



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio dvigubo jungimo
asinchroniniame generatoriuje, tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Gintė Matulaitė

Projekto autorė

lekt. Gytis Petrauskas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio dvigubo jungimo
asinchroniniame generatoriuje, tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Gintė Matulaitė

Projekto autorė

lekt. Gytis Petrauskas

Vadovas

doc. dr. Arūnas Lipnickas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Gintė Matulaitė

Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio dvigubo jungimo asinchroniniame generatoriuje, tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gintės Matulaitės, baigiamasis projektas tema „Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio dvigubo jungimo asinchroniniame generatoriuje, tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Matulaitė, Gintė. Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio dvigubo jungimo asinchroniniame generatoriuje, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Gytis Petrauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: tiesioginis matricinis keitiklis, dvigubo jungimo asinchroninis generatorius, kintamosios srovės dažnio keitiklis su nuolatinės srovės intarpu, naudingumo koeficientas, suminiai harmoniniai iškraipymai.

Kaunas, 2019. 46 p.

Santrauka

Šiame darbe tiriama galimybė dvigubo jungimo asinchroninio generatoriaus vėjo elektrinėje panaudoti matricinį (toliau – MC) keitiklį. Tradiciškai tokiose elektrinėse yra jungiamas kintamosios srovės dažnio keitiklis su nuolatinės srovės intarpu (toliau – B2B), tačiau sparčiai tobulėjant galios elektronikai ir siekiant išgauti kuo daugiau elektros energijos už kuo mažesnę kainą, yra ieškoma alternatyvių sprendimų. Tiesioginio matricinio keitiklio realizavimas vėjo elektrinėje su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi yra atliekamas sudarant supaprastintus minėtų keitiklių modelius ir palyginant juose gautus galios nuostolius ir galios kokybę įvertinantį parametą –suminį harmonikų iškraipymą.

Tyrimo metu nustatyta, jog B2B keitiklio galios nuostolių vidurkis, kuris lygus 5,76 %, yra mažesni, negu MC keitiklio, kuris yra 6,20 %. Taip pat išsiaiškinta, jog mažiausi įtampų ir srovių suminiai harmonikų iškraipymai MC keitiklyje yra gaunami esant 1600 Hz impulsų moduliacijos dažniui, o B2B keitiklyje – 2000Hz impulsų moduliacijos dažniui. B2B ir MC keitiklio rotoriaus ir tinklo pusės srovių bei įtampų suminiai harmonikų iškraipymai buvo analizuojami plačiau esant nustatytam impulsų moduliacijos dažniui. Didžiausias skirtumas tarp B2B ir MC keitiklių gautas analizuojant įėjimo srovių suminius harmonikų iškraipymus. Nustatyta, jog MC keitiklyje jie yra net 30 % mažesni negu B2B keitiklio modelyje. Taip pat ištirta, jog tinklo pusės įtampų suminiai harmonikų iškraipymai yra 4,5 % mažesni B2B keitiklyje, o tinklo pusės srovių suminiai harmonikų iškraipymai yra 5 % mažesni MC keitiklyje.

Matulaitė, Gintė. Research of a Direct Matrix Converter Operating in a Doubly-Fed Induction Generator. Master's Final Degree Project/ supervisor lect. Gytis Petrauskas; Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronics engineering, engineering sciences.

Keywords: direct matrix converter, doubly-fed induction generator, back-to-back converter, efficiency, total harmonic distortion.

Kaunas, 2019m. 46 pages.

Summary

In this work, the possibility to use a direct matrix converter (MC) in a wind turbine with a doubly-fed induction generator is investigated. Traditionally, such power plants are equipped with *back-to-back* (B2B) converters, but alternative solutions are being sought out while development of power electronics is rapidly growing and the need to obtain as much energy as possible at the lowest feasible cost is one of the main goals of wind turbine developers. In this research, the realization of a direct matrix converter in a wind turbine with a doubly-fed induction generator is performed by creating simplified models of MC and B2B converters and comparing their power losses and the power quality parameter - the total harmonic distortion.

In this study the results show that the average power loss of the B2B converter is 5.76 %, which is slightly lower than the average power loss in the MC (6.20 %). It has also been found, that the smallest total harmonic distortion in the MC is with pulse frequency modulation of 1600 Hz and in the B2B is with pulse frequency modulation of 2000Hz. Total harmonic distortions of input and output currents and voltages were compared while pulse frequency modulation was set to the determined frequency. The biggest difference between B2B and MC was observed in the total harmonic distortions of input currents. It was found that in the MC it is 30 % smaller than in the B2B converter. It has also been investigated that the total harmonic distortion of output voltages is 4.5 % lower in the B2B compared with the MC, and the total harmonic distortion of the output currents is 5 % lower in the MC in comparison with the B2B.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Nagrinėjamos temos aktualumas	12
2. VE sistema.....	13
2.1. Vėjo elektrinių tipai.....	13
2.2. Dvigubo jungimo asinchroninis generatoriaus.....	13
2.3. Kintamosios srovės galios keitikliai.....	14
2.3.1. Bendras keitiklių veikimo principas.....	15
2.3.2. Kintamosios srovės dažnio keitiklis su nuolatinės srovės intarpu.....	16
2.3.3. Matricinis keitiklis.....	16
2.4. Žemo dažnio filtrai	17
3. Vėjo elektrinės su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi modelio aprašymas.....	19
3.1. Vėjo elektrinės modelis	20
3.2. Asinchroninio generatoriaus aprašymas.....	20
3.3. Kintamosios srovės dažnio keitiklių impulsų moduliacijos ir valdymo metodai	21
3.3.1. Kintamosios srovės dažnio keitiklio su nuolatinės srovės intarpu impulsų moduliacijos ir valdymo metodai	21
3.3.2. Matricinio keitiklio impulsų moduliacijos ir valdymo metodai.....	23
3.4. Suminis harmonikų iškraipymas	23
4. B2B keitiklio vėjo elektrinėje su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi tyrimas.	25
5. B2B ir MC keitiklių palyginimo kriterijai	29
5.1. Galios nuostoliai.....	29
5.2. Galios kokybė.....	30
6. Palyginamųjų B2B ir MC keitiklių modelių sudarymas.....	31
6.1. Elektros tinklo modelio aprašymas	31
6.2. B2B keitiklio modelio aprašymas	32
6.3. MC keitiklio modelio aprašymas.....	33
7. Rezultatų analizė	35
7.1. Galios nuostoliai.....	35
7.2. Galios kokybė.....	37
Išvados	44
Literatūros sąrašas	45

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Perjungimo konfigūracijos ir atitinkamos apkrovos įtampos VSC keitiklyje [10]	22
2 lentelė. VE DFIG sistemos darbo režimo charakteristikos	27
3 lentelė. Supaprastinto modelio į keitiklį įeinančios vidinio tinklo kabelių linijos parametrai [25]	32
4 lentelė. Supaprastinto modelio iš keitiklio išeinančio išorinio tinklo transformatoriaus parametrai [26]	32
5 lentelė. Supaprastinto modelio iš keitiklio išeinančio išorinio tinklo kabelių linijos parametrai [25]	32
6 lentelė. Modeliuojamo B2B keitikliui žemo dažnio LCL filtro parametrai.....	33
7 lentelė. Modeliuojamo MC keitikliui žemo dažnio LC filtro parametrai	34
8 lentelė. Keitiklių įėjimo aktyviosios galios vertės	35
9 lentelė. Galios nuostolių išmatuotų B2B ir MC keitiklių modeliuose rezultatai	36
10 lentelė. B2B keitiklio THD analizė esant skirtingiems impulsų moduliacijos dažniams (f) ir skirtingiems vėjo greičiams (v)	37
11 lentelė. MC keitiklio THD analizė esant skirtingiems impulsų moduliacijos dažniams (f) ir skirtingiems vėjo greičiams (v)	38

Paveikslų sąrašas

1 pav. Globali suminė instaliuota VE galia [5].....	12
2 pav. Kintamo greičio VE su dažnio keitikliu [1]	13
3 pav. Rotoriaus greičio ir besisukančio magnetinio lauko, sukuriama DFIG rotoriaus apvijose, dažnio sąveika [8].....	14
4 pav. Standartinė trifazio PWM AC/AC dažnio keitiklio veikimo schema [10].....	15
5 pav. Dviejų lygių netiesioginis dažnio keitiklis su įtampos šaltinio inverteriu ir diodų tilto lygintuvu [10]	16
6 pav. Supaprastinta trifazio matricos keitiklio grandinė [10].....	17
7 pav. LCL filtro ekvivalentinė vienlinijinė schema [11].....	18
8 pav. LC filtro ekvivalentinė vienlinijinė schema [12]	18
9 pav. VE sistemos su DFIG dinaminis modelis ir duomenų ryšiai tarp įrenginių [9].....	19
10 pav. Aktyvaus vektoriaus dq koordinačių plokštumoje trifazio VSC atvaizdavimas [10]	22
11 pav. VE ir DFIG blokinė jungimo schema Matlab SIMULINK aplinkoje.....	25
12 pav. B2B keitiklio DFIG modelyje struktūrinė jungimo schema <i>Matlab SIMULINK</i> aplinkoje	26
13 pav. Vėjo elektrinės su dvigubo jungimo generatoriumi ir AC/DC/AC keitikliu galios kreivė (P). Elektromagnetinio sukimo momento modulio (T_{em}) ir menčių pasukimo kampo (β) priklausomybė nuo vėjo greičio (v).....	27
14 pav. VE DFIG sistemos aktyvioji galia (P) ir B2B keitikliui tenkanti aktyviosios galios dalis (P_{in})	29
15 pav. Supaprastintame modelyje modeliuojama į keitiklį įeinančio vidinio elektros tinklo blokinė jungimo schema.....	31
16 pav. Supaprastintame modelyje iš keitiklio išeinančio išorinio elektros tinklo blokinė jungimo schema	32
17 pav. Modeliuojama LCL filtro ir B2B keitiklio blokinė jungimo schema.....	33
18 pav. Modeliuojama LC filtro ir MC keitiklio blokinė jungimo schema	34
19 pav. B2B_DFIG, B2B ir MC modelių įeinančios į keitiklius aktyviosios galios charakteristikos	35
20 pav. B2B ir MC keitiklių naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo bazinės į keitiklį įeinančios aktyviosios galios P_{in} vertės	36
21 pav. B2B keitiklio įėjimo srovių (I_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio	39
22 pav. MC keitiklio įėjimo srovių (I_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio	39
23 pav. B2B keitiklio išėjimo srovių (I_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio.....	40
24 pav. MC keitiklio išėjimo srovių (I_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio.....	40
25 pav. B2B keitiklio įėjimo įtampų (U_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio.....	41
26 pav. MC keitiklio įėjimo įtampų (U_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio	41
27 pav. B2B keitiklio išėjimo įtampų (U_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio	42

28 pav. MC keitiklio išėjimo įtampų (U_{out}) THD pasiskirstymo priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio	42
29 pav. B2B ir MC keitiklių įėjimo (U_{in}) ir išėjimo (U_{out}) įtampų THD_U priklausomybė nuo vėjo greičio	43
30 pav. B2B ir MC keitiklių įėjimo (I_{in}) ir išėjimo (I_{out}) srovių THD_I priklausomybė nuo vėjo greičio	43

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

Doc. – docentas;

Lekt. – lektorius;

Prof. – profesorius;

AC – kintamoji srovė (angl. *Alternating Current*);

B2B – kintamosios srovės dažnio keitiklis su nuolatinės srovės intarpu (AC/DC/AC) ir IGBT pagrįsta PWM (angl. *Back-to-Back converter*);

DFIG – dvigubo jungimo asinchroninis generatorius (angl. *Doubly-Fed Induction Generator*);

DC – nuolatinė srovė (angl. *Direct Current*);

IGBT – dvipolis tranzistorius su nuskurdintu kanalu (angl. *Insulated-Gate Bipolar Transistor*);

ISVM – netiesioginė būsenos vektoriaus moduliacija (angl. *Indirect Space Vector Modulation*);

MC – tiesioginis matricinis keitiklis (angl. *Direct Matrix Converter*);

MPPT – maksimalaus galios taško sekimas (angl. *Maximum Power Point Tracking*);

PWM – impulso ilgio moduliacija (angl. *Pulse-Width Modulation*);

RMS – lygiavertė vidutinė kvadratinė (angl. *Root Mean Square*) įtampa arba srovė;

SVM – būsenos vektoriaus moduliacija (angl. *Space Vector Modulation*);

THD – suminis harmonikų iškreipymas (angl. *Total Harmonic Distortion*);

VE – vėjo elektrinė;

VSC – įtampos šaltinio kintamosios srovės galios keitiklis (angl. *Voltage Sourced Converter*).

Įvadas

Pastaruoju metu daugelyje pasaulio šalių yra siekiama įdiegti vis daugiau atsinaujinančią energiją generuojančių šaltinių. Viena populiariausių tokios energijos alternatyvų yra vėjo elektrinės (toliau – VE). Tai reiškia, jog dėl išaugusio VE generuojamos galios indėlio į elektros tinklą, vis svarbesnį vaidmenį atlieka elektrinės valdymas, o siekiant išgauti kuo daugiau energijos – energijos keitikliai. Šiuo metu rinkoje labiausiai paplitusi VE sistema yra dvigubo jungimo asinchroninio generatoriaus (angl. *Doubly-Fed Induction Generator*, toliau – DFIG) principu veikianti vėjo elektrinė, kurioje rotoriaus slydimo energija į elektros tinklą yra perduodama per netiesioginį kintamosios srovės dažnio keitiklį su nuolatinės srovės intarpu (angl. *Back-to-Back*, toliau – B2B). Šiame darbe yra analizuojama minėtoji sistema ir tiriama galimybė joje pritaikyti tiesioginį matricinį keitiklį (angl. *Direct Matrix Converter*, toliau – MC).

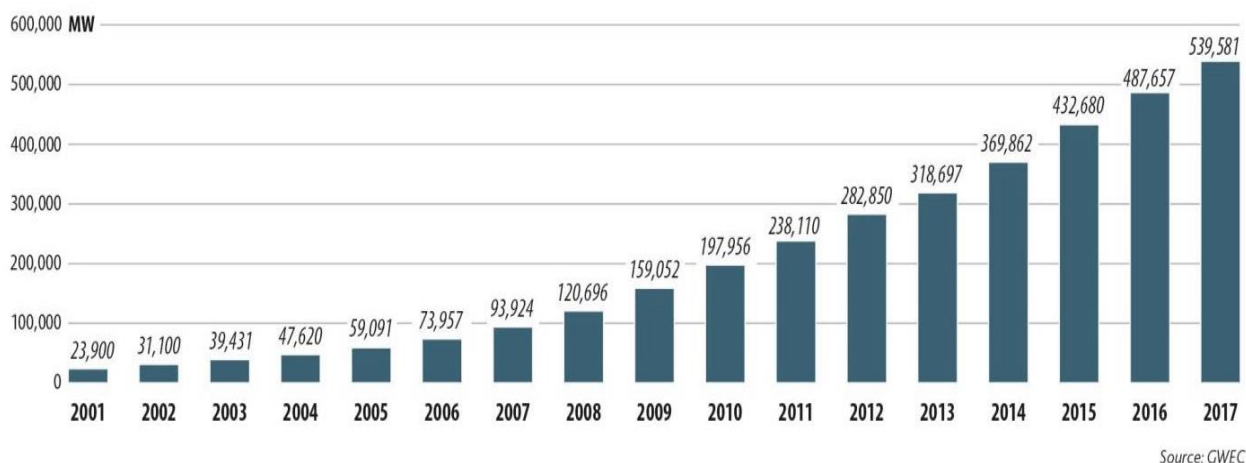
Tikslas – ištirti galimybę dvigubo jungimo asinchroninio generatoriaus vėjo elektrinėje pakeisti tradiciškai naudojamą netiesioginį *Back-to-Back* keitiklį tiesioginiu matriciniu keitikliu.

Uždaviniai:

- 1) ištirti DFIG sistemos charakteristikas;
- 2) sudaryti B2B keitiklio DFIG sistemoje modelį *Matlab SIMULINK* aplinkoje;
- 3) sudaryti MC keitiklio DFIG sistemoje modelį *Matlab SIMULINK* aplinkoje;
- 4) atlikti palyginamąjį keitiklių charakteristikų tyrimą.

1. Nagrinėjamos temos aktualumas

Vėjo elektrinės pradėtos diegti 1980-aisiais [1], tuomet jų galia siekė tik kelias dešimtis kW, o šiandien VE galia jau išaugo iki kelių MW. Viena iš pagrindinių VE tiekėjų pasaulyje „GE Renewable energy“ jau 2019m. planuoja pristatyti didžiausią ir galingiausią (12 MW galios) vėjo elektrinę pasaulyje – *Haliade-X* [2]. Akivaizdu, jog iš pradžių vėjo energijos gamyba neturėjo jokios įtakos elektros energetikos sistemos valdymui, tačiau padidėjus VE galios diapazonui, atsirado poreikis suderinti vėjo elektrinių charakteristikas su tinklo jungčių reikalavimais, t. y. įtampa, aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymu, harmonikomis ir kitais parametrais [1][3]. Šiam tikslui pasiekti, buvo būtina įdiegti galios elektroniką kaip sąsają tarp vėjo elektrinės ir elektros tinklo. Nors energijos keitiklių technologijos vystymasis prasidėjo dar 1970-taisiais, tačiau pastaruoju metu, dėl ypač sparčiai augančios vėjo energetikos rinkos (1 pav.), pastebimas ypatingai didelis susidomėjimas galios elektronikos technologijų taikymais. Siekiant sumažinti VE įrengimo ir eksploataavimo išlaidas bei didinti jų efektyvumą ir patikimumą, nemaža dalis mokslininkų savo darbuose dėmesį skiria konversijos sistemų nagrinėjimui ir naujų technologijų kūrimui [3][4].



1 pav. Globali suminė instaliuota VE galia [5]

Idėja naudoti matricinius keitiklius VE pirmą kartą buvo pasiūlyta 1998m [6], tačiau MC keitikliai dėl sudėtingesnių impulsų moduliacijų technikų ir perjungimo valdymo metodų buvo kiek nustumti į šoną B2B keitiklio (t. y. kintamosios srovės dažnio keitiklio su nuolatinės srovės intarpu) technologijos. VE gamintojams vis labiau siekiant sumažinti atsinaujinančios energijos kainas MC keitiklių pritaikymo vėjo industrijoje tema kalbama vis dažniau. MC keitiklyje nuolatinės srovės grandinės kondensatoriaus nebuvimas gali padidinti jo efektyvumą ir tarnavimo laiką. Priklausomai nuo dvikrypčių jungiklių realizavimo, MC keitiklio nuostoliai gali būti mažesni nei B2B keitiklio. MC keitikliuose lengviau atkurti sinusoidines įvesties ir išėjimo srovių bangas, kurių harmonikų iškreipimai yra mažesni [7]. Dėl minėtų priežasčių šiame darbe bus siekiama iširti supaprastintus B2B ir MC keitiklių modelius ir palyginti jų aktyviosios galios nuostolius bei suminį harmonikų iškreipimą (angl. *Total Harmonic Distortion*, toliau – THD).

2. VE sistema

Šiame skyriuje apžvelgiami vėjo elektrinių tipai ir pagrindiniai jų skirtumai, plačiau analizuojama VE su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi veikimo sistema ir joje naudojami galios keitikliai.

2.1. Vėjo elektrinių tipai

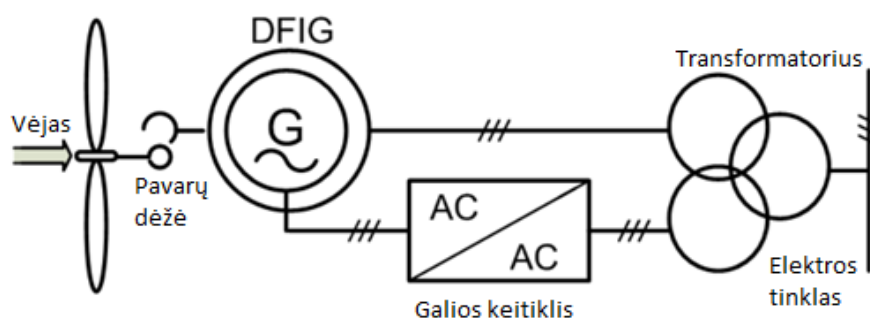
Moksliniuose darbuose yra išskiriami keturi VE tipai [1].

- A) fiksuoto greičio VE;
- B) iš dalies kintamo greičio VE su kintama rotoriaus varža;
- C) kintamo greičio VE su daliniu galios keitikliu;
- D) kintamo greičio VE su pilnu galios keitikliu.

Pagrindiniai skirtumai tarp šių koncepcijų yra elektros energiją generuojanti sistema ir būdas, kuriuo, siekiant išvengti perkrovos, yra ribojamas rotoriaus aerodinaminis efektyvumas, kai generuojama didesnė negu vardinė galia. Dėl savo efektyvumo, galios valdymo diapazono ir gebėjimo veikti įvairių vėjo greičių ribose, labiausiai šiuo metu rinkoje yra paplitusios C tipo kintamo greičio VE su daliniu galios keitikliu ir D tipo kintamo greičio VE su pilnu galios keitikliu. C tipo elektrinėse dažniausiai yra naudojami dvigubo jungimo asinchroniniai generatoriai.

2.2. Dvigubo jungimo asinchroninis generatoriaus

Dvigubo jungimo asinchroninio generatoriaus (toliau – DFIG) principas yra naudojamas C tipo kintamo greičio VE su daliniu galios keitikliu. Tokio tipo VE sistemos topologija pavaizduota 2 paveiksle[1].

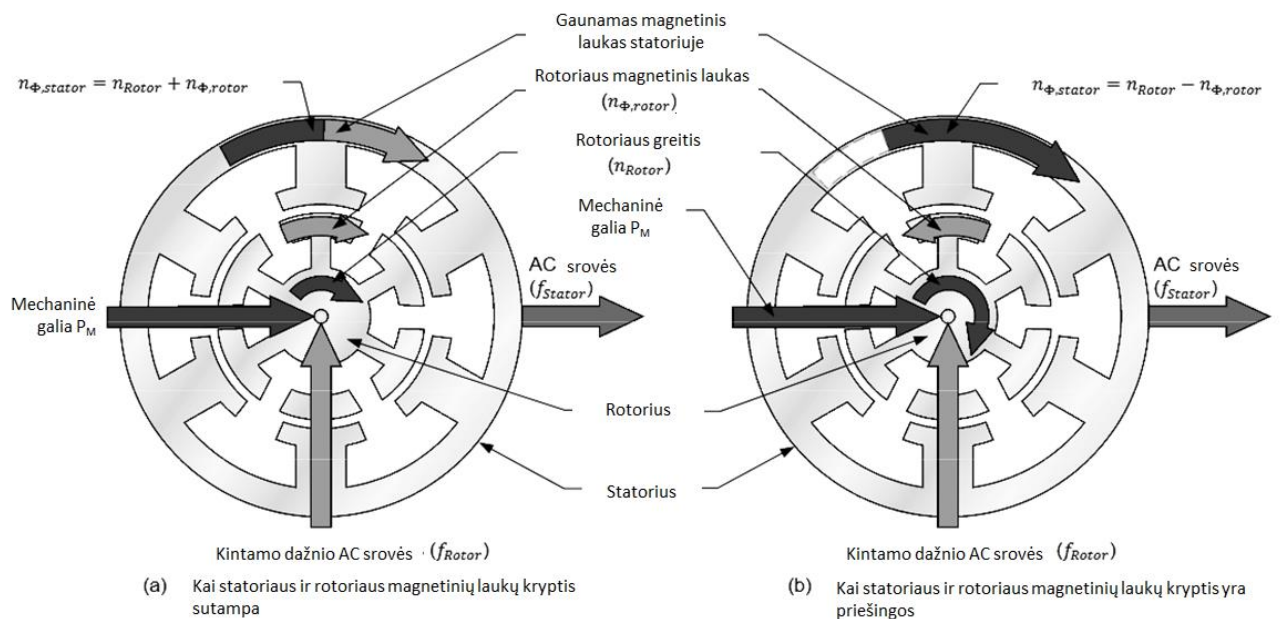


2 pav. Kintamo greičio VE su dažnio keitikliu [1]

Iš pateikto paveikslo matyti, jog DFIG tipo elektrinėse statorius yra tiesiogiai jungiamas prie elektros tinklo, o rotorius prie elektros tinklo yra jungiamas per AC/AC galios keitiklį. Šiai sistemai nereikia starterio ar reaktyviosios galios kompensatoriaus [8].

DFIG veikimo principas pagrįstas tuo, kad veleno mechaninė energija paverčiama į elektros energiją, kuri yra tiekiamą į kintamosios srovės elektros tinklą tiek statoriaus, tiek rotoriaus apvijomis. Asinchroninis generatorius veikia kaip sinchroninis variklis, kurio sinchroninis greitis (t. y. greitis, kuriuo generatoriaus velenas turi sukintis, kad generuotų elektros energiją kintamosios srovės tinklo dažniu) gali būti keičiamas koreguojant rotoriaus apvijoms tiekiamos kintamosios

srovės dažnį f_{rotor} . (3 pav.) [8]. Toks generatorius gali tiekti elektros energiją į tinklą tiek besisukdamas didesniu negu sinchroninis greičiu, tiek ir mažesniu [1].



3 pav. Rotoriaus greičio ir besisukančio magnetinio lauko, sukuriama DFIG rotoriaus apvijose, dažnio sąveika [8]

Didžiausias tokios sistemos privalumas yra toks, kad perduodama tik dalis elektros energijos per galios keitiklį. Todėl galios keitiklio sistemos vardinė galia gali būti mažesnė nei VE vardinė galia ir sudaryti apie 30 % VE generatoriaus galios, o rotoriaus greičio svyravimai gali siekti apie $\pm 30\%$ vardinio greičio [9]. Keitikliai tokiose sistemose valdo aktyviosios galios srautą tarp rotoriaus ir statoriaus. Šiais galios elektronikos prietaisais atliekamas reaktyviosios galios kompensavimas ir sklandus VE prijungimas prie bendrojo elektros tinklo. Valdant keitiklio aktyviają galią, galima keisti generatoriaus sukimosi greitį ir tokiu būdu VE rotoriaus greitį [1][3].

Rotoriaus greičio valdymo diapazonas C tipo vėjo elektrinėse yra didesnis, lyginant su B tipo kintamos rotoriaus varžos VE. Ekonominiu požiūriu ši koncepcija yra patrauklesnė ne tik dėl mažesnio dažnio keitiklio, bet ir dėl to, kad DFIG jungimo principas suteikia energijos šaltiniui daugiau dinamiškumo elektros energijos tinkle. Atsižvelgiant į nominalią galią, VE paprastai veikia 120 % greičiu arba su -20% slydimu [9]. Todėl pagrindiniai aptariamo jungimo trūkumai yra slydimo žiedų naudojimas ir apsaugos sistemos bei jų valdymas elektros tinklo gedimo atveju [8].

2.3. Kintamosios srovės galios keitikliai

Kintamo greičio vėjo elektrinėse su DFIG generatoriumi valdymo sistema, esantis galios keitiklis, gali koreguoti VE generuojamą galią, pagal maksimalų darbo tašką (angl. *Maximum Power Point Tracking*, toliau – MPPT), taip pat riboti VE generuojamą galią esant dideliems vėjo greičiams bei reguliuoti reaktyviosios galios mainus tarp VE ir elektros tinklo. Visa tai atliekama keičiant įėjimo parametrus [10]:

- apkrovos įtampos amplitudę;
- apkrovos poslinkio kampą, susietą su šaltinio įtampa;
- poslinkio kampą tarp šaltinio srovių ir įtampos (įėjimo galios koeficientą);

- dvikryptės (arba vienkryptės) galios srautą tekantį per keitiklį.

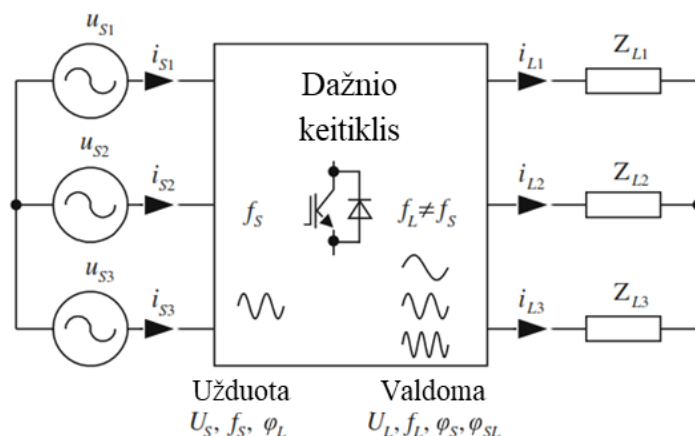
Kintamosios srovės arba AC/AC (angl. *Alternating Current*) dažnio keitiklių topologijos, priklausomai nuo AC/AC konversijos tipo, gali būti klasifikuojamos į [10]:

- 1) netiesioginės struktūros su nuolatinės srovės (angl. *Direct Current*, toliau – DC) energijos kaupimo elementais;
- 2) tiesioginės struktūros be DC energijos kaupimo elemento;
- 3) hibridinės struktūros su mažais vietiniais DC energijos kaupimo elementais.

Pirmoji grupė apima, šiuo metu populiariausius ir plačiai naudojamus pramonėje ir namų ūkiuose, netiesioginius dažnio keitiklius su įtampos arba srovės šaltinio inverteriais. Pastarajai grupei priskiriami ir B2B keitikliai. Antroji kategorija neturi nuolatinės srovės energijos kaupimo elementų. Šiuos keitiklius sudaro tarp šaltinio ir apkrovos gnybtų masyvu sujungti stacionarūs dvikrypčiai galios jungikliai. Dėl šio jungimo principo jie yra vadinami matriciniais keitikliais [10]. Plačiau apie jų veikimą ir sandarą aprašoma sekančiuose poskyriuose.

2.3.1. Bendras keitiklių veikimo principas

Standartinė trifazio kintamosios srovės dažnio keitiklio, valdomo impulso ilgio moduliacija (angl. *Pulse-Width Modulation*, toliau – PWM), jungimo schema pavaizduota 4 paveiksle. Sinusoidiniai įtampos šaltiniai (su nuolatinė amplitudė U_S ir pastoviu dažniu f_S) prijungiami prie dažnio keitiklio įvesties terminalų. Šaltinių įtampa paverčiama į išėjimo įtampos bangas su nustatyta amplitudė U_L , dažniu f_L ir apkrovos poslinkio kampų susietu su šaltinio įtampa U_S . Ši išėjimo įtampa taikoma apkrovai. Apkrovos srovės amplitudės I_L ir fazės kampai φ_L yra nustatomi pagal apkrovos varžos charakteristiką. Dvikrypčio galios srauto valdymo atveju, kai kryptis yra iš išvesties gnybtų į įvesties gnybtus, dažnio keitiklis paverčia apkrovos įtampos bangas f_L į įvesties srovės bangas f_S [10].

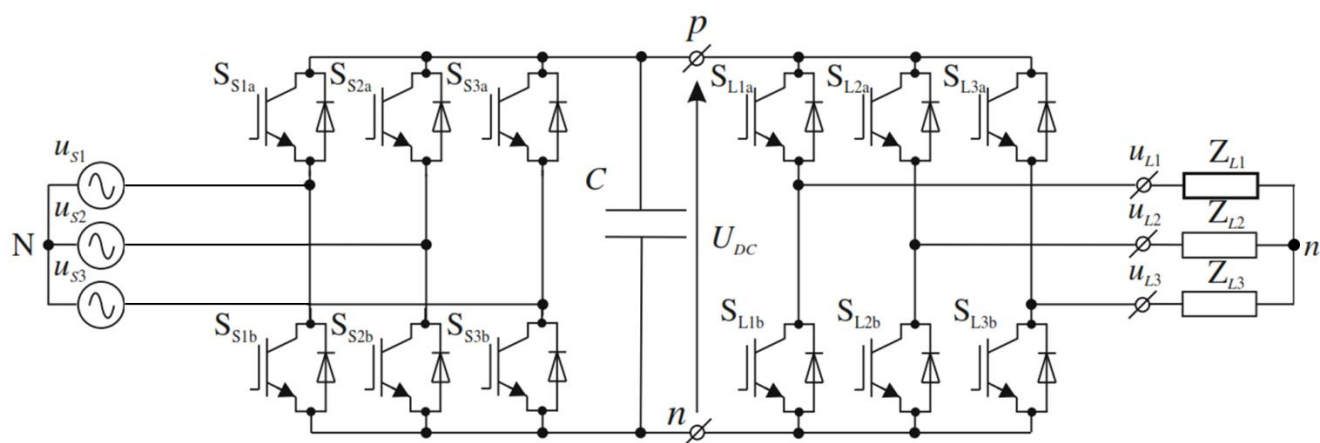


4 pav. Standartinė trifazio PWM AC/AC dažnio keitiklio veikimo schema [10]

Sekančiuose poskyriuose bus išsamiau aptariami pirmos (netiesioginės struktūros) ir antros (tiesioginės struktūros) kategorijų dažnio keitikliai, jų valdymo niuansai ir modeliavimas.

2.3.2. Kintamosios srovės dažnio keitiklis su nuolatinės srovės intarpu

Yra keletas netiesioginės struktūros įtampos keitiklių rūšių, tačiau šiuo metu plačiausiai vėjo elektrinėse yra naudojami įtampos šaltinio kintamosios srovės galios keitikliai (angl. *Voltage Sourced Converter*, toliau – VSC) su IGBT (t. y. dvipolio tranzistoriaus su nuskurdintu kanalu (angl. *Insulated-Gate Bipolar Transistor*)) tiltu (5 pav.). Pastarųjų topologija sudaryta iš jėgos komutuojamo lygintuvo ir jėgos komutuojamo keitiklio, kuris yra prijungtas prie bendros DC jungties. Šio tipo keitikliai dar vadinami B2B. Toks keitiklis paverčia kintamąją srovę į nuolatinę ir vėliau konvertuoja nuolatinę srovę atgal į kintamąją srovę su kintama amplitude ir dažniu. Nuolatinės srovės jungtį sudarantis kondensatorius atskiria du kintamosios srovės energijos perdavimo etapus ir užtikrina nepriklausomą jų valdymą [10].



5 pav. Dviejų lygių netiesioginis dažnio keitiklis su įtampos šaltinio inverteriu ir diodų tilto lygintuvu [10]

B2B keitiklis skirstomas į dvi dalis: tinklo pusės keitiklį ir rotoriaus pusės keitiklį. Šie keitikliai yra valdomi atskirai. Tinklo pusės keitiklis gali būti valdomas taip, kad gautų sinusoidines šaltinio sroves, o stabdymo energiją būtų galima gražinti atgal į elektros tinklą. Šį keitiklį dar galima vadinti sužadavimo keitikliu, t. y. jo DC jungties pusės įtampa turi būti didesnė už maksimalią tiekimo linijos įtampos vertę.

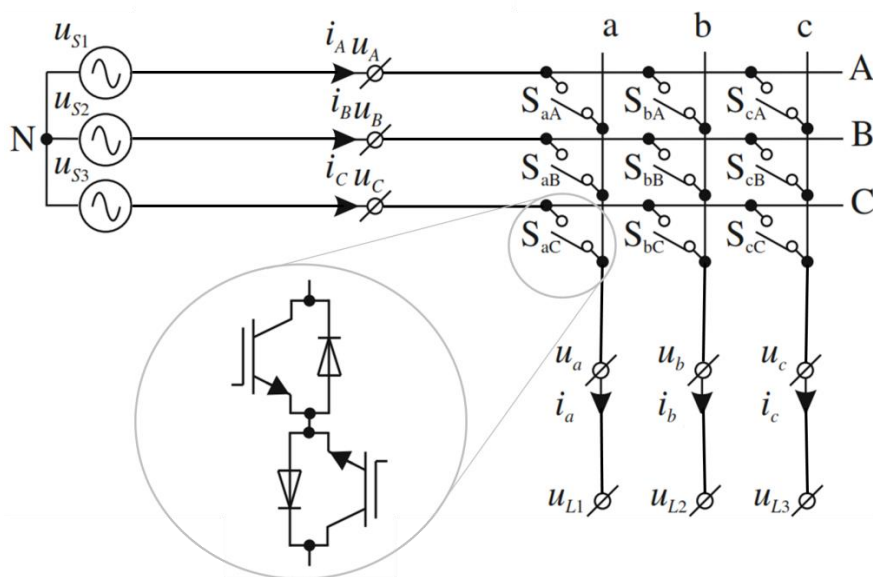
Programuojant aukšto dažnio įtampos impulsus klasikinis VSC generuoja žemo dažnio išėjimo įtampą su reguliuojamu dydžiu ir dažniu. Iš įvairių impulsų programavimo metodų daugeliu atveju yra teikiama pirmenybė nešlio impulso ilgio moduliavimo metodams (angl. *carrier-based PWM*) [10]. Apie tai plačiau aprašoma 3.3.1 skyriuje.

B2B keitikliams, taip pat yra reikalingi žemo dažnio filtrai – induktoriai. Šie filtrai yra viena didžiausių šio tipo keitiklių problemų, nes yra gremėzdiški ir sunkesni už DC jungties kondensatorius žemos ir vidutinės galios keitikliuose. Plačiau apie B2B keitiklių filtrus aprašoma 2.4 skyriuje.

2.3.3. Matricinis keitiklis

Tiesioginės struktūros keitikliai taip pat yra išskiriami į keletą rūšių, tačiau lygiai taip kaip ir klasikinių keitiklių atveju, dažniausiai yra nagrinėjami įtampos šaltinio matriciniai keitikliai (angl. *Voltage Source Matrix Converter*), kurie dažnai vadinamas tiesiog matriciniais keitikliais arba MC [10].

Paprastai matricinis keitiklis yra vienos pakopos, turintis $m \times n$ fazių masyvą dvikrypčių galios jungiklių, kurie tiesiogiai jungia m -fazės įtampos šaltinį su n -fazės apkrova. Trifazėse sistemose MC yra sudaromas iš devynių dvikrypčių jungiklių masyvo (6 pav.). Toks jungimo būdas leidžia bet kokią apkrovos fazę prijungti prie bet kurio šaltinio fazės.



6 pav. Supaprastinta trifazio matricos keitiklio grandinė [10]

MC keitiklio valdymas yra pagrįstas sudėtinga jungiklių komutacija. Tai yra vienas didžiausių šio keitiklio valdymo iššūkių. MC keitiklyje esantys dvikrypčiai galios jungikliai neturi natūralaus laisvos eigos kelio, kuris yra būdingas klasikiniam VSC kur dvikrypčiai galios jungikliai yra apsaugoti DC jungties kondensatoriumi. Dėl pastarosios priežasties srovės komutavimas tarp jungiklių MC keitiklyje yra sunkiau pasiekiamas negu VSC. Įgyvendinant MC keitiklių jungiklių valdymo strategijas, reikia laikytis dviejų bendrųjų taisyklių [10]:

- 1) jungiklių komutavimas neturėtų sukelti trumpojo jungimo tarp dviejų įvesties fazių, nes dėl to atsiradusi didelė trumpojo jungimo srovė gali sugadinti jungiklius;
- 2) jungiklių komutavimas neturėtų sukelti išėjimo srovės nutraukimo, nes dėl to atsirandantis viršįtampis gali sugadinti jungiklius.

Plačiau MC keitikliui taikomi moduliacijos ir valdymo metodai aprašyti 3.3.2 skyriuje.

Našumo padidinimui MC keitiklis taip pat turi turėti žemo dažnio filtrą. Paprastai šis filtras reikalingas tam, kad būtų sumažinta aukšto dažnio komponentų įtaka įvesties srovei ir sumažėtų trikdžių įtaka iš tinklo. Šių filtrų dydis yra atvirkščiai proporcingas matricos keitiklio perjungimo dažniui. MC filtrai plačiau aprašomi 2.4 skyriuje.

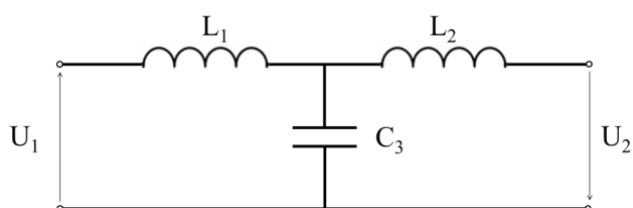
Pagrindinis matricos keitiklių privalumas, lyginant su klasikiniiais keitikliais, yra DC jungties kondensatoriaus, kuris gali sumažinti keitiklio efektyvumą ir veikimo trukmę, nebuvimas.

2.4. Žemo dažnio filtrai

Kaip jau minėta 2.3 skyriuje tiek B2B, tiek MC keitiklių aukšto dažnio harmonikų pašalinimui yra reikalingi žemo dažnio filtrai. Tam, jog būtų sumažintos AC/AC keitiklio, sukeltos harmonikos, DFIG jungimo principu veikiančiose vėjo elektrinėse yra naudojami rotorius ir elektros tinklo

pusės žemo dažnio filtrai (angl. *low-pass filters*) [11]. Rotoriaus srovėse harmonikos sukelia nepageidaujamus aktyviosios ir reaktyviosios galios svyravimus, o statoriaus srovėse esančios harmonikos ženkliai blogina į tinklą paduodamos galios kokybę. Įprastai VE su DFIG sistemose yra naudojami pasyvūs filtrai, tai reiškia, jog tokie filtrai yra sudaryti iš pasyvių elementų, tokių kaip ritės arba induktyvumai (L) ir kondensatoriai (C).

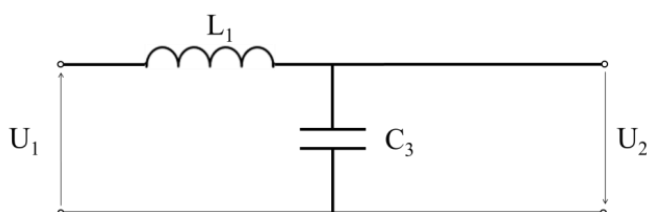
Dėl didelės talpos, esančios DFIG vėjo elektrinėse PWM valdymo principu veikiančiuose B2B keitikliuose, perjungimo dažnis nėra labai didelis. Ši priežastis lemia tai, jog norint sušvelninti harmonikas atsirandančias dėl mažo perjungimo dažnio, reikia didelio induktyvumo t. y. L tipo filtro. Tačiau dar didesnę harmonikų slopinimą padeda sukurti LCL filtras, kuris pavaizduotas 7 paveiksle [11].



7 pav. LCL filtro ekvivalentinė vienlinijinė schema [11]

LCL filtrą galima apibūdinti, kaip induktyvumą L_1 nuosekliai sujungtą su induktyvumu L_2 , kuriam paraleliai prijungiamas kondensatorius C_3 . Pastarieji filtro parametrai daro didelę įtaką LCL filtro veikimui. Naudojant prastai suprojektuotus parametrus nebus pasiektas tikėtinas slopinimo efektas arba dėl šalutinių virpesių atsiradimo atsiras harmonikų padidėjimai.

MC keitikliai sukelia srovės harmonikas, kurios patenka atgal į kintamosios srovės sistemą. Šios srovės harmonikos gali sukelti įtampos iškreipimus, turinčius įtakos kintamosios srovės sistemos veikimui. Šių nepageidaujamų harmonikų atsiradimo priežastys yra asimetrija užtvarų signaluose, asinchronizmas moduliacijos metode, perjungimo vėlavimai ir kiti netikslumai praktiniuose valdymo algoritmų įgyvendinimuose [12]. Siekiant užtikrinti tinkamą įtampos lygį MC keitiklio gnybtuose, ir sumažinti aukšto dažnio komponentų įtaką srovėms, taip pat reikia žemo dažnio filtro. Norint išvengti minėtų signalų taršos MC keitikliuose naudojami LC filtrai (8 pav.).



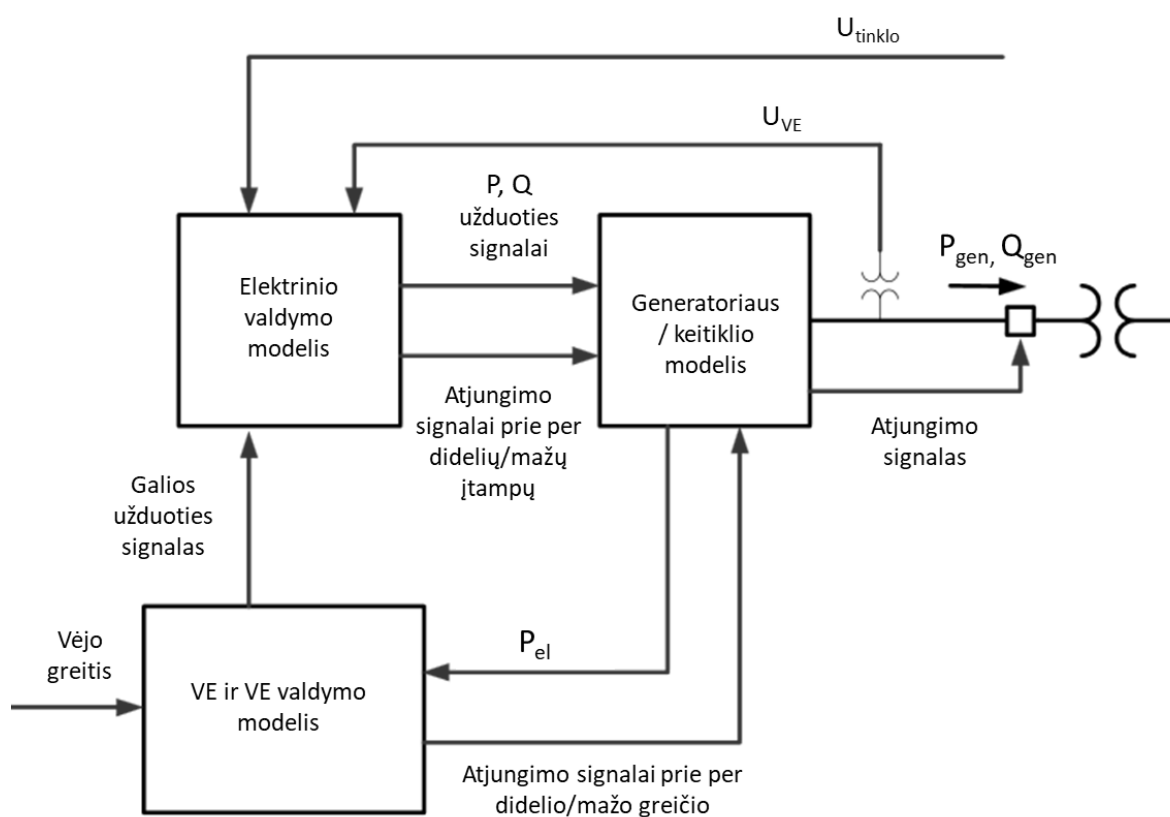
8 pav. LC filtro ekvivalentinė vienlinijinė schema [12]

Šio pasirinkimo priežastis yra pasyviųjų LC filtrų paprastumas ir jų gebėjimas išgauti norimas specifikacijas, naudojant didesnę efektyvumą, mažesnę dydį ir mažesnes sąnaudas nei naudojant aktyvius filtrus. 8 paveiksle pateiktame LC filtre induktyvumas L_1 yra jungiamas į grandinę nuosekliai, o kondensatorius C_3 – lygiagrečiai. Kondensatoriai C užtikrina žemą varžą pulsuojančiai aukšto dažnio srovei ir taip sušvelnina srovės harmoninius iškreipimus. Filtrų kondensatoriai yra prijungti žvaigžde prie virtualaus neutralaus taško, todėl sumažėja jų įtampa.

3. Vėjo elektrinės su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi modelio aprašymas

Visas VE sistemos su DFIG dinaminis modelis yra sudarytas iš trijų modelio komponentų (9 pav.) [9]:

- 1) generatoriaus / keitiklio modelio: ši VE sistemos modelio dalis sąveikauja su elektros tinklu ir modeliuoja kai kuriuos įrangos apribojimus;
- 2) elektrinio valdymo modelio: ši VE sistemos modelio dalis apima uždarnos ir atvirosios grandinės reaktyviosios galios valdymo funkcijas ir perduoda kitoms sistemos dalims reguliatoriaus funkcijas;
- 3) VE ir jos valdymo modelio: šioje VE sistemos modelio dalyje yra užprogramuotas mechaninis sistemos valdymas, įskaitant – menčių pasukimo kampo (angl. *pitch angle*) valdymą ir galios valdymo signalo perdavimą į keitiklį; greičio kitimą; rotoriaus inercijos lygtį, vėjo energiją, kaip vėjo greičio, menčių pasukimo kampo ir rotoriaus greičio funkciją.



9 pav. VE sistemos su DFIG dinaminis modelis ir duomenų ryšiai tarp įrenginių [9]

Pagrindinis VE valdymo tikslas yra maksimaliai padidinti energijos gamybą išlaikant pageidaujamą rotoriaus greitį ir išvengiant įrangos perkrovų [9]. Tolimesniuose poskyriuose plačiau bus aptariami dinaminio modelio ypatumai ir aiškinama, kaip efektyviai galima panaudoti VE generatoriaus rotoriuje generuojamą slydimo energiją, konvertuojant kintamo dažnio elektros energiją į tinklo dažnio elektros energiją ir tiekiant į energetinės sistemos elektros tinklą. Taip pat sekančiuose poskyriuose aprašomas vienas iš būdų efektyviam VE valdymui pasiekti t. y. valdymo įtaisai: menčių pasukimo laipsnis ir sukimo momentas, kurių signalai yra paduodami elektriniam valdikliui (keitikliui)[9].

3.1. Vėjo elektrinės modelis

Horizontalios ašies vėjo elektrinių santykis tarp vėjo greičio ir VE mechaninės energijos, išgautos iš vėjo energijos, gali būti išreikštas formule [13]:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3, \quad (1)$$

čia: C_p – našumo (arba galios) koeficientas, ρ oro tankis (kg/m^3), A – vėjo elektrinės rotoriaus menčių veikimo plotas (m^2) (angl. *swept area of the turbine rotor*), v – vėjo greitis (m/s).

Galios koeficientas C_p esantis (1) formulėje priklauso nuo mentės pokrypio kampo β ir mentės galo greičio λ santykio. Jų priklausomybė aprašoma lygybe:

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}}}, \quad (2)$$

čia: λ išreiškiamas kaip santykis tarp linijinio mentės galo greičio ir vėjo greičio.

Siekiant išgauti maksimalią galią iš vėjo energijos, yra sudaroma VE galios kreivė, kuri seka MPPT. Šį tašką galima apskaičiuoti pagal formulę [14]:

$$P_{MPPT} = T_{em} \omega_s. \quad (3)$$

čia: T_{em} – elektromagnetinis sukimo momentas tenkantis rotoriumi iš generatoriaus, ω_s – sinchroninis generatoriaus sukimosi greitis, kuris priklauso nuo įtampos esančios elektros tinkle dažnio ir generatoriaus polių skaičiaus.

3.2. Asinchroninio generatoriaus aprašymas

Asinchroninio generatoriaus besisukančio kampiniu greičiu ω_s , elektrinės lygtys bendroje dq atskaitos sistemoje gali būti užrašomos taip [13]:

$$\begin{cases} u_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ u_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} \\ u_{rq} = r_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_r \psi_{rd} \end{cases}, \quad (4)$$

čia: u_{sd} – statoriaus d ašies įtampa, u_{sq} – statoriaus q ašies įtampa, u_{rd} – rotoriaus d ašies įtampa, u_{rq} – rotoriaus q ašies įtampa, r_s – statoriaus varža, r_r – rotoriaus varža, i_{sd} – statoriaus d ašies srovė, i_{sq} – statoriaus q ašies srovė, i_{rd} – rotoriaus d ašies srovė, i_{rq} – rotoriaus q ašies srovė, ψ_{sd} – statoriaus d ašies magnetinis srautas, ψ_{sq} – statoriaus q ašies magnetinis srautas, ψ_{rd} – rotoriaus d ašies

magnetinis srautas, ψ_{rq} – rotoriaus q ašies magnetinis srautas, ω_s –sinchroninis generatoriaus sukimosi greitis, ω_r –rotoriaus sukimosi greitis.

Siekiant užtikrinti nepriklausomą valdymą tarp elektromagnetinio sukimo momento ir rotoriaus sužadavimo srovės asinchroninio generatoriaus lygtys turi būti aprašomos sinchroniškai besisukančioje dq koordinačių sistemoje, kai d ašis orientuota statoriaus magnetinio srauto vektoriaus kryptimi [13][15]:

$$\psi_{sq} = 0.$$

Tuomet elektromagnetinis sukimo momentas gali būti išreiškiamas, kaip asinchroninio generatoriaus rotoriaus srovės funkcija:

$$T_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \psi_{sd}, \quad (5)$$

čia: T_{em} – elektromagnetinis sukimo momentas tenkantis rotoriumi iš generatoriaus, p – polių porų skaičius, L_m – faziu tarpusavio induktyvumas, L_s – statoriaus induktyvumas, i_{rq} – rotoriaus q ašies srovė, ψ_{sd} – statoriaus d ašies magnetinis srautas.

3.3. Kintamos srovės dažnio keitiklių impulsų moduliacijos ir valdymo metodai

Šiame skyriuje aprašomi MC ir klasikinio VSC (kuriam priskiriamas ir B2B keitiklis) impulsų moduliavimo ir valdymo metodai. Yra keletas impulsų moduliacijos būdų, tačiau dažniausiai pageidaujamas PWM pagrįstas metodas [10].

PWM signalą sudaro dvi pagrindinės komponentės: darbo ciklas ir dažnis. Darbo ciklą galima apibrėžti procentais kaip laiko tarpą, kai signalas yra įjungtoje būsenoje lyginant su laiko tarpu, kurio metu signalas užbaigia vieną pilną ciklą. Dažnis nustato, kaip greitai PWM užbaigia vieną ciklą (pavyzdžiui 50Hz reiškia, kad 50 ciklų įvykdoma per 1 sekundę) ir to pasėkoje, apibrėžia kaip greitai turi keistis perjungimo (t.y. įjungta/išjungta) būseną. Keičiant šio skaitmeninio signalo būseną pakankamai greitai ir pagal atitinkamą darbo ciklo dydį, galima reguliuoti išėjimo signalo, kuris paduodamas apkrovai, dydį taip, kad jis būtų artimas analoginiam signalui.

3.3.1. Kintamosios srovės dažnio keitiklio su nuolatinės srovės intarpu impulsų moduliacijos ir valdymo metodai

Klasikinis VSC moduliuodamas aukšto dažnio įtampos impulsus generuoja žemo dažnio išėjimo įtampą su reguliuojamu įtampos dydžiu ir dažniu. Šio tipo keitikliuose egzistuoja du pagrindiniai PWM įgyvendinimo būdai, kurių veikimas pagrįstas apkrovų įtampų reguliavimu [10]:

- 1) trikampio sankirtos metodas, kuriame moduliavimo banga lyginama su trikampio nešlio banga, o sankirtos apibrėžia perjungimo laikus;
- 2) SVM metodas, kuriame inverterio būsenos trukmė (žiūr. 1 lentelę) iš anksto apskaičiuojama kiekvienam nešiklio ciklui naudojant būsenos vektoriaus teoriją.

SVM atveju yra naudojami kompleksinės kintamųjų transformacijos, kai atitinkamoje laiko srityje apkrovos įtampos ir srovės signalai yra perskaičiuojami į ekvivalenčius etaloninius įtampos ir srovės vektorius. Šių vektorių sukimasis kampiniu greičiu kompleksinėje koordinatinių sistemoje išreiškiamas formulėmis [10]:

$$\mathbf{u}_L = \frac{2}{3}(u_{L1} + au_{L2} + a^2u_{L3}), \quad (5)$$

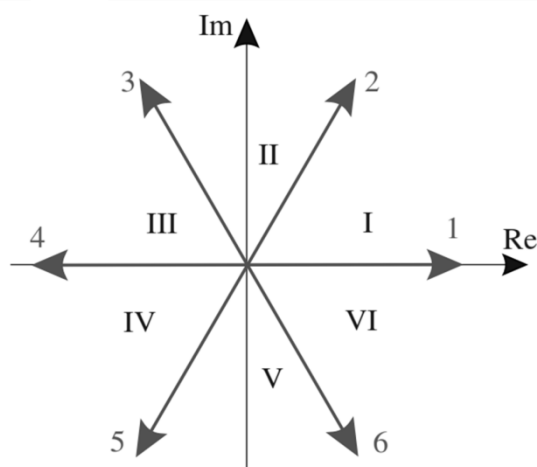
$$\mathbf{i}_L = \frac{2}{3}(i_{L1} + ai_{L2} + a^2i_{L3}), \quad (6)$$

čia: a – konstanta lygi $e^{j\frac{2\pi}{3}}$, \mathbf{u}_L , \mathbf{i}_L – atitinkamai apkrovos įtampos ir srovės vektoriai, u_{L1} , u_{L2} , u_{L3} , i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} – įtampos ir srovės vektorių dydis atitinkamos fazės apkrovai.

1 lentelė. Perjungimo konfigūracijos ir atitinkamos apkrovos įtampos VSC keitiklyje [10]

Nr.	S_{L1a}	S_{L2a}	S_{L3a}	S_{L1b}	S_{L2b}	S_{L3b}	u_{L1n}	u_{L2n}	u_{L3n}
1	1	1	0	0	0	1	$1/3 U_{DC}$	$1/3 U_{DC}$	$-2/3 U_{DC}$
2	1	0	0	0	1	1	$2/3 U_{DC}$	$-1/3 U_{DC}$	$-1/3 U_{DC}$
3	0	1	0	1	0	1	$-1/3 U_{DC}$	$2/3 U_{DC}$	$-1/3 U_{DC}$
4	0	1	1	1	0	0	$-2/3 U_{DC}$	$1/3 U_{DC}$	$1/3 U_{DC}$
5	0	0	1	1	1	0	$-1/3 U_{DC}$	$-1/3 U_{DC}$	$2/3 U_{DC}$
6	1	0	1	0	1	0	$1/3 U_{DC}$	$-2/3 U_{DC}$	$1/3 U_{DC}$
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	1	0	0	0

1 lentelėje aprašomas VSC keitiklis susideda iš aštuonių perjungėjų kombinacijų, iš kurių dvi būsenos atitinka išėjimo terminalų trumpąjį jungimą, o likusios šešios atitinka aktyviąją įtampą. Aktyviųjų vektorių atvaizdavimas dq koordinatinių erdvėje pavaizduotas 10 paveiksle.



10 pav. Aktyvaus vektoriaus dq koordinatinių plokštumoje trifazio VSC atvaizdavimas [10]

Kiekviena aktyvioji perjungimo konfigūracija VSC atitinka aktyvųjų erdvės vektorių, kai tuo tarpu nulinės konfigūracijos atitinka nulinius būsenos vektorius.

3.3.2. Matricinio keitiklio impulsų moduliacijos ir valdymo metodai

Matriciniame keitiklyje jungiklio perjungimo funkcija yra tokia:

$$s_{jK} = \begin{cases} 1, & \text{jungiklis } s_{jK} \text{ įjungtas} \\ 0, & \text{jungiklis } s_{jK} \text{ išjungtas} \end{cases} \quad (7)$$

čia: $j \in \{a, b, c\}$ yra išėjimo fazė, $K \in \{A, B, C\}$ yra įėjimo fazė.

Žinant tai, jog įėjimo fazėse yra negalimas trumpas jungimas, o išėjimo srovės negali būti nutrauktos (žiūr. 2.3.3 skyrių), matriciniam keitikliui galioja apribojimas [10]:

$$s_{jA} + s_{jB} + s_{jC} = 1. \quad (8)$$

Remiantis šiuo apribojimu, nesunku apskaičiuoti, jog trifazis matricinis keitiklis turi 27 leistinas jungiklių kombinacijas iš 512 galimų. Šiame keitiklyje įtampos ir srovės santykis apibūdinamas tokia išraiška:

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{aA}(t) & s_{aB}(t) & s_{aC}(t) \\ s_{bA}(t) & s_{bB}(t) & s_{bC}(t) \\ s_{cA}(t) & s_{cB}(t) & s_{cC}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{aA}(t) & s_{bA}(t) & s_{cA}(t) \\ s_{aB}(t) & s_{bB}(t) & s_{cB}(t) \\ s_{aC}(t) & s_{bC}(t) & s_{cC}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Matriciniam keitikliui gali būti taikomas tiesioginis arba netiesioginis PVM pagrįstas valdymas. Šiame darbe MC keitiklio jungiklių valdymas sudarytas remiantis netiesioginės erdvės vektorių moduliacijos (angl. *Indirect Space Vector Modulation*, toliau – ISVM) principu. Pastarasis moduliacijos metodas MC keitiklyje nuo SVM skiriasi tik tuo, kad vietoje vieno etapo (arba tiesioginės) moduliacijos yra remiamasi dvišiu (arba netiesiogine) MC keitiklio konfigūracija. Tokiu atveju matricinis keitiklis yra laikomas lygintuvo-inverterio be DC jungties kombinacija ir atitinka dvigubą PWM keitiklį [16][17]. Tokia kontrolės strategija naudoja labiausiai teigiamas ir labiausiai neigiamas įėjimo įtampos sudarant keitiklio išvesties įtampos signalus. Ši koncepcija dar yra žinoma kaip moduliavimas su "fiktyvia DC jungtimi" [10].

3.4. Suminis harmonikų iškraipymas

Ideali sinusoidinė įtampa arba srovė neturi harmoninių iškraipymų, nes tai yra signalas, susidedantis iš vieno dažnio. Įtampa arba srovė, kuri yra periodinė, bet ne vien tik sinusoidinė, turi didesnes dažnio komponentes (t.y. harmonikas), prisidedančias prie harmoninio signalo iškraipymo. Tai reiškia, jog kuo mažiau periodinis signalas atrodo kaip sinusoidinė banga, tuo stipresni yra

harmoniniai komponentai ir tuo daugiau harmonikų yra iškraipyme. Taigi, impulsų moduliacijos signalo banga įeinanti į keitiklį turi daug harmoninių iškraipymų, nes tai yra kvadratinė banga, kuri yra periodinė, bet neatrodo idealiai sinusoidinė.

Siekiant nustatyti kiek įtampos ar srovės iškraipymo lemia signalo harmonikos yra naudojamas suminis harmonikų iškraipymas [18]. THD energetikoje yra svarbus tuo, jog kuo jis mažesnis, tuo didesnis elektrinės sistemos galios koeficientas ir tuo mažesnės amplitudinės srovės, tai reiškia, jog gaunamas didesnis sistemos efektyvumas.

Kai kvadratinės bangos kintamosios srovės įtampa yra taikoma grandinei su reaktyviaisiais komponentais (kondensatoriais ir induktoriais), tie komponentai reaguoja taip, tarsi jie būtų veikiami kelių skirtingų dažnių sinusoidinės bangos įtampų. Periodinės įtampos ar srovės harmonikos arba harmoniniai dažniai yra signalo dažnio komponentai, kurie yra pagrindinio signalo dažnio daugikliai.

THD yra apskaičiuojamas kaip santykis tarp visų harmoninių dažnių lygiavertės vidutinės kvadratinės (angl. *Root Mean Square*, toliau – RMS) įtampos arba srovės (pradedant 2-ąja harmonika) ir fundamentinio dažnio įtampos arba srovės. Fundamentinis dažnis yra mažiausias dažnis, kurį sukelia viso objekto virpesiai ir kuris skiriasi nuo aukštesnio dažnio harmonikų. 7 lygtyje parodyta įtampų THD_U (tačiau, galioja ir skaičiuojant srovių THD_I) matematinė išraiška [18]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{n_rms}^2}}{U_{fund_rms}}, \quad (11)$$

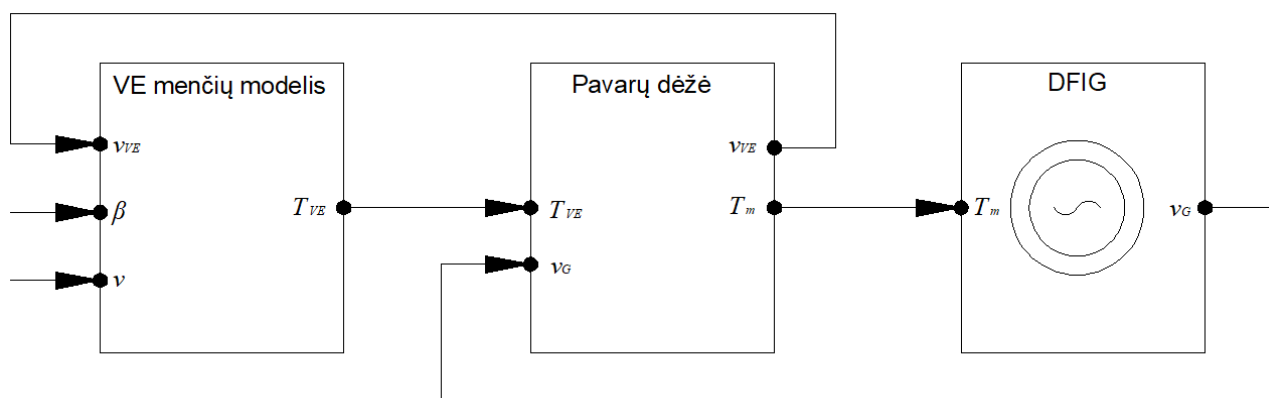
čia: U_{n_rms} – n-tosios harmonikos RMS įtampa, U_{fund_rms} – fundamentinio dažnio RMS įtampa.

Matematinis ne sinusoidinės bangos mažinimo į sudedamuosius dažnio komponentus procesas yra vadinamas Furjė analize [18]. Šiai analizei atlikti paprastai yra naudojami kompiuteriniai algoritmai, o THD yra ne apskaičiuojamas, bet išmatuojamas tam, kad būtų gauta fundamentinio dažnio RMS vertė ir visos harmonikos. Vienas iš THD matavimo metodų naudojamų *Matlab SIMULINK* aplinkoje remiasi įtampos (arba srovės) kitimo laiko atžvilgiu fiksavimu, tokiems duomenims yra atliekama Furjė transformacija ir pagal 11 lygybę, apskaičiuojamas THD pasinaudojus *Powergui* bloke esančiu *FFT analysis* įrankiu.

4. B2B keitiklio vėjo elektrinėje su dvigubo jungimo asinchroniniu generatoriumi tyrimas

Šiame skyriuje analizuojamas tradicinis AC/AC keitiklis su DC intarpu (arba AC/DC/AC) ir IGBT jungikliais, kuris yra prijungtas DFIG sistemoje. Šiam tikslui naudojamas *MathWorks* duomenų bazėje esančio modelio *power_wind_dfig_det* [19] pavyzdys. Kaip minėta 2.3.2 skyriuje nagrinėjamas keitiklis dar vadinamas B2B keitikliu. Toliau šis modelis bus vadinamas B2B_DFIG modeliu.

B2B_DFIG modelyje VE ir generatorius yra sudaryti pagal 3 skyriuje aprašytą metodiką naudojant Matlab SIMULINK bibliotekoje esančius *Wind Turbine*, *Wind Turbine Shaft* ir *Asynchronous Machine* blokus, o blokinė jungimo schema pavaizduota 11 paveiksle. Vėjo elektrinės menčių sukimasis yra simuliuojama naudojant *Wind Turbine* bloką. Šiuo bloku realizuojamas bendrinis VE modelis, kuris yra jungiamas į elektrinę sistemą per pavarų dėžę. Pastaroji yra simuliuojama naudojant *Wind Turbine Shaft* bloką iš *Matlab SIMULINK* bibliotekos. *Wind Turbine* blokas turi tris įvesties signalus ir vieną išvesties signalą, o *Wind Turbine Shaft* bloke yra du įvesties ir du išvesties signalai.



11 pav. VE ir DFIG blokinė jungimo schema Matlab SIMULINK aplinkoje

Wind Turbine bloko įvesties signalai:

- 1) VE greitis (v_{VE}), matuojamas *pu* vienetais apskaičiuotais esant generatoriaus baziniam greičiui, t. y. sinchroniniam generatoriaus sukimosi greičiui ω_s ;
- 2) mentės pokrypio kampas (β), kuris matuojamas laipsniais;
- 3) vėjo greitis (v) matuojamas m/s.

Wind Turbine bloko išėjimo signalas yra sukimo momentas T_{VE} , kuris perskaičiuojamas *pu* vienetais nuo vardinės VE galios ir bazinio generatoriaus greičio.

Wind Turbine Shaft bloko įvesties signalai:

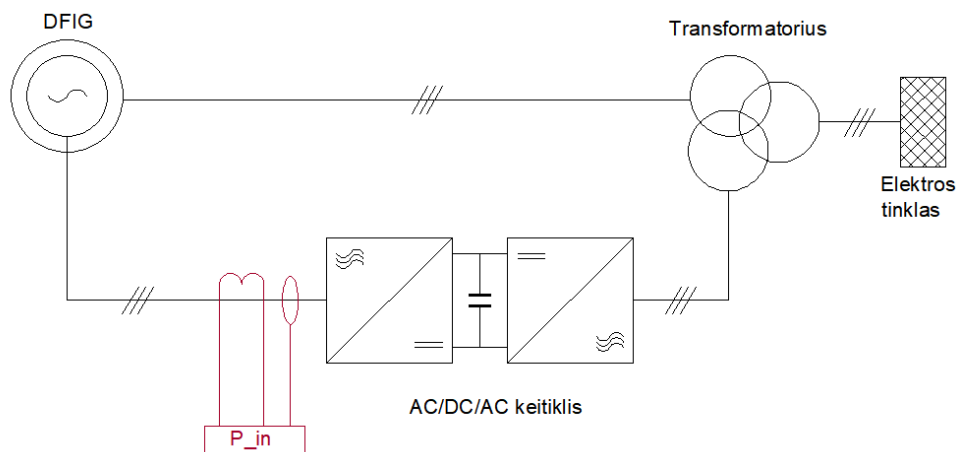
- 1) sukimo momentas T_{VE} , kuris gaunamas *Wind Turbine* bloke, kaip išvesties signalas;
- 2) generatoriaus greitis (v_G), kuris išreiškiamas *pu* vienetais nuo bazinio generatoriaus greičio.

Wind Turbine Shaft bloko išvesties signalai:

- 1) velenu perduodamas mechaninis sukimo momentas (T_m), kuris išreiškiamas *pu* vienetais apskaičiuotais pagal VE vardinę galią ir bazinį generatoriaus greitį;

- 2) VE greitis (v_{VE}) pu vienetais nuo bazinio generatoriaus greičio, kuris grąžinamas į *Wind Turbine* bloką, kaip pirmasis įvesties signalas.

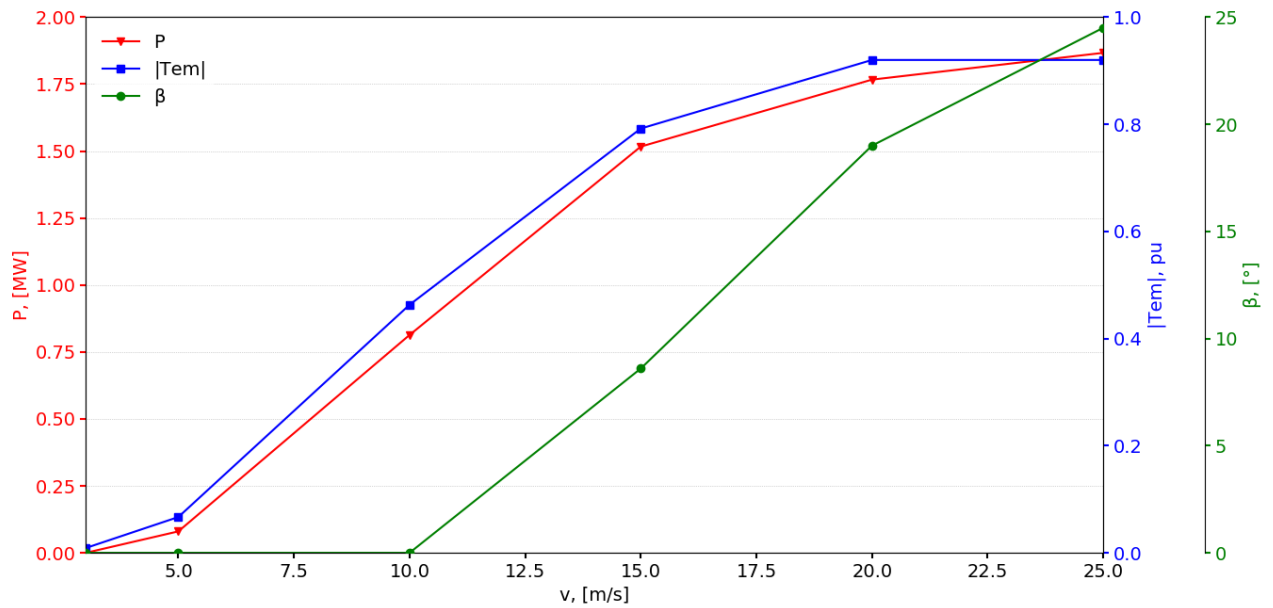
Aprašytas VE modelis yra sujungiamas su DFIG generatoriumi (11 pav.). DFIG generatorius sudarytas iš *Asynchronous Machine* bloko, kurio valdymas pagrįstas mechaniniu sukimo momentu T_m išeinančiu iš *Wind Turbine Shaft* bloko. Mechaninis sukimo momentas generatoriuje paverčiamas elektromagnetiniu sukimo momentu T_{em} . Šis blokas simuliuoja trifazį asinchroninį generatorių dq koordinatinių sistemoje. Analizuojamame modelyje generatoriaus statoriaus apvijos tiesiogiai jungiamos į tinklą, o rotoriaus apvijos į tinklą yra jungiamos slydimo žiedais, kurie maitinami kintamu dažniu per AC/AC keitiklį (12 pav.). Plačiau DFIG veikimo principas buvo aprašytas 2.2 skyriuje.



12 pav. B2B keitiklio DFIG modelyje struktūrinė jungimo schema *Matlab SIMULINK* aplinkoje

Pats B2B keitiklis sudaromas iš dviejų *Universal Bridge* blokų, kuriuose parenkami galios elektronikos prietaisai *IGBT / Diodes* ir nustatomas tiltų skaičius – 3, kaip pavaizduota 5 paveiksle. Šie blokai sujungiami nuolatinės srovės jungtimi panaudojant *Matlab SIMULINK* bibliotekos bloką *Series RLC Branch*, kuriame nustatomas *Branch* tipas C, t. y. kondensatorius. *Universal Bridge* blokų PWM impulsų moduliacijai sudaryti pasinaudojama *Discrete 3-phase PWM Generator* bloku.

Kaip aptarta 3.1 skyriuje vėjo elektrinės keitiklių valdymas yra projektuojamas taip, kad būtų gaunama didžiausia galima galia prie kiekvieno vėjo greičio [13] todėl siekiant išsiaiškinti nagrinėjamos sistemos darbo režimą pirmiausia yra išmatuojama galios kreivė ir sudarytos elektromagnetinio momento ir menčių pasukimo kampo priklausomybės nuo vėjo greičio. Šios kreivės vaizduojamos 13 paveiksle.



13 pav. Vėjo elektrinės su dvigubo jungimo generatoriumi ir AC/DC/AC keitikliu galios kreivė (P). Elektromagnetinio sukimo momento modulio ($|T_{em}|$) ir menčių pasukimo kampo (β) priklausomybė nuo vėjo greičio (v)

Galios kreivė gauta B2B_DFIG modelyje nustatant vėjo greitį, nuo 3m/s iki 25m/s [20]. VE darbinis režimas, dėl mechaninių priežasčių, prasideda esant ne mažesniai kaip 3m/s vėjo greičiui, o esant didesniai vėjo greičiui negu 25 m/s, kyla pavojus vėjo elektrinės komponentų perkrovai. Modelyje išmatuota, kad tiriama VE savo nominalią galią (1,5 MW) pasiekia apie apytiksliai 15 m/s vėjo greičio, o esant didesniems vėjo greičiams VE galia didėja, tačiau nežymiai. Taip yra dėl to, kad realioje aplinkoje oro sąlygos yra nepastovios ir dėl vėjo gūsių VE galia svyruotų aplink nominalią, tad gamintojai specifikacijose paprastai nurodo mažesnę galią. Aktyviosios galios vertės išmatuotos prie skirtingų vėjo greičių pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. VE DFIG sistemos darbo režimo charakteristikos

v, [m/s]	3	5	10	15	20	25
P, [MW]	0	0,080	0,813	1,517	1,767	1,867
P _{in} , [MW]	0	0,024	0,244	0,456	0,531	0,561
T _{em} , [pu]	0,009	0,067	0,463	0,792	0,920	0,920
β, [°]	0	0	0	8,6	19	24,5
I _{in_ef} , [pu]	0,212	0,212	0,382	0,608	0,707	0,707
U _{in_ef} , [pu]	0,506	0,506	0,505	0,506	0,506	0,506

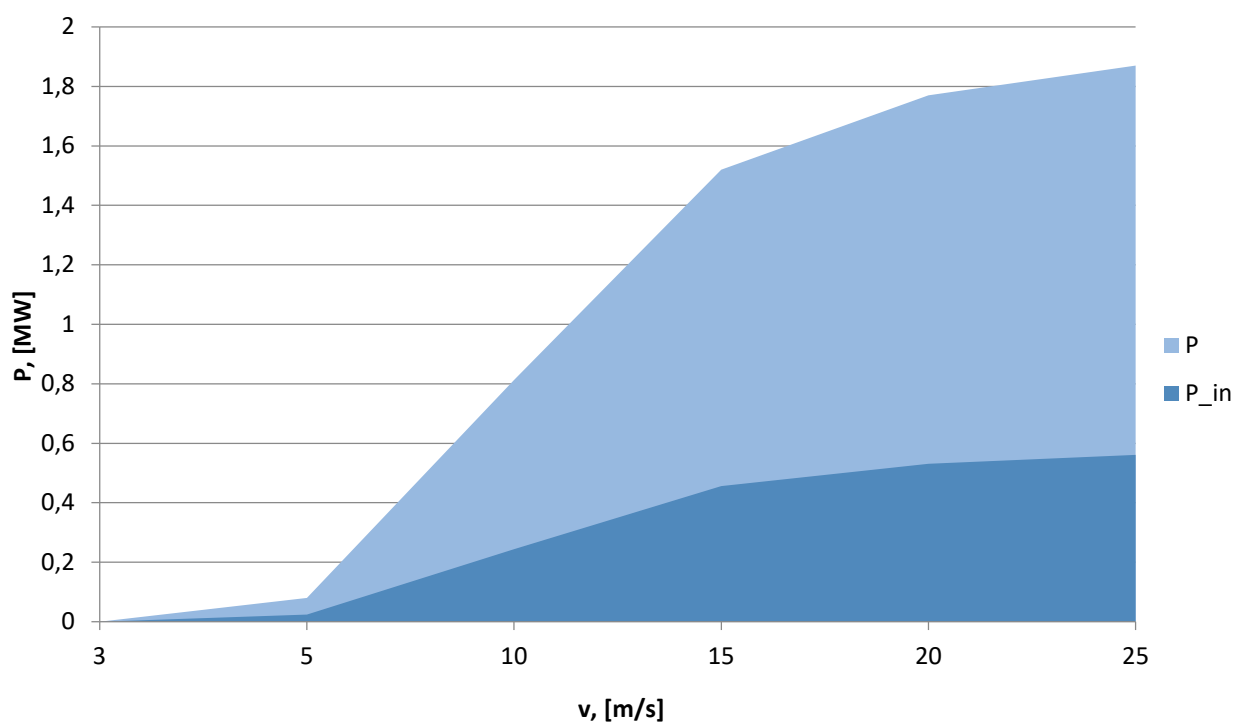
Kaip matoma 3.1 skyriuje pateiktoje (3) formulėje, galios kreivė yra valdoma kintant elektromagnetiniam momentui T_{em} . Iš 13 paveikslo matyti, jog galios kreivė yra tiesiogiai proporcinga elektromagnetinio momento kreivei. Elektromagnetinio momento vertės prie atitinkamų vėjo greičių pateiktos 2 lentelėje. Čia imamas elektromagnetinio momento modulis dėl to, kad jo ženklas rodo priešingą rotorius sukimuisi kryptį (palei laikrodžio rodyklę besukančio rotorius elektromagnetinio lauko sukimo momentas įgyja minuso ženklą).

Menčių pasukimo kampo ir aktyviosios galios priklausomybė yra netiesinė, kaip parodyta (1) ir (2) formulėse, todėl iš 13 paveikslų matyti, kad menčių pasukimo kampas daro didesnę įtaką aktyviosios galios valdymui esant didesniems vėjo greičio diapazonams. Menčių pasukimo kampo β priklausomybė nuo vėjo greičio B2B_DFIG modelyje pateikta 2 lentelėje.

B2B_DFIG modelyje taip pat buvo išmatuota aktyvioji galia tekanti keitikliu (12 pav.), bei rotoriaus pusės įtampos (U_{in_ef}) ir srovės (I_{in_ef}) efektinės vertės pu vienetais priklausančiais nuo aktyvios galios tekančios keitikliu. Kadangi pagrindinė keitiklio funkcija yra palaikyti elektros tinklo dažnį ir pakelti įtampą iki tinkle esančios įtampos, buvo nustatyta, jog šie dydžiai modelyje nekinta. Kadangi aktyvioji galia tekanti keitikliu yra lygi įtampos ir srovės sandaugai, o įtampa galios keitiklyje, yra palaikoma pastovi, tad kintant vėjo greičiui kinta tik srovės stipris: kuo didesnis vėjo greitis, tuo didesnė srovės amplitudė. Visi gauti rezultatai pateikiami žemiau esančioje 2 lentelėje.

5. B2B ir MC keitiklių palyginimo kriterijai

Išanalizavus VE su DFIG sistemos veikimo principus B2B_DFIG modelyje (žiūr. 4 skyrių), sudaromi supaprastinti B2B ir MC keitiklių modeliai sistemų palyginimui (plačiau aprašyti 6 skyriuje), kuriuose siekiama atkurti rotoriaus pusės (įeinančios į keitiklį) aktyviosios galios charakteristiką (P_{in}) pateiktą 2 lentelėje. 14 paveiksle, pasinaudojus minėtosios lentelės duomenimis, pavaizduotas visos DFIG vėjo elektrinės aktyviosios galios srautas (P) prie skirtingų vėjo greičių ir aktyviosios galios dalis tekanti iš rotoriaus per keitiklį perduodama į tinklą (P_{in}).



14 pav. VE DFIG sistemos aktyvioji galia (P) ir B2B keitikliui tenkanti aktyviosios galios dalis (P_{in})

5.1. Galios nuostoliai

Tam, kad būtų išvengta energijos nuostolių, galios keitimas per AC/AC keitiklius turi būti atliekamas veiksmingai. Tai įvertinti galima išmatuojant aktyviosios galios nuostolius atsirandančius keitiklyje arba jo komponentuose, per įvesties ir išvesties galios skirtumą [21]:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}, \quad (12)$$

čia: ΔP – galios nuostoliai, P_{in} – įeinanti į keitiklį galia, P_{out} – išeinanti iš keitiklio galia.

Siekiant apibrėžianti prietaiso, komponento ar sistemos efektyvumo kokybę yra įvertinamas energijos efektyvumo koeficientas η , kuris išreiškiamas formule [21]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \Delta P}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} - \Delta P}, \quad (13)$$

čia: ΔP – galios nuostoliai, P_{in} – įeinanti į keitiklį galia, P_{out} – išeinanti iš keitiklio galia.

Šie galios nuostoliai paprastai priklauso nuo keitiklio (ir nuo apkrovos) įėjimo / išėjimo įtampos, srovės, dažnio ir našumo (arba galios) koeficiento. Todėl 6 skyriuje plačiau aptariami palyginamųjų modelių sudarymo principai, pateikiami elektros tinklo duomenys ir nurodomos reikiamų filtrų konfigūracijos ir jungimas.

Vėliau, modeliuojant sudaromos B2B ir MC keitiklių galios charakteristikos nustatant reikiamą rotoriaus tinklo, įeinančio į keitiklį, įtampą. Naudojant *Matlab SIMULINK* bibliotekos *Three-Phase VI Measurement* bloką, išmatuojama įtampa ir srovė tiek rotoriaus tiek tinklo pusėje. Iš pastarųjų reikšmių gaunamos įėjimo ir išėjimo aktyviosios galios, kurių skirtumas apskaičiuojamas pagal (12) formulę. Vėliau, pasinaudojus (13) lygybe ir aktyviosios galios įėjimo ir išėjimo matavimais, įvertinamas naudingumo koeficientas. Gauti rezultatai pateikti 7.1 skyriuje.

5.2. Galios kokybė

Pagal tarptautinę elektrotechnikos komisiją, geriau žinomą kaip IEC 61400-21 (angl. *International Electrotechnical Commission*), galios kokybė yra apibrėžiama kaip įrangos ar sistemos gebėjimas patenkinamai veikti savo elektromagnetinėje aplinkoje, nesukeliant netoleruojamų elektromagnetinių trikdžių toje aplinkoje [22]. Minėtame IEC standarte galios kokybei žemo dažnio diapazonuose įvertinti yra išskiriama daugybė reiškinių, tačiau vienas pagrindinių yra harmonikos.

Šiame darbe tiriama galios kokybė, įvertinant suminį harmonikų iškraipymą (THD). Plačiau apie THD ir jų apskaičiavimo metodiką buvo aprašyta 3.4 skyriuje. THD įvertinimui naudojamas *Matlab SIMULINK* aplinkoje esantis *FFT Analysis* įrankis. Įrankyje matuojami THD remiantis trijų periodų vidurkiu pagal Naikvisto dažnio metoda, kuomet imamas dvigubai mažesnis dažnis, negu nagrinėjamojo signalo.

Toliau, siekiant geriau įvertinti keitiklių veikimo principus, yra tiriama impulsų moduliacijos dažnio (plačiau apie šį dydį rašoma 3.3 skyriuje) daroma įtaka harmonikų iškraipymui prie skirtingų vėjo greičių. Vėliau kiekvienam keitikliui nustatomas mažiausias įmanomas impulsų moduliacijos dažnis, kuriam esant gaunami mažiausi suminiai harmonikų iškraipymai. Gauti rezultatai pateikiami 7.2 skyriuje.

6. Palyginamųjų B2B ir MC keitiklių modelių sudarymas

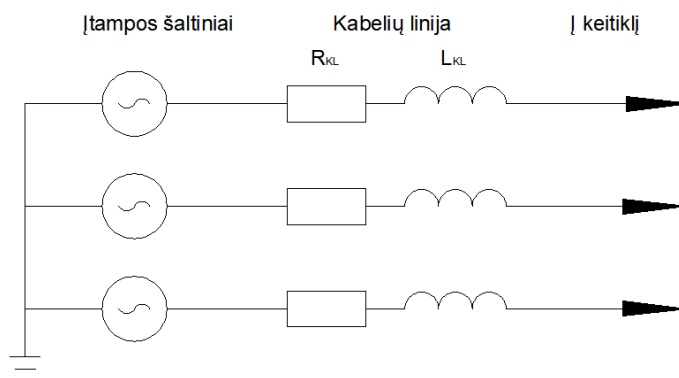
Kadangi B2B ir MC keitiklių dinaminio valdymo modeliai, dėl specifinės jų sandaros (pvz. B2B keitiklio valdyme didelę įtaką turi DC jungties įtampa, kai tuo tarpu MC keitiklis tokios jungties neturi), yra labai skirtingi, šių sistemų ekvivalentiniam palyginimui sudaromi supaprastinti modeliai:

- B2B – modeliuojamas analogiškas AC/DC/AC B2B keitiklis kaip ir B2B_DFIG modelyje, tačiau su supaprastinta valdymo schema ir sujungiamas su elektros tinklu;
- MC – modeliuojamas AC/AC matricinis keitiklis naudojant devynis grįžtamojo ryšio IGBT jungiklius ir sujungiamas su elektros tinklu.

Šių modelių sudarymui pasinaudojama *MathWorks* duomenų bazėje esančių modelių pavyzdžiais: MC keitiklio atveju *power_three_phase_matrix_converter* [23] ir B2B keitiklio atveju *power_ACDCAC_Converter* [24]. Palyginamųjų B2B ir MC keitiklių modelių sudarymas detalčiau aprašytas sekančiuose poskyriuose.

6.1. Elektros tinklo modelio aprašymas

Supaprastintame modelyje į keitiklį įeinančio vidinio VE elektros tinklo blokinė schema, modeliuojama *Matlab SIMULINK* aplinkoje, pateikiama 15 paveiksle. DFIG rotorius gnybtai simuliuojami idealiais įtampos šaltiniais, kuriuose, priklausomai nuo reikiamos aktyviosios galios, nustatomos atitinkamos įtampos amplitudės vertės.



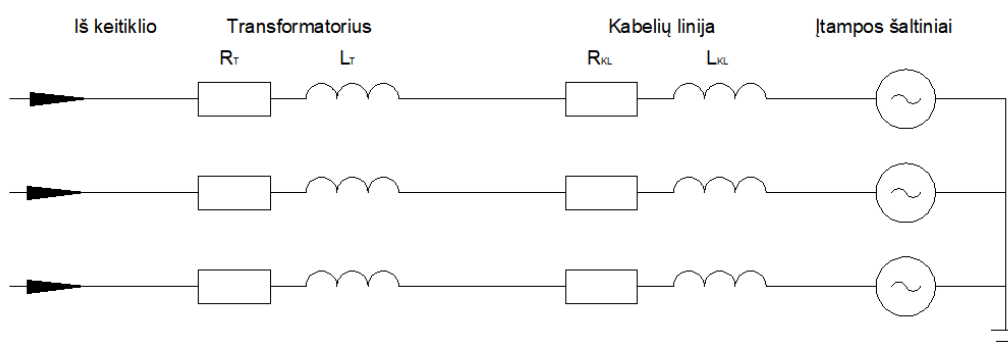
15 pav. Supaprastintame modelyje modeliuojama į keitiklį įeinančio vidinio elektros tinklo blokinė jungimo schema

Realesniam DFIG vėjo elektrinės galios charakteristikos kreivės atkūrimui, nuosekliai įtampos šaltiniams prijungiama varža ir induktyvumas. Supaprastintame modelyje šie elementai atitinka vėjo elektrinės su DFIG kabelio liniją esančią tarp generatoriaus ir keitiklio, kadangi keitiklis yra VE bokšto apačioje, o generatoriaus kabina yra 80 m aukštyje. Parinkti kabelio linijos parametrai pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Supaprastinto modelio į keitiklį įeinančios vidinio tinklo kabelių linijos parametrai [25]

Parametras	Matavimo vienetai	Dydis
Kabelio skersmuo	[mm ²]	3x1x44
Srovė	[A]	830
R _{KL}	[Ω/km]	0,0367
L _{KL}	[mH/km]	0,25
Ilgis	[m]	80

Taip pat, siekiant palyginti B2B ir MC keitiklių charakteristikas, modeliuojama iš keitiklio išeinančio išorinio elektros tinklo blokinė schema *Matlab SIMULINK* aplinkoje, kuri pateikiama 16 paveiksle.



16 pav. Supaprastintame modelyje iš keitiklio išeinančio išorinio elektros tinklo blokinė jungimo schema

Transformatorius ir elektros linija modeliuojami nuosekliai sujungtomis varžomis ir induktyvumais. Parinkti parametrai pateikiami 4 ir 5 lentelėse. Taip pat į grandinę žvaigžde prijungiami įtampos šaltiniai, kurie simuliuojama išorinio elektros tinklo įtampą.

4 lentelė. Supaprastinto modelio iš keitiklio išeinančio išorinio tinklo transformatoriaus parametrai [26]

Parametras	Matavimo vienetai	Dydis
Transformatoriaus galia	[kV·A]	400
R _T	[Ω]	0,005
L _T	[mH]	0,054

5 lentelė. Supaprastinto modelio iš keitiklio išeinančio išorinio tinklo kabelių linijos parametrai [25]

Parametras	Matavimo vienetai	Dydis
Kabelio skersmuo	[mm ²]	3x95
Srovė	[A]	220
R _{KL}	[Ω/km]	0,39
L _{KL}	[mH/km]	0,27
Ilgis	[m]	10 000

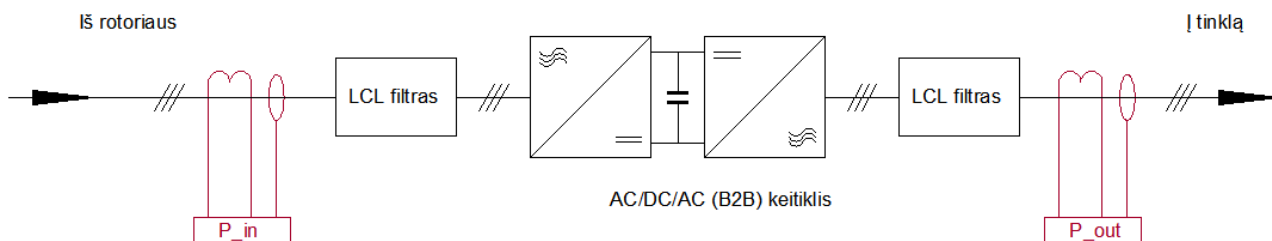
6.2. B2B keitiklio modelio aprašymas

Sudarant kintamosios srovės keitiklio su nuolatinės srovės intarpu modelį naudojamas *power_ACDCAC_Converter* B2B keitiklio su supaprastintu PWM valdymu iš *MathWorks* bibliotekos pavyzdys [24]. Šiam keitikliui prijungiamas 6.1 skyriuje aprašytas elektros tinklas.

B2B keitiklis, kaip ir 4 skyriuje aprašytame B2B_DFIG modelyje, sudaromas iš dviejų *Universal Bridge* blokų, kurie sujungiami nuolatinės srovės jungtimi panaudojant *Series RLC Branch C* tipo

bloką kaip kondensatorių. Keitiklio PWM impulsų moduliacijai sudaryti prijungiamas *Discrete 3-phase PWM Generator* blokas.

B2B keitiklio aukšto dažnio harmonikų pašalinimui modeliuojamas žemo dažnio filtras, pagal 2.4 skyriuje pateiktą pavyzdį. B2B keitiklio ir LCL filtrų blokinė jungimo schema pavaizduota 17 paveiksle. To paties tipo filtras naudojamas tiek rotoriaus, tiek elektros tinklo pusėje. Tiriamajam LCL filtrui parinktos reikšmės pateiktos 6 lentelėje.



17 pav. Modeliuojama LCL filtro ir B2B keitiklio blokinė jungimo schema

6 lentelė. Modeliuojamo B2B keitikliui žemo dažnio LCL filtro parametrai.

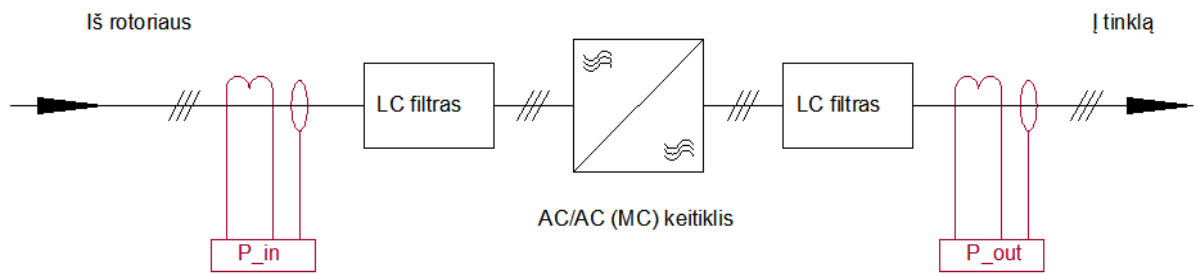
Parametras	Matavimo vienetai	Reikšmė
L1	[H]	1e-3
C3	[F]	100e-6
L2	[H]	0,73e-3

6.3. MC keitiklio modelio aprašymas

Sudarant kintamosios srovės keitiklio be nuolatinės srovės intarpo modelį naudojamas *power_three_phase_matrix_converter* MC keitiklio su supaprastintu ISWM valdymu iš *MathWorks* bibliotekos pavyzdys [23]. Šiam keitikliui prijungiamas 6.1 skyriuje aprašytas elektros tinklas.

MC keitiklio devyni dvikrypčiai elektroniniai jungikliai sudaromi, iš atskirų *IGBT* ir *Diode* blokų. Pastarieji jungikliai pagal 6 paveiksle pateiktą MC keitiklio jungimo schemą sujungiami į matricią. Šiame keitiklyje srovė ir įtampą valdoma pasinaudojus pagal anksčiau minėtos *MathWorks* bibliotekos pavyzdyje pateiktu ISVM impulsų moduliacijos bloku, kuriame matricinis keitiklis yra valdomas, kaip lygintuvo – inverterio be DC jungties kombinacija, kuri plačiau buvo aprašyta 3.3 skyriuje.

MC keitiklio aukšto dažnio harmonikų pašalinimui modeliuojamas žemo dažnio filtras, pagal 2.4 skyriuje pateiktą pavyzdį. MC keitiklio ir LC filtrų blokinė jungimo schema pavaizduota 18 paveiksle. To paties tipo filtras naudojamas tiek rotoriaus, tiek elektros tinklo pusėje. Tiriamajam LC filtrui parinktos reikšmės pateiktos 7 lentelėje.



18 pav. Modeliuojama LC filtro ir MC keitiklio blokinė jungimo schema

7 lentelė. Modeliuojamo MC keitikliui žemo dažnio LC filtro parametrai

Parametras	Matavimo vienetai	Reikšmė
L1	[H]	87.9e-3
C3	[F]	903e-6

7. Rezultatų analizė

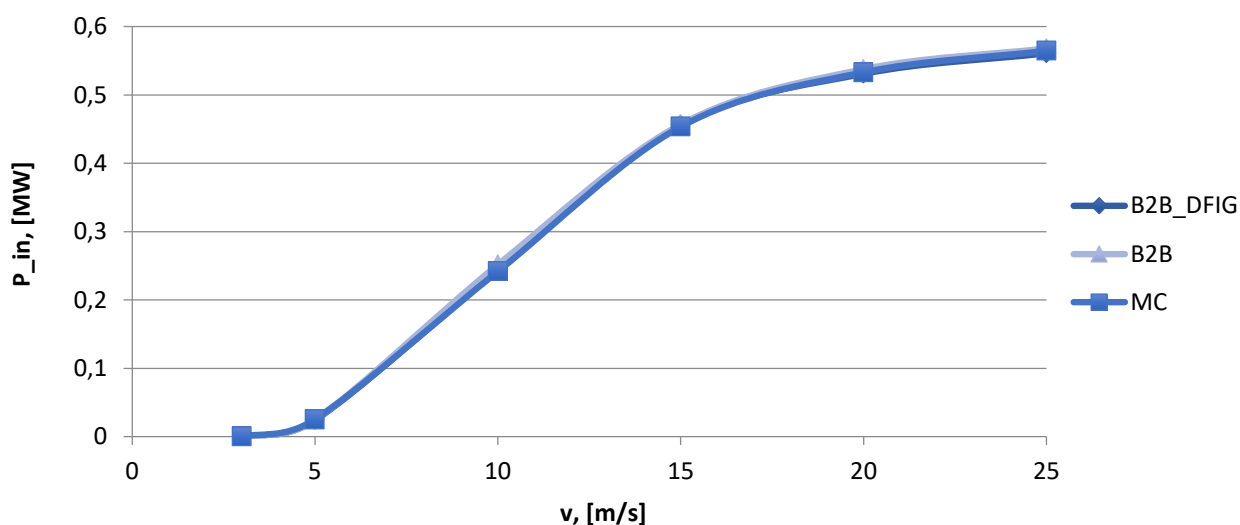
Šiame skyriuje pateikiami rezultatai, kurie buvo gauti pritaikius 0 skyriuje aptartą tyrimo metodiką palyginamiesiems B2B ir MC keitiklių modeliams, kurie buvo aprašyti 6 skyriuje. Toliau palyginamieji B2B ir MC keitiklių modeliai bus įvardinami kaip B2B ir MC keitikliai.

Žemiau esančioje 8 lentelėje pateikiamos rotoriaus pusės (arba į keitiklius įeinančios) aktyviosios galios (P_{in}) vertės esant skirtingiems vėjo greičiams (v), kurios išmatuotos B2B_DFIG modelyje ir simuliuojamos B2B ir MC keitikliuose.

8 lentelė. Keitiklių įėjimo aktyviosios galios vertės

Modelis	Parametras	Matavimo vienetai	Reikšmė					
			3	5	10	15	20	25
	v	[m/s]	3	5	10	15	20	25
B2B_DFIG	P_{in}	[MW]	0	0,024	0,2439	0,456	0,531	0,561
B2B	P_{in}	[MW]	0	0,02438	0,2516	0,4568	0,5377	0,5681
MC	P_{in}	[MW]	0	0,02529	0,2418	0,4536	0,5331	0,5646

19 paveiksle pavaizduotos B2B_DFIG, B2B ir MC keitiklių aktyviosios galios charakteristikos, remiantis 8 lentelėje pateiktais duomenimis. Matyti, jog palyginamuosiuose modeliuose pakankamai tiksliai atkurtos į keitiklius įeinančios aktyviosios galios charakteristikos.



19 pav. B2B_DFIG, B2B ir MC modelių įeinančios į keitiklius aktyviosios galios charakteristikos

7.1. Galios nuostoliai

9 lentelėje pateikiami B2B ir MC modeliuose išmatuoti galios nuostoliai ir apskaičiuoti naudingumo koeficientai remiantis 5.1 skyriuje aprašytomis formulėmis. Pastarojoje lentelėje pateikti parametrai:

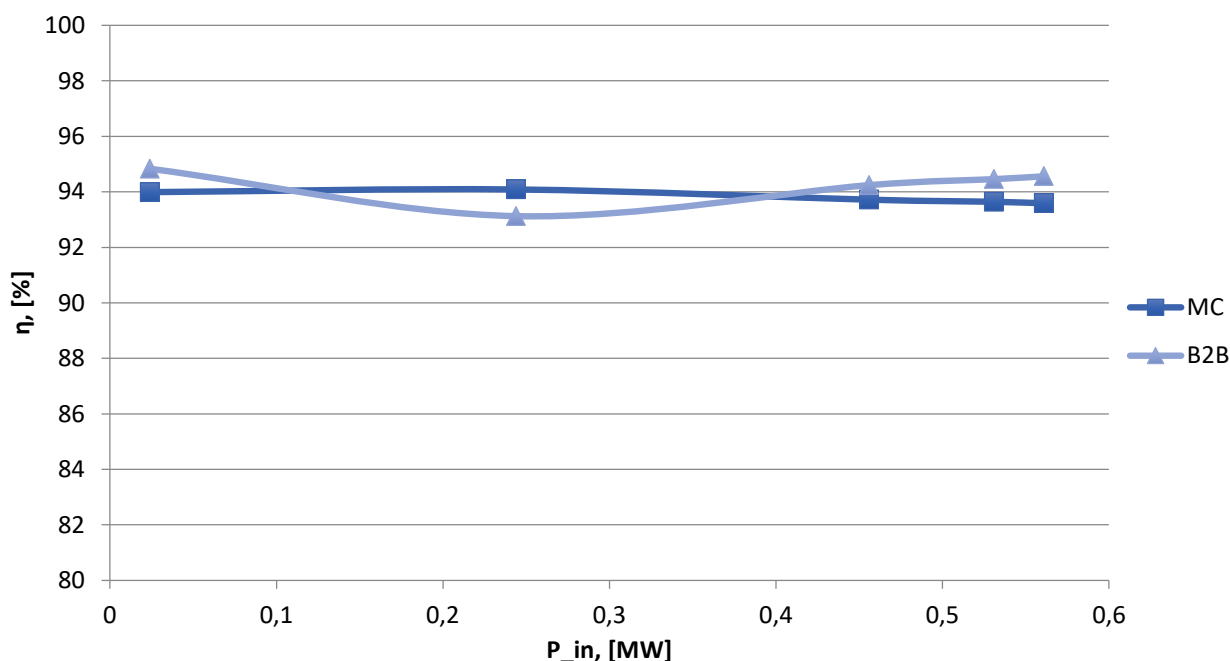
- P_{in} yra modeliavimo būdu sudarytos į keitiklį įeinančios aktyviosios galios reikšmės;
- $|\Delta P_{in}|$ yra B2B / MC keitiklyje sumodeliuotas, į keitiklį įeinančios aktyviosios galios (P_{in}), nuokrypis nuo B2B_DFIG modelyje išmatuotosios aktyviosios galios;
- P_{out} yra modeliavimo būdu sudarytos iš keitiklio išeinančios aktyviosios galios reikšmės;

- $\Delta P(\text{in-out})$ yra remiantis 12 formule apskaičiuotas aktyviosios galios skirtumas tarp B2B / MC modeliuose įeinančios P_{in} ir išeinančios iš keitiklio P_{out} ;
- η yra remiantis 13 formule apskaičiuoto B2B / MC keitiklio naudingumo koeficientas.

9 lentelė. Galios nuostolių išmatuotų B2B ir MC keitiklių modeliuose rezultatai

Modelis	Parametras	Matavimo vienetai	Reikšmė					
			3	5	10	15	20	25
MC	v	[m/s]	3	5	10	15	20	25
	P_{in}	[MW]	0	0,0253	0,2418	0,4536	0,5331	0,5646
	$ \Delta P(\text{in-in}) $	[%]	0	5,38	0,86	0,53	0,40	0,64
	P_{out}	[MW]	0	0,02377	0,2275	0,4251	0,4992	0,5284
	$\Delta P(\text{in-out})$	[MW]	0	0,00152	0,0143	0,0285	0,0339	0,0362
	η	[%]	NA	93,99	94,09	93,72	93,64	93,59
B2B	P_{in}	[MW]	0	0,0244	0,2516	0,4568	0,5377	0,5681
	$ \Delta P(\text{in-in}) $	[%]	0	1,58	3,16	0,18	1,26	1,27
	P_{out}	[MW]	0	0,02312	0,2343	0,4305	0,5079	0,5372
	$\Delta P(\text{in-out})$	[MW]	0	0,00126	0,0173	0,0263	0,0298	0,0309
		η	[%]	NA	94,83	93,12	94,24	94,46

Taip pat 9 lentelėje pateikiama keitiklių naudingumo koeficiento priklausomybė nuo bazinės vertės (t.y. vertės gautos B2B_DFIG modelyje) yra pavaizduota 20 paveiksle.



20 pav. B2B ir MC keitiklių naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo bazinės į keitiklį įeinančios aktyviosios galios P_{in} vertės

Iš 20 paveikslo matyti, jog tiek B2B, tiek MC keitiklių naudingumo koeficientai kinta nuo 93 % iki 95 % visame darbo režimo spektre, todėl galios nuostoliai abiejuose keitikliuose yra gana panašūs. Apskaičiavus galios nuostolių vidurkį nustatyta, jog B2B keitiklio galios nuostoliai yra kiek mažesni ir lygus 5,76 %, kai tuo tarpu MC keitiklio galios nuostoliai lygus 6,20 %. Iš 20 paveikslo

taip pat matyti, jog MC keitiklio naudingumo koeficientas visame darbo režime yra pastovesnis, negu B2B keitiklyje.

7.2. Galios kokybė

Šiame poskyryje aprašyti tyrimo rezultatai gauti išanalizavus 6 skyriuje aprašytus B2B ir MC keitiklių modelius pagal 5.2 skyriuje nurodytus kriterijus. Šioje tyrimo dalyje buvo nustatoma įėjimo (keitiklio rotorius pusės) bei išėjimo (keitiklio tinklo pusės) srovių (I_{in} , I_{out}) ir įtampų (V_{in} , V_{out}) THD priklausomybės nuo impulsų moduliacijos dažnio (f) ir vėjo greičio (v). B2B ir MC keitiklių tyrimo rezultatai pateikiami žemiau esančiose 10 ir 11 lentelėse.

Impulsų moduliacijos dažnis nustatomas intervale nuo 200 Hz iki 4000Hz. Matavimai buvo atliekami didinant impulsų moduliacijos dažnį 200Hz žingsniu. Nustatyta, jog tiek B2B, tiek MC keitikliuose tiriant THD, impulsų moduliacijos dažnio intervale nuo 2000Hz iki 4000Hz, pokytis buvo neženklus. Dėl to šiuo atveju išmatuotos THD vertės tik prie 3000Hz. Visa tai buvo vertinama nustatant atitinkamą vidinio tinklo įtampos šaltinių amplitudės reikšmę taip, jog būtų išgaunama įėjimo į keitiklį aktyvioji galia esant nustatytam vėjo greičio.

Plačiau įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų THD kitimo charakteristikos aptariamoms toliau, analizuojant trimačius grafikus (21–28 pav.), kurie yra sudaryti remiantis 10 ir 11 lentelių duomenimis.

10 lentelė. B2B keitiklio THD analizė esant skirtingiems impulsų moduliacijos dažniams (f) ir skirtingiems vėjo greičiams (v)

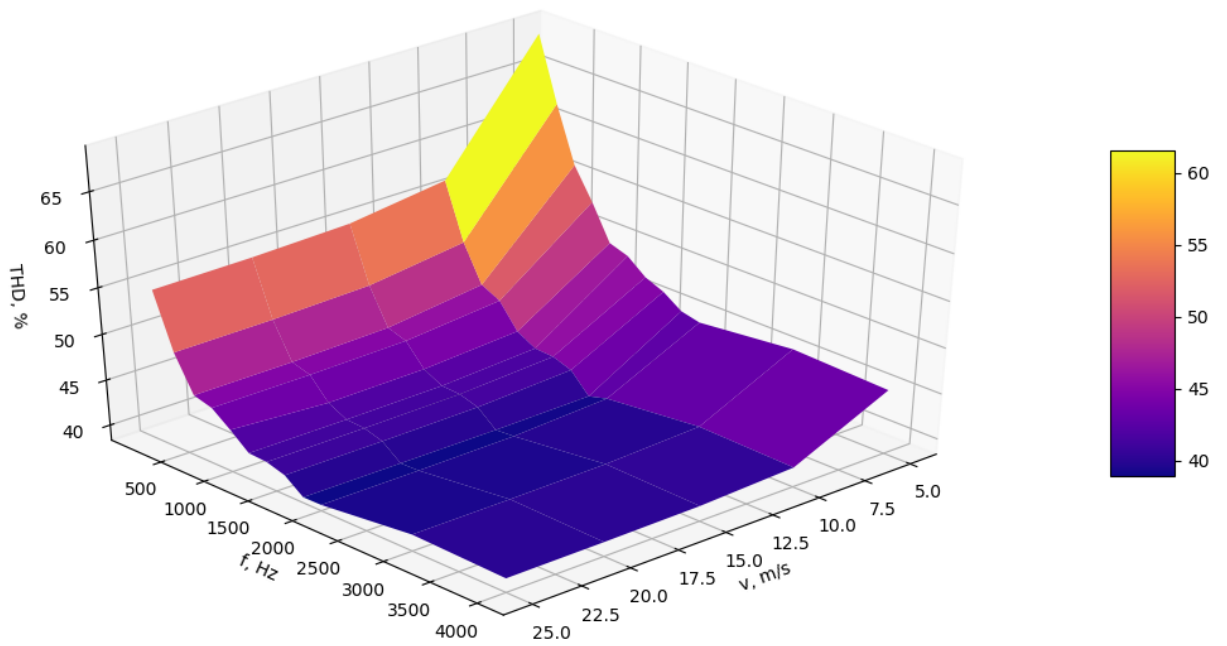
		THD, [%]	f , [Hz]											
			200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	3000	4000
v, [m/s]	5	U_{in}	16,26	12,15	9,04	7,33	6,66	6,45	6,24	6,14	6,01	5,9	5,95	5,88
		I_{in}	69,04	62,4	56,59	53,33	49,6	48,93	47,35	46,52	45,15	44,68	45,74	45,33
		U_{out}	110,76	96,4	64,8	37,48	13,58	7,77	5,26	4,05	3,09	2,89	2,19	2,18
		I_{out}	125,65	83,48	59,14	37,78	30,01	28,25	27,2	26,6	25,56	25,29	25,44	25,06
	10	U_{in}	16,11	11,88	9,46	8,36	7,73	7,47	7,43	7,33	6,97	7,09	7,18	7,13
		I_{in}	56,66	50,7	46,79	45,8	43,17	42,06	41,94	41,25	39,12	39,68	40,73	40,46
		U_{out}	112,49	97,79	65,73	38,03	13,78	7,89	5,34	4,11	3,14	2,93	2,23	2,22
		I_{out}	85,46	58,94	42,65	28,86	23,25	22,03	21,34	20,92	20,18	19,9	20,16	19,89
	15	U_{in}	16,13	11,87	9,52	8,49	7,9	7,64	7,61	7,51	7,2	7,26	7,38	7,33
		I_{in}	55,27	49,33	45,46	44,8	42,46	41,41	41,3	40,68	38,96	39,1	40,27	39,99
		U_{out}	112,74	98,01	65,86	38,11	13,81	7,9	5,35	4,12	3,14	2,94	2,24	2,23
		I_{out}	81,46	56,39	40,85	27,79	22,5	21,34	20,69	20,31	19,69	19,31	19,58	19,33
20	U_{in}	16,13	11,87	9,53	8,52	7,93	7,69	7,65	7,55	7,25	7,3	7,42	7,37	
	I_{in}	54,96	49,03	45,17	44,58	42,3	41,27	41,15	40,54	38,93	38,98	40,16	39,89	
	U_{out}	112,79	98,06	65,9	38,12	13,82	7,91	5,35	4,12	3,14	2,94	2,24	2,23	
	I_{out}	80,6	55,83	40,46	27,55	22,34	21,19	20,55	20,17	19,58	19,18	19,46	19,21	
25	U_{in}	16,13	11,87	9,54	8,53	7,95	7,7	7,66	7,56	7,26	7,32	7,44	7,38	
	I_{in}	54,87	48,94	45,09	44,53	42,96	41,23	41,11	40,5	38,92	38,95	40,13	39,86	
	U_{out}	112,83	98,13	65,92	38,14	13,82	7,91	5,35	4,12	3,14	2,94	2,24	2,23	
	I_{out}	80,35	55,68	40,35	27,49	22,29	21,14	20,51	20,13	19,55	19,14	19,42	19,17	

11 lentelė. MC keitiklio THD analizė esant skirtingiems impulsų moduliacijos dažniams (f) ir skirtingiems vėjo greičiams (v)

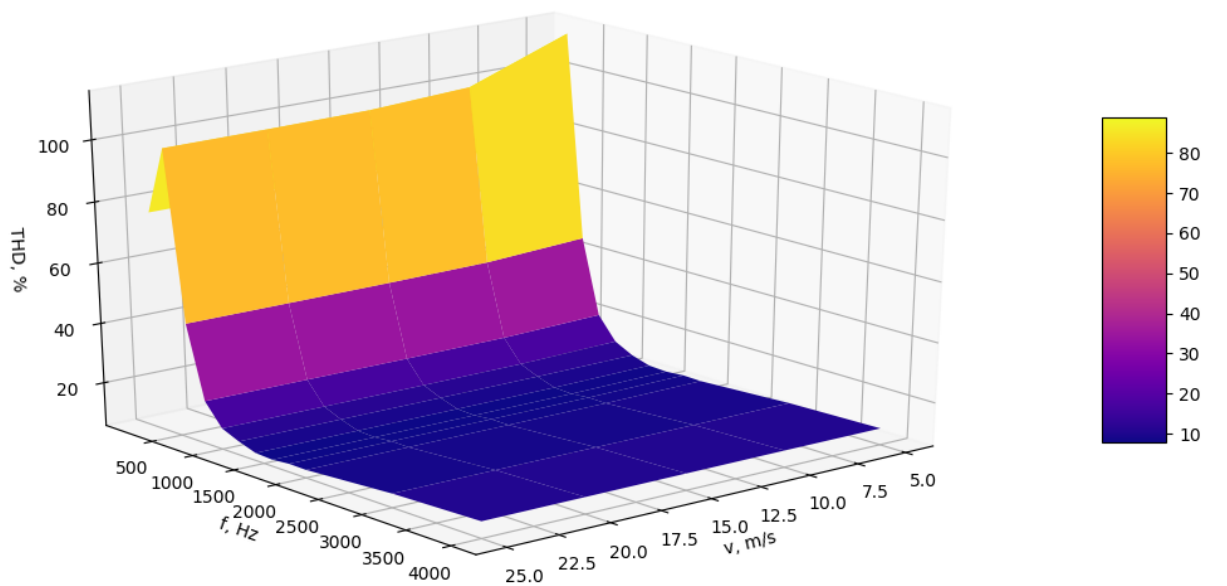
		THD, [%]	f, [Hz]											
			200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	3000	4000
v, [m/s]	5	U_in	55,20	69,05	36,83	11,23	8,92	7,88	6,55	6,43	6,70	6,66	7,80	8,35
		I_in	76,48	113,46	45,96	20,96	13,43	10,39	8,58	8,26	8,76	8,59	10,22	11,00
		U_out	146,68	109,79	88,88	36,01	16,66	14,36	7,37	6,23	5,46	5,52	8,33	9,76
		I_out	140,03	93,98	68,64	30,95	20,58	22,08	20,66	20,84	21,69	21,16	21,89	21,90
	10	U_in	56,00	69,43	36,90	11,42	8,97	8,11	6,60	6,47	6,81	6,81	8,26	8,96
		I_in	76,90	101,37	44,18	19,96	12,62	10,08	8,09	7,76	8,32	8,21	10,15	11,09
		U_out	146,80	110,65	88,92	36,10	16,69	14,74	7,44	6,31	5,69	5,88	9,41	11,11
		I_out	118,82	61,28	46,14	21,81	14,61	15,64	14,52	14,62	15,16	14,78	15,25	15,29
	15	U_in	56,14	69,50	36,91	11,45	8,98	8,15	6,61	6,48	6,83	6,83	8,34	9,06
		I_in	76,96	99,63	43,88	19,78	12,48	9,96	8,00	7,68	8,24	8,15	10,13	11,09
		U_out	146,83	110,80	88,93	36,12	16,70	14,81	7,46	6,33	5,73	5,93	9,57	11,33
		I_out	113,32	57,65	43,66	20,78	13,93	14,92	13,84	13,94	14,45	14,08	14,53	14,57
20	U_in	56,17	69,51	36,91	11,46	8,98	8,16	6,61	6,49	6,83	6,83	8,36	9,08	
	I_in	76,98	99,30	43,82	19,75	12,45	9,95	7,99	7,67	8,23	8,13	10,13	11,09	
	U_out	146,84	110,82	88,93	36,12	16,70	14,82	7,46	6,33	5,74	5,93	9,62	11,38	
	I_out	112,24	56,98	43,20	20,59	13,81	14,79	13,71	13,81	14,21	13,95	14,40	14,44	
25	U_in	56,18	69,52	36,91	11,46	8,98	8,16	6,61	6,49	6,84	6,83	8,36	9,09	
	I_in	76,98	99,18	43,80	19,73	12,44	9,94	7,98	7,66	8,22	8,13	10,13	11,09	
	U_out	146,84	110,84	88,93	36,12	16,70	14,83	7,46	6,34	5,74	5,94	9,63	11,39	
	I_out	111,85	56,74	43,04	20,53	13,76	14,74	13,66	13,76	14,27	13,91	14,35	14,39	

Iš 7.1 poskyryje 9 lentelėje pateiktų rezultatų yra žinoma, jog didėjant vėjo greičiui, didėja aktyvioji galia, tiek įeinanti, tiek išeinanti iš keitiklio. Dėl to iš 21–28 paveikslų nustatyta, kad abiejų keitiklių rotoriaus pusės (I_in) ir keitiklio pusės srovių (I_out) THD_I yra neženkliai didesni prie mažesnių vėjo greičių, tai reiškia, kad THD_I didėja esant mažesnei aktyviajai galiai. Taip pat nustatyta, jog esant mažesniems vėjo greičiams įtampų THD_U mažėja, priešingai negu THD_I. Iš trimačių paveikslų matyti, jog visame impulsų moduliacijos spektre didėjant impulsų moduliacijos dažniui, tiek srovių, tiek įtampų THD eksponentiškai mažėja. Taip pat iš 21–28 paveikslų buvo nustatyta, jog abu (B2B ir MC) keitikliai geriau išfiltruoja įtampų harmonikas (THD_U) negu srovių (THD_I).

Palyginus įėjimo srovių grafikus, pavaizduotus 21 ir 22 paveiksluose, galima teigti, jog MC keitiklio THD_I didėjant vėjo greičiui išlieka pastovesni negu B2B keitiklio įėjimo srovių THD_I, kurie didėja prie mažesnių vėjo greičių. Taip pat nustatyta, kad esant mažesniems impulsų moduliacijos dažniams B2B keitiklio harmoniniai iškraipymai yra mažesni, tačiau didinant impulsų moduliacijos dažnį THD_I MC keitiklyje sumažėja daug greičiau, negu B2B keitiklyje.

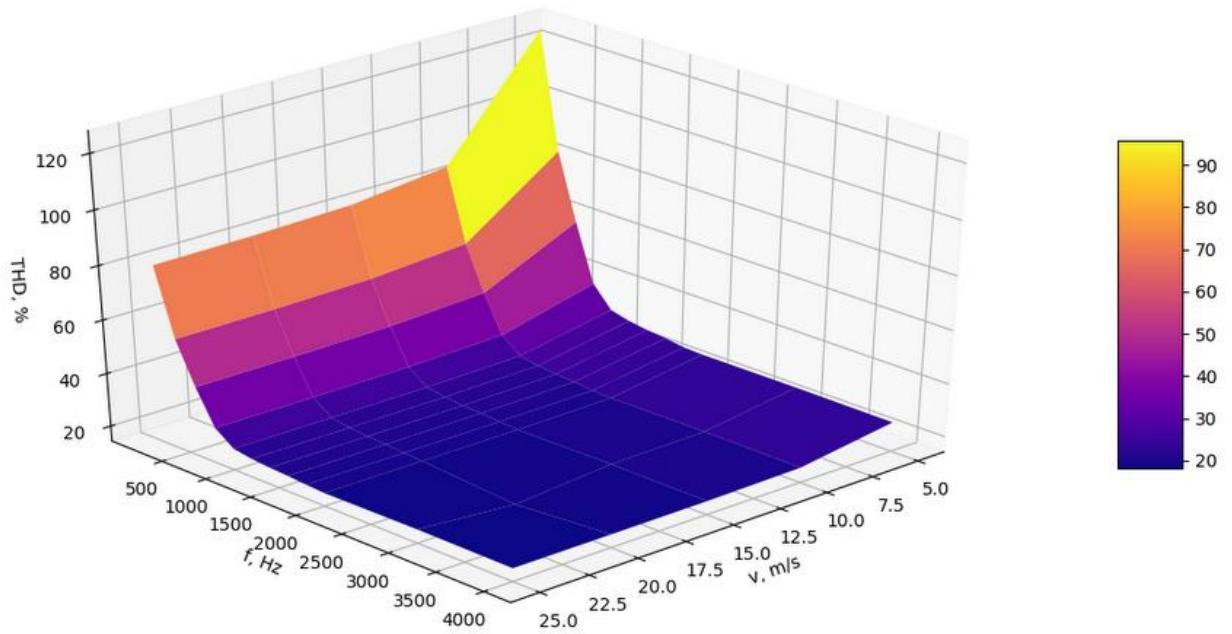


21 pav. B2B keitiklio įėjimo srovių (I_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

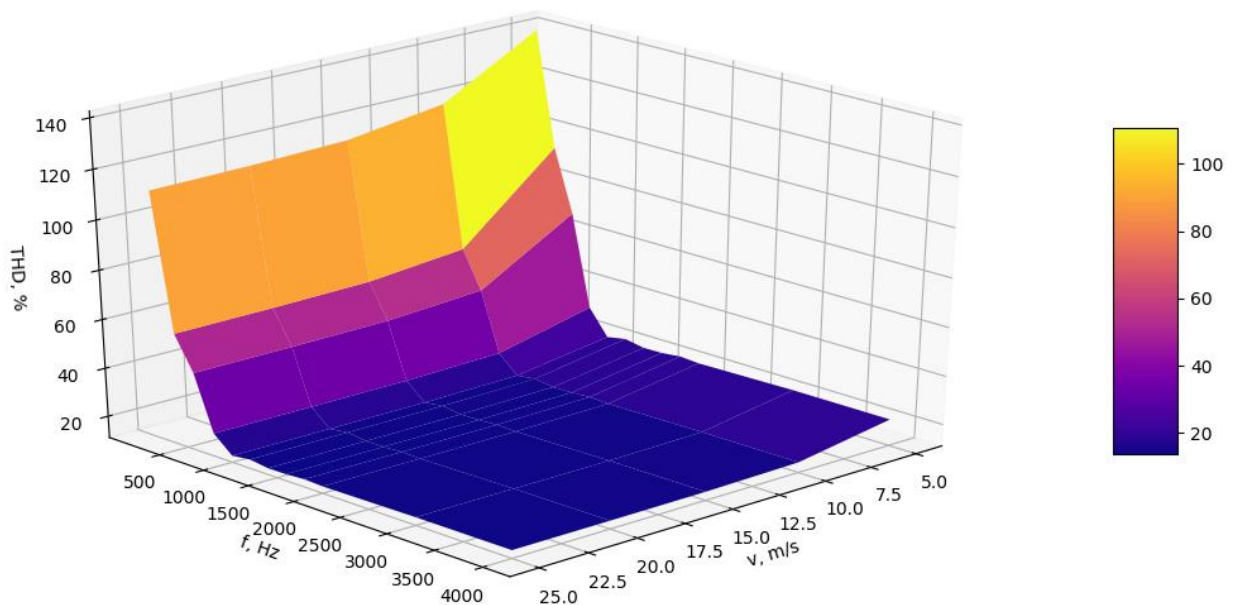


22 pav. MC keitiklio įėjimo srovių (I_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

Analizuojant tiriamų keitiklių išėjimo srovių suminius harmoninius iškraipymus, pateiktus 23 ir 24 paveiksluose, galima matyti, jog abiejų keitiklių elgesys yra panašus, t. y. abiem atvejais nustatyti neženkliai didesni THD esant mažiems vėjo greičiams ir panašiu tempu mažėjančios THD priklausomybės didėjant impulsų moduliacijos dažniui. Didžiausias skirtumas tarp dviejų sistemų išryškėja prie labai mažų impulsų moduliacijos dažnių, kai MC keitiklio suminiai harmoniniai iškraipymai yra apie 20 % didesni, negu B2B keitiklio.

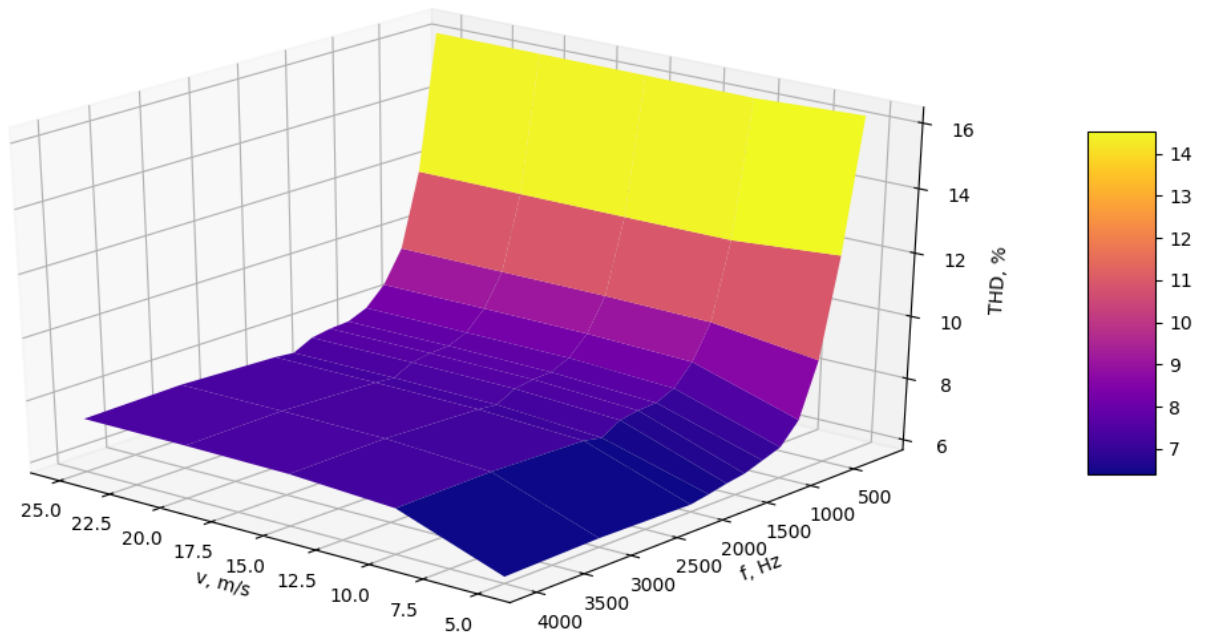


23 pav. B2B keitiklio išėjimo srovių (I_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

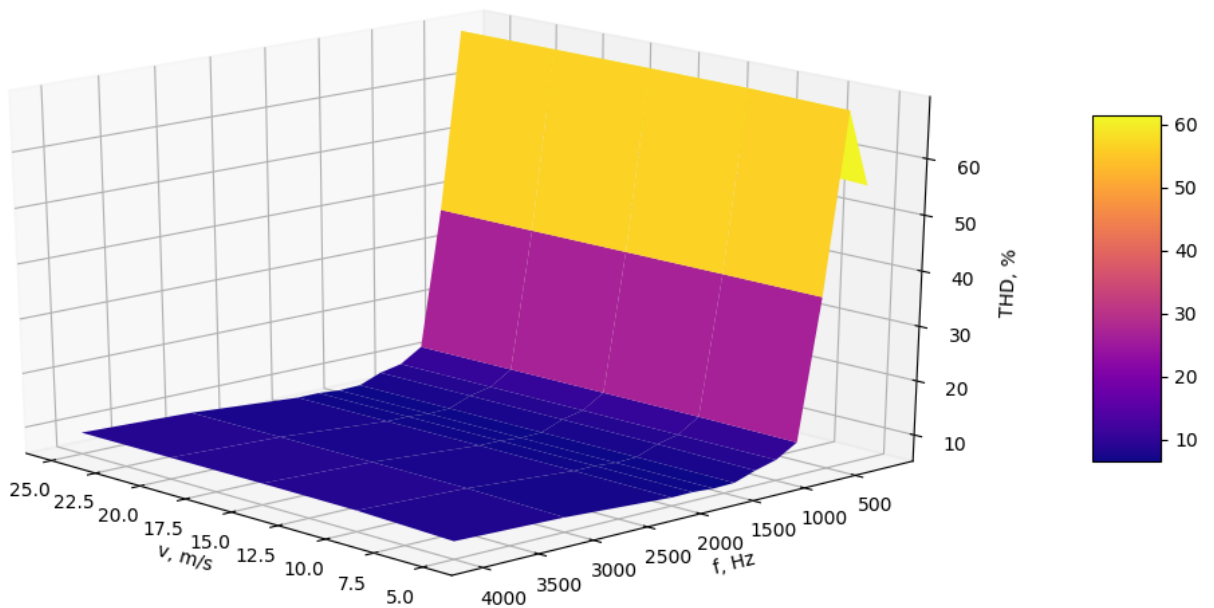


24 pav. MC keitiklio išėjimo srovių (I_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

Lyginant trimačius įėjimo įtampų grafikus, pavaizduotus 25 ir 26 paveiksluose, nustatyta, jog, priešingai nei tiriant B2B keitiklio įėjimo sroves, prie mažesnio vėjo greičio yra mažesni harmoniniai iškraipymai. Tuo tarpu MC keitiklyje visame vėjo greičio kitimo diapazone įėjimo įtampų THD išlieka gan pastovūs. Tačiau, lygiai taip pat kaip ir analizuojant įėjimo srovių trimačius grafikus (žiūr. 21 ir 22 pav.) nustatyta, kad 25 ir 26 paveiksluose, palaipsniui didėjant impulsų moduliacijos dažniui THD MC keitiklyje sumažėja ženkliai greičiau, negu B2B keitiklyje.

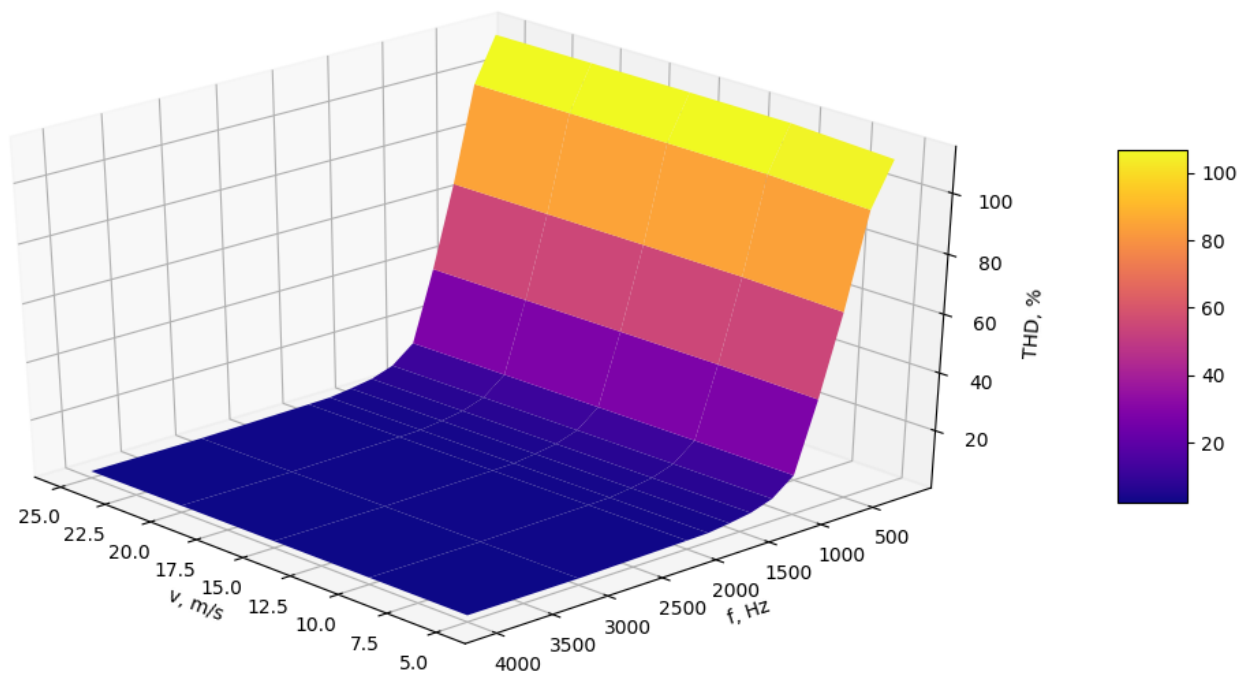


25 pav. B2B keitiklio įėjimo įtampų (U_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

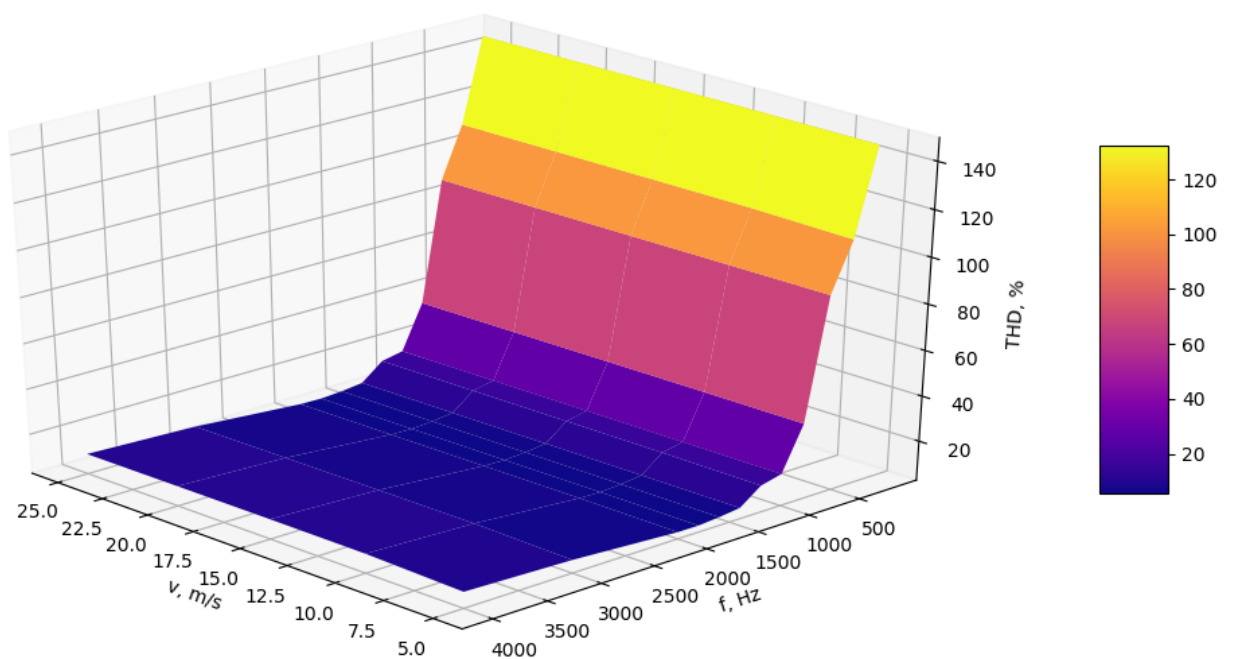


26 pav. MC keitiklio įėjimo įtampų (U_{in}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

Tarp B2B ir MC keitiklių išėjimo įtampų suminių harmoninių iškreipymų charakteristikų, pateiktų 27 ir 28 paveiksluose, ženklus skirtumas nėra. Taip pat nustatyta, kad panašiai kaip ir tiriant išėjimo srovių THD, MC keitiklyje prie mažesnių impulsų moduliacijos dažnių išėjimo įtampų THD yra beveik 40 % didesni negu B2B keitiklyje.

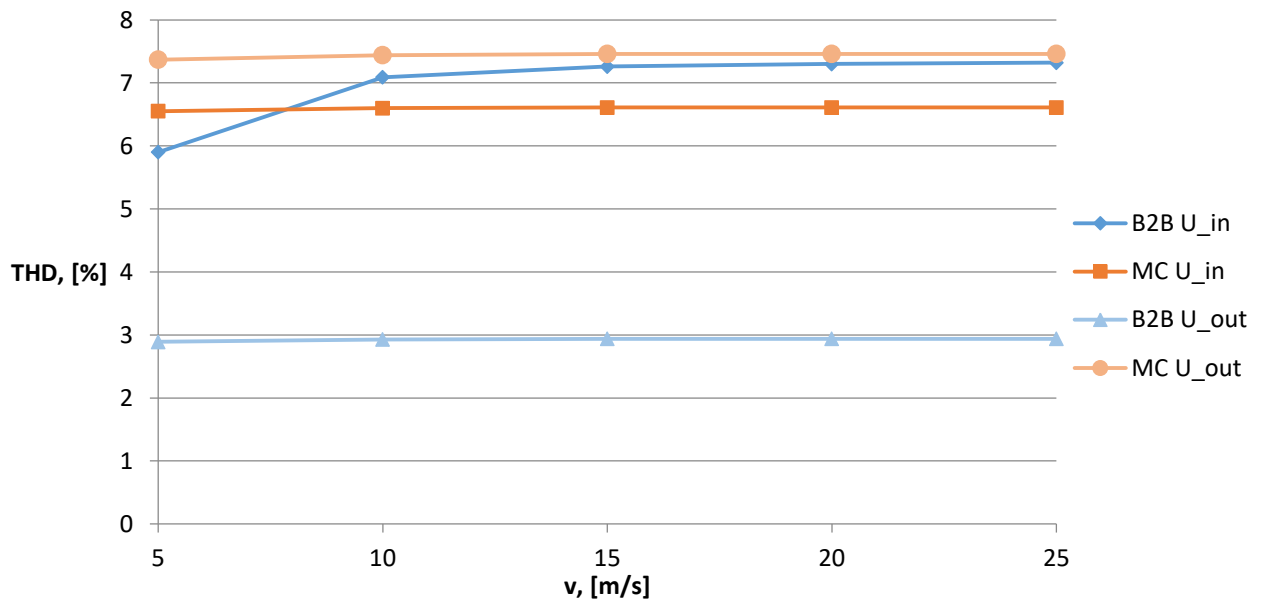


27 pav. B2B keitiklio išėjimo įtampų (U_{out}) THD priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio



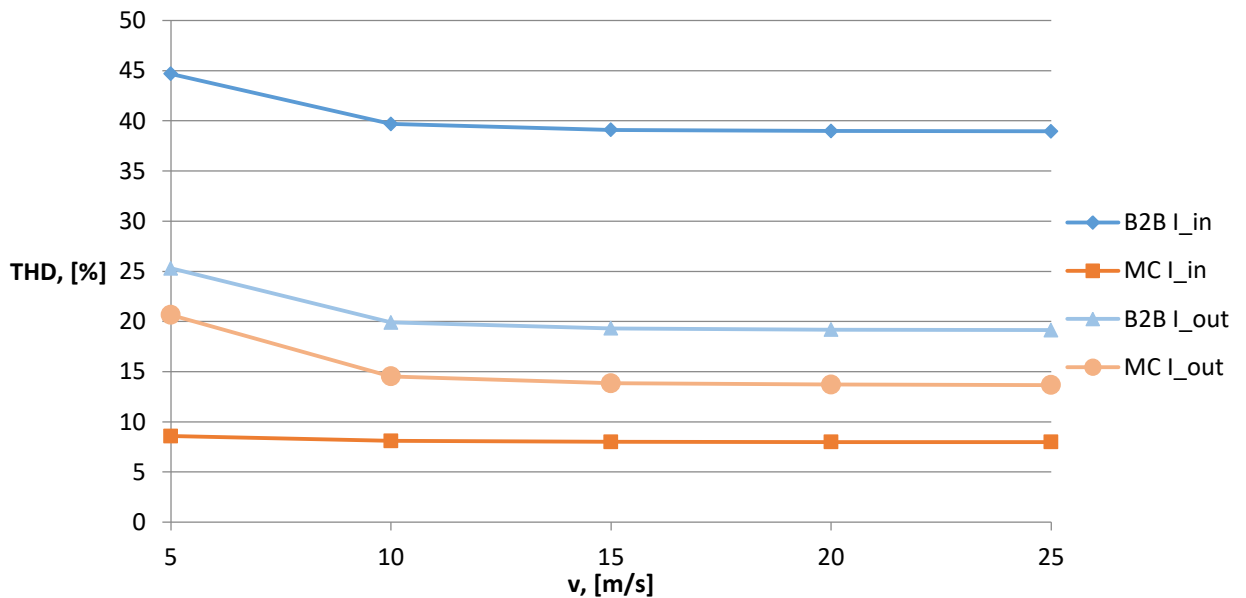
28 pav. MC keitiklio išėjimo įtampų (U_{out}) THD pasiskirstymo priklausomybė nuo moduliacijos impulsų dažnio ir vėjo greičio

Iš aukščiau pateiktų rezultatų matyti, jog mažiausi suminiai harmonikų iškraipymai MC keitiklyje pasiekiami esant 1600 Hz impulsų moduliacijos dažniui, o B2B keitiklyje – 2000 Hz impulsų moduliacijos dažniui. MC keitiklyje didinant pastarąjį dažnį THD pradeda po truputį didėti, o B2B keitiklyje didinant šį dažnį THD mažėja, tačiau neženkliai. 29 ir 30 paveiksluose pateikiamos B2B ir MC keitiklių THD priklausomybės nuo vėjo greičio esant tokiam impulsų moduliacijos dažniui, kai suminių harmonikų iškraipymų koeficientai yra mažiausi.



29 pav. B2B ir MC keitiklių įėjimo (U_{in}) ir išėjimo (U_{out}) įtampų THD_U priklausomybė nuo vėjo greičio

Iš 29 paveikslo matyti, jog B2B ir MC keitiklių rotoriaus pusėje esančių įtampų (U_{in}) THD_U esant didesniems vėjo greičiams MC keitiklyje yra truputį mažesni, negu B2B keitiklyje, tačiau analizuojant visą darbo režimą matyti, jog abiejų keitiklių įtampos harmoniniai iškreipymai rotoriaus pusėje yra apytiksliai lygūs 7 %. Tinklo pusėje esančių įtampų (U_{out}) THD_U B2B keitiklyje sumažėja iki 3 %, kai tuo tarpu MC keitiklyje išauga 1 % lyginant su U_{in} THD_U verte t. y. MC keitiklyje išėjimo įtampos (U_{out}) THD_U yra 4,5 % didesnė negu B2B keitiklyje.



30 pav. B2B ir MC keitiklių įėjimo (I_{in}) ir išėjimo (I_{out}) srovių THD_I priklausomybė nuo vėjo greičio

Iš 30 paveikslo galima matyti, kad tiek rotoriaus, tiek tinklo pusėje srovių suminiai harmonikų iškreipymai yra mažesni negu B2B keitiklyje. MC keitiklio įėjimo srovių suminiai harmonikų iškreipymai yra daugiau kaip 30 % mažesni, o išėjimo srovių THD_I apytiksliai 5 % mažesni negu B2B keitiklyje.

Išvados

- 1) B2B keitiklio galios nuostolių vidurkis yra kiek mažesnis, negu MC keitiklio modelio ir yra lygus 5,76 %, kai MC – 6,20 %.
- 2) Dėl keitiklių veikimo principo ir struktūros mažiausias įtampos ir srovės harmoninių iškreipimų koeficientas MC keitiklyje gaunamas, kai impulsų pločio moduliacijos dažnis yra 1600 Hz, o B2B keitiklyje – 2000 Hz.
- 3) Grandyje tarp DFIG rotoriaus ir keitiklio įtampų THD_U B2B bei MC keitikliuose yra apytiksliai lygūs 7 %.
- 4) Grandyje tarp keitiklio ir elektros tinklo MC keitiklyje įtampų THD_U yra 4,5 % didesnė negu B2B keitiklyje.
- 5) Grandyje tarp DFIG rotoriaus ir keitiklio srovių THD_I MC keitiklyje yra daugiau kaip 30 % mažesni negu B2B keitiklyje.
- 6) Grandyje tarp keitiklio ir elektros tinklo MC keitiklyje srovių THD_I yra apytiksliai 5 % mažesni negu B2B keitiklyje.

Literatūros sąrašas

- [1] Blaabjerg F., Iov F., Chen Z., Ma K., *Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems*, International Energy Conference, IEEE, 2010 m.
- [2] *GE announces Haliade-X, the world's most powerful offshore wind turbine*, Pasiukiama: <https://www.genewsroom.com/press-releases/ge-announces-haliade-x-worlds-most-powerful-offshore-wind-turbine-284260> . Žiūrėta (2018/05/15)
- [3] Chen Z., *A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines*, Transactions on Power Electronics, IEEE, 2009 m.
- [4] Cheng M., Zhu Y., *The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review*, Energy Conversion and Management, ELSEVIER, 2014 m.
- [5] Global Wind Energy Council, *Global Wind Statistics 2017*. Pasiukiama: http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf . Žiūrėta (2018/05/15)
- [6] Nabil T., Brahim M., Toufik R., *Matrix converters in Wind Energy Systems*, Energy Science and Technology Vol. 8: Wind Energy, Studium Press LLC, 2015m.
- [7] Islam M. R., Guo Y., Zhu J., *Power converters for wind turbines: Current and future development*, Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments, Formatex Research Center, 2013m.
- [8] *Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)*, Courseware Sample by the staff of Lab-Volt Ltd. 2011m. Pasiukiama: <http://faculty.iauctb.ac.ir/faculty/Files//Content/Principles%20of%20Doubly-Fed%20Induction%20Generator.pdf>. Žiūrėta (2018/05/15)
- [9] Miller N.W., Price W.W., Sanchez-Gasca J. J., *Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*, GE-Power Systems Energy Consulting, 2003 m.
- [10] Szczesniak P., *Three-Phase AC–AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*, Power Systems, Springer-Verlag, 2013 m.
- [11] Zhan P., Lin W., Wen J., Yao M., Li N., *Design of LCL Filters for the Back-to-back Converter in a Doubly Fed Induction Generator*, PES Innovative Smart Grid Technologies, IEEE, 2012 m.
- [12] Popovici A., Popescu V., Babaita M., Lascu D., Negoitescu D., *Modeling, Simulation and Design of Input Filter for Matrix Converters*,
- [13] Pinto S.F., Aparicio L., Esteves P., *Direct Controlled Matrix Converters in Variable Speed Wind Energy Generation Systems*, POWERENG, IEEE 2007m.
- [14] *Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)*, The MathWorks, Inc, Pasiukiama: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html> (žiūrėta 2018/10/20).

- [15] Babaie Lajimi A., Asghar Gholamian S., Shahabj M., *Modeling and Control of a DFIG-Based Wind Turbine During a Grid Voltage Drop*, ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, 2011 m.
- [16] Dabour S.M., M. Rashad A.M, *Indirect Space-Vector PWM Technique for Three to Nine Phase Matrix Converters*, Proceedings of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, 2015m.
- [17] Huber L., Borojevic D., *Space Vector Modulated Three-phase to Three-phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 1995m.
- [18] Williams D. *Understanding, Calculating, and Measuring Total Harmonic Distortion (THD)*, 2017 m. Pasičkiamia: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>. Žiūrėta (2019/11/25)
- [19] R. Gagnon, *Wind Farm - DFIG Detailed Model*, The MathWorks, Inc, Pasičkiamia: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html>. Žiūrėta (2018/05/15)
- [20] *GE Energy 1.5 MW Wind Turbine*. Pasičkiamia: <https://geosci.uchicago.edu/~moyer/GEOS24705/Readings/GEA14954C15-MW-Broch.pdf> (žiūrėta 2018/03/17).
- [21] Fuchs F.W., Schröder J., Wittig B., *State of the Technology of Power Loss Determination in Power Converters*, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), IEEE, 2013 m.
- [22] IEC 61400-21:2008 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.
- [23] Dudgeon G., *Three-Phase Matrix Converter*, The MathWorks, Inc, Pasičkiamia: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/three-phase-matrix-converter.html>, Žiūrėta (2018/05/15)
- [24] *AC-DC-AC Converter*, The MathWorks, Inc, Pasičkiamia: <https://in.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/ac-dc-ac-converter.html>, Žiūrėta (2018/05/15)
- [25] *Draka Keila Cabels* produktų katalogas, Estija, 2014m.
- [26] Svinkūnas G., Medvedev K., *Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net*, Elektronika ir elektrotechnika, KTU, 2012 m.