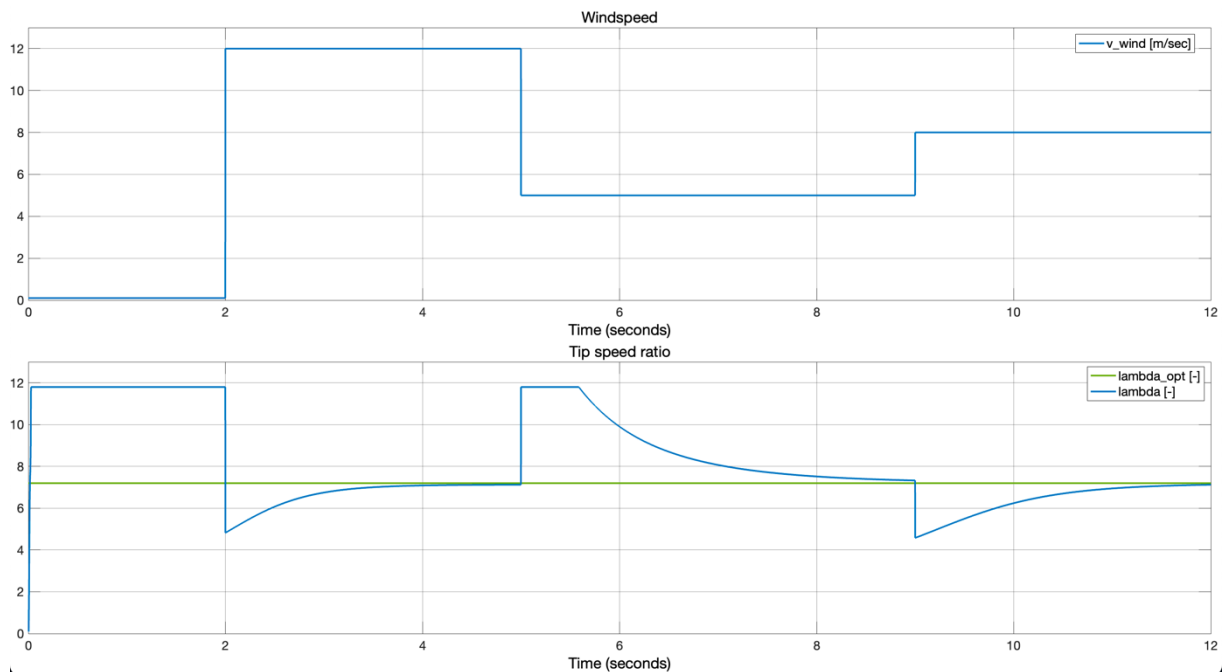
Síťový regulátor splňuje požadavek na stabilní hodnoty U_{DC} vyjma malého překmitu při skokovém rozběhu v počátku. D složka proudu síťového měniče dle předpokladů koresponduje s činným výkonem rotoru. Q složka je správně při požadavku $Q_{GSC} = 0$ nulová a při požadavku $Q_{GSC} = 1000$ je stabilně záporná, což odpovídá teorii.

7.2.7 Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti

Obrázek 35: Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 0$



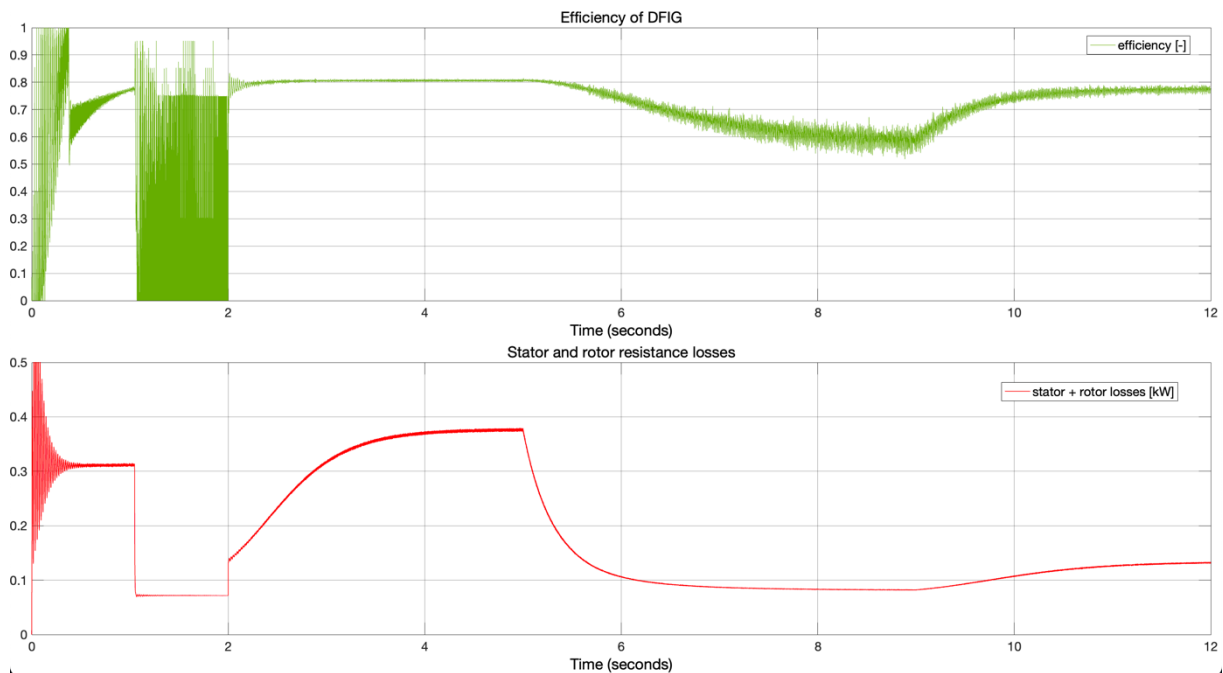
Obrázek 36: Rychlost větru a součinitel rychloběžnosti – $Q_{GSC} = 1000$



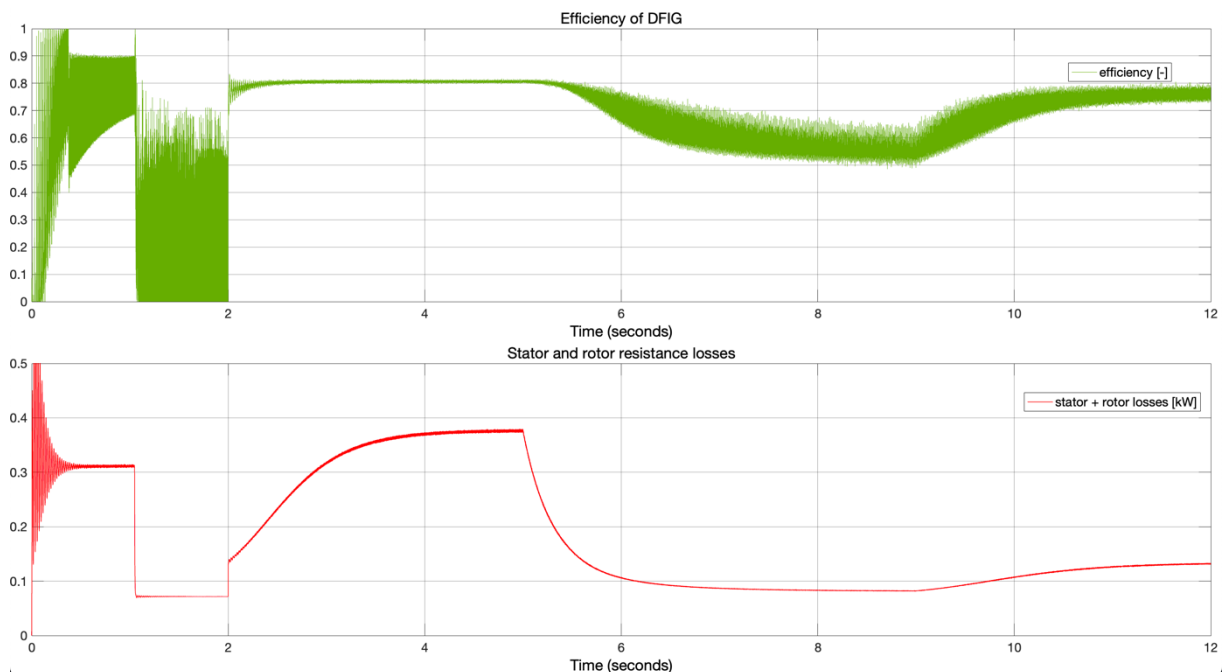
Na skokově se měnící rychlost větru reaguje v obou simulacích blok MPPT změnou otáček DFIG tak, aby se součinitel rychloběžnosti vracel směrem k optimální hodnotě, kdy je dosaženo maximálního výkonu, což je přesně to, co by měl dělat. Zvýšená dodávka Q_{GSC} nemá pozorovatelný vliv, což je správně.

7.2.8 Účinnost a jouleovy ztráty

Obrázek 37: Účinnost a jouleovy ztráty – $Q_{GSC} = 0$



Obrázek 38: Účinnost a jouleovy ztráty – $Q_{GSC} = 1000$



Simulovaný asynchronní stroj má satorové i rotorové vinutí s relativně velikými odpory, což se velmi negativně projevuje na výsledné účinnosti DFIG v přeměně mechanického výkonu z větrné turbíny do elektrické energie dodané statorem a rotorem. Jouleovy ztráty dosahují při maximálním zatížení téměř 400 W u stroje s jmenovitým výkonem 3,6 kW. Výsledkem je mizerné maximum účinnosti pouze 80 % při $v_w=12$ m/sec. Avšak pro starší výukový školní motor to není překvapením.

8 Závěr

Podařilo se vytvořit matematický model dvojité napájeného asynchronního generátoru v prostředí Matlab Simulink. Následně se podařilo model parametrizovat podle asynchronního stroje a měniče v laboratoři H26 Katedry elektrických pohonů a trakce. Nakonec se podařilo navrhnout, implementovat a naladit regulační strukturu pro řízení výkonu generátoru. Byly splněny pokyny pro vypracování.

Funkce DFIG ve vytvořeném modelu ve většině bodech odpovídala teoretickým předpokladům. DFIG opravdu umí dobře spolupracovat s větrnou turbínou, protože umí dobře měnit své otáčky a výrazně snižuje výkonové nároky na použitý měnič a zvyšuje účinnost celého systému. Horších výsledků bylo dosaženo u účinnosti a účinníku. Důvodem je ale použitý starší výukový asynchronní stroj, který má velké odpory a indukčnosti vinutí, takže nelze vinit samotný princip DFIG. Horší výsledky v tomto ohledu nejsou překvapením.

Implementace modelu dvojité napájeného asynchronního generátoru v prostředí Matlab Simulink se mi nejprve zdála jako spíše snadnější úkol, neboť jde o sestavení něčeho, o čem se ví, že funguje a je k tomu dostupná odvozená teorie. Nicméně se ukázalo, že to tak snadné není. Náročnost tkví především z množství parametrů modelu, které je potřeba stanovit relativně přesně. V modelu vystupuje například šest PI regulátorů, což znamená dvanáct konstant, které je potřeba přesně naladit. Navíc citlivost na hodnoty konstant regulátorů se mi zdála spíše větší zejména u síťového měniče. Během stavby modelu jsem se po delším trápení rozhodl, že dočasně odstraním celou část síťového měniče a ponechám pouze rotorový měnič. Takto zjednodušený model měl být výrazně snadnější na odladění, což se potvrdilo. Po úspěšném naladění rotorové části jsem zpět zakomponoval síťovou část měniče a ladění pohonu šlo mnohem lépe. Přesto bylo náročné a to zejména časově. Simulace trvaly příliš dlouho. Proto jsem se rozhodl celý model přestavět (ale zachovat základní) s cílem zefektivnit chod simulací. Bylo to správné rozhodnutí. Dobu výpočtu referenční simulace se podařilo zkrátit z cca 15-20 minut na cca 4-6 minut. Zrychlení bylo dosaženo použitím efektivnějších bloků/funkcí a použitím akceleratoru.

Mrzí mě, že jsem se na začátku nezkusil vydat cestou odvození analytických přenosů jednotlivých bloků regulačního schématu pro využití některých analytických metod pro odhad konstant regulátorů. Empirický způsob ladění je příliš časově náročný a nesystematický.

Návrhy zlepšení:

- zvětšit J pohonu na reálnou hodnotu a opakovat výstupní simulace (náročné na výpočetní výkon protože simulace budou delší),
- implementace vícestupňové převodovky pro zvýšení minimálních otáček generátoru, při nejnižší provozní rychlosti větru klesá účinnost transformace výkonu na hřídeli do výkonu v síti k 70 %,
- přesnější měření parametrů školního asynchronního stroje,

- implementace přesnějšího výpočtu úhlu síťového napětí pomocí PLL potřebného pro Park transformaci matematického modelu obvodu síťového měniče, filtru a sítě,
- výměna asynchronního stroje za lepší (snížení statorového a rotorového odporu, snížení indukčností).

9 Zdroje

- 1) JUST, Jan. *AERODYNAMIKA AXIÁLNÍCH VĚTRNÝCH TURBÍN* [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/23651/final-thesis.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. VÚT Brno.
- 2) HOLÝ, Tadeáš. *Analýza a porovnání vlastností asynchronních strojů s různými typy statorového vinutí* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82401/F3-DP-2019-Holy-Tadeas-DP_Holy_KOS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT FEL.
- 3) TEXAS INSTRUMENTS. *Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx*. Texas, USA, 1997. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/an/bpra048/bpra048.pdf>
- 4) Doubly-fed generators. *ABB.com* [online]. Švýcarsko, 2023 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://new.abb.com/motors-generators/generators/generators-for-wind-turbines/doubly-fed-generators>
- 5) ABAD, Gonzalo et. al. *DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: MODELING AND CONTROL FOR WIND ENERGY GENERATION*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-1-118-10494-1.
- 6) KOZAK, Peter. *EFFECTS OF UNSTEADY AERODYNAMICS ON VERTICAL-AXIS WIND TURBINE PERFORMANCE* [online]. Illinois, 2014 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263161316_Effects_of_Unsteady_Aerodynamics_on_Vertical-Axis_Wind_Turbine_Performance. Thesis. Illinois Institute of Technology.
- 7) Fixed-Speed Wind Energy Conversion Systems. *Ebrary.net* [online]. [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://ebrary.net/188967/engineering/fixed_speed_wind_energy_conversion_systems
- 8) JIANG, Yanda. Fixed speed wind turbine power curve. In: *NREL Forum* [online]. 2019 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://forums.nrel.gov/t/fixed-and-variable-wind-turbines-help-pls/1372>
- 9) Installed power. *Energy-Charts* [online]. Mnichov, Německo: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2023 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://www.energy-charts.info/>
- 10) Mathematics of three-phase electric power. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematics_of_three-phase_electric_power
- 11) Power Control of Wind Turbines. *Windpower.org* [online]. Denmark, 2003 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/powerreg.htm>
- 12) M. WILAMOWSKI, Bogdan a J. David IRWIN. *Power Electronics and Motor Drives: The Industrial Electronics Handbook*. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-138-07747-8.
- 13) ABU-RUB, Haitham, Mariusz MALINOWSKI a Kamal AL-HADDAD. *POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND*

- INDUSTRIAL APPLICATIONS*. United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & Sons LTD, 2014. ISBN 9781118634035.
- 14) KOBRLÉ, Pavel. *Přednášky předmětu Elektrické pohony a trakce: Matematický model AM a transformace souřadnic*. Praha: ČVUT FEL, 2019.
- 15) ŠKODA ENYAQ iV technické parametry. *Skoda-storyboard.com* [online]. Mladá Boleslav, 2022 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://cdn.skoda-storyboard.com/2022/03/TD-ENYAQ-iV-cz.pdf>
- 16) ENAIR ENERGY S.L. *User Manual E70 PRO Wind Turbine* [online]. Španělsko, 2022 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://www.enair.es/descargas/Manual/MANUAL_E70PROX2_en.pdf
- 17) BURTON, Tony et. al. *Wind Energy Handbook*. Velká Británie: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0471489972.
- 18) CASTILLO, John. Wind Turbine Components Market Estimated To Experience A Hike In Growth By 2024. *TMR Blog* [online]. Albany NY, 2019 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://tmrblog.com/wind-turbine-components-market-estimated-to-experience-a-hike-in-growth-by-2024/>

10 Seznam příloh

- simulační model v prostředí Matlab Simulink
- simulační parametry modelu