



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Tomas Bendoraitis

**TIESIOGINIO MATRICINIO KEITIKLIO, VEIKIANČIO
REAKTYVIOSIOS GALIOS KOMPENSAVIMO RĖŽIME,
TYRIMAS.**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Gytis Petrauskas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

**TIESIOGINIO MATRICINIO KEITIKLIO, VEIKIANČIO
REAKTYVIOSIOS GALIOS KOMPENSAVIMO RĖŽIME,
TYRIMAS.**

Baigiamasis magistro projektas
Studijų programos pavadinimas (kodas 621H66001)

Vadovas

(parašas) Lekt. dr. Gytis
Petrauskas (data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Renaldas Urniežius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Tomas Bendoraitis
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Tomas Bendoraitis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio reaktyviosios galios kompensavimo režime tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. ____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Tomo Bendoraičio**, baigiamasis projektas tema „Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio reaktyviosios galios kompensavimo režime, 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)

Bendoraitis, Tomas. **Tiesioginio matricinio keitiklio, veikiančio reaktyviosios galios kompensavimo režime, tyrimas.** Valdymo sistemų Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Petrauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *Matricinis keitiklis, erdvės vektoriaus moduliacija, reaktyvioji galia.*

Kaunas, 2017. 54 p.

SANTRAUKA

Darbo tikslas – ištirti kaip tiesioginį matricinį dažnio keitiklį valdomą netiesioginę erdvės vektoriaus moduliacija galima panaudoti reaktyviosios galios nuostolių kompensavimui. Tam „Matlab Simulink“ programine įranga sukurtas sistemos modelis. Modelį sudaro trijų fazių įtampos šaltinis, galios transformatorius, pirminė ir antrinė perdavimo linijos matricinis keitiklis su aktyvine apkrova ir papildomi reaktyviąją galią generuojantys įrenginiai. Naudojant netiesioginę erdvės vektoriaus moduliaciją keitiklis valdymo požiūriu suskaidomas į virtualias lyginimo ir invertavimo dalis. Kur lyginimo dalyje keičiant nuostatos signalą galima kompensuoti reaktyviąją galią.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad matricinis keitiklis gali kompensuoti reaktyvios galios nuostolius tiek talpinio, tiek induktyvinio tipo reaktyviąją galią generuojančiam įrenginiui. Taip pat nustatyta, kad keitiklis gali kompensuoti kelis įrenginius vienu metu. Nustatyta, kad įrenginio ir įėjimo transformatoriaus reaktyviosios galios santykis kompensuojant skirtingo tipo įrenginius esant skirtingos transformatoriaus galioms kinta nuo 0,047 iki 0,48 arba nuo 0,2 iki 0,47, priklausomai nuo įrenginio apkrovos tipo. Taip pat, nustatyta kaip kinta šalutinių harmonikų kiekis įėjime keitikliui veikiant reaktyviosios galios kompensavimo režime.

Bendoraitis, Tomas. (*Research of direct matrix converter operating in reactive power compensation mode*): Master's thesis / supervisor assoc. doc dr. Gytis Petrauskas. The Faculty of Electricity and electronics, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences.

Key words: Matrix converter, space vector modulation, reactive power.

Kaunas, 2017. 54 p.

SUMMARY

Purpose of this Master's thesis is to research how matrix converter with indirect space vector modulation can compensate reactive power losses in system. For this purpose model in "Matlab Simulink" was constructed. Model consists of three phase power source, power transformer, primary and secondary power transfer lines, matrix converter with active load and additional reactive power generating devices. To control converter indirect space vector modulation is used where converter is divided in virtual rectifier and inverter parts. In rectifier part phase angle can be controlled to compensate reactive power.

After all the research it was found that matrix converter can compensate capacitive and inductive additional devices in the grid. Also converter can compensate more than one device. Reactive power ratio between device and power transformer was measured in compensation mode with different transformer power and ratio changes from 0,047 to 0,48 or from 0,2 to 0,47 according to device load type. Also given, characteristics on how THD in input signals changes in reactive power compensation mode.

TURINYS

ĮVADAS.....	10
1. DAŽNIO KEITIKLIAI	11
1.1 Keitikliai su reaktyviosios energijos kaupimo elementų.....	12
1.2 Dažnio keitikliai be reaktyviosios energijos kaupimo elementų	14
1.2.1 Tiesioginis AC – AC dažnio keitiklis: Matricinis keitiklis	15
1.2.2 Dvikrypčio jungiklio topologijos	16
2. MODULIAVIMO STRATEGIJOS	18
2.1 Skaliariniai metodai.....	18
2.1.1 Tiesioginio valdymo. (Venturi).....	18
2.1.2 Rojaus metodas	19
2.2 Impulso pločio moduliacijos (PWM) metodai	19
2.2.1 Metodai paremti nešlio moduliacija.	19
2.2.2 Tiesioginė erdvės vektoriaus moduliacija (SVM).....	20
2.2.3 Netiesioginė erdvės vektoriaus moduliacija.....	21
2.2.3.1 Erdvės vektoriaus moduliacijos lyginimo stadija.....	22
2.2.3.2 Erdvės vektoriaus moduliacijos invertavimo stadija	24
3. REAKTYVIOJI GALIA IR JOS KOMPENSAVIMO BŪDAI	26
4. MATLAB SIMULINK MODELIS.....	30
4.1 Galios grandinė	30
4.2 Valdymo grandinė.....	33
5. REAKTYVIOS GALIOS KOMPENSAVIMAS	40
5.1 Energetinės sistemos apkrovos pobūdis.	40
6. ELEKTRINIŲ DYDŽIŲ MATAVIMAS MATLAB SIMULINK MODELyje	42
7. MODELIAVIMO REZULTATAI.....	44
IŠVADOS	51
LITERATŪROS ŠALTINIAI.....	52
Priedai	55
1. Priedas. Galimos MC keitiklio jungiklių konfigūracijos.....	55

SUTRUMPINIMŲ SĄRAŠAS

AC - Kintama srovė (angl. *Alternating current*);

DC - Nuolatinė srovė (angl. *Direct current*);

MC - Matricinis keitiklis (angl. *Matrix converter*);

PWM - Impulso pločio moduliacija (angl. *Pulse width modulation*);

VSI - Įtampos šaltinio inverteris. Viena iš AC – AC keitiklių rūšių (angl. *Voltage source inverter*);

IGBT - Dvipolis tranzistorius su izoliuota užtūra (angl. *Insulated Gate Bi-polar Transistor*);

B2B - Pirmyn-atgal keitiklis (angl. *Back-to-Back*);

CSI - Srovės šaltinio inverteris (angl. *Current source inverter*);

VSMC - Įtampos šaltinio matricinis keitiklis (angl. *Voltage source matrix converter*);

CSMC - Srovės šaltinio matricinis keitiklis (angl. *Current source matrix converter*);

SVM - Erdvės vektoriaus moduliacija (angl. *Space vector modulation*);

PCC - Prognozuojamos srovės valdymas (angl. *Predictive current control*);

PTC - Prognozuojamo sukimo momento valdymas (angl. *Predictive torque control*);

DTC - Tiesioginio sukimo momento valdymas (angl. *Direct torque control*);

EMF - Elektrovaros jėga (angl. *Electromotive force*);

FACTS - AC perdavimo sistemos įrenginiai (angl. *Flexible AC transmission system devices*);

ĮVADAS

Terminas keitiklis elektronikoje dažniausiai apibūdina statinius įrenginius galinčius keisti maitinimo įtampos parametrus. Keitikliai gali būti AC - DC, DC - AC, DC - DC, ar AC - AC. Šiame darbe dėmesys bus skiriamas AC - AC arba dar dažnio keitikliais vadinamiems įrenginiams. Dažnio keitikliai galios elektronikoje taikomi jau ilgą laiką. Jei naudojami kintamos įtampos mašinoms valdyti. Paprasčiausias pavyzdys galėtų būti trijų fazių kintamos įtampos variklio valdymas.

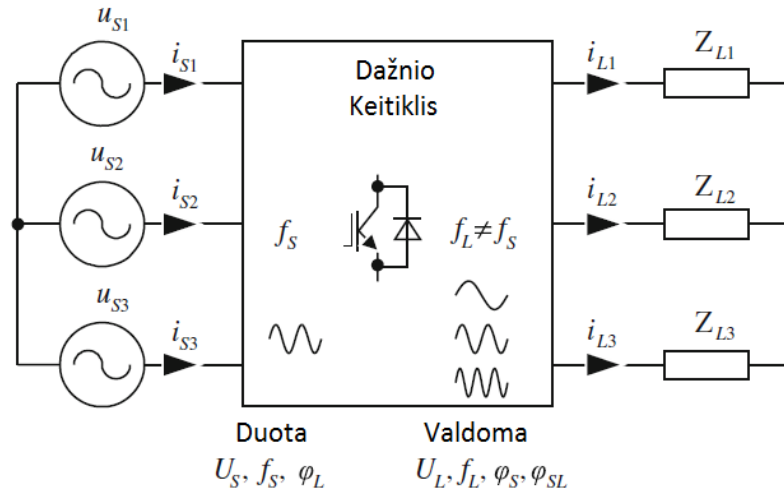
Variklis yra induktyvinio tipo apkrova. Prijungus apkrovą sudarytą iš reaktyviųjų elementų tinkle generuojami reaktyviosios galios nuostoliai, kurie mažina į apkrovą patenkančios aktyviosios galios kiekį bei sistemos stabilumą. Norint kompensuoti šiuos nuostolius galima naudoti tiesioginį matricinį dažnio keitiklį valdomą netiesioginės erdvės vektoriaus moduliacijos būdu.

Matricinį keitiklį valdant netiesioginiu erdvės vektoriaus metodu, keitiklis valdymo požiūriu padalinamas į virtualias lyginio ir invertavimo stadijas, kurios yra susietos valdymo grandine ir veikia nepriklausomai viena nuo kitos. Lyginimo stadijoje galima su nuostatos signalu keisti fazės kampą tarp įtampos ir srovės įėjime, taip formuojant reikiamo tipo apkrovą. Apkrovos gali būti aktyvinės, kai fazės kampas tarp įtampos ir srovės lygus 0. Tokiai apkrovai kompensuoti reaktyvios galios nereikia, nes ji nekeičia fazės kampo. Galimos talpinio ir induktyvinio pobūdžio apkrovos, kurios pakeičia fazės kampą. Talpinio tipo apkrovai srovės fazė lenkia įtampos fazę, o induktyvinei srovės fazė atsilieka nuo įtampos fazės. Tai parenkant apkrovos tipą priešingą prijungtam įrenginiui galima kompensuoti reaktyvios galios nuostolius.

Šiame darbe bus tiriama kokio tipo papildomus reaktyviosios galios nuostolius generuojančius įrenginius ir kaip gali kompensuoti tiesioginis matricinis keitiklis su aktyvine apkrova.

1. DAŽNIO KEITIKLIAI

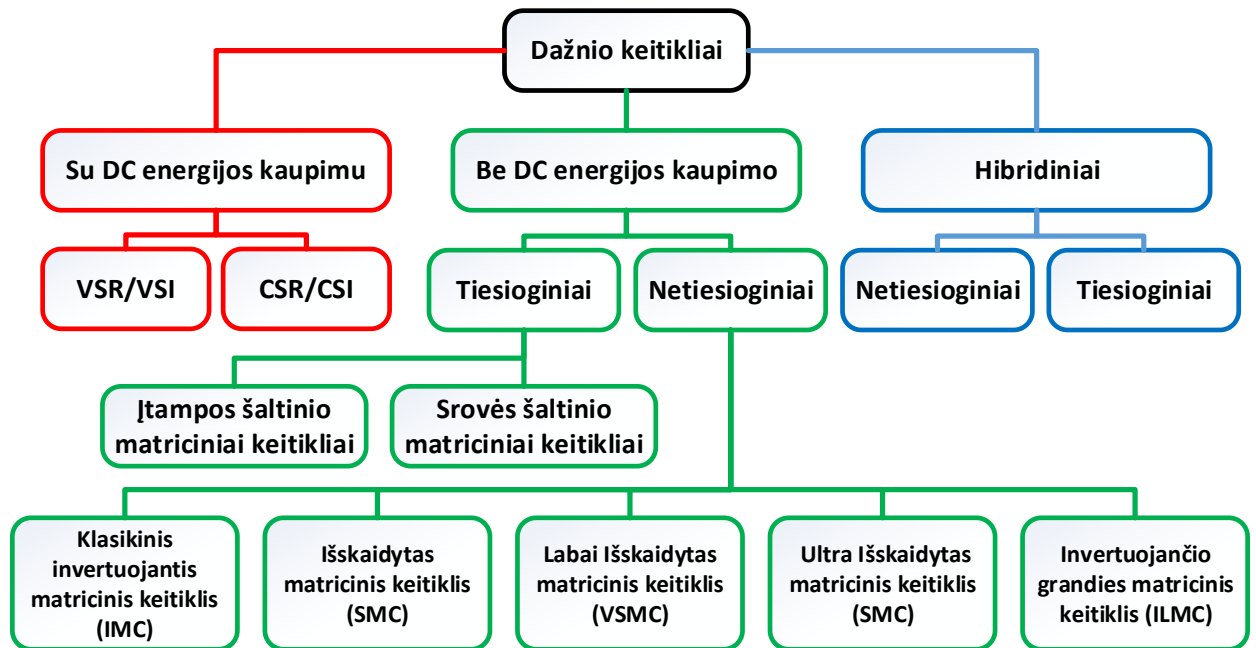
Kaip jau minėta anksčiau, dažnio keitikliai vieno dažnio įtampą keičia kito dažnio įtampa. Taip pat, galima valdyti apkrovos įtampos amplitudę, apkrovos poslinkio kampą, pagal įtampos šaltinį, poslinkio kampus tarp apkrovos įtampų ir srovių.[3] Paveikslėlyje (žr. 1.1 pav.) pateikiama bendra trijų fazių PWM AC - AC keitiklio diagrama.



1.1 pav. Bendra trijų fazių PWM AC - AC keitiklio diagrama. [3]

Prie dažnio keitiklio įėjimo prijungta pastovios amplitudės U_S ir dažnio f_S sinuso formos įtampa. Išėjime gaunama įtampa U_L ir dažnis f_L gali būti reguliuojami. Taip pat reguliuojamas ir išėjimo įtampos poslinkio kampas. Apkrovos srovių amplitudės I_L ir fazės ϕ_L įtakoja apkrovos charakteristikų. Vykstant dvikrypčiam valdymui per jungiklius, keitiklis keičia apkrovos sroves iš dažnio f_L į įėjimo sroves su dažniu f_S [3].

Dažnių keitiklių yra labai įvairių todėl būtina juos klasifikuoti, pagal tam tikrus bruožus. Toliau (žr. 1.2 pav.) pateikiama trijų fazių AC - AC keitiklių klasifikacija.

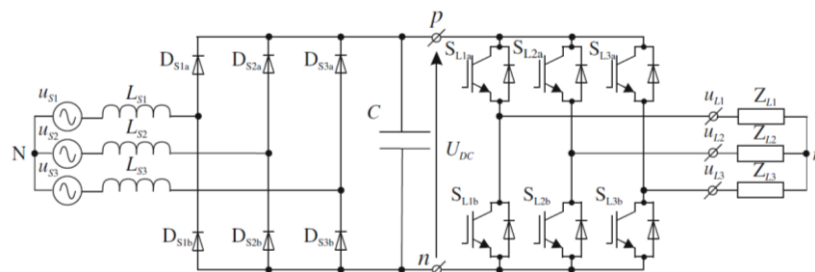


1.2 pav. Trijų fazių AC – AC keitiklių klasifikacija. [3]

Išskiriamos trys pagrindinės kategorijos, pagal keitimo principą. Galima rasti ir kitokių klasifikavimo schemų, nes keitikliai vis dar tobulinami. Pirmoji grupė labiausiai paplitusi pramonėje, kaip įtampos inverteriai ir srovės inverteriai. Antroji grupė neturi reaktyviųjų kaupimo elementų. Tačiau savybių pagerinimui turi nedidelio nominalo kondensatorius ir induktyvumus, veikiančius kaip filtrai. Paskutinė grupė naudoja mažus reaktyviuosius kaupimo elementus ar papildomus DC - DC keliančiuosius keitiklius (angl. boost converter).

1.1 Keitikliai su reaktyviosios energijos kaupimo elementų

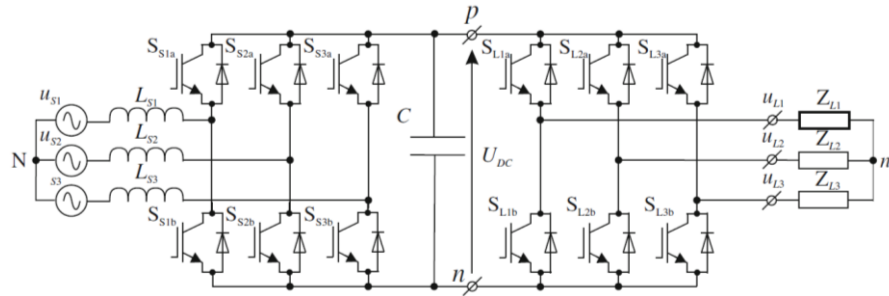
Daugiausia naudojama AC - AC keitiklio struktūra yra PWM moduluotos įtampos šaltinio inverteris (VSI). Viena iš galimų schemų pateikta toliau (žr. 1.1.1 pav.). Joje vaizduojamas dviejų lygių netiesioginis dažnio keitiklis su įtampos šaltinio inverteriu ir diodų tilteliu.



1.1.1 pav. Dviejų lygių netiesioginis dažnio keitiklis su įtampos šaltinio inverteriu ir diodų tilteliu. [3]

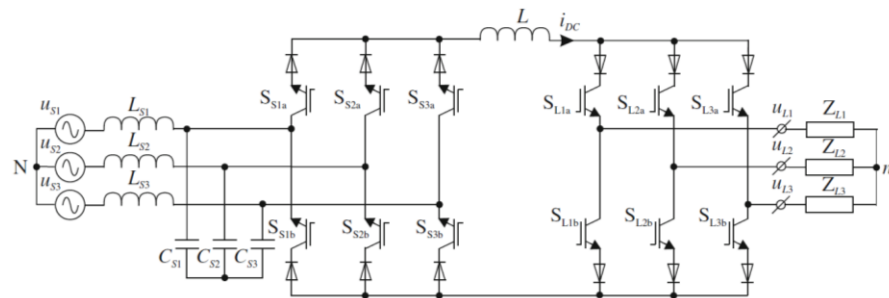
Netiesioginis keitiklis sudarytas iš dviejų pakopų ir energijos kaupimo elemento, įėjime kintama įtampa keičiama į nuolatinę toliau dar kartą keičiama iš nuolatinės į kintamą formuojant norimos amplitudės ir dažnio signalą. Atskyrimo kondensatorius C leidžia abi keitimo pakopas valdyti nepriklausomai. Išėjimo signalas gaunamas keičiant darbinio ciklo trukmę invertavimo

stadijoje esantiems įrenginiams, siekiant gauti sinuso formos srovės induktyvinėje apkrovoje. Įėjimo srovė, šiuo atveju, turi šalutinių harmonikų. Tai pat reikia įdiegti apsaugos priemones, kad varikliui stabdant nuolatinio signalo dalies įtampos nepažeistų grandinės. Vienas iš sprendimo būdų, naudoti IGBT tiltelį lyginimui. Toks keitiklis vadinamas B2B (žr. 1.1.2 pav.). Šiuo atveju valdomas ir įtampos lygintuvas. Taip pat, būtini įėjimo filtro induktyvumai, kurie dažnai sukelia problemų dėl savo didelių gabaritų.[3]



1.1.2 pav. B2B keitiklis (BB-VSI) [3]

Dar vienas galimas sprendimas – keitiklis su PWM srovės šaltinio inverteriu (CSI), pavaizduotas 1.1.3 paveiksle.



1.1.3 pav. Dviejų lygių, netiesioginis dažnio keitiklis su srovės šaltinio inverteriu. [3]

CSI tipo keitiklis generuoja panašaus tipo išėjimo signalą, kaip ir B2B tipo. Nuolatinės įtampos jungčiai naudojamas induktyvumas, kuris fiziškai būna didesnis nei skiriamasis kondensatorius. Taip pat, reikalingas įėjimo filtras. Tai žemo dažnio LC filtras. Be to, reikia nuosekliai IGBT tranzistoriams prijungti diodus, taip padidinant laidumo nuostolius ir grandinės sudėtingumą.

Schemoms pavaizduotoms (žr. 1.1.1 pav. ir 1.1.2 pav.) paveikslėliuose, galimos aštuonios jungiklių kombinacijos. Dvi iš jų sudaro trumpą jungimą išėjime, o likusios šešios aktyvios. Schemai pavaizduotai 1.1.3 paveiksle, galimos šešios aktyvios ir trys nulinės srovės kombinacijos. Visos kombinacijos pateiktos (žr. 1.1.1 lentelė ir 1.1.2 lentelė) lentelėse.

1.1.1 lentelė. Jungiklių padėtys ir apkrovos įtampos VSI atveju. [3]

Nr.	SL1a	SL2a	SL3a	SL1b	SL2b	SL3b	UL1n	UL2n	UL3n
1	1	1	0	0	0	1	$\frac{1}{3}U_{DC}$	$\frac{1}{3}U_{DC}$	$-\frac{2}{3}U_{DC}$
2	1	0	0	0	1	1	$\frac{2}{3}U_{DC}$	$-\frac{1}{3}U_{DC}$	$-\frac{1}{3}U_{DC}$
3	0	1	0	1	0	1	$-\frac{1}{3}U_{DC}$	$\frac{2}{3}U_{DC}$	$-\frac{1}{3}U_{DC}$
4	0	1	1	1	0	0	$-\frac{2}{3}U_{DC}$	$\frac{1}{3}U_{DC}$	$\frac{1}{3}U_{DC}$
5	0	0	1	1	1	0	$-\frac{1}{3}U_{DC}$	$-\frac{1}{3}U_{DC}$	$\frac{2}{3}U_{DC}$
6	1	0	1	0	1	0	$\frac{1}{3}U_{DC}$	$-\frac{2}{3}U_{DC}$	$\frac{1}{3}U_{DC}$
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	1	0	0	0

1.1.2 lentelė. Jungiklių padėtys ir apkrovos įtampos CSI atveju. [3]

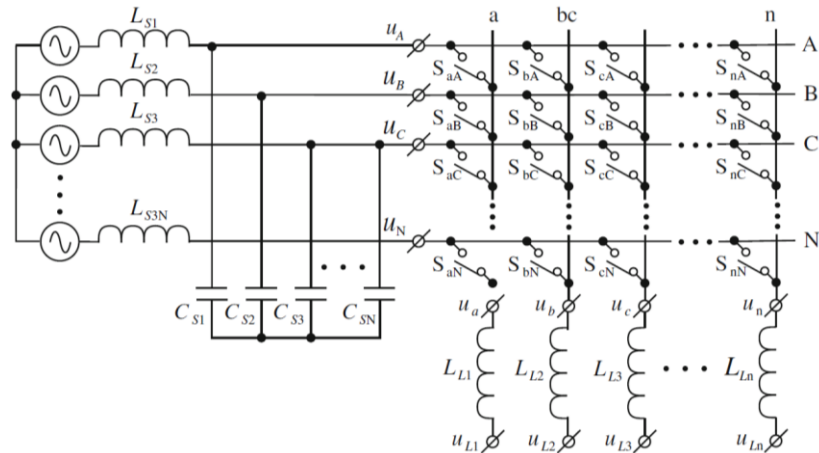
Nr.	SL1a	SL2a	SL3a	SL1b	SL2b	SL3b	UL1n	UL2n	UL3n
1	1	0	0	0	0	1	I_{DC}	0	$-I_{DC}$
2	0	1	0	0	0	1	0	I_{DC}	$-I_{DC}$
3	0	1	0	1	0	0	$-I_{DC}$	I_{DC}	0
4	0	0	1	1	0	0	$-I_{DC}$	0	I_{DC}
5	0	0	1	0	1	0	0	$-I_{DC}$	I_{DC}
6	1	0	0	0	1	0	I_{DC}	$-I_{DC}$	0
7	1	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	1	0	0	0

1.2 Dažnio keitikliai be reaktyviosios energijos kaupimo elementų

Šiame skyriuje bus aprašomas AC - AC keitiklis be reaktyviųjų galios kaupimo elementų. Galima išskirti keletą grupių. Pirmoji yra tiesioginis matricinis keitiklis (MC), galintis dirbti dviem režimais. Kaip įtampos šaltinio keitiklis (VSMC) ir srovės šaltinio keitiklis (CSMC). Jo konstrukcija tokia, kad bet kuri įėjimo fazė gali būti prijungta prie bet kurios išėjimo fazės. Matricinis keitiklis pirmą kartą aprašomas knygoje 1976 m. straipsnyje apie statinius dažnio keitiklius (autoriai Gyugi ir Pelly) [1]. Tačiau didesnis susidomėjimas kilo 1980 metais, kai dvikrypčiams jungikliams pradėti taikyti tranzistoriai. Kitą keitiklių grupę su netiesioginiu keitikliu ir fiktyvia DC grandimi. Trečioji keitiklių grupė paremta matricos reaktanso skeltuiais su sinchroniniais šaltinio ar apkrovos jungikliais. Čia naudojami AC energijos kaupimo elementai, kaip maži talpumai ar induktyvumai. [3]

1.2.1 Tiesioginis AC – AC dažnio keitiklis: Matricinis keitiklis

Keitiklis, sudarytas iš $m \times n$ matricos jungiklių, galinčių m įėjimo fazę tiesiogiai prijungti prie n išėjimo fazės. Supaprastinta keitiklio schema pateikta toliau (žr. 1.2.1.1 pav.)



1.2.1.1 pav. Supaprastinta $m \times n$ matricinio keitiklio schema. [3]

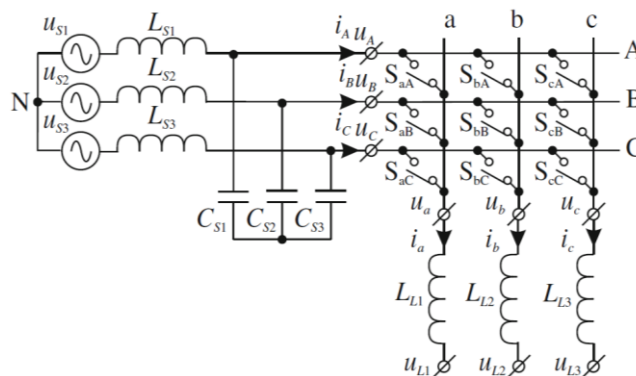
Daugiausiai naudojamas 3x3 tipo keitiklis, kur naudojamos trys fazės, kas yra būdinga variklių valdyme. Svarbu tai, kad keitiklio įėjime yra įtampos šaltinis, todėl įėjimai negali būti sujungiami kartu, kas sukeltų trumpą jungimą. Taip pat, apkrova dažniausiai yra induktyvinio pobūdžio, todėl išėjimo fazė negali būti atvira.

Jungiklio perjungimo funkcija pateikta 1.2.1.1 formulėje [2]

$$S_{Kj} = \begin{cases} 1, & \text{jungiklis } S_{Kj} \text{ uždarytas} \\ 0, & \text{jungiklis } S_{Kj} \text{ atidarytas} \end{cases} \quad K = A, B, C; \quad j = a, b, c; \quad (1.2.1.1)$$

Taip pat, 1.2.1.2 pateikiamas apribojimas jungiklių padėtimis. Su apribojimais 3x3 matricinis keitiklis turi 27 galimas jungiklių kombinacijas.

$$S_{Aj} + S_{Bj} + S_{Cj} = 1 \quad j = a, b, c; \quad (1.2.1.2)$$



1.2.1.2 pav. Supaprastinta 3x3 matricinio keitiklio schema. [3]

Maitinimo ir apkrovos įtampos gali būti aprašytos vektoriais.

$$v_0 = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}; \quad v_i = \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \quad (1.2.1.3)$$

Ryšys tarp įėjimo įtampų ir apkrovos gali būti išreikštas 1.2.1.4 formule.

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \\ v_0 &= T v_i \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1.4)$$

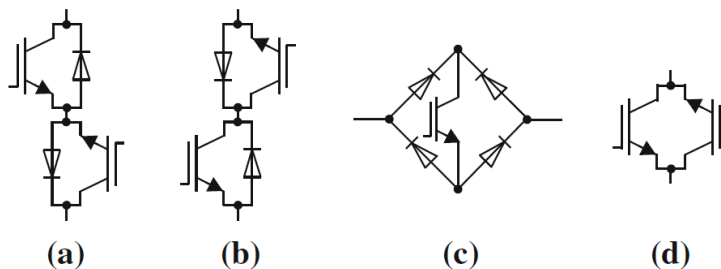
Čia T yra momentinė perdavimo matrica. Taip pat, panašias priklausomybes galima parašyti įėjimo ir išėjimo srovėms. Čia T^T yra T transponuota.

$$i_i = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; \quad i_0 = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (1.2.1.5)$$

$$i_i = T^T i_0 \quad (1.2.1.6)$$

1.2.2 Dvikrypčio jungiklio topologijos

Trijų fazių matriciniame keitiklyje naudojami devyni dvikrypčiai jungikliai, galintys praleisti abiejų krypčių sroves, tiek blokuoti įtampas. Galimos keturios pagrindinės jungiklio topologijos, pateiktos 1.2.2.1 paveiksle [4], [5], [6]. Pati paprasčiausia schema yra diodų tiltelis su viduryje prijungtu IGBT tranzistoriumi (žr. 1.2.2.1 pav. c). Pagrindinis šios schemos privalumas, kad naudojamas tik vienas aktyvinis elementas, taip sumažinama kaina ir paprastėja valdymas. Tačiau gana dideli laidumo nuostoliai, nes vienu metu naudojami trys elementai (du diodai ir tranzistorius). Taip pat, srovės kryptis negali būti valdoma.



1.2.2.1 pav. Dvykrypčių jungiklių topologijos. a) Bendro emiterio nuosekli, b) bendro kolektoriaus nuosekli, c) diodų tiltelio su IGBT tranzistoriumi, d) atbulinio srauto blokavimo su IGBT. [3]

Kitos dvi dažniausiai naudojamos jungiklių schemas, tai bendro emiterio nuosekli (žr. 1.2.2.1 pav. a) ir bendro kolektoriaus nuosekli (žr. 1.2.2.1 pav. b). Abi schemas sudarytos iš dviejų IGBT tranzistorių ir dviejų diodų. Diodai blokuoja atgalinę įtampą, o IGBT reguliuoja srovės kryptį. Lyginant su diodų tilteliu laidumo nuostoliai mažesni, nes vienu metu laidūs du elementai ir galima valdyti srovės kryptį. Tačiau reikalingi du IGBT valdikliai. Taip pat, dėl bendro emiterio jungimo kiekvienai jungiklio celei reikalingas atskirtas maitinimo šaltinis. Paskutinė schema - atbulinio blokavimo su IGBT [15] (žr. 1.2.2.1 pav. d). Pagrindinis jos bruožas, atbulinės įtampos

blokavimas, kuris leidžia atsisakyti diodų, taip sumažinant laidumo nuostolius. Visų jungiklių konfigūracijų sudėtingumas palygintas 1.2.2.1. lentelėje.

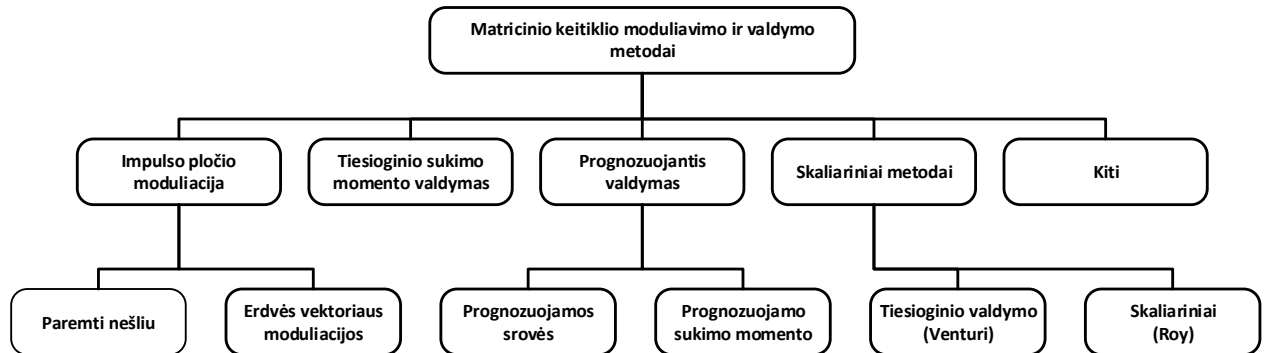
1.2.2.1. lentelė. MC elemento sudėtingumas su skirtingomis jungiklių konfigūracijomis. [3]

Jungiklio konfigūracija	Tranzistorių kiekis	Diodų kiekis	Izoliuotų maitinimo šaltinių kiekis	Užtūros valdymo grandinių kiekis
Bendro emiterio nuosekli	18	18	9	18
Bendro kolektoriaus nuosekli	18	18	6	18
Diodų tiltelio su IGBT	9	36	9	9
Atbulinio srauto blokavimo su IGBT	18	0	6	18

Gaminant matricinius keitiklius dažnai naudojami atskiri dvikrypčių jungiklių moduliai, nes jie pritaikyti didesnei galiai. Vienas iš pavyzdžių Dynex dvikrypčio jungiklio modulis 1,200 V/1,200A. Galima rasti ir jau paruoštų visos jungiklių matricos modulių.

2. MODULIAVIMO STRATEGIJOS

Matricinio dažnio keitiklio valdymas sudėtingas, per visus jo egzistavimo metus pateiktas ne vienas metodas jam valdyti [7], [8], [9], [10]. Skirtingi valdymo metodai turi skirtingus perdavimo koeficientus ir skirtingus perjungimo algoritmus. Moduliavimo strategijas galima suskirstyti į kelias grupes [7].



2.1 pav. Moduliavimo ir valdymo metodai matriciniams keitikliams. [7]

Toliau aprašomos visos strategijos, jų pagrindiniai bruožai, privalumai bei trūkumai.

2.1 Skaliariniai metodai

2.1.1 Tiesioginio valdymo. (Venturi)

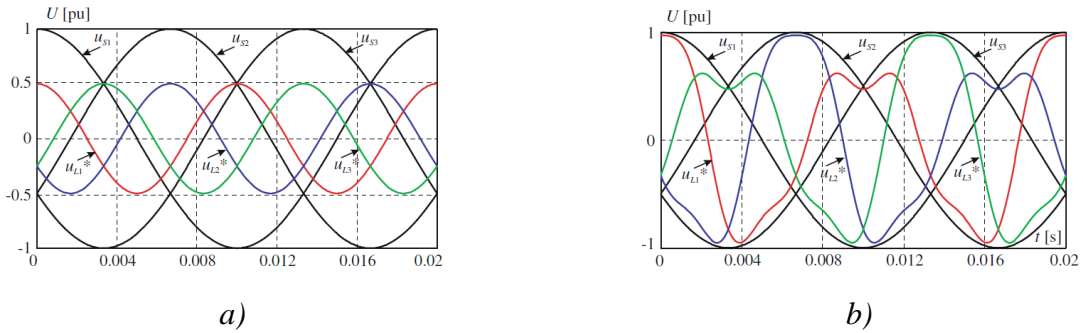
Šis metodas yra vienas seniausių. Jis remiasi jungiklių įjungimo laiko ieškojimu pagal norimą išėjimo signalą. (1.2.1.4) ir (1.2.1.6) formulės aprašo keitiklio įėjimo ir išėjimo srovių ir įtampų ryšį. Žinant šį ryšį belieka surasti matricią T. Matricos elementai gali būti skaičiuojami pagal (2.1.1.1) formulę. [7]

$$m_{ij}(t) = \frac{1}{3} \left(1 + 2v_{iN}(t) \bar{v}_{jN} / V_i^2 \right) \quad (2.1.1.1)$$

Kur $i = A, B, C$ ir $j = a, b, c$. Tačiau svarbu žinoti, kad šiuo atveju matricos perdavimo koeficientas negali viršyti $q = 0,5$. Norint padidinti perdavimo koeficientą buvo pasiūlyta pridėti prie signalo jo trečiąją harmoniką. Tokių atveju perdavimo matricos elementai skaičiuojami pagal:

$$m_{ij}(t) = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{2v_{iN}(t) \bar{v}_{jN}}{V_i^2} + \frac{4q}{3\sqrt{3}} \zeta \right) \quad (2.1.1.2)$$

Kur $\zeta = \sin(\omega_i t + \beta_i) \sin(3\omega_i t)$, $i = A, B, C$ ir $j = a, b, c$. $\beta = 0, \left(\frac{2\pi}{3}\right), \left(\frac{4\pi}{3}\right)$. Tokiu atveju gaunamas perdavimo koeficientas $q = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$. Tipinės išėjimo įtampų ir srovių diagramos pateiktos 2.1.1.1 paveiksle.



2.1.1.1 pav. Tipinės išėjimo įtampų ir srovių diagramos, kai apkrovos dažnis 100 Hz; a) $q = 0.5$, b) $q = 0.866$. [3]
Perdavimo koeficientą gali sumažinti fazių poslinkiai įėjimo signalė.

2.1.2 Rojaus metodas

Šis metodas buvo pasiūlytas 1987 [11]. Rojaus metodas labai panašus į ankščiau aprašytą (Venturi), tačiau čia perdavimo koeficientas visada vienodas. Įtampa gali būti išreikšta:

$$m_{ij}(t) = \frac{1}{T_s} (t_K v_K + t_L v_L + t_M v_M) \quad (2.1.2.1)$$

$$T_s = t_K + t_L + t_M \quad (2.1.2.2)$$

Kur indeksas M priskiriamas įėjimo įtampai su skirtingu poliarumu, indeksas L įėjimo įtampai su mažiausia amplitude, o K trečiajai įtampai. Šiuo atveju perjungimo modelis priklauso nuo įėjimo įtampų lyginimo ir momentinės norimos išėjimo įtampos. Įjungimo ciklai aprašomi lygtimis:

$$\left. \begin{aligned} m_{Lj} &= \frac{(v_{jN} - v_M)v_L}{1.5V_i^2} \\ m_{Kj} &= \frac{(v_{jN} - v_M)v_K}{1.5V_i^2} \\ m_{Mj} &= 1 - (m_{Lj} + m_{Kj}) \end{aligned} \right\} \quad (2.1.1.3)$$

Lyginant Venturio ir Rojaus metodus galima pasakyti, kad skirtumas tarp išėjimo įtampų nereikšmingas. Venturio metodas naudojamas tik prie žemų perjungimo dažnių.

2.2 Impulso pločio moduliacijos (PWM) metodai

2.2.1 Metodai paremti nešlio moduliacija.

Metodas remiasi sinuso PWM moduliavimu. Čia aukšto dažnio trikampio formos signalas lyginamas su atraminiu sinuso formos signalu. Perjungimo algoritmai gaunami panaudojant loginę lentelę, kuri turi priskirtas jungiklių reikšmes norimai išėjimo įtampai pagal įėjimo signalą. Įėjimo įtampų lygiai įvertinami trimis kintamaisiais: x_A , x_B , x_C . Kurie formuojami pagal 2.2.1.1 lentelę.

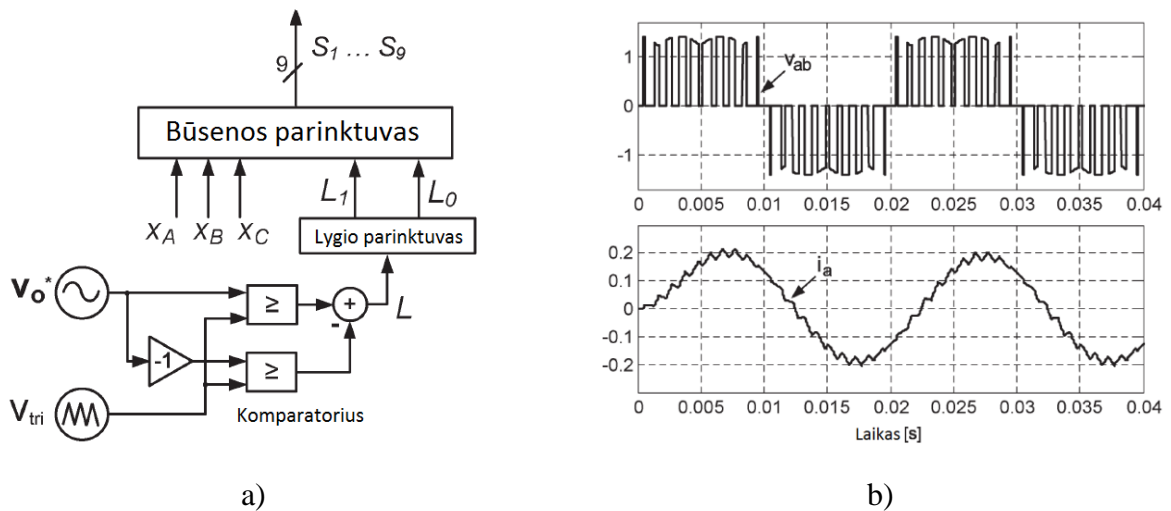
2.2.1.1 lentelė. PWM metodo įėjimo įtampų lygiai. [7]

Sąlyga	Reikšmė
$V_A > V_B$	$x_A = 1$
$V_B > V_C$	$x_B = 1$
$V_C > V_A$	$x_C = 1$

Jeigu sąlygos 2.2.1.1 lentelėje netenkinamos, tada loginis kintamasis lygus 0. Jungiklių būsenos parenkamos pagal lygtį:

$$N = 16x_A + 8x_B + 4x_C + 2L_1 + L_0 \quad (2.2.1.1)$$

Kur L_0 ir L_1 yra išėjimo įtampos lygiai (L_0 , jei išėjimo įtampa ≥ 0 , L_1 , jei išėjimo įtampa < 0). PWM metodai gali būti naudojami ir su kintamos įėjimo galios faktoriumi.



2.2.1.1 pav. A) PWM metodo jungiklių valdymo mechanizmas; b) tipinės išėjimo signalų reikšmės. [7]

2.2.2 Tiesioginė erdvės vektorių moduliacija (SVM)

Šis metodas [12] pagrįstas įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų erdvės vektorių formavimu. Norimas sinuso formos išėjimo signalas formuojamas parenkant reikiamų, dvikrypčių jungiklių, įjungimo laikus. Įtampų vektoriai trijų fazių sistemai gali būti išreiškiami pagal transformacijas:

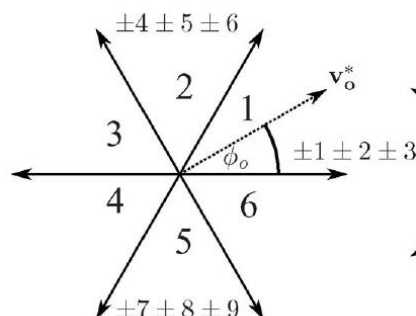
$$V_i = \frac{2}{3}(v_{AB} + \alpha v_{BC} + \alpha^2 v_{CA}) = |v_i|e^{j\alpha_i} \quad (2.2.2.1)$$

$$V_o = \frac{2}{3}(v_{ab} + \alpha v_{bc} + \alpha^2 v_{ca}) = |v_i|e^{j\alpha_o} \quad (2.2.2.2)$$

Kur α_i , α_o yra norimi įėjimo ir išėjimo įtampų fazės kampai, o α kompleksinis faktorius.

$$\alpha = e^{j2\pi/3} \quad (2.2.2.3)$$

Toliau išėjimo įtampos erdvės vektoriai apskaičiuojami visoms 27 jungiklių kombinacijoms. Taip gaunami šeši fiksuotos amplitudės vektoriai su skirtingais fazės kampais. Tačiau naudojami 18 vektorių su fiksuotais kampais ir kintamomis amplitudėmis (žr. 2.2.2.1 pav.). Taip pat, trijų vektorių dydis lygus nuliui.

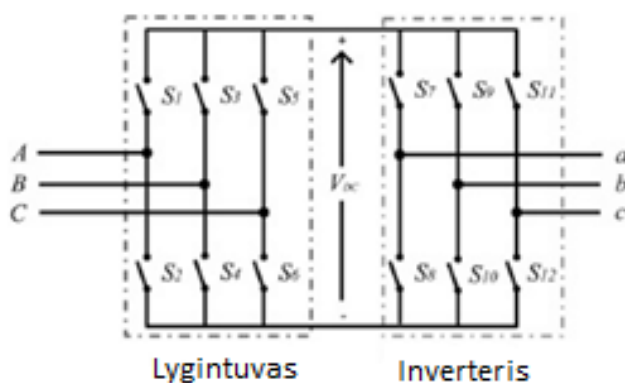


2.2.2.1. pav. Išėjimo erdvės vektoriai. [7]

Tačiau tokį valdymo būdą sudėtinga realizuoti todėl naudojama netiesioginė moduliavimo strategija.

2.2.3 Netiesioginė erdvės vektorių moduliacija

Valdymo požiūriu, netiesioginis matricinis keitiklis gali būti vaizduojamas kaip dvigubas PWM keitiklis (lygintuvas ir inverteris) be reaktyviosios galios kaupimo elementų (žr. 2.2.3.1. pav.). Lyginimo stadija prijungta kaip standartinis trijų fazių lygintuvas, iš šešių jungiklių. Invertavimo stadija sudaryta iš trijų fazių inverterio (VSI). Abi stadijos sujungtos virtualia nuolatine jungtimi, kas leidžia perduoti srovę abiem kryptimis.



2.2.3.1. pav. Netiesioginė trijų fazių MC keitiklio apibendrinta schema. [7]

Pagrindinis netiesioginio moduliavimo uždavinys atskirti įėjimo srovės ir išėjimo įtampos valdymą. Tai atliekama moduliavimo matricią S dalinant į dvi dalis: lygintuvo perdavimo matricią R ir inverterio perdavimo matricią I . Tada moduliavimo matricią gali užrašyti:

$$S = IR \quad (2.2.3.1)$$

Kur,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix} \quad \text{ir} \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2.3.2)$$

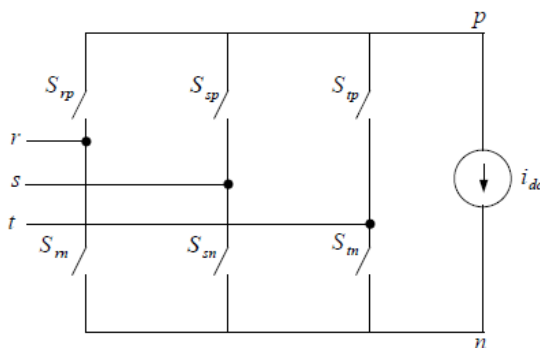
Tada įtampos perdavimo matricą galima užrašyti:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 S_1 + S_8 S_2 & S_7 S_3 + S_8 S_4 & S_7 S_5 + S_8 S_6 \\ S_9 S_1 + S_{10} S_2 & S_9 S_3 + S_{10} S_4 & S_9 S_5 + S_{10} S_6 \\ S_{11} S_1 + S_{12} S_2 & S_{11} S_3 + S_{12} S_4 & S_{11} S_5 + S_{12} S_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.2.3.3)$$

Perdavimo matrica (žr. 2.2.3.3 formulę) rodo, kad įėjimo fazės sujungtos su išėjimo per lygintuvo ir inverterio jungiklius.

2.2.3.1 Erdvės vektorių moduliacijos lyginimo stadija

Šiame skyrelyje aprašoma SVM metodo lyginimo stadija. Netiesioginiame SVM metode reikia atsižvelgti į virtualią nuolatinę grandį, kurios įtampa formuojama skaidant įėjimo įtampą.



2.2.3.1.1 pav. Tiesioginio matricinio dažnio keitiklio, valdomo netiesiogine erdvės vektorių moduliacija, lyginimo stadijos schema. [23]

O įėjimo srovės gali būti išreikštos kaip virtualios nuolatinės grandies srovė I_{DC} padauginta iš lygintuvo perdavimo matricos.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2.3.1.1)$$

Įėjimo srovės erdvės vektorius I_{IN} išreiškiamas erdviniu vektoriumi naudojant transformaciją:

$$I_{IN} = \frac{2}{3} (I_A + a I_B + a^2 I_C) = |I_{IN}| e^{j\alpha_i} \quad (2.2.3.1.2)$$

Lygintuvo jungikliams galimos 9 jungimo konfigūracijos iš kurių šešios nelygios nuliui. Vienu metu gali būti atviras tik vienas jungiklis viršutinėje lyginimo pakopos dalyje ir vienas apatinėje dalyje. Taip yra todėl, nes būtina sudaryti kelią tekėti srovei, tačiau negalima palikti įjungtų kelių jungiklių vienoje eilėje, nes galimas trumpas jungimas įėjimo įtampoms. Lygintuvo srovių vektorių diagrama pavaizduota 2.2.3.1.2 paveikslėlyje. Atraminė srovė formuojama veikiant kaimyniniams vektoriams I_γ , I_δ diagramoje atitinkamais įjungimo intervalais d_γ , d_δ . Jeigu įėjimo

srovės gali būti laikomos nekintančiomis per trumpą perjunginėjimo intervalą T_s , tokiu atveju atraminis vektorius gali būti išreikštas:

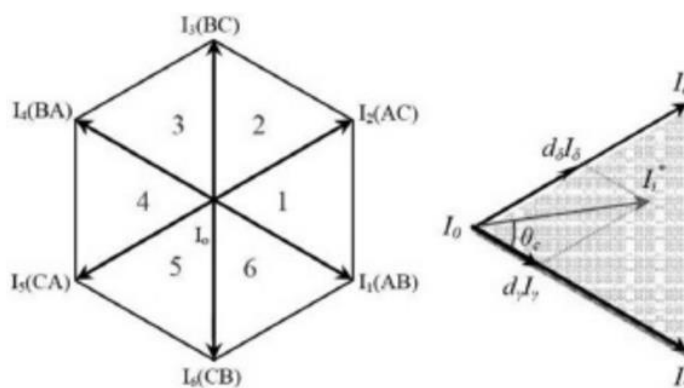
$$I_{IN}^* = d_\gamma I_\gamma + d_\delta I_\delta + d_{OC} I_0 \quad (2.2.3.1.3)$$

Ijungimo intervalai apskaičiuojami pagal:

$$\begin{aligned} d_\gamma &= m_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) \\ d_\delta &= m_c \sin(\theta_c) \\ d_{OC} &= 1 - (d_\gamma - d_\delta) \end{aligned} \quad (2.2.3.1.4)$$

Kur θ_c yra atraminės srovės kampas vektorinėje diagramoje. O m_c yra srovės moduliavimo indeksas, nurodantis srovės perdavimo koeficientą.

$$0 \leq m_c \leq 1, \quad m_c = I_{IN}^* / I_{DC} \quad (2.2.3.1.5)$$



2.2.3.1.2. pav. Lygintuvo pakopos srovių vektorinė diagrama. [7]

Moduliavimo indeksas yra nustatomas maksimaliai vertei tam, kad įėjimo srovė priklausytų tik nuo įtampos perdavimo koeficiento. Kur V_o ir V_i žymi išėjimo ir įėjimo įtampos vertes

Įtampos perdavimo koeficientas yra aprašomas formule:

$$q = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.2.3.1.6)$$

Kur V_o ir V_i yra išėjimo ir įėjimo įtampos vertės. Maksimali perdavimo koeficiento vertė gali būti $\frac{\sqrt{3}}{2}$. Tačiau maksimalus moduliavimo indeksas yra įtakojamas ir fazės kampo tarp įtampos ir srovės.

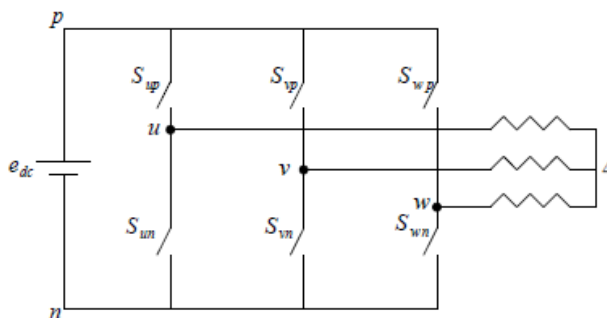
$$q_{max,\varphi} = q_{max} \cos \varphi_i \quad (2.2.3.1.7)$$

Galima įvesti naują moduliavimo indeksą M , norint įvertinti kaip kinta moduliavimo koeficientas q įvertinus fazės kampą φ . Naujas moduliavimo indeksas kinta nuo 0 iki $\frac{\sqrt{3}}{2}$. Tokiu atveju įėjimo srovė ir išėjimo įtampa gali būti aprašomos formulėmis:

$$\begin{aligned} V_o &= M \cos \varphi_i \cdot V_i \\ I_i &= M \cos \varphi_i \cdot I_o \end{aligned} \quad (2.2.3.1.8)$$

2.2.3.2 Erdvės vektoriaus moduliacijos invertavimo stadija

Šiame skyriuje aprašoma tiesioginio matricinio keitiklio, valdomo netiesiogine erdvės vektoriaus moduliacija, invertavimo stadija. Keitiklis sudarytas iš trijų mazgų, prijungtų prie apkrovos išėjime. Išėjimo įtampos gali būti vaizduojamos kaip virtualios nuolatinės grandies įtampa padauginta iš invertavimo pakopos perdavimo matricos.



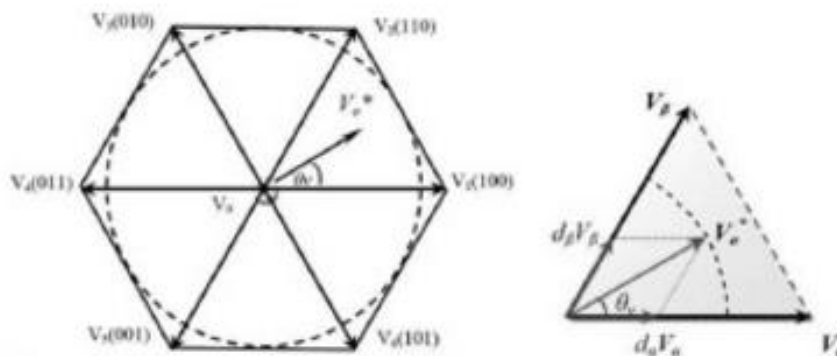
2.2.3.2.1 pav. Tiesioginio matricinio dažnio keitiklio, valdomo netiesiogine erdvės vektoriaus moduliacija, invertavimo stadijos schema. [23]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} +\frac{1}{2}V_{DC} \\ -\frac{1}{2}V_{DC} \end{bmatrix} \quad (2.2.3.2.1)$$

Išėjimo įtampos erdvės vektorius išreiškiamas:

$$V_{out} = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) = |V_{out}|e^{j\alpha_i} \quad (2.2.3.2.2)$$

Galimos aštuonios invertavimo stadijos jungiklių kombinacijos, norint išvengti trumpo jungimo. Iš jų dvi yra lygios nuliui. Įtampos vektoriai pavaizduoti vektorinėje diagramoje (žr. 2.2.3.2.2 pav.).



2.2.3.2.2. pav. Invertavimo dalies įtampų vektorinė diagrama. [7]

Atraminė įtampa formuojama veikiant kaimyniniams vektoriams V_α , V_β diagramoje atitinkamais įjungimo intervalais d_α , d_β . Jeigu išėjimo įtampos gali būti laikomos nekintančiomis per nedidelį perjunginėjimo intervalą T_s , tada atraminis vektorius gali būti išreikštas:

$$V_O^* = d_\alpha V_\alpha + d_\beta V_\beta + d_{OV} V_0 \quad (2.2.3.2.3)$$

Įjungimo intervalai apskaičiuojami pagal:

$$\begin{aligned} d_\alpha &= m_v \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_v\right) \\ d_\beta &= m_v \sin(\theta_v) \\ d_{OV} &= 1 - (d_\alpha - d_\beta) \end{aligned} \quad (2.2.3.2.4)$$

Kur θ_v yra atraminės įtampos kampas vektorinėje diagramoje. O m_v yra įtampos moduliavimo indeksas.

$$m_v = \sqrt{3} V_{o,max} / V_{DC} \quad (2.2.3.2.5)$$

Kur $V_{o,max}$ yra norima išėjimo įtampos linijos vertė. Pagal išraišką nustatyta (žr. 2.2.3.2.5 formulę) m_v gali būti įvairaus dydžio, kitaip nei m_c .

Norint užtikrinti tinkamą keitiklio veikimą reikia sujungti abi moduliacijas ir taip gauti perjungimo signalus dvikrypčiams jungikliams.

3. REAKTYVIOJI GALIA IR JOS KOMPENSAVIMO BŪDAI

Augant galios poreikiams dauguma perdavimo linijų nėra tinkamai valdomos, norint padidinti galios perdavimą. Tam naudojami specialūs AC perdavimo sistemos įrengimai (angl. FACTS - Flexible AC transmission system devices). Naudojant FACTS galima sumažinti elektrinių sunaudojamus išteklius norint perduoti reikiamą energijos kiekį.

Galios perdavimas elektros linija be nuostolių gali būti aprašytas (3.1) formule. [20]

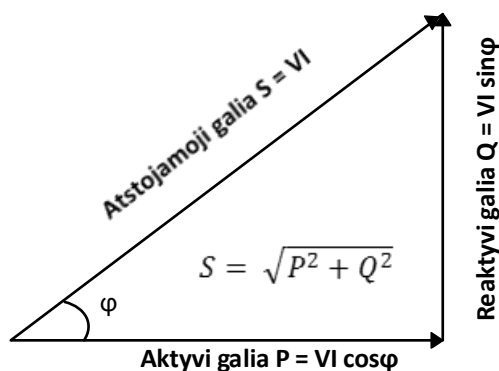
$$P_{ij} = \frac{v_i v_j}{x_{ij}} \sin \delta_{ij} \quad (3.1)$$

Kur V_i ir V_j yra i-toji ir j-toji perdavimo linijos įtampos amplitudės, δ yra įtampos fazės kampas, o X_{ij} yra perdavimo linijos reaktansas. Todėl galima teigti, kad valdant perdavimo įtampą, fazės kampą ar linijos reaktansą galima keisti perduodamos energijos kiekį. Tiek aktyvios, tiek reaktyvios. Išskiriamos kelios FACTS įrenginių grupės:

- Nuoseklus, statinis, sinchroninis kompensatorius (SSSC).
- Statinis VAR kompensatorius (SVC).
- Nenutrūkstamo galios perdavimo valdiklis (UPFC).
- Statinis sinchroninis kompensatorius (STATCOM).

Visi minimi įrenginiai naudojami valdyti galios srautui, taip padidinant galios perdavimą. Kartu mažinant energijos kainą, bei gerinant sistemos stabilumą.

Galią galima suprasti kaip energiją perduodamą linija ir jos atšakomis. Momentinė galia lygi perduodamos įtampos ir srovės sandaugai. Tačiau, kai įtampos ir srovės fazės nesutampa galią galima išskirti į dvi komponentes: aktyviają galią (matuojama vatais, W) ir reaktyviają galią (matuojama Varais, Var)

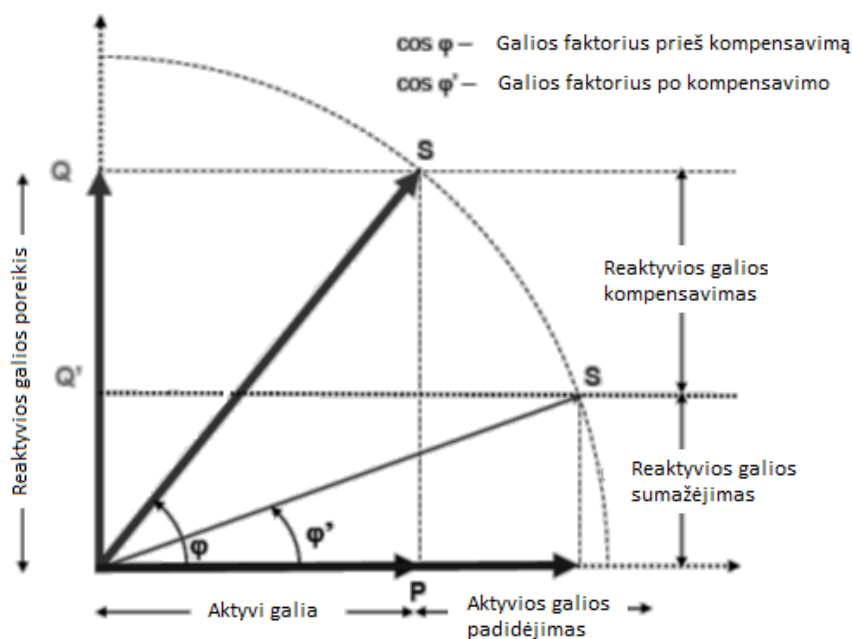


3.1 pav. Galios vektorių diagrama.

Atstojamoji galia (žr. 3.1 pav.) sudaryta iš dviejų dedamųjų. Ir kinta priklausomai nuo jų amplitudės ir kampo φ .

Kintamos įtampos grandinėse energija kaupiama talpumuose ir induktyvumuose, todėl vis matoma energijos tekėjimo krypties kaita tarp šaltinio ir apkrovos. Kai įtampos ir srovės fazės sutampa, perduodama tik aktyvinė energija, kuri ir vartojama apkrovoje. Tačiau, kai atsiranda fazių skirtumas, dalis galios virsta reaktyviaja, kuri nėra suvartojama. Reaktyvi galia tik padidina bendrus galios nuostolius ir sumažina aktyvios galios kiekį tenkantį apkrovai.

Išreikšti galios nuostoliams yra naudojamas galios faktorius, aprašomas, kaip santykis tarp aktyvios ir atstojamosios galios. Idealiu atveju jis lygus ± 1 .

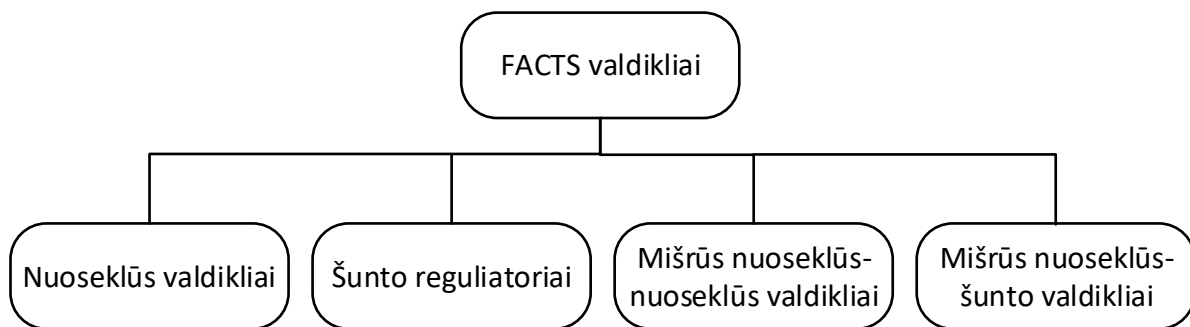


3.2 pav. Reaktyvios galios kompensavimo įtakos vektorinė diagrama. [23]

Kintamos įtampos šaltinio sugeneruota reaktyvi galia kaupiama kondensatoriuje ketvirtadalį ciklo, o kitą ketvirtadalį ciklo perduodama atgal į šaltinį. Todėl reaktyviosios galios dažnis yra dvigubai didesnis nei šaltinio (50 Hz). Šis papildomas dažnis įneša trikdžius, kuriuos taip pat galima sumažinti kartu su reaktyviaja galia.

Kaip jau minėta anksčiau, reaktyviosios galios kompensavimui naudojami FACTS įrenginiai. Jie gali būti sudaryti iš transformatorių, kondensatorių, jungiklių ar induktyvumų. Taip pat naudojant tranzistorius ar tiristorius, kaip jungiklius. Elektroniniai jungikliai pranašesni už mechaninius savo greitimeika. Kas labai svarbu, norint padidinti energijos srautą, sistemos stabilumą bei valdymo galimybes.

FACTS valdiklius galima suskirstyti į keturias pagrindines grupes (žr. 3.3 pav.). Kur kiekviena iš jų bus trumpai aprašoma toliau.

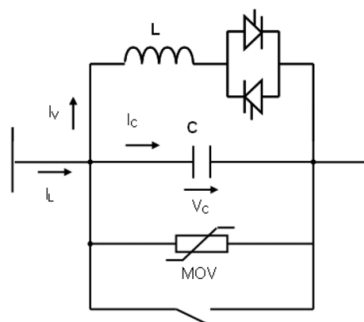


3.3 pav. FACTS valdiklių klasifikacija. [20]

Nuoseklus valdiklius sudaro kondensatoriai, induktyvumai ar reguliuojami šaltiniai. Kurie į tinklą įjungti nuosekliai. Kai fazės kampas tarp įtampos ir srovės lygus 90° nuoseklus valdiklis arba tik paduoda, arba tik vartoja reaktyvį galią. Nuoseklus valdiklius galima suskirstyti į mažesnes grupes:

- Nuoseklus, statinis, sinchroninis kompensatorius (SSSC).
- Tarp linijinis galios srauto valdiklis (IPFC).
- Tiristoriumi valdomas nuoseklus kondensatorius (TCSC).
- Tiristoriumi perjungiamas nuoseklus kondensatorius (TSSC).
- Tiristoriumi valdomas nuoseklus induktyvumas (TCSR).
- Tiristoriumi perjungiamas nuoseklus induktyvumas (TSSR).

Iš aukščiau išvardintų grupių dažniausiai praktikoje naudojama TCSC [21]. TCSC struktūra pateikta (žr. 3.4 pav.). Juo galima slopinti signalus didelėse sistemose. TCSC veikia kaip greitas aktyvios galios reguliatorius, nes juo galima keisti elektrinį linijos ilgį.



3.4 pav. TCSC valdiklio struktūra. [20]

Šunto reguliatoriai, kaip ir nuoseklūs valdikliai, gali būti talpumai, induktyvumai, reguliuojamas šaltinis ar visų elementų kombinacija. Tačiau vietoj įtampos į sistema paduodama srovė. Galima išskirti keletą populiariausių šunto reguliatorių tipų: statinis sinchroninis kompensatorius (STATCOM), tiristoriumi valdomas induktyvumas (TCR), statinis VAR kompensatorius (SVC).

TRC sudarytas iš nuoseklaus induktyvumo ir dviejų lygiagrečių tiristorių, kurių kiekvienas veikia skirtingą ciklo pusperiodį. Taip sukuriamas valdomas reaktansas. TRC gali būti naudojamas kaip įtampos ribotuvas mažai apkrautose grandinėse.

Statinis VAR kompensatorius naudojamas aukštos įtampos grandinėse. Pagrindiniai šio kompensatoriaus privalumai yra sumažinami nuostoliai, padidinamas stabilumas, be to galima riboti įtampą, kad ji neišeitų iš reikiamo ruožo. VAR kompensatorius gali būti sudarytas iš lygiagrečiai sujungto TRC ir nekintančio dydžio talpumo arba iš lygiagrečiai sujungto TRC ir TSC. Dar viena statinio VAR kompensatoriaus savybė, kad jis gali ne tik generuoti reaktyviąją galią, bet ir ją sugerti.

Statinis kompensatorius (STATCOM) sudarytas iš įtampos valdiklio ir transformatoriaus kaip šunto. Jis keičia DC galią į AC galią su kintančiu fazės kampu ir amplitude, taip kartu reguliuodamas reaktyviosios galios kiekį. Kadangi valdyti matriciniam keitikliui naudojamas netiesioginis erdvės vektorių metodas, kur keitiklis skiriamas į dvi dalis, lyginimo ir invertavimo, lyginimo stadijoje taip pat galima valdyti fazės kampą, taip keičiant reaktyviosios galios kiekį ir ją kompensuojant.

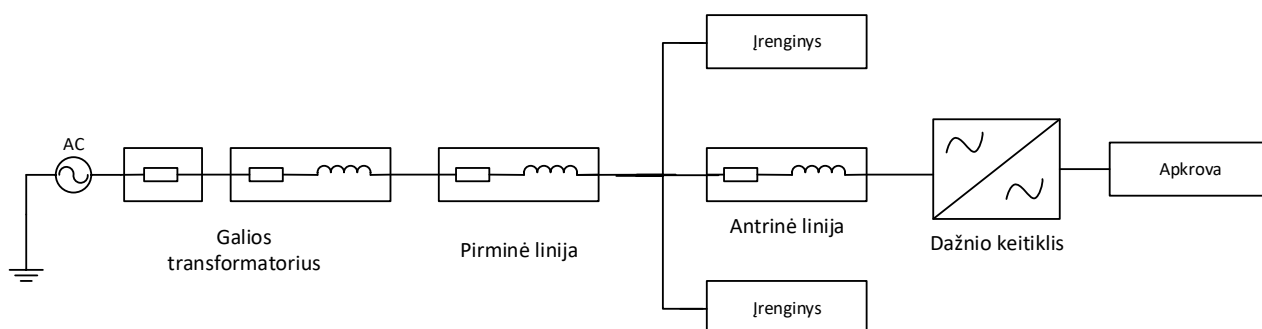
4. MATLAB SIMULINK MODELIS

Šiame skyrelyje bus aprašomas Matlab Simulink aplinkoje sudarytas matricinio keitiklio modelis, valdomas erdvės vektoriaus moduliacija. Modelį sudaro:

- Maitinimo šaltinis (trijų fazių).
- Galios transformatoriaus modelis
- Linijos modelis.
- Papildomi komponentai prijungti bendroje linijoje.
- Matricinio 3x3 keitiklio modelis.
- Valdymo blokai.
- Aktyvinės apkrovos modelis.

Toliau bus aprašoma kiekviena modelio dalis ir valdymo metodas.

Maitinimo šaltinis, skirtas 0,4 kV tinklui, sudarytas iš trijų kintamos įtampos šaltinių, kurių signalas vienas nuo kito perstumtas per 120 laipsnių. Šie trys šaltiniai yra galios transformatoriaus įėjimai. Galios transformatoriaus išėjime prijungta 300 metrų, 50 mm² storio elektros perdavimo linija. Toliau linija atsišakoja į keletą 100 metrų ilgio, 16 mm² storio linijų, nes šio linijos skersmens pakanka perduodamai srovei. Prie vienos iš linijų prijungtas matricinis dažnio keitiklis kartu su lygiagrečiu talpiniu filtru įėjime. Keitiklio išėjime prijungta aktyvinė apkrova, norint stebėti srovę. Keitiklio valdymo grandinė pateikta atskirais blokais, tam, kad būtų gali aiškiai parodyti valdymui reikalingas operacijas.



4.1 pav. Blokinė modeliuojamos sistemos schema.

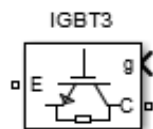
4.1 Galios grandinė

Galios grandinė bus laikomas matricinis keitiklis su aukštos įtampos įėjimais ir išėjimais, galios transformatorius su galios perdavimo linija, įėjimo filtras, taip pat keitiklio viduje esantys puslaidininkiniai jungikliai skirti komutuoti įtampai.

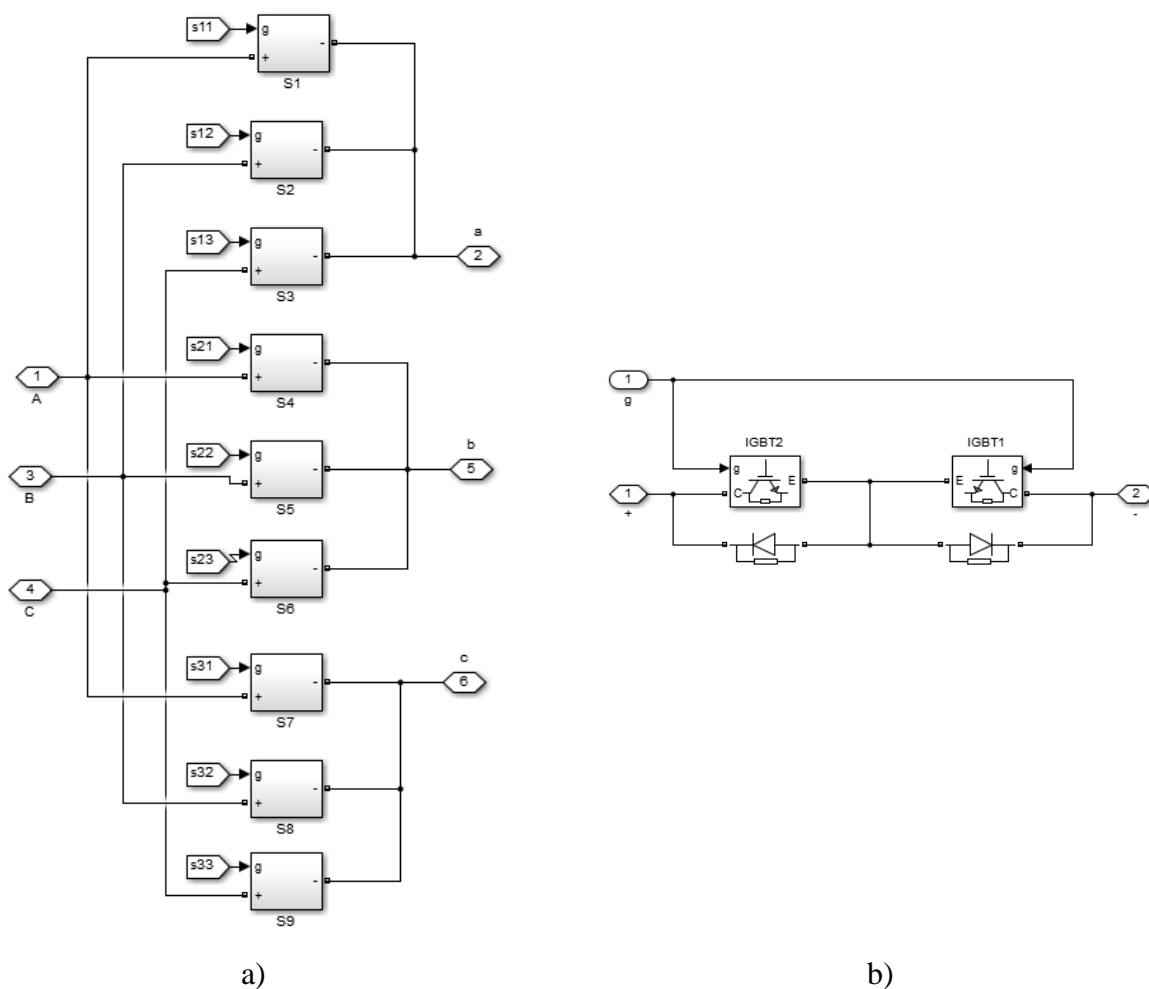
Matricinis keitiklis sudarytas iš devynių dvikrypčių jungiklių sujungtų matricos konfigūracija. Į kiekvieną jungiklį ateina valdymo signalas iš valdymo grandinės, nurodantis

kokioje padėtyje jungiklis turi būti kiekvienu laiko momentu. Taip pat į jungiklį ateina atitinkama įėjimo įtampos fazė. Jungiklių išėjimai sujungti reikiama tvarka, kad keitiklio išėjime būtų formuojamos norimos įtampos amplitudės ir dažniai. Dvikryptis jungiklis sudarytas iš dviejų IGBT tranzistorių modelių sujungtų bendro emiterio konfigūracija kartu su blokuojančiais diodais.

Panaudotas jau sukurtas IGBT tranzistoriaus modelis (žr. 4.1.1 pav.). Tačiau galima įvesti pagrindinius parametrus, norint imituoti kitą IGBT tranzistorių.



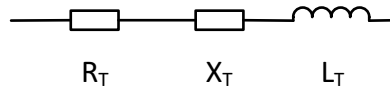
4.1.1 pav. IGBT tranzistoriaus modelio žymėjimas.



4.1.2 pav. Matricinio keitiklio struktūra. A) Vidinė keitiklio struktūra. B) Vidinė jungiklio struktūra.

Keičiami IGBT modelio parametrai su esamomis vertėmis:

- Nuostolių varža (Ω) 0.001
- Induktyvumas (H) 0
- Krintanti įtampa (V) 1
- 10% srovės kritimo laikas (s) $1 \cdot 10^{-6}$
- Srovės liekanos laikas (s) $2 \cdot 10^{-6}$
- Pradinė srovė (A) 0
- Slopinimo varža (Ω) $1 \cdot 10^5$



4.1.3 pav. Galios transformatoriaus atstojamųjų parametų schema.

Galios transformatoriaus modelis gali būti sudarytas iš trijų komponentų, kurių parametrai priklauso nuo transformatoriaus galios. Pasirinkta transformatoriaus galia 100 kVA. Tada transformatorius gali būti aprašytas trimis parametrais: R_T , X_T , L_T .

4.1.1 lentelė. Galios transformatorių modelių parametrai. [25]

Transformatoriaus galia, kV·A	R_T , Ω	X_T , Ω	L_T , mH
100	0,036	0,065	0,207
250	0,017	0,025	0,079
400	0,005	0,017	0,054
630	0,003	0,013	0,041
1000	0,0019	0,0085	0,027

Galios perdavimo linijoms parašyti taip pat naudojami panašūs parametrai kaip ir galios transformacijos atveju. Galima sumuoti tik bendrą kontaktų varžą sistemai.

Modelyje naudojamos dvi skirtingos rūšies perdavimo linijos: pirmoji 50 mm^2 , skirta galios perdavimui nuo transformatoriaus iki išsišakojimo taško, antroji 16 mm^2 , skirta galios perdavimui į skirtingus įrenginius tinkle.

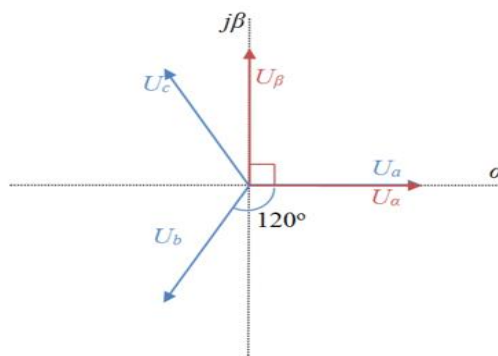
4.1.2 lentelė. Elektros perdavimo linijų modelių parametrai. [25]

Kabelio skersmuo, mm^2	Apkrova, kV·A	Srovė, A	R_L , Ω/km	X_L , Ω/km	L_L , mH/km
2,5	12	18	12,5	0,104	0,33
16	53	78	2,3	0,09	0,29
25	68	100	1,5	0,087	0,28
50	102	150	0,77	0,087	0,28
95	150	220	0,39	0,084	0,27
150	198	290	0,2	0,081	0,26

4.2 Valdymo grandinė

Šiame poskyryje bus aprašoma naudojamo Erdvės vektoriaus moduliacijos valdymo modulio struktūra ir savybės. Į moduliavimo grandinę paduodami du signalai. Tai signalas įėjimo srovės moduliacijai ir signalas išėjimo įtampos moduliacijai, nes naudojamas netiesioginio keitiklio valdymo metodas. Šie signalai paduodami į dvi panašios sandaros moduliacijos grandines, kurių struktūra bus nagrinėjama toliau. Pagal netiesioginę keitiklio valdymo struktūrą, pirma yra lygintuvo pakopa, kur keičiama virtualios nuolatinės grandies srovė, dabar ją ir nagrinėsime.

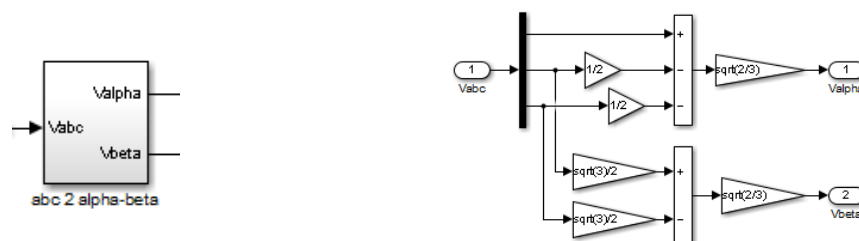
Pateiktoje įėjimo moduliacijos grandinėje (žr. 4.2.3 pav.) moduliacijos signalas pirmiausia padauginamas iš perdavimo koeficiento q , kurio reikšmė mūsų atveju 0,866, nes pridama ir trečioji signalo harmonika. Toliau norint atlikti matematinės operacijas su trijų fazių įėjimo signalu jį būtina transformuoti iš trijų fazių koordinačių sistemos į dviejų koordinačių sistemą. Tam naudojamas $\alpha\beta 0$ arba Klarko transformacijos blokas. Paprastai $\alpha\beta 0$ transformaciją galima išreikšti formulėmis (4.2.1).



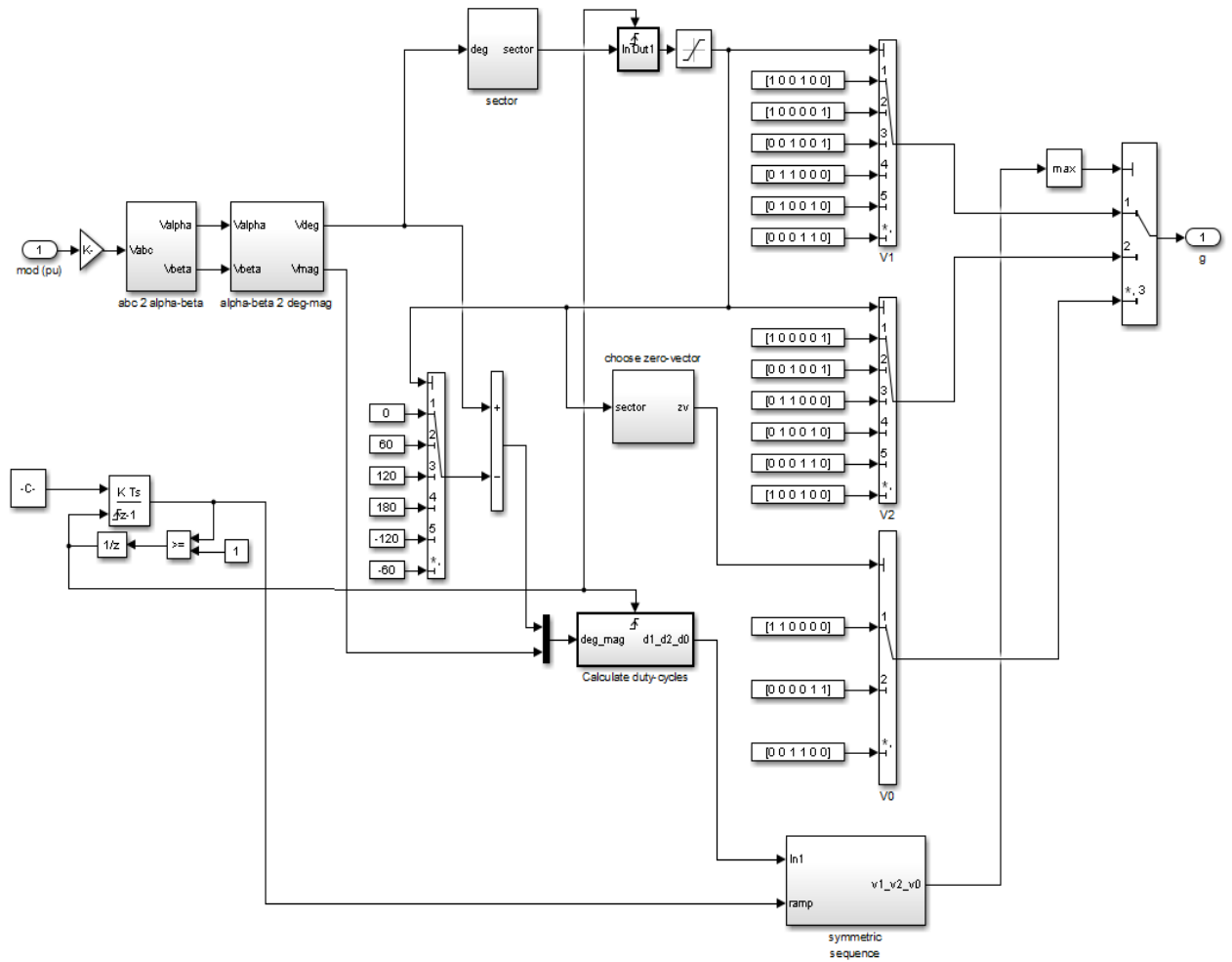
4.2.1 pav. Koordinačių sistemų palyginimas. [22]

$$\begin{aligned}
 U_{\alpha} &= \frac{2}{3} \left(U_a - \frac{1}{2} U_b - \frac{1}{2} U_c \right) \\
 U_{\beta} &= \frac{2}{3} \left(0 * U_a + \frac{\sqrt{3}}{2} U_b - \frac{\sqrt{3}}{2} U_c \right)
 \end{aligned}
 \tag{4.2.1}$$

Tos pačios formulės suformuotos iš matematinių blokų Simulink aplinkoje, kad būtų galima tiesiogiai keisti įėjimo signalus.

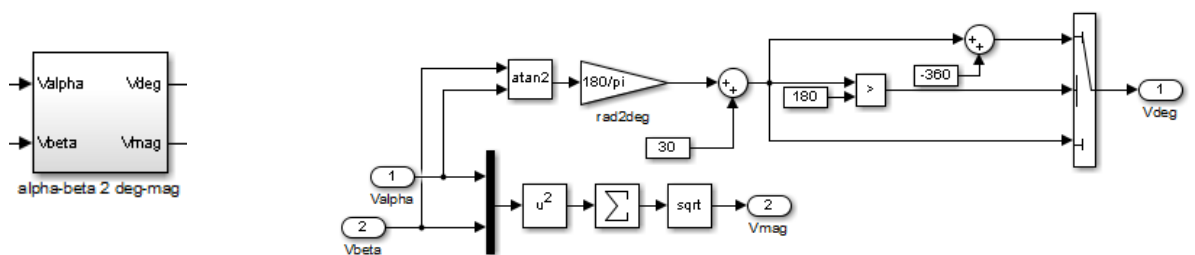


4.2.2 pav. $\alpha\beta 0$ transformacijos blokas ir grandinė Simulink aplinkoje.

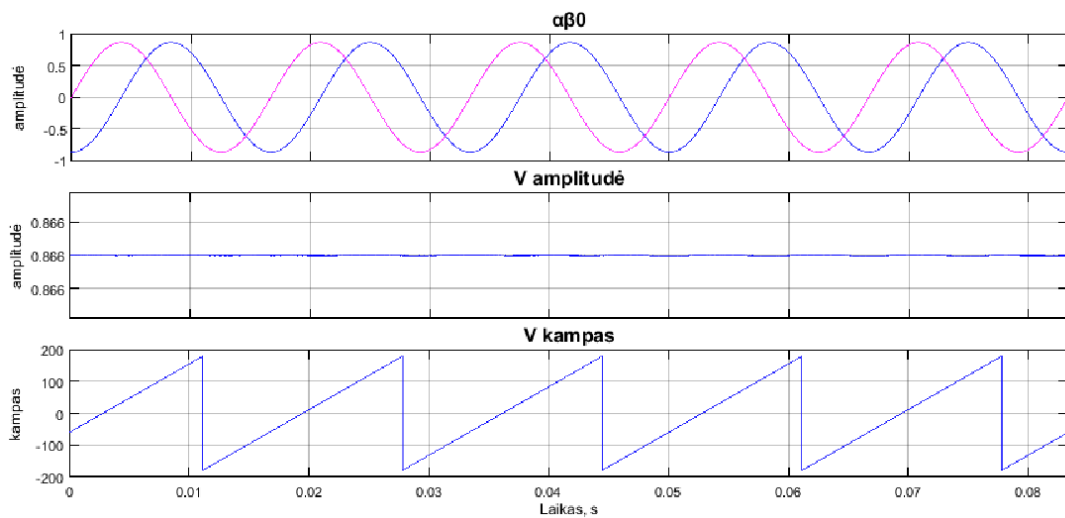


4.2.3 pav. Lyginimo pakopos moduliacijos schema.

Turint signalus $\alpha\beta 0$ koordinacių plokštumoje toliau signalai perskaičiuojami į vektorius. Randama vektoriaus amplitudė ir jo kampas. Simulink aplinkoje ši transformacija pateikta 4.2.4 paveiksle, o gautos reikšmės laike pavaizduotos 4.2.5 paveiksle.

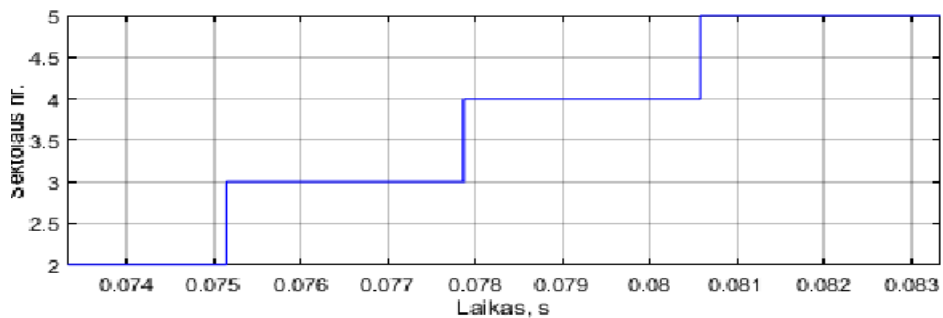


4.2.4 pav. Signalų transformacija į vektorius blokas ir grandinė Simulink aplinkoje.



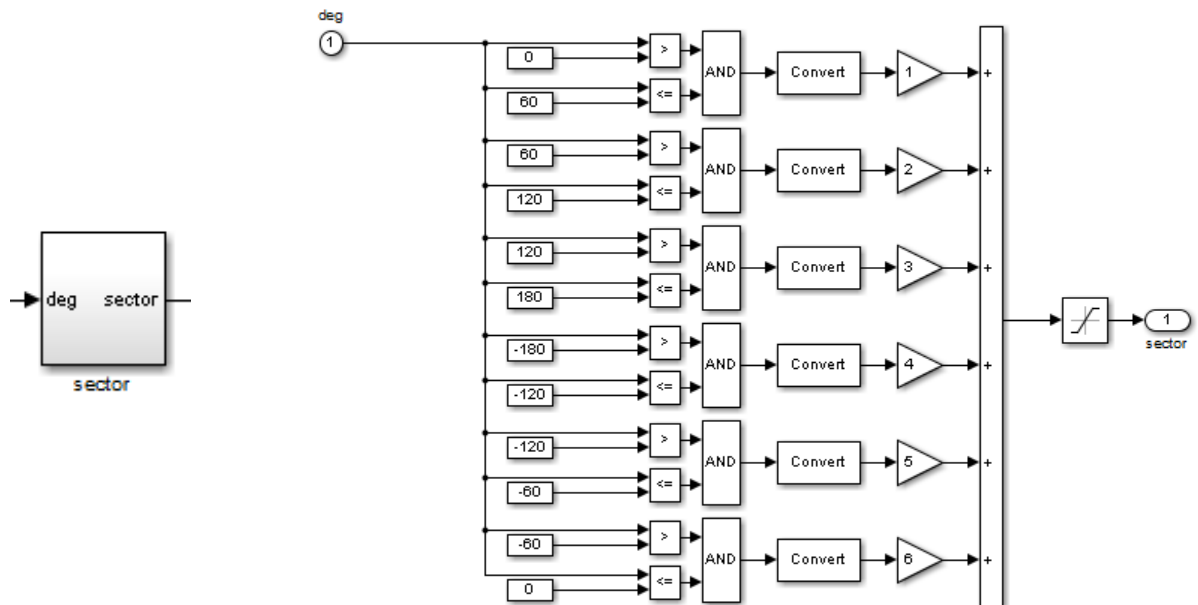
4.2.5 pav. Transformacijos į vektorius įėjimo ir rezultatų signalai.

Žinant įėjimo signalo vektoriaus kampą galima įvertinti kuriam SVM moduliacijos vektorių sektoriui priklauso įėjimo vektorius kiekvienu momentu. Tai atliekama paprasčiausiai lyginant reikšmes. Lyginimo schema pavaizduota 4.2.7 paveikslėlyje. Kaip matoma iš schemos, pirma nustatoma kuriam laipsnių sektoriui priklauso įėjimo kampas. Tada vyksta duomenų tipo transformacija ir dauginimas iš sektoriaus numerio (nuo 1 iki 6).



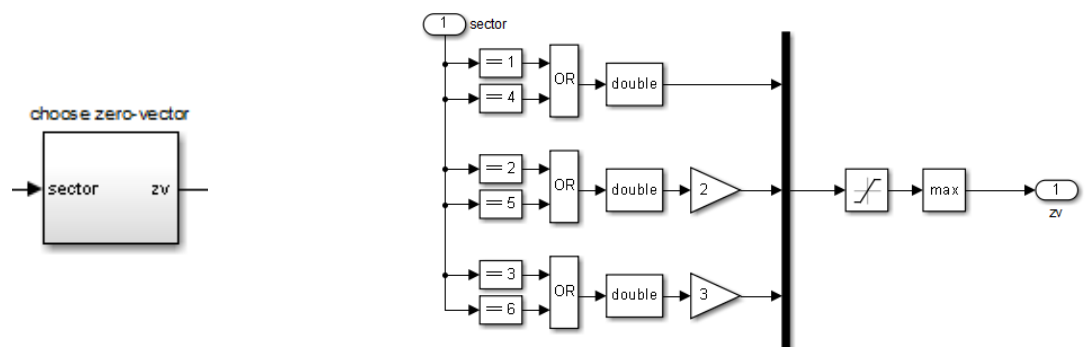
4.2.6 pav. Srovės vektoriaus sektorių parinkimo grafikas.

Žinant kuriame sektoriuje yra erdvės vektorius galima MC keitiklio moduliatoriui (žr. 4.2.12 pav.) perduoti tam tikras jungiklių kombinacijas. Jas sudaro 12 kombinacijų, kur erdvės vektoriaus amplitudės reikšmė nelygi nuliui. Ir trys kombinacijos, kur erdvės vektoriaus amplitudės reikšmė lygi nuliui.



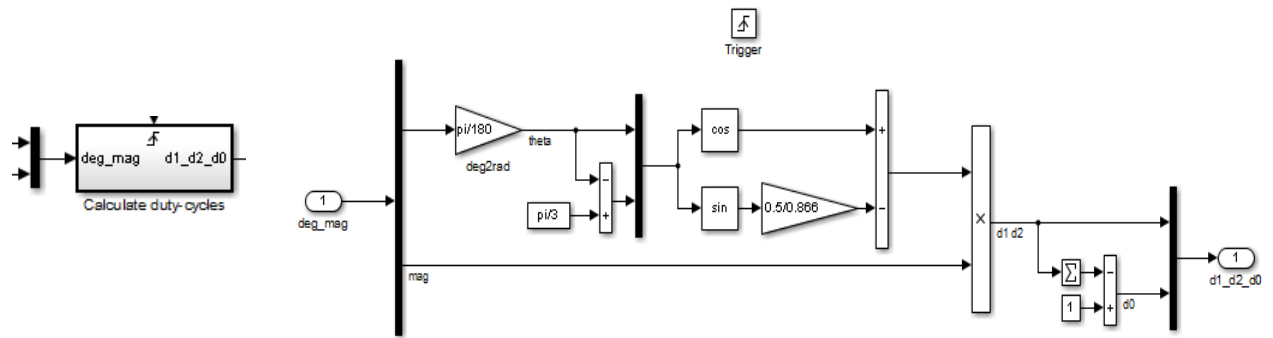
4.2.7 pav. Signalų vektorių sektoriaus išrinkimo blokas ir grandinė.

Nuliniams vektoriams išskirti reikalingas papildomas skaičiavimo blokas (žr. 4.2.8 pav.), kuris pagal erdvės vektoriaus kampą nustato kuriam skyriui priklauso vektorius ir parinka jo jungiklių kombinacijas. Pagal (žr. 4.2.8 pav.) pateiktą struktūrą matoma, kad nulinis vektorius parenkamas pagal tai kokiuose sektoriuose yra erdvės vektorius ir pagal tai parenkamas išėjimo koeficientas. Kurio reikšmė kinta nuo 1 iki 3.

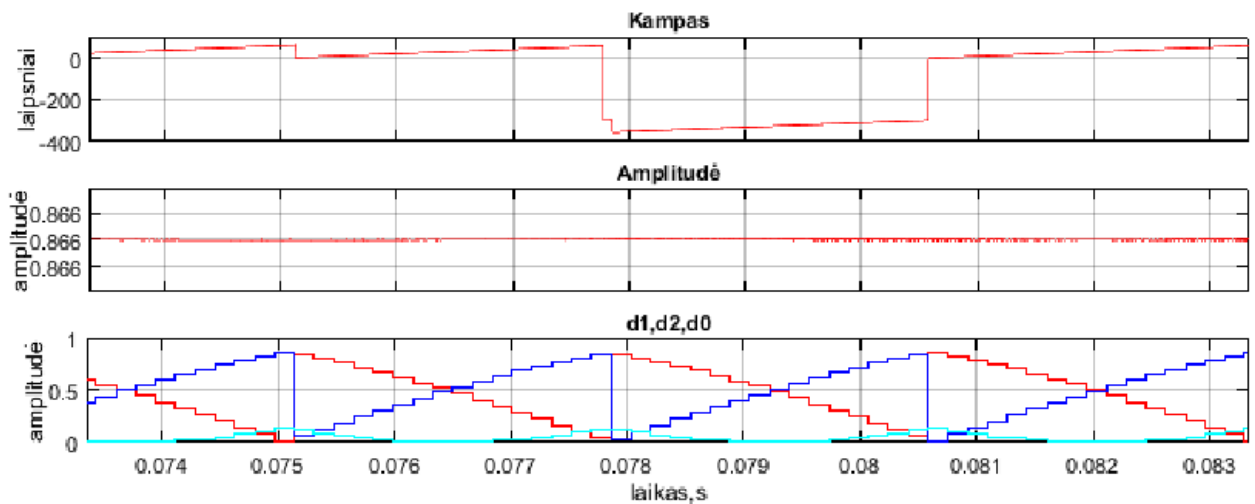


4.2.8 pav. Nulinių vektorių išskyrimo blokas ir jo sandara.

Kadangi, pats valdymo signalų generavimo metodas pagrįstas PWM metodu, reikalinga apskaičiuoti impulsų skverbties laikus. Tam naudojamas dar vienas blokas (žr. 4.2.9 pav.), kurio įėjimai yra erdvės vektoriaus amplitudė, jo kampas ir taktiniai impulsai. Kaip matoma iš 4.2.10 paveikslėlio, vektoriaus amplitudė beveik nekinta, kinta tik jo kampas.



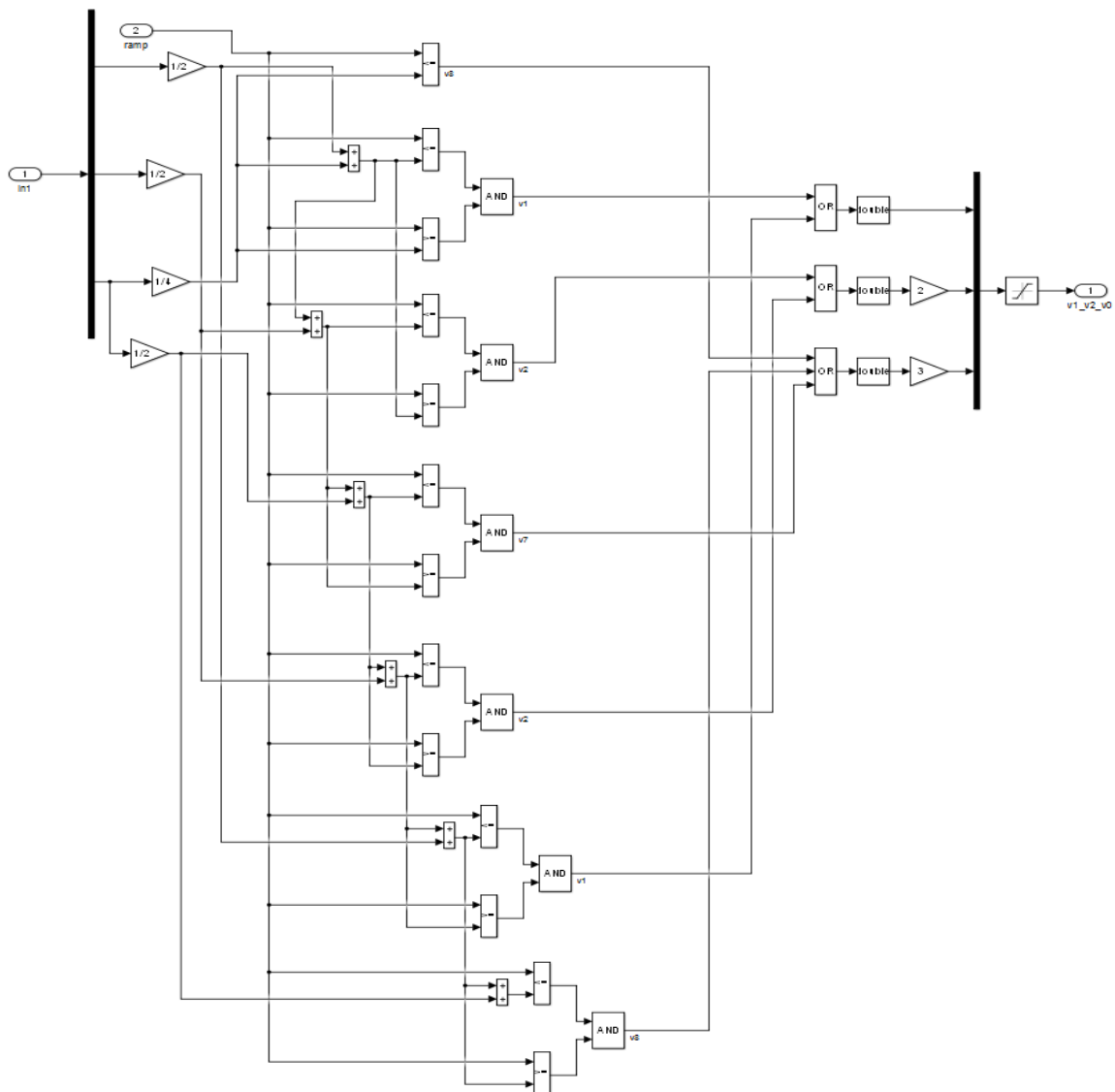
4.2.9 pav. Impulsų pločio skaičiavimas blokas ir jo sandara Simulink aplinkoje.



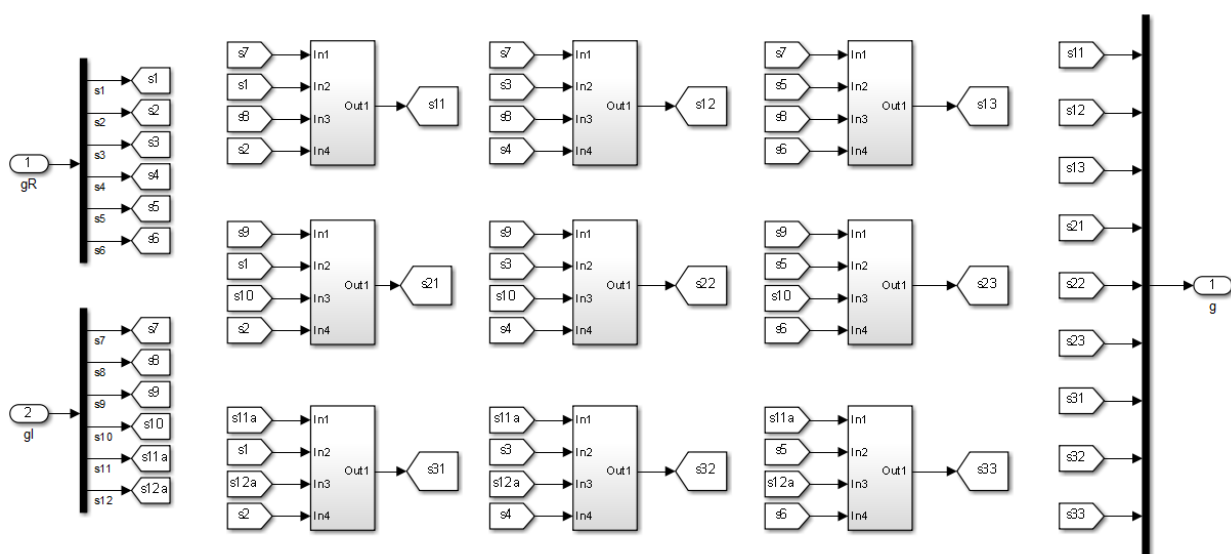
4.2.10 pav. Impulsų pločio skaičiavimo rezultatai.

Toliau suskaičiuotos impulsų pločio reikšmės išreiškiamos diskrečiais impulsais, kurie jau gali būti panaudoti valdymo reikšmių skaičiavimui. Panaudojant logines taisykles (žr. 4.2.11 pav.) yra sukuriama trijų reikšmių PWM signalai, kurie toliau paduodami tiesioginiam moduliatoriui (žr. 4.2.12 pav.). Turint impulsų seką galima generuoti tiesioginio moduliatoriaus įėjimo signalus.

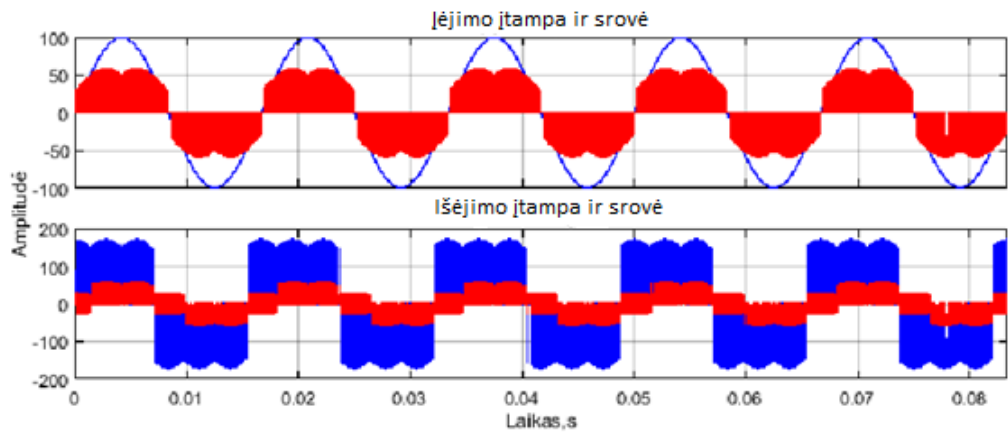
Įtampos moduliacijos schema beveik atitinka srovės moduliacijos schemą. Tačiau nulinių vektorių kiekis kitas. Taip pat reikalingi papildomi veiksmai impulsų sekos generavimui. Tačiau pagrindiniai žingsniai tokie patys.



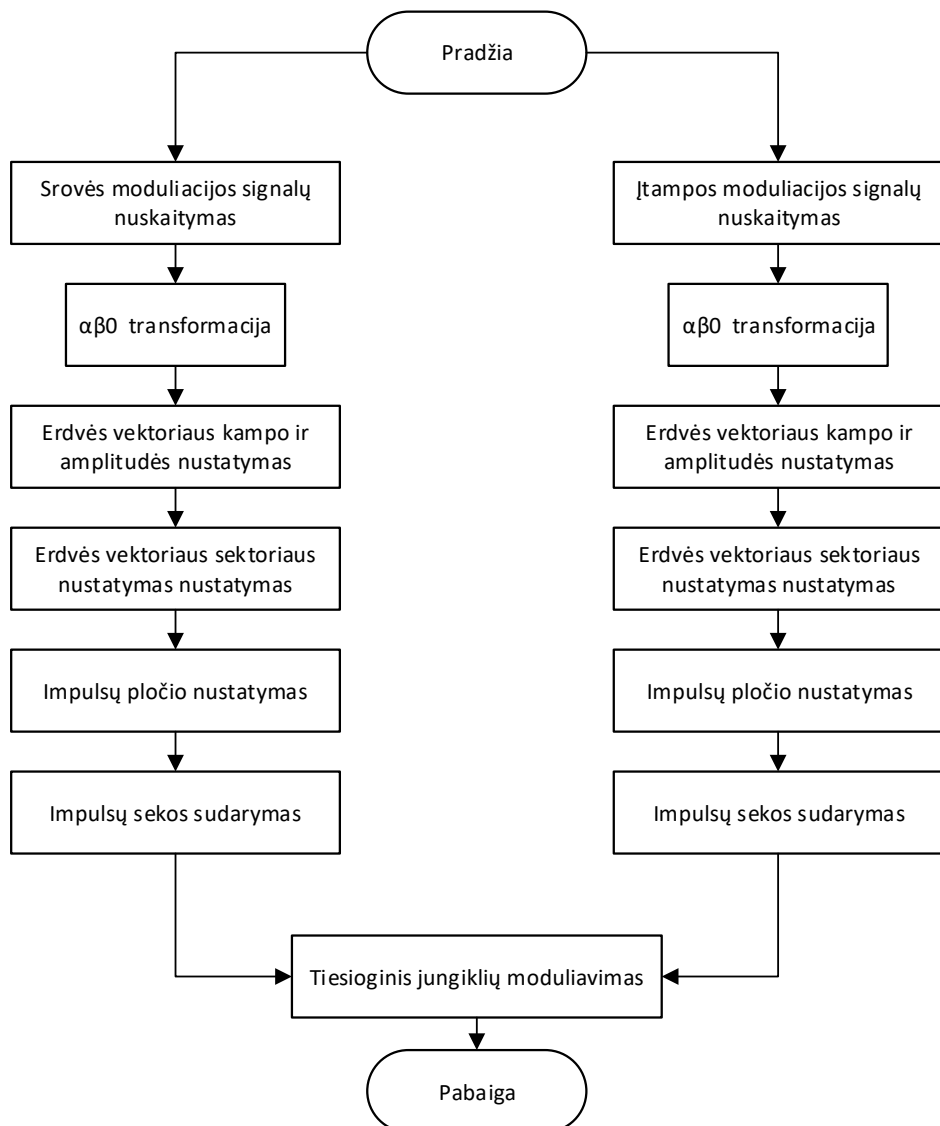
4.2.11 pav. Impulsų sekos formavimo komutatoriui bloko sandara.



4.2.12 pav. Tiesioginio MC keitiklio modulatoriaus bloko sandara.



4.2.13 pav. Keitiklio, be įėjimo filtro, įėjimo ir apkrovos įtampos (mėlyna) ir srovės (raudona) signalai.



4.2.14 pav. SVM valdymo algoritmas.

5. REAKTYVIOS GALIOS KOMPENSAVIMAS

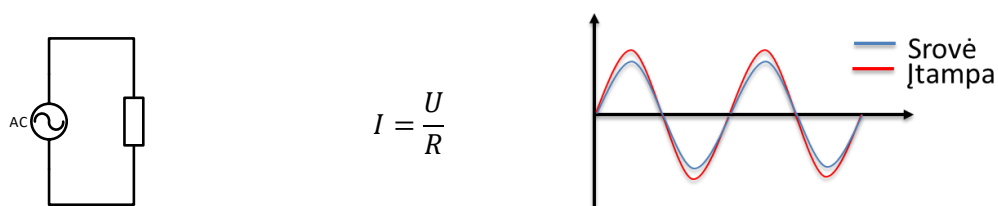
Išnagrinėjus matricinį dažnio keitiklį bei įsigilinus į erdvės vektoriaus valdymo metodą, toliau galime nagrinėti reaktyvios galios kompensavimą ir matricinio dažnio keitiklio veikimą.

Bus tiriami keli kompensavimo režimai, priklausomai nuo prijungtos apkrovos. Papildomi reaktyviają galią generuojantys įrenginiai prijungiami antrinėje perdavimo linijoje, lygiagrečiai dažnio keitikliui. Priklausomai nuo įrenginių apkrovos tipo keičiama keitiklio nuostatos signalo vertė, siekiant kompensuoti reaktyviosios galios nuostolius.

5.1 Energetinės sistemos apkrovos pobūdis.

Elektrinės apkrovos pagal savo savybes gali būti skirstomos į keturis pagrindinius tipus: aktyvinę, induktyvinę, talpinę ir kombinuotą. Apkrova retu atveju būna tik vieno tipo. Taip yra todėl, nes gaminant elektrinius prietaisus neišvengiama talpumų, induktyvumų bei varžų. Kiekvienas apkrovos tipas skirtingai įtakoja elektrinį signalą [24].

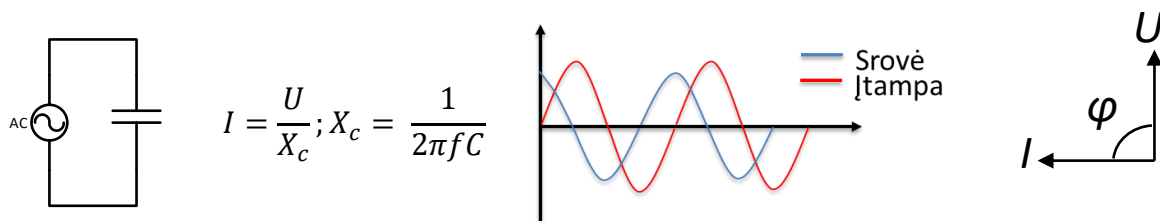
Aktyvinė apkrova, dar gali kitaip gali būti vadinama varža ir matuojama omais (Ω). Šios apkrovos savybė ta, kad per ją tekant elektros srovei dalis energijos prarandama ir virsta šiluma. Dažniausi aktyvios apkrovos tipai yra liuminescencinės lempos ir elektriniai šildytuvai.



5.1.1 pav. Aktyvinės apkrovos simbolis grandinėje, srovės tekančios per aktyvinę apkrovą formulė bei įtampos ir srovės apibendrinta diagrama.

Aktyvinei apkrovai fazės kampas tarp įtampos ir srovės lygus nuliui. Todėl nėra jokių reaktyviosios galios nuostolių.

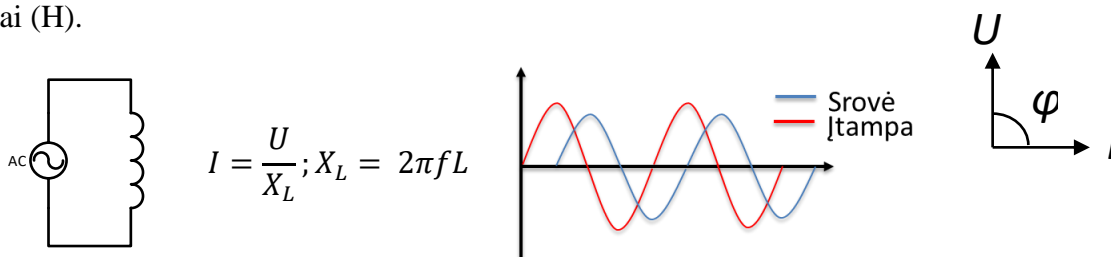
Talpinės apkrovos dydis matuojama faradais (F). Tai gali būti laidūs paviršiai atskirti dielektriku. Sudaryti talpai naudojami komponentai vadinami kondensatoriais. Jie gali būti naudojami elektriniuose varikliuose, radijo grandinėse, maitinimo šaltiniuose. Talpine apkrova gali būti ir labai ilga energijos perdavimo linija.



5.1.2 pav. Talpinės apkrovos simbolis grandinėje, srovės tekančios per talpinę apkrovą formulė bei įtampos ir srovės apibendrinta diagrama kartu su vektorine diagrama.

Talpinės apkrovos įtampa pirminiu momentu būna lygi nuliui, o srovė maksimali, toliau kondensatoriui įsikraunant įtampa kyla, o srovė krenta. Fazės kampas tarp įtampos ir srovės talpinei apkrovai yra neigiamas, tai reiškia, kad srovės fazė lenkia įtampos fazę. Fazės kampui nesant lygiam nuliui atsiranda reaktyvios galios nuostoliai. Norint kompensuoti reaktyvios galios nuostolius talpiniai apkrovai reikia prijungti tinkamo dydžio induktyvinę apkrovą.

Induktyvine apkrova gali būti bet kuris laidininkas kuriuo teka elektros srovė. Tekanti elektros srovė aplink laidininką generuoja magnetinį lauką. Norint padidinti induktyvumą galima laidininką susukti į ritę ir patalpinti kintančiame magnetiniame lauke. Induktyvinės apkrovos pavydžiai gali būti transformatoriai, elektriniai varikliai ir ritės. Induktyvumo matavimo vienetai yra henriai (H).

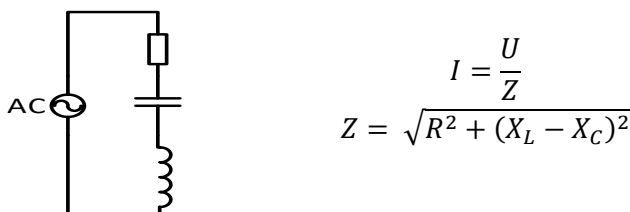


5.1.3 pav. Induktyvinės apkrovos simbolis grandinėje, srovės tekančios per induktyvinę apkrovą formulė bei įtampos ir srovės apibendrinta diagrama kartu su vektorine diagrama.

Induktyvinei apkrovai fazės kampas tarp įtampos ir srovės yra teigiamas, tai reiškia, kad įtampos fazė lenkia srovės fazę. Kompensuoti induktyvinėms apkrovoms yra naudojami atitinkamo dydžio kondensatoriai.

Kombinuota elektrinė apkrova sudaryta iš kelių anksčiau minėtų apkrovos tipų. Visi laidininkai turi savo savitąją varžą, kuri priklauso, nuo laidininko medžiagos ir aplinkos sąlygų. Laidininkai normaliomis sąlygomis, taip pat turi induktyvumo ir taplumo savybių. Įvairios radijo grandinės naudoja įvairaus tipo pasyvinius elementus, todėl jų apkrovos tipas taip pat mišrus. Elektros varikliai taip pat yra mišrios apkrovos tipo. [24] Fazės kampas tarp įtampos ir srovės mišriai apkrovai gali būti, tiek teigiamas, tiek neigiamas. Tai priklauso nuo bendro apkrovos tipo. Srovės fazė lenkia įtampos fazę jei $X_C > X_L$ ir srovės fazė atsilieka nuo įtampos fazės, jei $X_L > X_C$. Fazės kampas gali būti apskaičiuotas pagal:

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \text{ arba } \frac{X_C - X_L}{R} \quad (5.1.1)$$

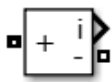


5.1.4 pav. Kombinuotos apkrovos simbolis grandinėje, srovės tekančios per induktyvinę apkrovą formulė.

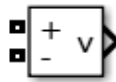
6. ELEKTRINIŲ DYDŽIŲ MATAVIMAS MATLAB SIMULINK MODELyje

Norint atlikti tyrimus reikia teisingai matuoti sistemos parametrus. Tam naudojami standartiniai Simulink paketo blokai ir sukurti matavimo blokai. Pagrindiniai matuojami dydžiai sudarytame modelyje yra įėjimo ir išėjimo įtampos ir srovės efektinės ir amplitudinės vertės. Įėjimo ir išėjimo aktyvioji ir reaktyvioji galios, taip pat fazės kampas tarp įtampos ir srovės įėjime ir išėjime.

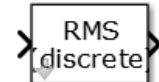
Įtampų ir srovių efektinės vertės matuojamos standartiniais Simulink blokais „Voltage measurement“, „Current measurement“ kartu su „Discrete RMS value“, bloku, kurio kvantavimo dažnis lygus 50 μ s (žr. 6.1 pav.). Stebint efektines vertes galima nustatyti, kaip keitiklio valdymo kampas įtakoja išėjimo įtampą.



a)



b)



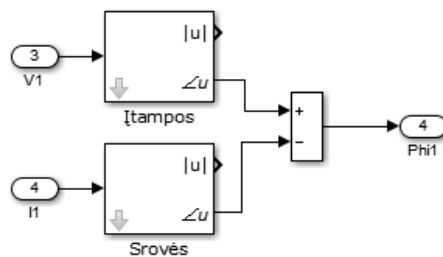
c)

6.1 pav. Simulink matavimo blokai panaudoti efektinių verčių nustatymui. A) „Current measurement“ blokas srovės matavimui. B) „Voltage measurement“ blokas įtampos matavimui. C) „Discrete RMS value“ blokas efektinės vertės nustatymui.

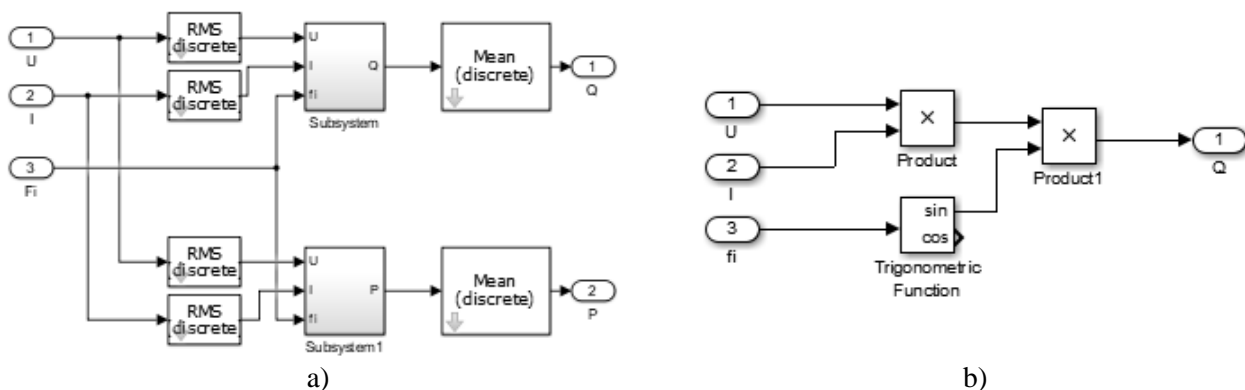
Amplitudinės signalų vertės matuojamos „Three-Phase VI measurement“ ir „Scope“ bloku, kur vienoje ašyje galima atvaizduoti kelis signalus, tai nustatant ryšį tarp jų. Tai ypač patogu norint nustatyti kaip kinta fazės kampas tarp įtampos ir srovės. „Three-Phase VI measurement“ blokas sudarytas ir anksčiau minėtų įtampos ir srovės matavimo blokų.

Įtampos ir srovės fazės kampas apskaičiuojamas naudojant standartinius Furje transformacijos blokus iš Simulink bibliotekos. Bloko išėjime gaunami signalų pagrindinės harmonikos fazės kampai, kurių skirtumas parodo kampą φ . Fazės kampo skaičiavimo grandinė pavaizduota 6.2 paveiksle. Žinant kampo φ vertę galima apskaičiuoti aktyviają bei reaktyviają galias. Tam iš standartinių Simulink blokų sudaryta galios skaičiavimo grandinė. Simulink pakete yra standartinių reaktyvios galios matavimo blokų, tačiau skaičiavimuose jei neįvertina šalutinių harmonikų kiekio todėl buvo sudaryti nauji skaičiavimo blokai. Blokai sudaryti remiantis aktyviosios ir reaktyviosios galios skaičiavimo formulėmis (6.1).

$$P = UI \cos \varphi; \quad Q = UI \sin \varphi \quad (6.1)$$



6.2 pav. Simulink paketo funkcinių blokų schema fazės kampo ϕ tarp srovės ir įtampos apskaičiavimui.



6.3 pav. Simulink paketo funkcinių blokų schema aktyviosios ir reaktyviosios galios apskaičiavimui. A) bendra grandinė. B) posistemės bloko grandinė.

Kartu su galios matavimo blokais naudojami ir vidutinės reikšmės blokai, nes aukšto dažnio papildomos harmonikos iškraipo signalą.

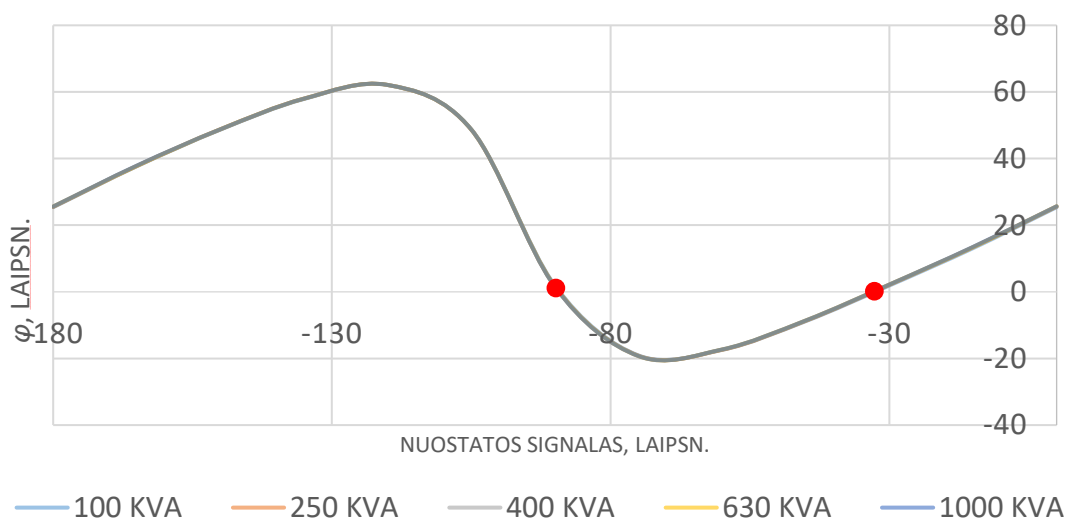
7. MODELIAVIMO REZULTATAI

Šioje darbo dalyje bus pateikiami ir analizuojami modeliavimo metu gauti rezultatai. Taip pat paaiškinama konkretaus modelio struktūra.

Pirmas modelis sudarytas taip, kad būtų galima stebėti, kaip matricinis keitiklis valdomas erdvės vektoriaus būdu gali kompensuoti reaktyviają galią esant aktyvinei apkrovai. Tam reikia nustatyti kaip keitiklis įtakoja sistemos parametrus neveikdamas reaktyviosios galios kompensavimo režimu.

Sudaryto fazės kampo tarp srovės ir įtampos keitiklio įėjime nuo valdymo kampo priklausomybės su skirtingos galios transformatorių parametrais (žr. 7.1 pav.). Keitiklio išėjimo dažnis lygus įėjimo dažniui (50 Hz). Ištyrus atskirą sistemą nustatyta kad, matricinė pavara, valdomą netiesioginės erdvės vektoriaus moduliacijos būdu, energetinei sistemai sudaro aktyvaus talpinio pobūdžio apkrovą.

Norint kaip įmanoma sumažinti reaktyviosios galios kiekį būtina rinktis valdymo kampo reikšmę lygią šioms dviem vertėms. Taip pat galima pasiekti fazės kampo įėjime tarp įtampos ir srovės skirtumą nuo -20 iki 62 laipsnių. Tai reiškia, kad keitiklis gali kompensuoti santykinai didesnę talpinio tipo apkrovą įėjime nei induktyvinio, nes galima pasiekti didesnę teigiamo, nei neigiamo fazės kampo reikšmę.

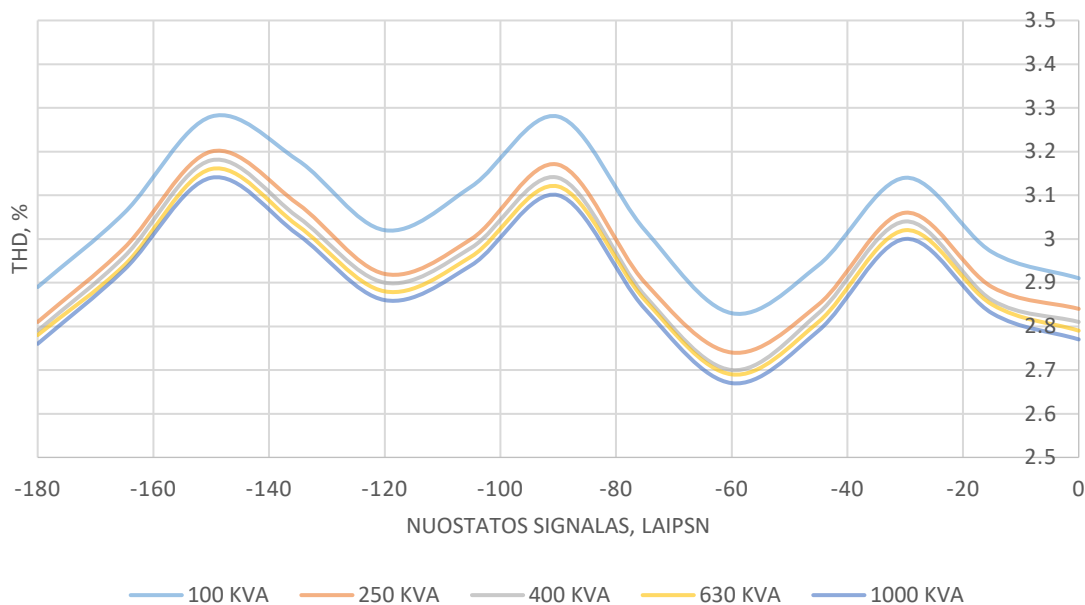


7.1 pav. Fazės kampo tarp srovės ir įtampos keitiklio įėjime priklausomybė nuo matricinio keitiklio lyginimo stadijos nuostatos signalo .

Tačiau norint nuspręsti kokia nuostatos signalo reikšmė optimaliausia reikia palyginti kaip kinta ir kiti sistemos parametrai.

Vienas iš jų yra šalutinių harmonikų kiekis (THD). Šis parametras turi būti kuo mažesnis norint pasiekti didesnę sistemos stabilumą ir pagerinti veikimą. Toliau pateikiama šalutinių

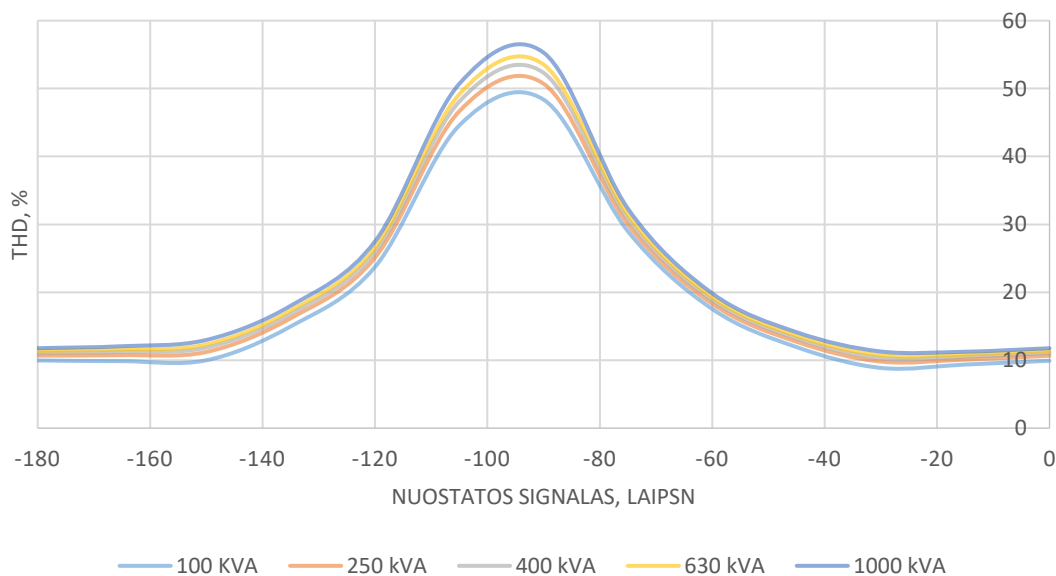
harmonikų kiekio įėjimo įtampos ir srovės signalams nuo valdymo kampo (žr. 7.2 pav. ir 7.3 pav.). Kaip matoma šalutinių harmonikų keikis esant skirtingoms transformatoriaus galioms kinta. Didėjant transformatoriaus galiai mažėja šalutinių harmonikų kiekis įėjimo įtampos signale, tačiau didėja įėjimo srovės signale.



7.2 pav. Šalutinių harmonikų kiekio įėjimo įtampos signale priklausomybė nuo nuostatos signalo lyginimo stadijoje.

Skirtumas įėjimo įtampos signalams (apie 0,1%) daug mažesnis nei įėjimo srovės (6%). Taip pat, nepriklausomai nuo transformatoriaus galios įėjimo transformatoriaus šalutinių harmonikų kiekis neviršija 5 procentų ribos.

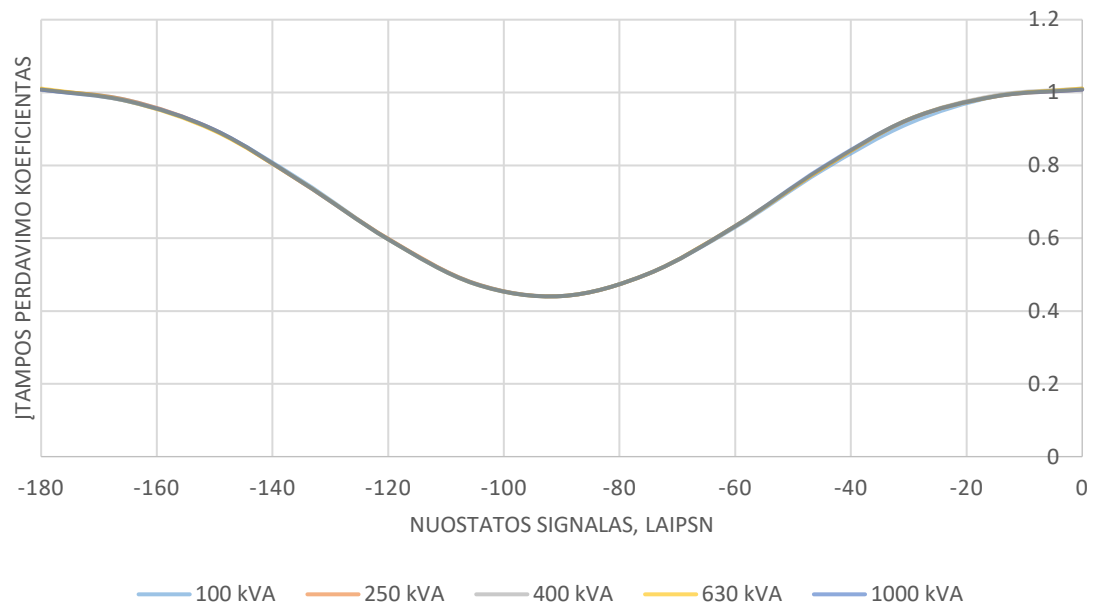
Pagal anksčiau nustatytas kampų vertes siūloma naudoti mažesnę valdymo kampo reikšmę, nes tada gaunami mažesni šalutinių harmonikų kiekiai.



7.3 pav. Šalutinių harmonikų kiekio įėjimo srovės signale priklausomybė nuo nuostatos signalo lyginimo stadijoje.

Šalutinių harmonikų kiekis išėjimo srovės ir įtampos signalams nekinta nuo transformatoriaus galios vertės. O priklausomybės forma sutampa su įėjimo srovės THD priklausomybe nuo nuostatos signalo.

Fazės kampas įėjime įtakoja ir įtampos perdavimo koeficientą. Didėjant fazės kampui tarp srovės ir įtampos įėjime, mažėja tiesioginio matricinio keitiklio išėjimo įtampa (žr. 7.4 pav.).



7.4 pav. Tiesioginio matricinio dažnio keitiklio įtampos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo valdymo kampo.

Įtampos perdavimo koeficientas pasiekia vertę lygią 0,866, kai nuostatos signalas lygus 32 laipsniams. Esant šiam perdavimo koeficientui nėra permoduliuavimo ir pasiekama maksimali išėjimo įtampa. Taip pat esant 32 laipsnių nuostatos signalui minimizuojami reaktyvios galios nuostoliai įėjime. Todėl galima teigti, kad sumažinus reaktyviosios galios nuostolius keitiklis pasiekia optimalų darbo tašką.

Esant nedidelei nuostatos signalo reikšmei (<10 laipsnių) išėjimo įtampa beveik nekinta. Tačiau toliau didinant fazių skirtumą išėjimo įtampa mažėja netiesiniu dėsnio. Ir pasiekia minimalią vertę prie 90 laipsnių. Taip yra todėl, nes nuostatos signalui esant 90 laipsnių fazės kampas įėjime tarp įtampos ir srovės yra didžiausias. Taip pat, išėjimo įtampos vertė nepriklauso nuo įėjimo transformatoriaus galios (žr. 7.4 pav.). Išėjimo srovė kinta tokiu pačiu dėsnio kaip ir išėjimo įtampa ir pasiekia minimalią vertę esant 90 laipsnių nuostatos signalui.

Toliau bus tiriamas sistemos darbas 0,4 kV tinkle esant papildomiems įrenginiams, kurių apkrovos tipai vienodi.

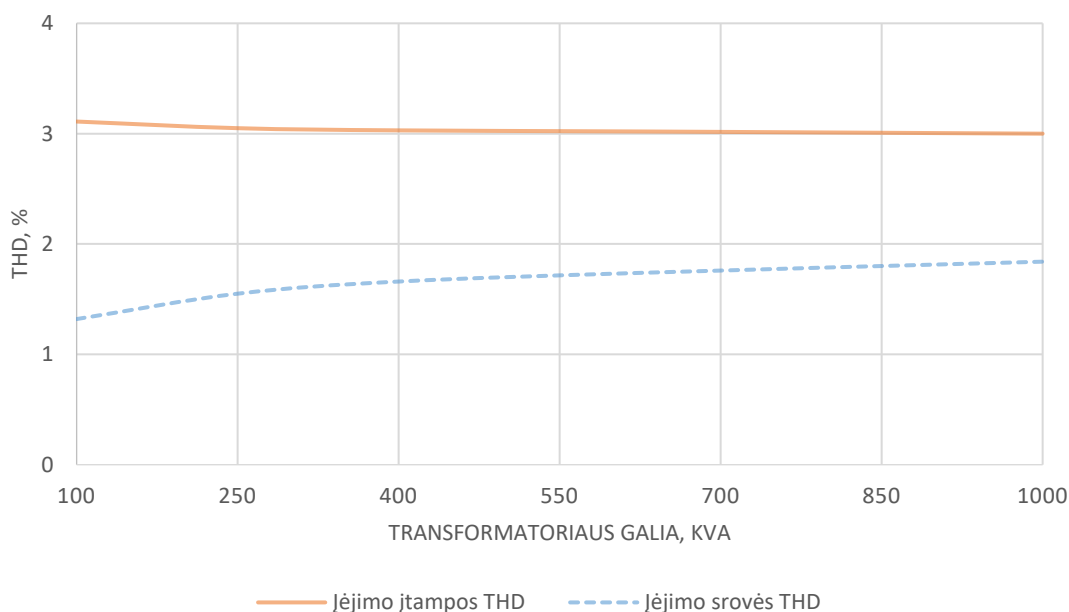
Tinkle prijungus tik reaktyviają apkrovą, galima ją kompensuoti panaudojant tiesioginį matricinį dažnio keitiklį. Nuostatos signalas kompensuojant apkrovą priklauso nuo apkrovos dydžio. Visiškai kompensuoti reaktyvios galios nuostolius galima ne visais atvejais, nes matricinis keitiklis turi savo kompensavimo ribas. Pasirinkus reaktyviosios apkrovos dydį nuo 300mH iki

3000mH nuostatos signalas keičiamas nuo 32 iki 42 laipsnių. Įėjimo transformatoriaus galia neturi įtakos įėjimo fazės kampui tarp įtampos ir srovės kampui prie pasirinktos nuostatos signalo vertės.

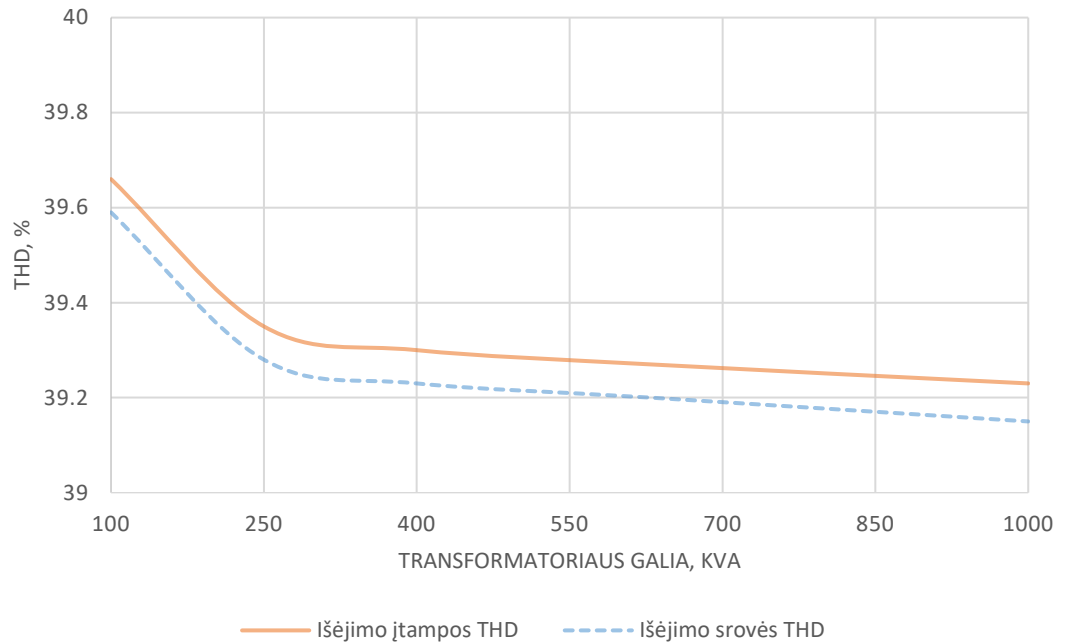
Tačiau transformatoriaus galia turi įtakos šalutinių harmonikų kiekiui keitiklio įėjime ir išėjime prie pasirinktos nuostatos signalo vertės. Keičiant įėjimo transformatoriaus galią nuo 100 kVA iki 1000 kVA nustatyta, kad didėjant galiai, mažėja šalutinių harmonikų kiekis įėjimo įtampos, išėjimo įtampos ir srovės signaluose, tačiau didėja įėjimo srovės iškreipymai (žr. 7.5 pav. , 7.6 pav.). Šalutinių harmonikų kiekio pokytis nuo transformatoriaus galios labai nedidelis. Įėjimo signalams jis siekia 0,1 ir 0,5 procento, o išėjimo signalams 0,4 procento.

7.1 lentelė. Šalutinių harmonikų kiekis tinkle nuo įėjimo transformatoriaus galios.

	100 kVA	250 kVA	400 kVA	630 kVA	1000 kVA
Įėjimo įtampos THD, %	3.11	3.05	3.03	3.02	3
Įėjimo srovės THD, %	1.32	1.55	1.66	1.74	1.84
Išėjimo įtampos THD, %	39.66	39.35	39.3	39.27	39.23
Išėjimo srovės THD, %	39.59	39.28	39.23	39.2	39.15



7.5 pav. Tinklo įėjimo įtampos ir srovės šalutinių harmonikų priklausomybė, nuo įėjimo transformatoriaus galios.



7.6 pav. Keitiklio išėjimo įtampos ir srovės šalutinių harmonikų priklausomybė, nuo įėjimo transformatoriaus galios.

Matricinis keitiklis tiriamas kompensavimo režime, kai tinkle prijungti keli vienodo tipo reaktyviosios galios šaltiniai. Pasirinkti 10 μF talpinio tipo įrenginiai ir 1 H induktyvinio tipo įrenginiai.

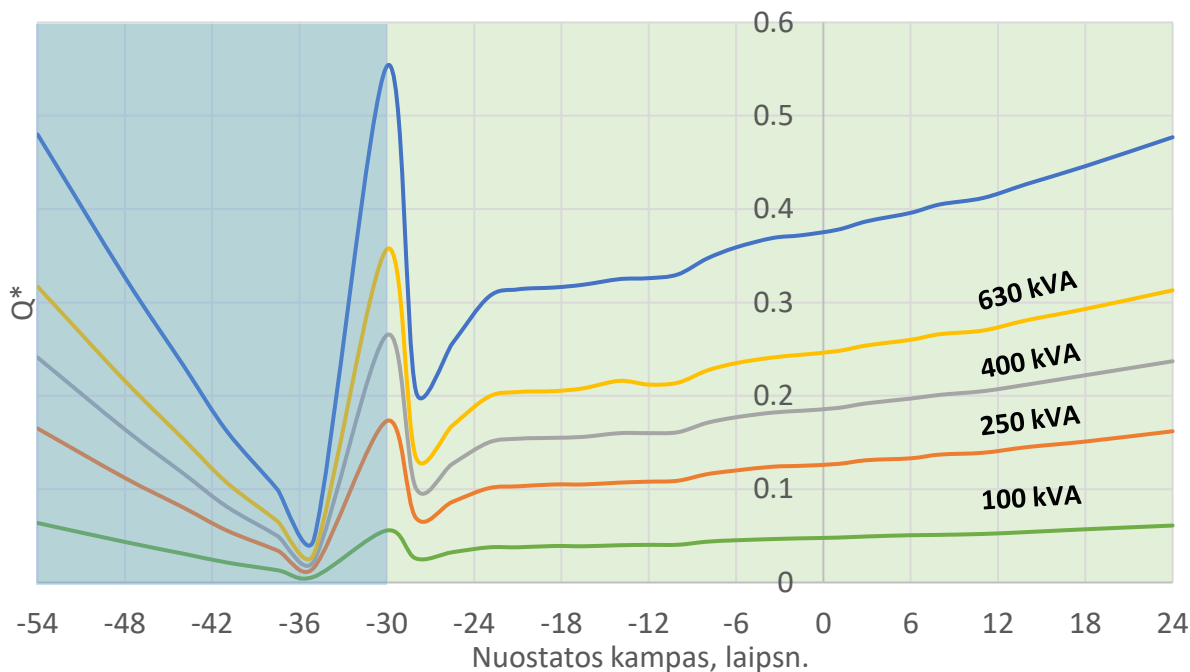
Taip pat, modeliavimo būdu nustatyti matricinio keitiklio reaktyviosios galios kompensavimo ribas su skirtingais įėjimo transformatoriais, įvedamas reaktyviosios galios koeficientas Q^* . Koeficientas (7.1) parodo reaktyviųjų galių santykį tarp kompensuojamos reaktyviosios galios ir transformatoriaus reaktyviosios galios.

$$Q^* = \frac{\text{Kompensuojama reaktyvioji galia, VAR}}{\text{Transformatoriaus reaktyvioji galia, VAR}} \quad (7.1)$$

Sudaryta Q^* priklausomybė nuo nuostatos signalo virtualioje lyginimo stadijoje (žr. 7.7 pav.). Pasirinktas nuostatos signalo diapazonas nuo -60 iki 20 laipsnių, tai apimant visą galimą, anksčiau modeliavimo būdu tirtas, atskirtos sistemos modelio įėjimo kampo diapazoną. Keitiklis visais atvejais veikia reaktyviosios galios kompensavimo režime, su skirtingu reaktyviąją galią generuojančių įrenginių kiekiu, kuriam kompensuoti reikalingos skirtingos nuostatos signalo vertės.

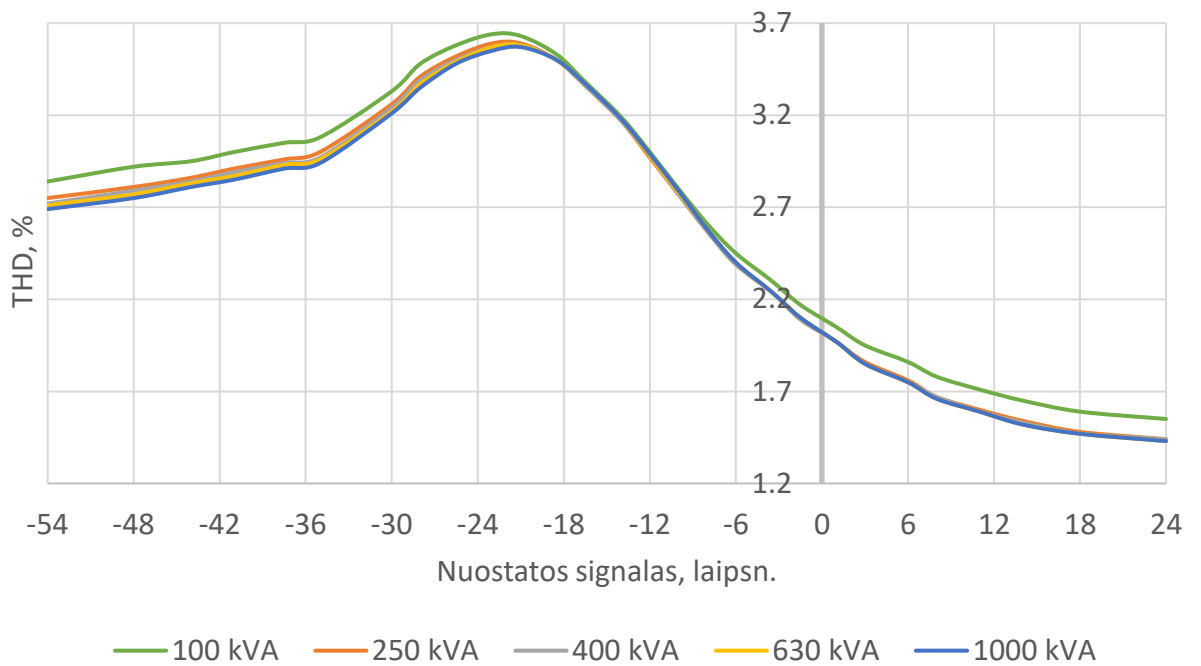
Įrenginio apkrovos pobūdis keičiamas, kai nuostatos signalas lygus -30 laipsnių (nes sudarytas sistemos modelis keitiklio apkrovai jau perstumia fazės kampą tarp įtampos ir srovės per 30 laipsnių), todėl gaunami netolygumai priklausomybėje. Kai nuostatos signalas mažesnis nei -30 laipsnių kompensuojami induktyvinio tipo reaktyviąją galią generuojantys įrenginiai. Galima kompensuoti induktyvinio tipo įrenginių reaktyviąją galią iki 0,48 transformatoriaus reaktyviosios galios. Kai nuostatos signalas didesnis nei -30 laipsnių kompensuojami talpinio tipo reaktyviąją galią generuojantys įrenginiai.

Galima kompensuoti talpinio tipo įrenginių reaktyviąją galią iki 0,47 transformatoriaus reaktyviosios galios. Iš priklausomybės (žr. 7.7 pav.) matoma, kad esant didesnei įėjimo transformatoriaus galiai galima kompensuoti didesnę reaktyviosios galios kiekį įėjime. Galima kompensuoti iki pusės transformatoriaus reaktyviosios galios.

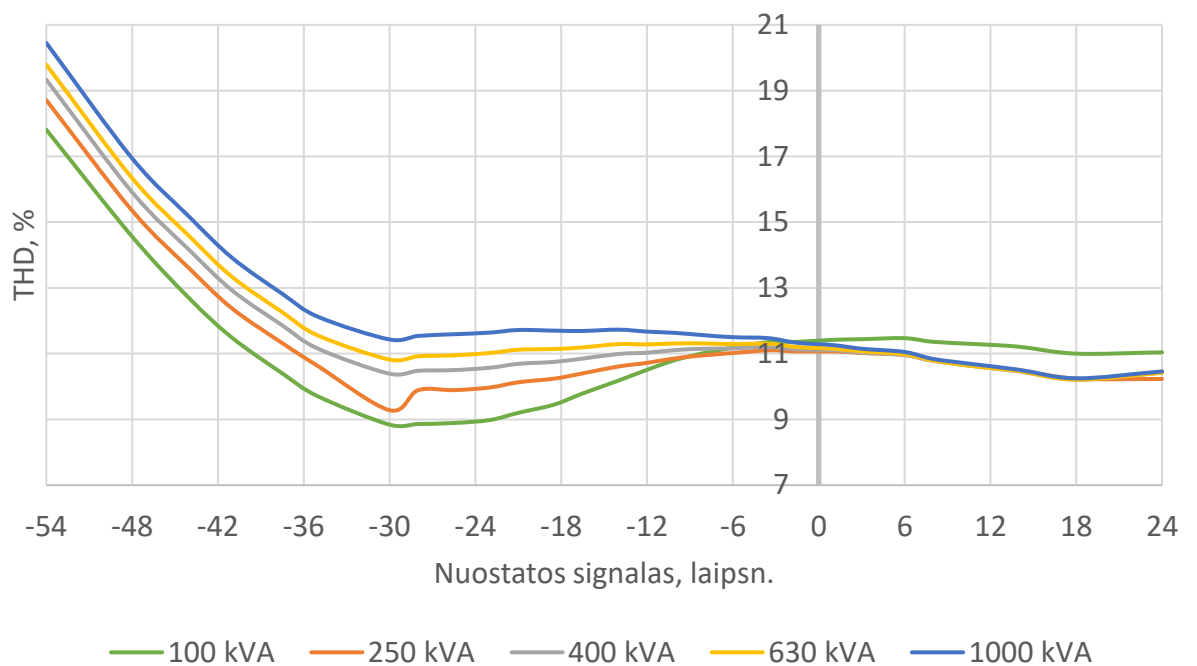


7.7 pav. Reaktyviosios galios koeficiento Q^* priklausomybė nuo nuostatos signalo virtualioje lyginimo stadijoje, reaktyviosios galios kompensavimo režime, prie skirtingų įėjimo transformatoriaus galių.

Sudarytos šalutinių harmonikų kiekio (*angl. THD*) priklausomybės įėjimo įtampos ir srovės signaluose (žr. 7.8 pav. ir 7.9 pav.). Šalutinių harmonikų kiekis įėjimo įtampos signalė mažėja didėjant kompensuojamos reaktyviosios galios kiekiui. Taip pat THD kiekis mažesnis kompensuojant talpinio tipo įrenginius ir neperžengia leistinos 5 procentų ribos visame diapazone.



7.8 pav. Šalutinių harmonikų kiekio jėgimo įtampos signalė priklausomybė nuo nuostatos signalo virtualioje lyginimo stadijoje, reaktyviosios galios kompensavimo režime, prie skirtingų jėgimo transformatoriaus galių.



7.9 pav. Šalutinių harmonikų kiekio jėgimo srovės signalė priklausomybė nuo nuostatos signalo virtualioje lyginimo stadijoje, reaktyviosios galios kompensavimo režime, prie skirtingų jėgimo transformatoriaus galių.

Šalutinių harmonikų kiekis jėgimo srovės signalė nėra ribojamas teisinių reikalavimų. Kaip matoma (žr. 7.9 pav.), THD kiekis didėja kompensuojant didesnę kiekį induktyvinio tipo reaktyviosios galios. Tačiau kompensuojant talpinio tipo reaktyviąją galią šalutinių harmonikų kiekis beveik nekinta. Didėjant transformatoriaus galiai didėja ir THD kiekis, tai geriausiai pastebima esant induktyvinio tipo įrenginiams. Talpinio tipo įrenginiams THD nuo transformatoriaus galios didėja tik esant mažam įrenginių skaičiui. Vėliau transformatorius beveik nebeturi įtakos.

IŠVADOS

- 1) Atlikus literatūros analizę išsiaiškinta, kad tiesioginį matricinį keitiklį valdomą netiesioginio erdvės vektoriaus moduliacijos būdu galima valdymo požiūriu išskaidyti į lyginimo ir invertavimo stadijas. Lyginimo stadijoje keičiant fazės kampo nuostatos signalą galima valdyti energetinės sistemos apkrovos pobūdį. Reiškia, matricinė pavara gali atlikti ne tik dažnio keitimo ir variklio greičio reguliavimo funkciją, bet ir reaktyviosios galios kompensavimo funkciją.
- 2) Ištyrus atskirą sistemą nustatyta kad, matricinė pavara, valdomą netiesioginės erdvės vektoriaus moduliacijos būdu, energetinei sistemai sudaro aktyvaus talpinio pobūdžio apkrovą.
- 3) Modeliavimo Matlab Simulink būdu nustatyta, kad matricinis keitiklis gali kompensuoti induktyvaus pobūdžio reaktyviąją galią nuo 0,047 iki 0,48 santykinės reaktyviosios galios. Kompensuojant šią reaktyviąją galią šalutinių harmonikų kiekis kinta ribose nuo 2,69 iki 2,94 proc, reiškia išlaikant jų kiekį standarto leidžiamose ribose.
- 4) Modeliavimo Matlab Simulink būdu nustatyta, kad matricinis keitiklis gali kompensuoti talpinio pobūdžio reaktyviąją galią nuo 0,2 iki 0,47 santykinės reaktyviosios galios. Kompensuojant šią reaktyviąją galią šalutinių harmonikų kiekis kinta ribose nuo 1,43 iki 3,35 proc, reiškia išlaikant jų kiekį standarto leidžiamose ribose.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. L. Gyugi and B. Pelly, *Static Power Frequency Changers: Theory, Performance and Applications*. New York: Wiley, 1976. p 17-79
2. L. Huber and D. Borojevic, "Space vector modulated three phase to three phase Matrix Converter with input power factor correction." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 6, pp. 1234-1246, November/December 1995. p 1234- 1246
3. P. Szczesniak, *Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology, Power Systems*. DOI: 10.1007/978-1-4471-4896-8_2, © Springer-Verlag London 2013
4. Andreu J, Kortabarria I, Ormaetxea E, Ibarra E, Martin JL, Apinaniz S (2012) *A step forward towards the development of reliable matrix converters*. *IEEE Trans Ind Electron* p 167-183
5. Hornkamp M, Loddenkötter M, Muenzer M, Simon O, Bruckmann M (2001) *EconoMAC the first all-in-one IGBT module for matrix converters*. In: *Proceedings of drives and controls and power electronics conference*, London, UK.
6. Wheeler PW, Rodriguez J, Clare JC, Empringham L, Weinstein A (2002) *Matrix converters: a technology review*. *IEEE Trans Ind Electron*. p 276-288
7. *A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters*. J. Rodriguez M. Rivera J. W. Kolar P. W. Wheeler. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 59, No. 1, pp. 58-70, January 2012.
8. Wheeler PW, Rodriguez J, Clare JC, Empringham L, Weinstein A (2002) *Matrix converters: a technology review*. *IEEE Trans Ind Electron* 49(2):276–288
9. Oyama J, Xia X, Higuchi T, Yamada E (1997) *Displacement angle control of matrix converter*. In: *Proceedings of IEEE power electronics specialists conference, PESC'97*, St. Louise, US, p 1033–1039
10. L. Zhang, C. Watthanasarn, and W. Shepherd, "Control of AC-AC matrix converters for unbalanced and/or distorted supply voltage," in *Proc. 32nd Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2001, vol. 2, p. 1108–1113.
11. G. Roy and G.-E. April, "Cycloconverter operation under a new scalar control algorithm" in *Proc. 20th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 1989, vol. 1, p. 368–375.
12. L. Huber and D. Borojevic, "Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 6, p. 1234–1246, Nov. 1995.

13. *PREDICTIVE CONTROL OF POWER CONVERTERS AND ELECTRICAL DRIVES*. Jose Rodriguez and Patricio Cortes Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Valparaiso, Chile. 2012, John Wiley & Sons, Ltd
14. M. Rivera, R. Vargas, J. Espinoza, and J. Rodriguez, “*Behavior of the predictive DTC based matrix converter under unbalanced AC-supply,*” in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Sep. 2007, p. 202–207.
15. Application Characteristics of an Experimental RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) Module. E. R. Motto, J. F. Donlon, M. Tabata, H. Takahashi, Y. Yu, G. Majumdar. Powerex Incorporated, Youngwood, Pennsylvania, USA and Mitsubishi Electric Power Semiconductor Device Works, Fukuoka, Japan 2004 IEEE.
16. *Predictive Current Control of an Induction Machine Fed by a Matrix Converter With Reactive Power Control*. René Vargas, Student Member, IEEE, José Rodríguez, Senior Member, IEEE, Ulrich Ammann, Member, IEEE, and Patrick W. Wheeler, Member, IEEE IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 12, DECEMBER 2008.
17. *Predictive Direct Torque and Flux Control of an Induction Motor Drive fed by a Direct Matrix Converter with Reactive Power Minimization*. Lamouchi Zakaria and Kamel Barra Department of Electrical Engineering Larbi Ben M'hidi university. Oum El Bouaghi, 04000. Algeria 2013 IEEE.
18. *Predictive Torque and Flux Control of an Induction Machine fed by an Indirect Matrix Converter*. J. Rodriguez, J. Kolar, J. Espinoza, M. Rivera, C. Rojas Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María. 2010 IEEE.
19. *Auto-Tuning the Cost Function Weight Factors in a Model Predictive Controller for a Matrix Converter VAR Compensator*. Mohammad B. Shadmand, Robert Balog, Texas A&M University, 2015.
20. An Overview of Facts Devices used for Reactive Power Compensation Techniques. Aishvarya Narain, S. K. Srivastava, Department of Electrical Engineering Madan Mohan Malviya University of Technology Gorakhpur, UP, India. IJERT December-2015.
21. *System Studies for Grid Enhancement – Example TCSC*, Siemens AG 2003.
22. Balanced Current Control Strategy for Current Source Rectifier Stage of Indirect Matrix Converter under Unbalanced Grid Voltage Conditions. Yeongsu Bak, June-Seok Lee, Kyo-Beum Lee. Special Issue Microgrids 2016 m.
23. *Reactive Power Compensation using a Matrix Converter*. Nathalie Marie-Anna Holtsmark, Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering. 2010.

24. *Introductory Circuit Analysis*, Robert L. Boylestad; 1981
25. G. Svinkunas, K. Medvedev. *Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net* // *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija,

Priedai

1. Priedas. Galimos MC keitiklio jungiklių konfigurācijas

#	SAa	SBa	SCa	SAb	SBb	SCb	SAc	SBc	SCc
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	1	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	1	0
6	0	0	1	0	1	0	1	0	0
7	1	0	0	0	0	1	0	0	1
8	0	1	0	0	0	1	0	0	1
9	0	1	0	1	0	0	1	0	0
10	0	0	1	1	0	0	1	0	0
11	0	0	1	0	1	0	0	1	0
12	1	0	0	0	1	0	0	1	0
13	0	0	1	1	0	0	0	0	1
14	0	0	1	0	1	0	0	0	1
15	1	0	0	0	1	0	1	0	0
16	1	0	0	0	0	1	1	0	0
17	0	1	0	0	0	1	0	1	0
18	0	1	0	1	0	0	0	1	0
19	0	0	1	0	0	1	1	0	0
20	0	0	1	0	0	1	0	1	0
21	1	0	0	1	0	0	0	1	0
22	1	0	0	1	0	0	0	0	1
23	0	1	0	0	1	0	0	0	1
24	0	1	0	0	1	0	1	0	0
25	1	0	0	1	0	0	1	0	0
26	0	1	0	0	1	0	0	1	0
27	0	0	1	0	0	1	0	0	1