



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Regeneracinių AC pavarų palyginamasis tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Airidas Valiulis**

Projekto autorius

**Doc. dr. Gytis Petrauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

## **Regeneracinių AC pavarų palyginamasis tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Airidas Valiulis**

Projekto autorius

**Doc. dr. Gytis Petrauskas**

Vadovas

**Lekt. Dr. Vytautas Gargasas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Airidas Valiulis

## **Regeneracinių AC pavarų palyginamasis tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad: 1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektualinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų; 2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;

3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (usi);  
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Airidas Valiulis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Valiulis, Airidas. Regeneracinių AC pavarų palyginamasis tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Gytis Petrauskas: Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: netiesinio jungimo matricinė pavara, retinta matricinė pavara, labai retinta matricinė pavara.

Kaunas, 2023. 47 p.

### **Santrauka**

Matriciniai galios keitikliai yra valdomų puslaidininkinių jungiklių masyvas jungiantis trifazį šaltinį su trifaze apkrova. Matricinės pavaros gali užtikrinti dvikryptį galios srautą ir valdyti išėjimo bangos formą bei grąžinti energiją atgal į tinklą, kai pavara stabdoma. Dėl šių savybių dėmesys skiriamas dvikryptėms matricinėms pavaroms. Atsižvelgiant į matricinių pavarų galimybes, šiame darbe atliktas netiesės, retintos ir labai retintos matricinių pavarų energetinių charakteristikų tyrimas, kai jos veikia regeneraciniu darbo režimu.

Valiulis, Airidas. Comparative Study of Regenerative AC Drives. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Gytis Petrauskas; Faculty of Electrical and Electronics, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: indirect matrix drive, sparse matrix drive, very sparse matrix drive.

Kaunas, 2023. 47.

### **Summary**

Matrix power converters are an array of controlled semiconductor switches that connect a three-phase source to a three-phase load. Matrix drives can provide bidirectional power flow, control the output waveform, and feed power back to the grid when the drive is decelerated. These features lead to the focus on bidirectional matrix drives. Considering the possibilities of matrix drives, this work has carried out a study of the energy characteristics of indirect, sparse and very sparse matrix drives when they operate in the regenerative working mode.

## Turinys

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Paveikslų sąrašas .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>Įvadas.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1. Regeneracinių kintamos įtampos pavarų modifikacijos.....</b>                                 | <b>10</b> |
| 1.1. Struktūra ir scheminiai sprendimai.....   | 12        |
| 1.1.1. Netiesioginė matricinė pavara .....   | 14        |
| 1.1.2. Retinta matricinė pavara (SMC).....   | 17        |
| 1.1.3. Labai Retinta matricinė pavara (VSMC).....  | 18        |
| 1.2. Regeneracinių pavarų valdymo strategijos.....   | 19        |
| 1.2.1. Impulso pločio moduliacija nešiklio pagrindu .....  | 20        |
| 1.2.2. Erdvės vektoriaraus impulso pločio moduliacija.....   | 21        |
| <b>2. Parengtinis tyrimas .....</b>  | <b>22</b> |
| 2.1. Elektros energijos grąžinimo į tinklą sąlygų tyrimas .....                                    | 22        |
| <b>3. Pavarų energetinių charakteristikų, prijungimo prie elektros tinklo taške, tyrimas .....</b> | <b>26</b> |
| 3.1. Netiesioginės matricinės pavaros energetinės charakteristikos.....                            | 27        |
| 3.2. Retintos netiesioginės matricinės pavaros energetinės charakteristikos. ....                  | 33        |
| 3.3. Labai retintos matricinės pavaros energetinės charakteristikos .....                          | 37        |
| <b>Išvados .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>Literatūros sąrašas .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>Priedai.....</b>  | <b>48</b> |
| 1 Priedas. Netiesioginio jungimo matricinės pavaros modelis.....                                   | 48        |
| 2 Priedas. Retintos matricinės pavaros modelis .....   | 49        |
| 3 Priedas. Labai retintos matricinės pavaros modelis .....   | 50        |

## Paveikslų sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 pav.</b> Trifazis pilno tilto dažnio keitiklis su tarpine nuolatinės srovės grandimi.....                               | 10 |
| <b>2 pav.</b> Dvikrypčiai IGBT tipo jungikliai .....   | 12 |
| <b>3 pav.</b> Matricinių pavarų klasifikacija.....   | 13 |
| <b>4 pav.</b> Netiesioginės matricinės pavaros (IMC) topologija.....   | 16 |
| <b>5 pav.</b> SMC pavaros topologija.....  | 17 |
| <b>6 pav.</b> VSMC pavaros topologija.....   | 18 |
| <b>7 pav.</b> Matlab simulink modelis, kai pavarą imituojanti grandies dalis generuoja stačiakampės formos signalą.....      | 22 |
| <b>8 pav.</b> Aktyvios ir Reaktyvios galios priklausomybė nuo fazinės įtampos .....  | 23 |
| <b>9 pav.</b> Aktyvios ir Reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų .....             | 24 |
| <b>10 pav.</b> Suminio šalutinių harmonikų iškraipymo priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų.....    | 25 |
| <b>11 pav.</b> IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio. ....                              | 28 |
| <b>12 pav.</b> IMC pavaros suminio šalutinių harmonikų iškraipymo priklausomybė nuo impulso pločio. ....                     | 29 |
| <b>13 pav.</b> IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento. ....                               | 30 |
| <b>14 pav.</b> IMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento. ....   | 31 |
| <b>15 pav.</b> IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų..... | 31 |
| <b>16 pav.</b> IMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų.....                           | 32 |
| <b>17 pav.</b> SMC pavaros Aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio. ....                              | 33 |
| <b>18 pav.</b> SMC pavaros THD priklausomybė nuo impulso pločio. ....  | 34 |
| <b>19 pav.</b> SMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento.....                                | 35 |
| <b>20 pav.</b> SMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento. ....   | 36 |
| <b>21 pav.</b> SMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.....          | 36 |
| <b>22 pav.</b> SMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.....                                    | 37 |
| <b>23 pav.</b> VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio. ....                             | 38 |
| <b>24 pav.</b> VSMC pavaros THD priklausomybė nuo impulso pločio. ....   | 39 |
| <b>25 pav.</b> VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento.....                               | 39 |
| <b>26 pav.</b> VSMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento.....   | 40 |
| <b>27 pav.</b> VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.....         | 41 |
| <b>28 pav.</b> VSMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.....                                   | 42 |

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

AC – kintama elektros srovė;

DC – nuolatinė elektros srovė;

IMC – netiesinio jungimo matricinė pavara (angl. *indirect matrix converter*)

MC – matricinė pavara (angl. *matrix converter*)

PW – impulso plotis;

PWM – impulso pločio moduliacija (angl. *pulse width modulation*);

SMC – retinta matricinė pavara (angl. *sparse matrix converter*)

THD – suminis harmoninis iškraipymas (angl. *total harmonic distortion*);

VSMC – labai retinta matricinė pavara (angl. *very sparse matrix converter*)



## Įvadas

Elektros energijos konvertavimo sistemos su nuolatine įtampos ar srovės grandimi dažniausiai naudojamos kintamos srovės dažnio ar amplitudės valdymui, pavyzdžiui, kintamo pavaros greičio valdymui. Pavaros su įtampos nuolatine jungtimi atveju tinklo jungtis paprasčiausiu atveju gali būti įgyvendinta diodiniu tilteliu. Trūkumai yra santykinai dideli tinklo iškraipymai, dideli reaktyviosios galios reikalavimai ir vienos krypties energijos srautas. Alternatyva yra inovatyvios matricinės pavaros su dvikrypčiu energijos srautu, kuris suteikia galimybę gražinti energiją atgal į tinklą kai pavara yra stabdoma. Šių sistemų fizinis pagrindas yra pastovi momentinė galia, kurią suteikia simetriška trifazė įtampos ir srovės sistema [1], [2]. MC dažnai vertinama kaip ateities keitiklių koncepcija, skirta įvairioms reikmėms, pradedant mobiliaisiais maitinimo šaltiniais ir baigiant atsinaujinančios energijos gamybos sistemomis [3]. Matricinės pavaros gali užtikrinti dvikryptį galios srautą ir puikiai valdyti išėjimo bangos formą, o tai gali būti naudinga sprendžiant energijos kokybės problemas, tokias kaip reaktyvioji galia ir suminės šalutinės harmonikos bei gražinti energiją atgal į tinklą, kai pavara stabdoma. Dėl šių savybių dėmesys skiriamas dvikryptėms matricinėms kintamo greičio pavaroms. Atsižvelgiant į matricinių pavarų galimybes, šiame darbe atliktas netiesinio jungimo matricinių pavarų topologijų energetinių charakteristikų tyrimas, kai jos veikia generatoriniu darbo režimu.

**Darbo tikslas** – ištirti procesus inovatyviose regeneracinėse pavarose, kai pavara yra stabdymo režime.

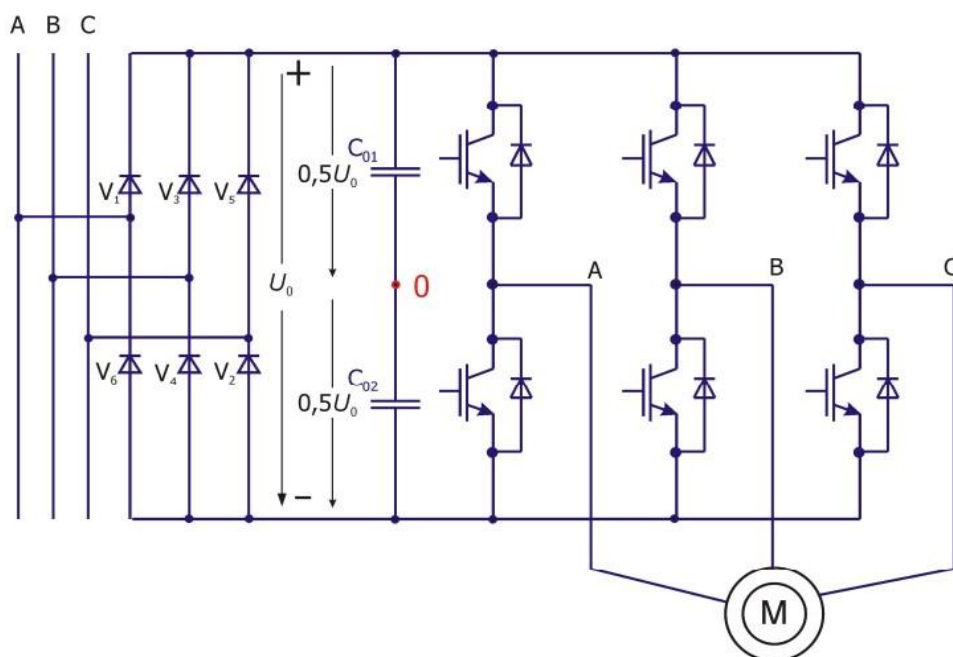
### **Darbo uždaviniai:**

1. sukurti supaprastinę pavara ir tinklą imituojantį modelį bei išanalizuoti elektros energijos gražinimo į tinklą sąlygas;
2. sudaryti trijų pagrindinių netiesioginių matricinių pavarų topologijų modelius ir modeliavimo būdu ištirti lygintuvo impulso pločio įtaką pavarų energetinėms charakteristikoms.
3. modeliavimo būdu ištirti variklį veikiančio jėgos momento įtaką energetinėms charakteristikoms;
4. modeliavimo būdu ištirti kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų įtaką energetinėms charakteristikoms.

## 1. Regeneracinių kintamos įtampos pavarų modifikacijos

Galios keitiklių sistemos su įtampos arba srovės nuolatine jungtimi šiais laikais dažniausiai naudojamos galiai konvertuoti iš trifazės tinklo į trifazę apkrovą su savavališka įtampos amplitude ir dažniu, kaip reikalaujama, pavyzdžiui, kintamo greičio pavaromis. Pavaros su nuolatinės įtampos jungtimi gali būti įgyvendinta paprasčiausiu diodiniu tilteliu [1]. Standartiniame 6 impulsų lygintuvui naudojami 6 diodai (1 pav.). Kondensatoriaus pulsavimo srovė priklauso nuo nuolatinės srovės jungties induktoriaus vertės, elektros tinklo trumpojo jungimo pajėgumo ir keitiklio perjungimo dažnio bei išėjimo apkrovos. Jei nėra nuolatinės srovės jungties induktoriaus, nuolatinės srovės jungties kondensatoriai gali atlaikyti santykinai dideles bangavimo sroves, dėl kurių gali padidėti savaiminis įkaitimas. Dėl savaiminio įkaitimo, be aukštos aplinkos temperatūros, kondensatorius gali tapti silpniausia numatomos dažninės pavaros veikimo laiko grandimi ir yra svarbus taikymo aspektas. Ši pavara neturi dvikrypčio energijos srauto todėl negali gražinti energiją atgal į tinklą. [4]

Kondensatoriai plačiai naudojami nuolatinės srovės jungtims AC–AC pavarose, siekiant subalansuoti momentinį galios skirtumą tarp įvesties šaltinio ir išėjimo apkrovos bei sumažinti nuolatinės srovės jungties įtampos pokytį. Kai kuriose programose jie taip pat naudojami siekiant suteikti pakankamai energijos per sulaikymo laiką. Galios elektronikos keitikliai ir inverteriai taip pat yra plačiai naudojami pavarose, siekiant generuoti kintamą dažnį ir įtampą. Pavarų (1 pav.) galios keitimo mazgas susideda iš lygintuvo (AC–DC) tarpinės nuolatinės srovės grandies ir inverterio (DC–AC). Galios elektronikos keitikliai dažnai naudojami variklio greičiui reguliuoti įvairiose buitinėse, akademinėse ar pramonės srityse. Išskyrus pagrindines galimybes, skirtingoms programoms reikia skirtingų funkcijų [4]. Pavyzdžiui, transporto priemonės įkroviklio sistema turi būti kompaktiška ir mažesnė, o saulės energijos generavimo dvikryptis ryšys labiau rūpinasi stabilumu ir veikimo patikimumu. Šie specifiniai taikomųjų programų reikalavimai turi įtakos keitiklių topologijų raidai įvairiomis kryptimis. Skirtingos pavarų topologijos lemia skirtingą sudėtingumo lygį ir kokybę. Todėl topologijos pasirinkimas priklauso nuo užduoties pobūdžio, reikalavimų ir kainos. [5].



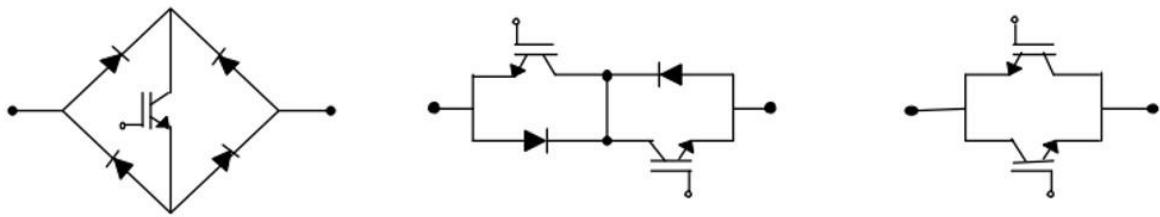
1 pav. Trifazis pilno tilto dažnio keitiklis su tarpine nuolatinės srovės grandimi.

Modelyje (1 pav.) parodyta įprasta trifazio variklio pavaros sistema su galios elektronikos sistema, kurioje diodinis lygintuvas iš pradžių pakeičia tinklo įtampą į fiksuotą nuolatinės srovės įtampą, o ji paverčiama valdomos amplitudės arba dažnio įtampa naudojant trifazį inverterį [4]. Kondensatoriai yra jautrūs šiluminiams ir elektriniams įtempiams, o jų pagrindinis trūkumas yra ribota eksploataavimo trukmė ir didelis gedimo greitis. Kaip pranešama, apie 30 % keitiklių gedimų sukelia kondensatorių degradacija, todėl jie laikomi silpniausia galios elektroninių sistemų grandimi. Atsižvelgiant į tai, kondensatorių gedimo būklės stebėjimas ir techninės priežiūros planavimas prieš įvykstant rimtam gedimui ar gedimui turi didelę reikšmę užtikrinant patikimą nuolatinės srovės ryšio programų veikimą ir užkertant kelią galimiems katastrofiniams gedimams. [6]

Siekiant sumažinti linijos srovės harmonikas, reikia naudoti pasyvius arba aktyvius harmonikų mažinimo būdus, kad būtų įvykdyti tarptautiniai reglamentai. Palyginti su trifaziu diodiniu lygintuvu su mažesniu nuolatinės srovės jungties kondensatoriumi, nuolatinės srovės grandinės įtampą galima reguliuoti geriau naudojant nuolatinės srovės jungties kondensatorius. Be to, trifazio diodo lygintuvo nuolatinės srovės jungties įtampos pulsacija yra daug mažesnė nei vienfazio diodo lygintuvo. Jei pageidaujamas dvikryptis galios srautas, pirmajai pakopai galima pritaikyti impulsų pločio moduliacijos (PWM) lygintuvą, kuris gali imti sinusines sroves iš kintamosios srovės šaltinio. Paprastai dviejų pakopų keitikliuose naudojamas nuolatinės srovės jungties energijos kaupimo elementas turi palyginti didelį fizinį tūrį, palyginti su visu keitiklio tūriu, todėl galios tankis yra mažas. Dar svarbiau, kad elektrolitiniai kondensatoriai pasižymi dideliu gedimų dažniu, o tai sumažina keitiklio tarnavimo laiką. Elektrolitiniai kondensatoriai yra labai jautrūs temperatūrai, todėl jų gedimų dažnis gerokai padidėja esant aukštesnei temperatūrai [7].

Matricinės pavaros turi keletą privalumų, palyginti su tradicinėmis lygintuvo – inverterio, valdomo dažnio pavaromis. Matricinės pavaros suteikia sinusoidines įvesties ir išvesties bangų formas su minimaliomis aukštesnės eilės harmonikomis ir be subharmonikų. Matricinių pavarų įėjimo galios koeficientą galima visiškai valdyti. Taip pat, matricinėms pavaroms būdinga dvikrypčio energijos srauto galimybė. Paskutinis, bet ne mažiau svarbus dalykas yra tai, kad jis turi minimalius energijos kaupimo reikalavimus, o tai leidžia atsikratyti didelių gabaritų ir ribotą eksploataavimo laiką energiją taupančių kondensatorių. Tačiau, matricinė pavara taip pat turi tam tikrų trūkumų. Visų pirma, jo maksimalus įvesties išėjimo įtampos perdavimo koeficientas ribojamas iki 87 % sinusinės įvesties ir išvesties bangų formoms. Tam reikia daugiau puslaidininkinių įtaisų nei įprastam AC–AC netiesioginio maitinimo dažnio keitikliui, nes nėra monolitinių dvikrypčių jungiklių, todėl kiekvienam dvikrypčiui jungikliui turi būti naudojami atskiri vienakrypčiai įtaisai, išdėstyti įvairiai. Galiausiai jis ypač jautrus įėjimo įtampos sistemos trikdžiams. [8]

Viena iš patraukliausių matricinių pavarų savybių yra dvikryptis energijos srautas. Dvikryptės matricinės pavaros naudoja atitinkamas vienakrypčių jungiklių topologijas arba dvikrypčius jungiklius. Pirmoji pagrindinė problema yra susijusi su dviejų krypčių jungiklių realizavimu. Pagal apibrėžimą, dvikryptis jungiklis gali vesti sroves ir blokuoti abiejų poliškumo įtampą, priklausomai nuo valdymo faktinio signalo. Dvikrypčio jungiklio topologija yra įgyvendinta derinant įprastus vienakrypčius puslaidininkinius įtaisus (2 pav.). Kita problema, glaudžiai susijusi su dviejų krypčių jungiklių įgyvendinimu, kuri buvo pagrindinė kliūtis pramoninei matricinio keitiklio sėkmei, yra komutavimo problema. Komutavimo problema iš esmės kyla dėl to, kad matricos keitikliuose nėra statinių laisvos eigos takų. Dėl to tampa sudėtinga užduotis saugiai komutuoti srovę iš vieno dvikrypčio jungiklio į kitą, nes reikia ypač atsargiai nustatyti jungiklių komandų signalų laiką ir sinchronizuoti [7].



2 pav. Dvikrypčiai IGBT tipo jungikliai

Siekiant sumažinti nuolatinės srovės grandinės įtampos pulsaciją, DC arba AC induktorius naudojamas kaip pasyvus filtras. Kuriant variklio pavaros sistemą, atsižvelgiama į tokius svarbius aspektus kaip kompaktiškumas, maža kaina, mažas bendras harmoninis iškreipimas (THD), geresnis našumas ir ilgas tarnavimo laikas. Kintamo dažnio pavaroje, siekiant reguliuoti nuolatinės srovės jungties įtampą ir apsaugoti galios modulį, paprastai naudojamas nuolatinės srovės jungties kondensatorius. Šis elementas padeda sumažinti išėjimo įtampos iškreipimą, sumažinamas energijos kiekis, kuris išsklaidomas kaip šiluma, taip pagerinant keitiklio efektyvumą. Tačiau šie elementai sukuria didelę įvesties srovės harmoniką ir iškreipimus, taip pat brangus komponentas, kurio eksploataavimo laikas yra ribotas [4]. Be topologinių skirtumų, naudojami puslaidininkinių jungiklių vidinė struktūra, moduliavimas ir perjungimo būdai yra svarbūs veiksniai, lemiantys keitiklių efektyvumą. Pramonėje įprastinių izoliuotų vartų dvipolio tranzistoriaus (IGBT) struktūra vis dar yra vienas iš labiausiai pageidaujamų perjungimo įrenginių [9].

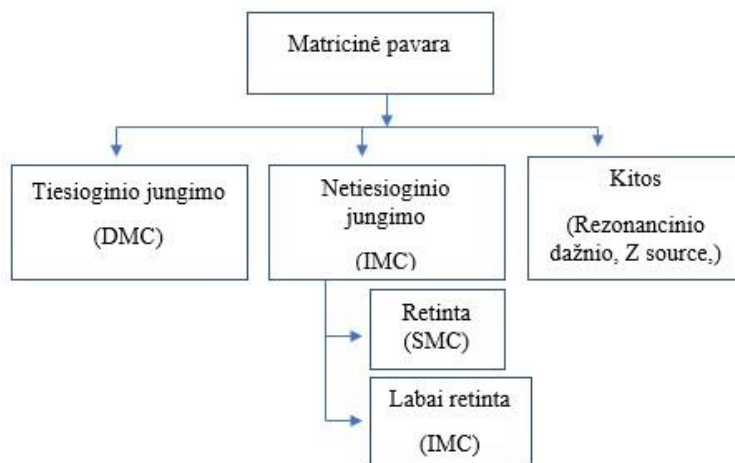
Tradicinėje matricinių pavarų (MC) klasifikacijoje naudojamos trys subkategorijos: pavaros su nuolatinės srovės jungties energijos kaupimu, MC ir tarpinė hibridinių MC kategorija. Priverstinė komutuojama kintamosios srovės pavara laikoma MC, jeigu nereikia tarpinio energijos kaupimo maitinimo grandinėje kaip esminio funkcinio elemento. Šiame darbe pagrindinis dėmesys skiriamas regeneracines savybes turinčioms matricinėms pavaroms. Nagrinėjamos pavarų topologijos yra visiškai kietojo kūno įrenginiai su mažais pasyviais elementais, kurie yra pritaikyti aukšto dažnio srovės ar įtampos komponentams filtruoti. Matricinės pavaros dar gali būti suskirstytos pagal valdymą į dvi grupes: kai išėjimo dažnis yra konstanta ir, kai išėjimo dažnis kinta. Pirmoji grupė apima matricų ir matricos reaktyvinių kapoto signalo pavarų topologijas. Antroji grupė apima pavaras pagrįstas dažnio valdymu, matricines pavaras, atsižvelgiant į tiesiogines ir netiesiogines (netiesioginės matricinės pavaros, retintos matricos pavaros) taip pat topologija, leidžianti padidinti išėjimo įtampą. Literatūros apžvalgoje pateikiamos įvairios pavarų topologijos, palyginamos ir įvertinamos pagal išėjimo įtampos ir fazės valdymą, įėjimo galios koeficiento valdymą ir komponentų skaičių. [6]

### 1.1. Struktūra ir scheminiai sprendimai

Matricinės pavaros yra valdomų puslaidininkinių jungiklių masyvas, tiesiogiai jungiantis trifazį šaltinį su trifaze apkrova. Šio tipo pavaros turi keletą patrauklių savybių, kurios buvo ištirtos per pastaruosius du dešimtmečius. Per pastaruosius kelerius metus buvo stebimas mokslinio darbo padidėjimas, todėl šio topologijos priartėjo prie pramoninio pritaikymo [10].

Matricinės pavaros yra dvikryptės, leidžiančios konvertuoti AC–AC energiją be tarpinio energijos kaupimo, atskleidžiančios vieną iš svarbiausių matricinių pavarų pranašumų, palyginti su

tradicinėmis atgalinės įtampos šaltinio pavaromis. Be to, dėl mažesnių filtravimo reikalavimų matricinės pavaros topologijos yra daugiausia priklausoma nuo galios puslaidininkių, ir dėl to matricinės pavaros gali pasiekti neprilygstamą galios tankį, o tai yra patraukli savybė tokioms reikmėms kaip aviacija, aeronautika, karinė, elektrinė trauka ir platinimas brangių nekilnojamojo turto srityse [11].



**3 pav.** Matricinių pavarų klasifikacija

Aukščiau pavaizduotos pavaros (3 pav.) be nuolatinės srovės energijos kaupimo elementų prisideda prie mažesnių sąnaudų, mažesnių matmenų, didesnio patikimumo ir ilgesnio pavaros eksploatavimo laiko, taip pat prie ištisų sistemų. Pavarų be nuolatinės srovės jungties dažnai laikomi ateities koncepcija tam tikroms reikmėms, tačiau, nepaisant intensyvių kelis dešimtmečius trukusių tyrimų, iki šiol jie pasiekė tik mažą pramonės skvarbą. To priežastis, be techninių aspektų (mažas tam skirtų maitinimo jungiklių skaičius), gali būti sudėtingesnė moduliacija, palyginti su nuolatinės srovės grandinės pavaromis [12]. Tarp labiausiai pageidaujamų galios dažnio keitiklių savybių yra šios:

- 1) paprasta ir kompaktiška maitinimo grandinė;
- 2) savavališkos amplitudės apkrovos įtampos generavimas ir dažnis;
- 3) sinusinės įėjimo ir išėjimo srovės;
- 4) veikimas su vienetu galios koeficientu bet kuriai apkrovai; 5) regeneravimo galimybė [10].

Šias idealias charakteristikas gali įvykdyti matriciniai keitikliai, ir tai yra didžiulio susidomėjimo topologijų priežastis. Matricinis keitiklis yra priverstinis komutuojamas keitiklis, kuris naudoja valdomų dvikrypčių jungiklių masyvą kaip pagrindinius maitinimo elementus, kad sukurtų kintamos išėjimo įtampos sistemą su neribotu dažniu. Jame nėra nuolatinės srovės grandinės ir nereikia didelių energijos kaupimo elementų. Pagrindinis matricinio keitiklio elementas yra visiškai valdomas keturių kvadrantų dvikryptis jungiklis, leidžiantis dirbti aukštu dažniu [10].

Nepaisant visų šių patrauklių savybių matricinės pavaros dar nesulaukė daug dėmesio pramonėje dėl daugybės neišspręstų problemų. Svarbiausia problema yra sumažintas įtampos perdavimo

koeficientas, kuris apibrėžiamas kaip santykis tarp išėjimo įtampos ir įėjimo įtampos ir yra apribotas iki 0,866, kai naudojamas tiesinis moduliavimas [13]. Kita svarbi problema yra MC pavaros stabilumas, padidėjus maksimaliai įtampai [14]. Vienas iš siūlomų būdų padidinti išėjimo galios ribą yra pridėti lygiagretų slopinimo rezistorių prie įvesties filtro induktyvumo. Šiuo atžvilgiu analitiniai ir skaitmeniniai metodai buvo naudojami stabilumo ribinėms lygtims nustatyti, tiesinant sistemos būsenų lygtis. Kitas populiarus būdas yra naudoti skaitmeninį žemųjų dažnių filtrą, išfiltruojant išmatuotą įėjimo įtampą. Filtruotos įėjimo įtampos naudojamos apskaičiuojant moduliavimo procesui reikalingų perjungimo konfigūracijų darbo ciklus [15].

Viena iš pagrindinių MC valdymo problemų yra srovės komutavimas. Netiesioginėse matricinėse pavarose naudojami jungikliai nėra apsaugoti klasikiniame galios keitikliui būdingu nuolatinės srovės jungties kondensatoriumi. Tačiau kondensatorius gali būti naudojamas siekiant apsaugoti jungiklius. Kai matricinės pavaros topologijoje kondensatorius nėra naudojamas srovės komutaciją tarp jungiklių sunkiau pasiekti. Svarstant matricinių pavarų komutavimo strategijas, reikia laikytis dviejų bendrų taisyklių:

1. komutacija neturėtų sukelti trumpojo jungimo tarp dviejų įėjimo fazių, nes dėl to kylanti didelė cirkuliacinė srovė gali sugadinti jungiklius;
2. komutavimas neturėtų sukelti išėjimo srovės pertrūkių, nes dėl to atsirandantis viršįtampis gali sugadinti jungiklius.

Jungiklius turi būti įmanoma įjungti ir išjungti taip, kad būtų išvengta trumpųjų jungimų ir staigių srovės nutrūkimų. Komutavimas visą laiką turi būti aktyviai kontroliuojamas, laikantis dviejų aukščiau paminėtų pagrindinių taisyklių [16].

### **1.1.1. Netiesioginė matricinė pavara**

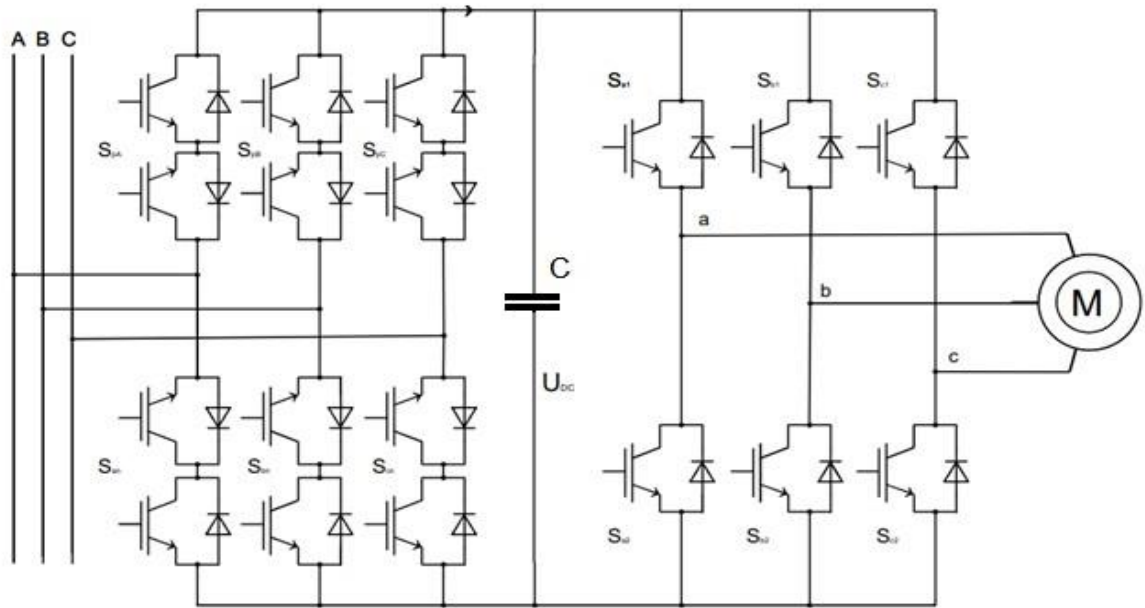
Matricinės pavaros skirstomos į dvi pagrindines grupes: pavaras su energijos kaupimu arba pavaros turinčios nuolatinės srovės grandinę ir pavaras kurios, nuolatinės srovės grandinės neturi. Pirmoje grupėje yra srovės ir įtampos šaltinių topologijos, su kuriomis galima gauti kintamosios srovės konvertavimą, atsižvelgiant į talpinę arba indukcinę nuolatinės srovės jungtį. Pavaros turinčios nuolatinės srovės grandį tarp lygintuvo ir inverterio yra vadinamos netiesioginės matricos pavaromis (IMC), pavaros šios grandinės neturinčios yra vadinamos tiesioginės matricos pavaromis (DMC).

DMC yra pagrįstas dviejų krypčių jungikliais ir pakeičia lygintuvą, keitiklį ir energijos kaupimo etapus tik vienoje pakopoje. Tai yra tinkamiausias pasirinkimas, kai svarbūs veiksniai yra dydis ir būtinybė pašalinti nuolatinės srovės pakopą. Tačiau didžiausias šios technologijos trūkumas yra didelis valdymo sudėtingumas. Netiesioginio jungimo pavaros siūlo tą patį našumą kaip ir tiesioginio jungimo, pvz., keturių kvadrantų veikimas, vieneto galios koeficientas, sinusinės bangos formos su kintamu dažniu ir amplitudė variklio ir regeneracijos veikimo metu. Pagrindinis netiesioginio jungimo pavarų pranašumas yra, kad šio tipo pavarų valdymas yra paprastesnis ir mažiau sudėtingas, palyginti su DMC, todėl sistema taip pat gali saugiai komutuoti be ypatingų jutiklių, kaip reikalaujama DMC. Kitas privalumas IMC palyginant su DMC, yra tai, kad nereikia papildomos apsaugos nuo viršįtampio grandinės. Be to, dėl technologinės pažangos, galios keitiklių valdymui ir moduliavimui naudojami greiti ir galingi mikroprocesoriai, o klasikiniai metodai, kilę iš analoginės elektronikos, pvz., PWM arba histerezė, dabar yra skaitmeniniu būdu emuliuojamos grandinės, įgyvendinamos su komparatoriais ir skaitikliais, pagal programinę įrangą. Tuo pačiu metu dėmesys naujų valdymo metodų kūrimui išaugo dėl didelės šių mikroprocesorių apdorojimo galios, o tai yra nuspėjamojo valdymo atvejis, kai sistemos modelis naudoja būsimą kintamųjų elgseną numatant iš

anksto nustatytą laiko horizontą ir parenka optimalų veiksmą pagal sąnaudų funkcijos sumažinimą. IMC pavaros struktūros pasižymi tuo, kad jos koncepcijos yra labai intuityvios ir lengvai suprantamos, jos gali būti pritaikytos įvairioms sistemoms bei gali apimti kelias sistemas [17].

Netiesioginė matricinė pavara (IMC) yra sukurtas iš tiesioginės matricos keitiklio (DMC), siekiant supaprastinti didelių gabaritų apkabos grandinę. Įtraukdamas keturių kvadrantų srovės šaltinio lygintuvo pakopą ir įtampos šaltinio keitiklio pakopą. IMC taip pat išlaiko patrauklias savybes, tokias kaip dvikryptis energijos srautas, sinusinė įvesties ir išėjimo srovė, valdomas įvesties galios koeficientas, draugiška tinklui. Be to, dvikrypčiai galios įtaisai naudojami tik lygintuvo pakopoje, kad būtų galima moduluoti įvesties sroves, o keitiklio pakopoje nepriimami jokie dvikrypčiai įrenginiai [18]. Panašiai kaip ir srovės šaltinio lygintuvų harmoninė charakteristika, IMC lygintuvo pakopos įėjimo srovėse yra aukšto lygio harmonikų. Šios harmonikos daugiausia koncentruojasi į pagrindinius ir kelis perjungimo dažnio dažnius. Taip yra daugiausia dėl to, kad harmonikas sukuria dvikrypčių galios įrenginių aukšto dažnio perjungimo veiksmai. Todėl žemo dažnio LC filtras su slopinimo varža paprastai yra nustatomas tarp kintamosios srovės tinklo ir IMC lygintuvo pakopos, kad būtų pašalintos aukštos eilės harmonikos ir sumažintas elektromagnetinis triukšas. Be to, tai gali padėti sušvelninti galimus svyravimus pereinamojo proceso metu. Dėl esamo LC filtro ir galimų parametrų neatitikimo sąlygų paprastai yra fazių skirtumas tarp tinklo srovės ir IMC įvesties srovės, todėl susidaro nevieningas tinklo galios koeficientas (GPF). Nors esant tam tikram rezonansiniam dažniui, LC filtro įtaka GPF gali susilpnėti dėl techninės įrangos parametrų optimizavimo aspekto, nes padidėja filtro induktyvumas ir sumažėja filtro talpa, tai gali sukelti rimtus įėjimo įtampos svyravimus ir net pabloginti sistemos stabilumą. Taigi atrodo, kad GPF reguliavimas programinės įrangos projektavimo aspektu sukuriant veiksmingą valdymo strategiją yra geresnis pasirinkimas. IMC valdymo sistema paprastai susideda iš dviejų dalių: viena dalis yra pagrindinė moduliavimo strategija, skirta generuoti impulsų pločio moduliavimo (PWM) užtvairo impulsus galios puslaidininkiams, kita dalis yra išorinės valdymo kilpos su konkrečiais valdymo tikslais, kad būtų gauta atskaita. pirmiau minėti moduliavimo strategijai. IMC įėjimo pusės lygintuvo pakopos moduliavimo metodai paprastai yra skirti įvesties srovių moduliavimui. Pavyzdžiui, srovės erdvės vektoriaus moduliavimo dalis naudojama įvesties srovės vektoriui reguliuoti dvigubo erdvės vektoriaus PWM (DSVPWM). Daugeliu atvejų įėjimo srovės vektoriaus fazės kampas yra užfiksuotas tinklo įtampos vektoriaus fazės kampu esamame moduliavimo algoritme. Vadinasi, dėl anksčiau minėtos srovės fazės paklaidos, kurią sukelia LC filtras, tinklo srovės nesutampa su tinklo įtampa. Tačiau jei šią fazės paklaidą tarp tinklo srovių ir IMC įvesties srovių galima aptikti ir kompensuoti tinkamu metodu, GPF galima netiesiogiai sureguliuoti, kad būtų vienoda [19].

MC iš prigimties yra dvikrypčiai, todėl gali regeneruoti energiją atgal į tinklą iš apkrovos pusės. Tačiau IMC nuolatinės srovės įtampa turi tik teigiamą poliškumą. Kad būtų galima tekėti abipusiai srovės srautas (keturių kvadrantų veikimas), IMC įėjimo tiltelyje reikalingi dvikrypčiai aktyvūs jungikliai. Išėjimo pusėje išėjimo įtampoms formuoti naudojamas klasikinis įtampos šaltinio keitiklis [20]. Įprasta IMC struktūra parodyta 4 paveiksle, kuriame yra šeši dvikrypčiai perjungimo įtaisai (12 vienkrypčių), sudarantys lygintuvą ir šeši vienkrypčiai jungikliai sudarantys inverterį. Ši pavara dar žinoma kaip dviejų pakopų matricinė pavara [21], [22]. Literatūroje buvo pranešta apie keletą IMC topologijų.



**4 pav.** Netiesioginės matricinės pavaros (IMC) topologija.

Netiesioginis matricinis keitiklis teoriškai gaminamas sujungiant tinklo pusės keitiklį, kuris yra atsakingas už srovės lyginimo etapą, su apkrovos pusės keitikliu, kuris yra atsakingas už inversijos etapą. Abi pakopos praktiškai sujungtos nuolatinės srovės magistrale, kurioje nėra elektrolitinio kondensatoriaus arba indukcinio kaupimo elemento. Tačiau šis priklausomai nuo paskirties šis elementas gali būti naudojamas, norint stabilizuoti įtampos svyravimus. Kai energijos saugojimo elementas nėra naudojamas, keitiklis paverčiamas neriboto naudojimo laiko keitikliu. Palyginti su 3 fazių apkrovomis, daugiafazės apkrovos ir ypač pramoninės mašinos yra laikomos mažiau atsparios gedimams, mažiau atsparios sukimo momentams ir galinčios išlaikyti kintamas galios tankio vertes [23].

IMC galima suskirstyti į pirminę ir antrinę stadiją. Pirminė trifazio įvesties maitinimo šaltinio pakopa susideda iš dvylikos IGBT blokų ir yra žinoma kaip srovės šaltinio lygintuvas [24]. Lygintuvo pakopa nuleidžia aukštos kokybės įvesties srovės iš maitinimo šaltinio, šiuo atveju iš elektros tinklo. Lygintuvo pakopos paskirtis yra generuoti sinusinę įėjimo srovę ir teigiamą nuolatinės srovės grandinės įtampą. Lygintuvo pakopa nuosekliai jungia teigiamą įėjimo įtampą su teigiamu poliumi, o neigiamą įtampą su neigiamu polių, nuolatinės srovės grandinės magistralės. Antroji pakopa susideda iš šešių IGBT ir yra panaši į standartinį įtampos šaltinio keitiklį. Remiantis nuolatinės srovės jungties įtampa, kurią lemia dviejų teigiamų linijų įėjimo įtampų segmentas, keitiklio pakopa yra moduluojama taip, kad generuotų pageidaujamo dydžio ir kintamo dažnio trifazę išėjimo įtampą. Įvesties įtampos išmatuojamos ir naudojamos kaip atskaitos vektoriaus kampo pagrindas [16, 17]. IMC taip pat užtikrina gerą įtampos ir dažnio reguliavimą. Paprastai naudojamas nulinės nuolatinės srovės grandinės srovės komutavimas, kai keitiklio pakopa yra moduluojama į laisvosios eigos režimą, o tada lygintuvas komutuoja esant nulinei nuolatinės srovės grandinei. Tai taip pat gali sumažinti aktyviųjų įrenginių skaičių, o aktyviųjų gnybtų grandines bus lengviau įdiegti. Netiesioginio jungimo pavarų įvesties galios koeficientas pablogėja esant žemai įtampai. Gerai žinoma, kad prastas įėjimo galios koeficientas sukelia neigiamą poveikį kintamosios srovės energijos šaltinio panaudojimui, taip pat padidina elektros srovės stiprumą labiau nei būtina. Taikant įprastą erdvės

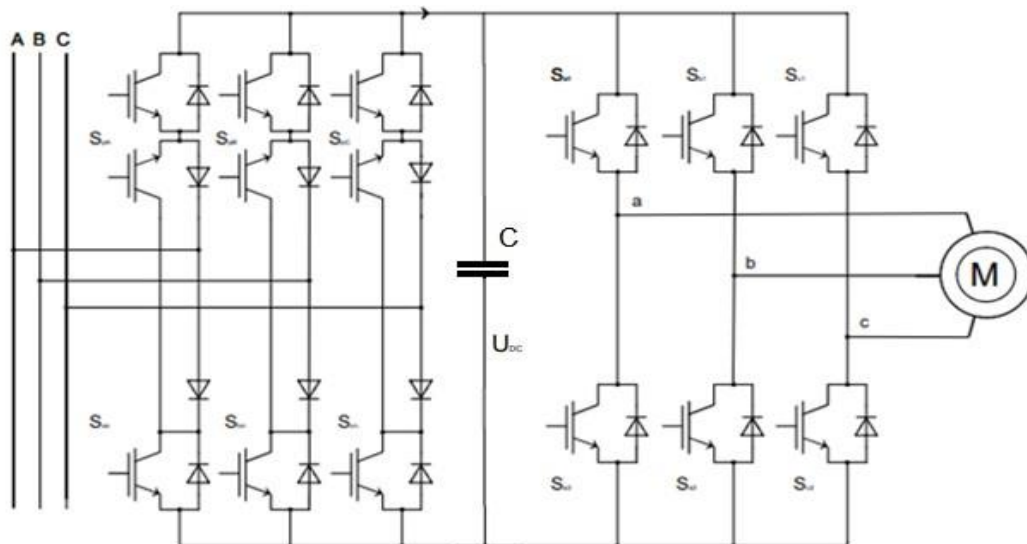


vektorius moduliavimo metodą IMC, įvesties sektoriai ir moduluojamų jungiklių darbo ciklai lygintuvo pakopoje nustatomi pagal įėjimo fazės įtampos dydį ir jos fazės kampą [26].

### 1.1.2. Retinta matricinė pavara (SMC)

Trifazių retintų netiesioginių matricinių pavarų topologijos sukurtos remiantis netiesiogės matricinės pavaros struktūra. Jos gali būti klasifikuojamas pagal jungiklių skaičių; retintos matricos pavara (SMC), labai retintos matricos pavara (VSMC) ir ypač retintos matricos pavara (USMC) [27]. SMC reikalauja generuoti aukščiausios įtampos vertę virtualioje nuolatinės srovės jungtyje, išlaikyti sinusoidinės srovės bangų formas ir vienodą fazinį kampą tarp įtampos ir srovės įvesties pusėje, taip pat sinchronizuoti lygintuvo ir keitiklio jungiklius [28].

Jei darome prielaidą, kad nuolatinės srovės grandinės įtampa visada yra teigiama, galima sukurti supaprastintą IMC tilto atšakos struktūrą, pašalinant viršutinį IGBT iš kiekvieno jungiklio, prijungto prie neigiamos nuolatinės srovės magistralės. Nauja topologija, parodyta 5 paveikslėlyje, vadinama retintos netiesioginės matricos pavara (SMC). Žinoma, po pašalinimo pasiekiamas mažesnis valdymo sudėtingumas ir mažesnės realizavimo pastangos bei sąnaudos [23], [29].



5 pav. SMC pavaros topologija

Dviejų pakopų netiesioginio jungimo kintamos srovės pavaros atmaina (5 pav.), kur nenaudoja nuolatinės srovės kaupimo elementų yra SMC tipo pavara. SMC pašalina daugiau jungiklių lygintuvo stadijoje, palyginti su IMC. IMC ir SMC funkciniu požiūriu yra lygiaverčiai, tačiau jiems būdingos mažesnės realizavimo pastangos ir sumažinamas jungiklių skaičius [30]. Prarastos matricos pavarose inverteris yra naudojamas toks pats kaip ir IMC tipo pavarose, tačiau yra sumažintas lygintuvo tranzistorių skaičius. Inverterio lygmenyje naudojami 3 dvikrypčiai IGBT jungikliai ir 3 vienakrypčiai IGBT tipo jungikliai. Naudojamų IGBT tranzistorių skaičius sumažinamas iki 9 vienetų, tačiau diodų skaičius išlieka nepakitęs [29].

SMC valdymo strategija buvo sukurta trifaziame MC. SMC gali suteikti tokių pranašumų kaip stabilumas prieš didelius trikdžius, greitas dinaminis atsakas ir tinkamumas netiesinėms sistemoms. Įrodyta, kad jis pasižymi geresniu tvirtumu, greitai reaguodamas į trumpalaikį atsaką įvairiomis veikimo sąlygomis. SMC taip pat pasižymi tvirtu elgesiu ir atsparumu elektros sistemos netiesiškumui. Tarp įvairių valdymo strategijų šių MC pavarų histerezės tipo valdymas lieka

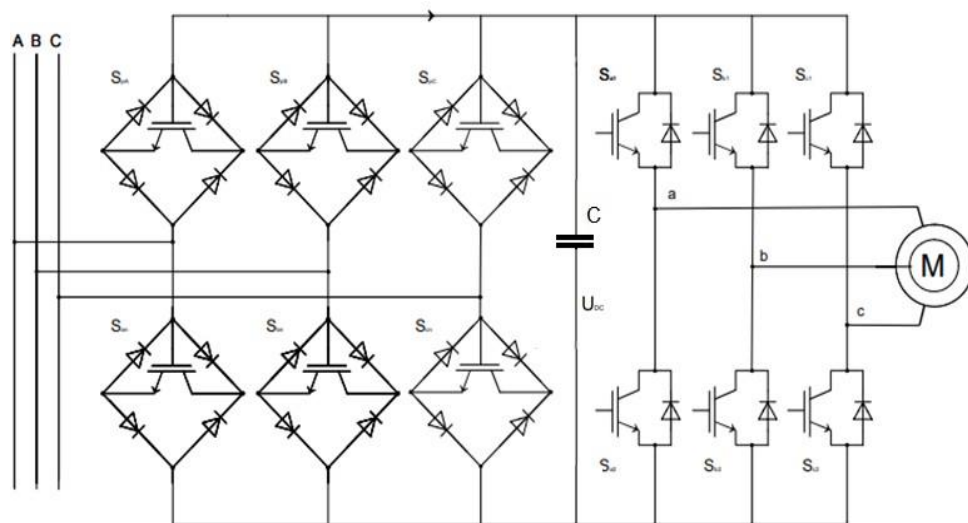
nepakankamai ištirtas. Šiuo metu venturini metodas nesulaukia didelio dėmesio. Tačiau SVM, DTC ir nuspėjamosios kontrolės tyrimai vis dar labai aktyvūs. Nuspėjamasis valdymas atrodo kaip perspektyvus valdymo įrankis dėl savo paprastumo, gero našumo ir lankstumo, įtraukiant papildomus valdymo tikslus ir sistemos apribojimus. Galios keitiklių ir pavarų nuspėjamojo valdymo dariniai gali apimti nuspėjamą srovės valdymą, nuspėjamą įtampos valdymą, nuspėjamą galios [31].

SMC valdymo ir veikimo diapazonas nėra ribojami, nepaisant sumažėjusio vienpolių išjungimo galios puslaidininkių skaičiaus, todėl SMC yra labai įdomi IMC alternatyva pramoninėms reikmėms. Jei pageidaujama vienkryptės PWM lygintuvo sistemos funkcionalumas, tuomet SMC realizavimo pastangas galima sumažinti praleidžiant galios tranzistorius ir kiekvienoje tilto atkarpoje nes jie leidžia nuolatinės srovės grandies srovei tekėti atvirkštiniu būdu. Šis jungiklių pašalinimas apriboja grandinės veikimą iki vienkryptčio galios srauto, o įėjimo įtampos ir pagrindinio įėjimo srovės fazinio poslinkio valdymas yra ribojamas iki  $\pi/6$ , o apkrovos srovės ir apkrovos įtampos pagrindinės fazės poslinkis negali viršyti  $\pi/6$  [32].

### 1.1.3. Labai Retinta matricinė pavara (VSMC)

Įdomus atvejis yra tas, kad nulinės nuolatinės srovės grandinės srovės valdymo schema, IMC perjungimo įtaisų dydis gali būti dar labiau sumažintas iki 12, todėl bus sukurta nauja topologija, kuri yra labiau praretinta MC (VSMC). Nėra jokių funkcionalumo apribojimų. palyginti su DMC ir SMC. Jis turi mažesnius perjungimo nuostolius dėl mažo jungiklių skaičiaus, bet didesnio laidumo nuostolio, nes diodų skaičius yra pakankamai didelis [33].

Topologija susideda iš srovės šaltinio lygintuvo, prijungto prie keturkojo inverterio pakopos per fiktyvią nuolatinės srovės jungtį be jokių saugojimo elementų. Šioje topologijoje pirmąją pakopą sudaro trifazis maitinimo šaltinis ir lygintuvas. Lygintuvo pakopa turi 6 dvikrypčius jungiklius, kurių kiekvienas turi keturis diodus, ir yra išdėstytas kaip priekinio srovės šaltinio lygintuvas. Kiti 6 inverterio pakopos jungikliai turi lygiagrečius diodus galinio įtampos šaltinio pavaros formavimui [34].



6 pav. VSMC pavaros topologija.

Šioje topologijoje (5 pav.) lygintuvo pakopos moduliavimo strategija yra tokia pati, kaip ir įprasti IMC lygintuvo pakopos moduliavimo metodai. Moduliacijos lygintuvo pakopoje tikslas yra sukurti

maksimalią įtampą nuolatinės srovės jungtyje. Be to, norint palaikyti sinusoidinę įėjimo srovę ir vienetinį įvesties galios koeficientą, reikalinga moduliacija. Lygintuvo pakopa sintezuoja teigiamą nuolatinės srovės grandinės įtampą, pasirinkdama perjungimo būseną. Paprastai jis veikia, kai viršutinis ir apatinis jungikliai yra įjungti bet kuriuo momentu. Atitinkamus aktyvius darbo ciklus lygintuvo pakopai galima nustatyti pagal įėjimo fazių sroves ir atitinkamas įėjimo įtampas [34].

## 1.2. Regeneracinių pavarų valdymo strategijos

Netiesioginiai matriciniai keitikliai naudoja sudėtingas impulsų pločio moduliavimo (PWM) schemas, kad pasiektų vienodo galios koeficiento ir sinusinės išėjimo srovės tikslą. Tai yra vienas pagrindinių MC tipo pavarų valdymo būdų [35]. Paprastesnis jungiklių valdymo būdas yra PW valdymas, kuris formuoja stačiakampės formos įtampą, tačiau dėl naudojamos įtampos formos jis turi keletą trūkumų. Patikimesnis srovės komutavimo metodas, kuris atitinka taisykles, naudoja keturių pakopų komutavimo strategiją, pagal kurią galima valdyti srovės tekėjimo per komutavimo elementus kryptį. Norint įgyvendinti šią strategiją, dvikryptis jungiklis turi būti suprojektuotas taip, kad būtų galima valdyti srovės srauto kryptį kiekviename jungiklio elemente. Pastovioje būsenoje abu aktyvaus dvikrypčio jungiklio elemento įrenginiai yra užblokuoti, kad būtų galima abi srovės kryptys. Toliau daroma prielaida, kad apkrovos srovė yra nurodyta kryptimi, o viršutinis dvikryptis jungiklis yra uždarytas. Kai reikalingas komutavimas, srovės kryptis naudojama norint nustatyti, kuris aktyvaus jungiklio įrenginys nelaidus. Apkrovos srovė perduodama į įeinantį įrenginį arba šiuo metu, arba išjungus išeinantį įrenginį. Likęs įrenginys įeinančiame jungiklyje yra įjungtas, kad būtų galima pakeisti srovę. Šis procesas parodytas kaip laiko perjungimo elementas, kuris sukuria dviejų pakopų srovės komutavimo strategiją. Visi šios kategorijos srovės komutavimo būdai priklauso nuo žinių apie išvesties linijos srovės kryptį. Tai gali būti sunku patikimai nustatyti perjungimo galios keitiklyje, ypač esant mažam srovės lygiui didelės galios įrenginiuose, kur tradiciniai srovės jutikliai, yra linkę duoti neapibrėžtus rezultatus. Vienas iš būdų, kuris buvo naudojamas siekiant išvengti šių galimų pavojaus sąlygų, yra sukurti „beveik nulinei“ srovės zonai, kurioje komutacija negali vykti. Tačiau šis metodas sukels valdymo problemų esant mažam srovės lygiui ir paleidžiant. Siekiant išvengti šių srovės matavimo problemų, buvo sukurta dvikrypčio jungiklio įtampos panaudojimo srovės kryptčiai nustatyti. Šis metodas leidžia labai tiksliai nustatyti srovės kryptį be išorinių jutiklių. Dėl tikslumo, pasiekiamo naudojant šį metodą, galima naudoti dviejų pakopų komutavimo strategiją su galutiniais laikotarpiais, kai srovė keičia kryptį [30].

IMC valdymas taip pat išliko įdomi tema tyrėjams, kuriems priklauso netiesioginio jungimo lygintuvo ir inverterio etapai. IMC moduliavimo strategijos skirstomos į dvi kategorijas: 1) erdves vektoriaus impulsų pločio moduliacija (SVM); ir 2) nešikliu pagrįsta impulsų pločio moduliacija (CBM). SVM tapo plačiausiai naudojama IMC valdymo technika dėl savo puikių savybių. Tačiau SVM metodą sunku įgyvendinti dėl sudėtingų skaičiavimų, pagrįstų sektoriaus sprendimais ir paieškos lentelėmis. Dabar yra tyrinėjamas įvairių ir patobulintų SVM alternatyvų [36]. CBM technika, skirta išspręsti IMC topologijos standartinės vienos CBM technikos apribojimą. Paprastos moduliavimo lygtys gaunamos naudojant šį metodą, nenaudojant darbo koeficientų, apskaičiuotų remiantis SVM technika ir sektoriaus sprendimais. CBM valdymo technika yra skirta sumažinti netiesioginių matricinių keitiklių (IMC) perjungimo nuostolius. Pertraukiamo impulso pločio moduliavimo metodas taikomas siekiant sumažinti perjungimų skaičių per vieną nešlio ciklą, o parenkama optimali poslinkio įtampa, kad būtų išvengta didelių išėjimo fazių srovių komutavimo. Sumažinus perjungimų skaičių ir išvengiant didelių srovių komutavimo, siūloma CBM strategija žymiai sumažina perjungimo nuostolius IMC [37].

IMC valdymas taip pat išliko įdomi tema tyrėjams, kuriems priklauso netiesioginio jungimo lygintuvo ir inverterio etapai. IMC moduliavimo strategijos skirstomos į dvi kategorijas: 1) erdvės vektoriaus impulsų pločio moduliacija (SVM); ir 2) nešikliu pagrįsta impulsų pločio moduliacija (CBM). SVM tapo plačiausiai naudojama IMC valdymo technika dėl savo puikių savybių. Tačiau SVM metodą sunku įgyvendinti dėl sudėtingų skaičiavimų, pagrįstų sektoriaus sprendimais ir paieškos lentelėmis. Dabar yra tyrinėjamas įvairių ir patobulintų SVM alternatyvų [36]. CBM technika, skirta išspręsti IMC topologijos standartinės vienos CBM technikos apribojimą. Paprastos moduliavimo lygtys gaunamos naudojant šį metodą, nenaudojant darbo koeficientų, apskaičiuotų remiantis SVM technika ir sektoriaus sprendimais. CBM valdymo technika yra skirta sumažinti netiesioginių matricinių keitiklių (IMC) perjungimo nuostolius. Pertraukiamo impulso pločio moduliavimo metodas taikomas siekiant sumažinti perjungimų skaičių per vieną nešlio ciklą, o parenkama optimali poslinkio įtampa, kad būtų išvengta didelių išėjimo fazių srovių komutavimo. Sumažinus perjungimų skaičių ir išvengiant didelių srovių komutavimo, siūloma CBM strategija žymiai sumažina perjungimo nuostolius IMC [37].

### **1.2.1. Impulso pločio moduliacija nešiklio pagrindu**

Daugelis valdymo strategijų, pagrįstų PWM metodais, kurios leidžia reguliuoti išėjimo įtampą išlaikant vienodą galios koeficientą įvesties pusėje, buvo pritaikytos įvairių tipų MC, kaip buvo pranešta. Paprastumo dėlei aptarsime nešikliu pagrįstą moduliavimo metodą, taikomą trijų fazių iki vienfazių MC, kurį galima lengvai išplėsti iki trifazio-trifazio arba kelių lygių keitiklio. Metodas pagrįstas sinusoidiniu PWM (SPWM), kuris yra gerai žinomas formavimo būdas galios elektronikoje, kai aukšto dažnio trikampio nešiklio signalas yra lyginamas su sinusoidiniu atskaitos signalu. Šiuo metodu perjungimo impulsai generuojami naudojant loginę lentelę kaip įėjimo įtampų ir norimų lygių išėjimo pusėje funkciją. Paprastai PWM metodai gali veikti su kintamu įėjimo galios koeficientu, kur galima sintetinti sinusoidines įėjimo sroves su norimu galios koeficientu, keičiant nešiklio nuolydį ir naudojant poslinkio įtampas. Tačiau aptartas PWM metodas dėl savo paprastumo yra apribotas jo veikimu naudojant vienodą galios koeficientą [23]. Impulso pločio moduliavimo metodai, skirti MC, apima nešikliu pagrįstą ir SVM moduliavimo metodus. Taikant nešiklio moduliaciją, įvesties galios koeficientą galima reguliuoti naudojant poslinkio įtampą ir keičiant nešiklio nuolydį. SVM yra populiariesnis metodas ir jis gali geriausiai panaudoti įvesties įtampą, kad sumažintų komutacijų skaičių, valdytų įvesties galios koeficientą ir užtikrintų geresnę maitinimo kokybę. Remdamasis erdvės vektoriaus vaizdavimu, SVM sujungia du gretimus vektorius ir nulinės būsenos vektorius, kad sukurtų norimą nuorodą. SVM gali apibendrinti MC moduliavimo problemą. Yra tiesioginiai ir netiesioginiai SVM, skirti MC. Tiesioginis SVM leidžia geriau suprasti veikimo ir moduliavimo procesą, nes nėra fiktyvios nuolatinės srovės jungties. Netiesioginis SVM yra lengviau įgyvendinamas sprendimas. Išėjimo įtampos ir įėjimo srovės vektorių sintezė pagrįsta darbo ciklais. Netiesioginis konvertavimas gali valdyti išėjimo dažnį, amplitudę ir įėjimo srovės fazių poslinkį. Šiuo metodu galima atsieti virtualiosios lygintuvo pakopos moduliaciją ir virtualiojo keitiklio pakopos moduliaciją, todėl galima derinti skirtingas dviejų pakopų moduliavimo strategijas. Be to, netiesioginė konversijos schema palengvina įėjimo įtampos disbalanso. SVM valdomas MC gali generuoti sinusoidines bangas. Tačiau atvirojo ciklo SVM tampa neveiksmingas valdant išėjimo sroves iki norimų verčių, kai apkrova nežinoma [32], [38].

## 1.2.2. Erdvės vektoriaus impulso pločio moduliacija

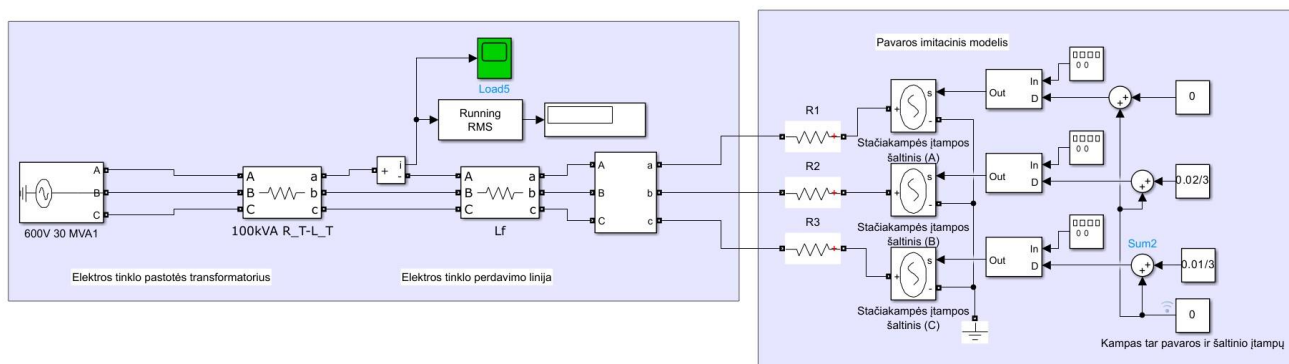
SVPWM pagrįstas tuo, kad 3 fazės įtampos sistemoje yra tik du nepriklausomi kintamieji. Galime naudoti stačiakampes koordinatas, kad pavaizduotume 3 fazių įtampą fazorių diagramoje [39]. Tai sudėtingesnė sinusinės bangos generavimo technika, kuri suteikia varikliui didesnę įtampą su mažesniu bendru harmoniniu iškraipymu. Pagrindinis bet kurios moduliavimo technikos tikslas yra gauti kintamą išėjimą, turintį didžiausią pagrindinį komponentą su minimaliomis harmonikomis. Erdvės vektoriaus PWM (SVPWM) metodas yra pažangus; daug skaičiavimo reikalaujantis PWM metodas ir galbūt geriausi kintamojo dažnio pavaros taikymo būdai [40]. Iš 27 galimų trifazių MC perjungimo konfigūracijų tik 21 yra naudinga SVM algoritme. Pirmosios 18 perjungimo konfigūracijų nustato išėjimo įtampos vektorių ir įėjimo srovės vektorių, turinčius fiksuotas kryptis. Šių vektorių dydis priklauso atitinkamai nuo įėjimo įtampų ir išėjimo linijos srovių momentinių verčių. Paskutinės trys perjungimo konfigūracijos nustato nulines įėjimo srovės ir išėjimo įtampos vektorius. SVM algoritmas, skirtas MC, turi būdingą galimybę visiškai valdyti tiek išėjimo įtampos vektorių, tiek momentinį įėjimo srovės poslinkio kampą. Dviejų pakopų SVM metodas yra klasikinės SVM technikos variantas, turintis keletą svarbių savybių, tokių kaip per didelės signalo, tačiau šis metodas nebenaudojamas. Bet kuriuo mėginių ėmimo momentu išėjimo įtampos vektorius ir įėjimo srovės poslinkio kampas yra žinomi kaip atskaitos dydžiai. Įvesties linijos ir nulines įtampos vektorius nustatomas pagal šaltinio įtampą ir atpažįstamas pagal jo matavimus. Tada galima valdyti įvesties pusę, valdant įvesties srovės vektoriaus fazės kampą. Tiek įėjimo srovės, tiek išėjimo įtampos vektoriai sintezuojami atsižvelgiant į darbo ciklus. Darbo ciklai apskaičiuojami pagal išėjimo įtampos fazę ir įėjimo srovės vektoriaus nuorodas, kurio darbo ciklo ženklas yra neigiamas, tada taikytinos perjungimo būsenos pavadinimas turi turėti neigiamą ženklą. Nulinio vektoriaus darbo ciklas yra toks, kad visas darbo ciklas turi būti lygiavertis vienetui esant fiksuotam mėginių ėmimo dažniui [23]. Paprastai moduliavimo strategijos buvo sukurtos remiantis erdvės vektoriais. SVPWM metodas IMC. SVPWM metodu gaunamos įėjimo srovės/išėjimo įtampos sinusinės bangos formos ir didžiausias IMC įtampos perdavimo santykis. Tačiau SVPWM metodas turi tam tikrų trūkumų. Norint sintezuoti atskaitos įvesties srovę ir atskaitos išėjimo įtampą, reikia atlikti sudėtingus skaičiavimus ir lenteles. Todėl pastaruoju metu buvo svarstomas nešikliu pagrįstas PWM metodas IMC valdymui, siekiant pašalinti SVPWM metodo trūkumą. Taikant nešikliu pagrįstą PWM metodą, aukšto dažnio trikampus nešiklis lyginamas su moduliacijos signalais, kad būtų sukurti maitinimo grandinės jungiklių blokavimo impulsai [38].

## 2. Parengtinis tyrimas

Pradiniame tyrimo etape sudaromi supaprastinti modeliai imituojantys energijos gražinimą į tinklą. Modelis susideda iš dviejų įtampos šaltinių. Modeliams sudaryti naudojamas „MATLAB Simulink“ programinis paketas. Modelyje, vienas šaltinis imituoja elektros tinklą, kitas – pavarą. Elektros tinklo modeliui sudarytas yra naudojama trifazis elektros šaltinis, kurio linijinė įtampa siekia 400 V ir aktyvioji varža  $R_1 = 0,036$ . Šie elementai skirti imituoti 10KV – 4KV pastotę. Elektros tinklo perdavimo linijos varžą imituojantys varžos elementas kurio varžos atitinka:  $R_2 = 0,125 \Omega$ . Kitas elektros šaltinis sudaromas taip, kad imituotų pavarą regeneraciniame režime. Imitacinį pavaros modelį sudaro trifazis įtampos šaltinis, kurio kintamos įtampos forma yra keičiama. Toks pavaros modelis generuoja stačiakampės formos įtampą. Taip pat, pavaros modelis sudarytas taip, kad būtų galima keisti kintamos įtampos maksimalią vertę ir fazinį kampą. Elektros tinklo modelis ir elektros pavarą imituojantis modelis veikia 50 Hz dažniu.

### 2.1. Elektros energijos gražinimo į tinklą sąlygų tyrimas

Pavaros imitaciniam modeliui sudaryti naudojama trys skirtingi įtampos šaltiniai leidžiantys generuoti norimos formos, amplitudės ir pločio įtampą. Pavara veikia naudojant impulso pločio (PW) valdymą. Taip pat įvedami matematiniai veiksmai generuojamiems signalams, kad būtų galima keisti kampą tarp trifazio elektros šaltinio ir pavaros įtampų.

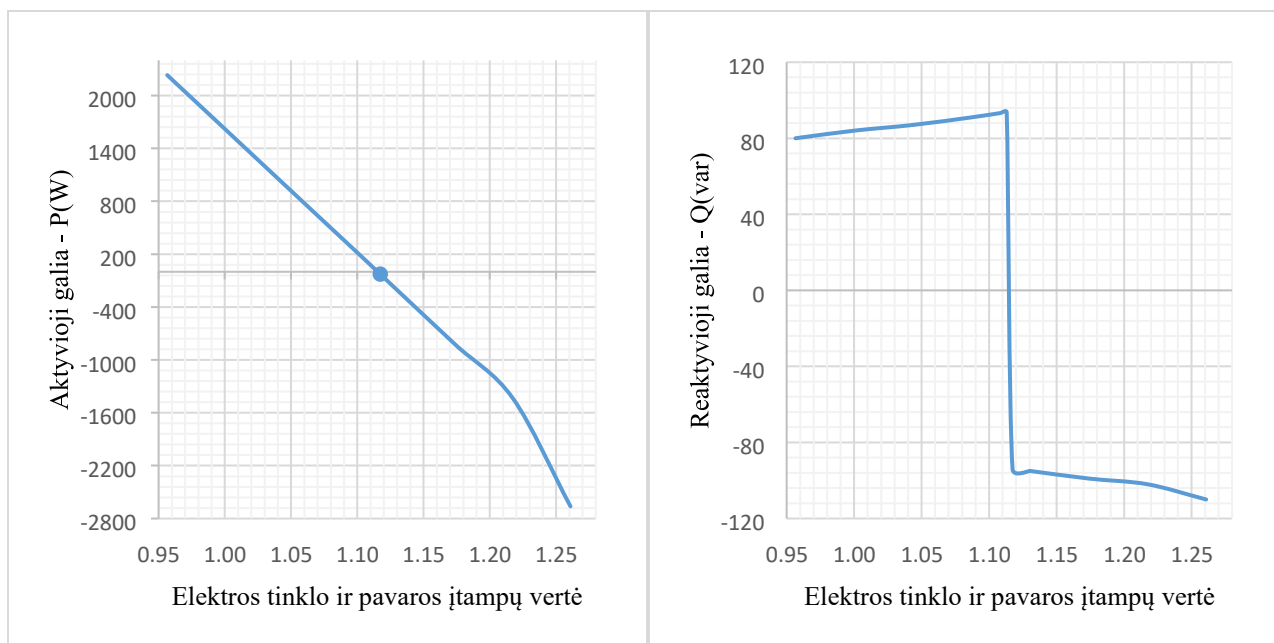


7 pav. Matlab simulink modelis, kai pavarą imituojanti grandies dalis generuoja stačiakampės formos signalą.

Paveikslėlyje (7 pav.) pateiktas modelis vaizduojantis elektros tinklą ir pavarą, kaip pavaros modelis generuoja stačiakampės formos įtampą. Kai generatoriaus ritė sukasi 360 laipsnių, išėjimo įtampa pereina per vieną pilną ciklą. Vieno ciklo metu įtampa didėja nuo nulio iki  $U_{max}$  viena kryptimi, sumažėja iki nulio ir vėl didėja iki  $U_{max}$  priešinga kryptimi ( $U_{max} < 0$ ), o po to vėl sumažėja iki nulio, taip sudarydamas stačiakampės formos įtampą.  $U_{max}$  atsiranda kai pavara pasisuka 90 laipsnių kampu ir yra vadinama maksimalia įtampa. Laikas per kurį generatorius užbaigia vieną ciklą, vadinamas periodu, o ciklų skaičius per sekundę – dažniu. Sudaryto modelio dažnis yra 50 Hz.

Kita reikšmė, vertė nuo teigiamos maksimalios vertės iki neigiamos maksimalios vertės, yra įtampos dydis, kurį apima sinusinė banga. Tačiau kintamajai srovei dažniausiai naudojama vertė yra efektyvioji vertė. Efektyvioji kintamosios įtampos vertė gali būti apskaičiuojama padalijus visas sinusinės bangos amplitudes per vieną laikotarpį, imant šių verčių vidurkį ir kvadratinę šaknį. Efektyvioji vertė, kuri yra įtampų vidutinio kvadrato šaknis, yra žinoma kaip kvadratinė arba RMS

vertė. Pradiniame tyrimo etape yra keičiama sudaryto pavaros modelio fazių efektyvioji vertė ir sudaromos pavaros energetinės charakteristikos.

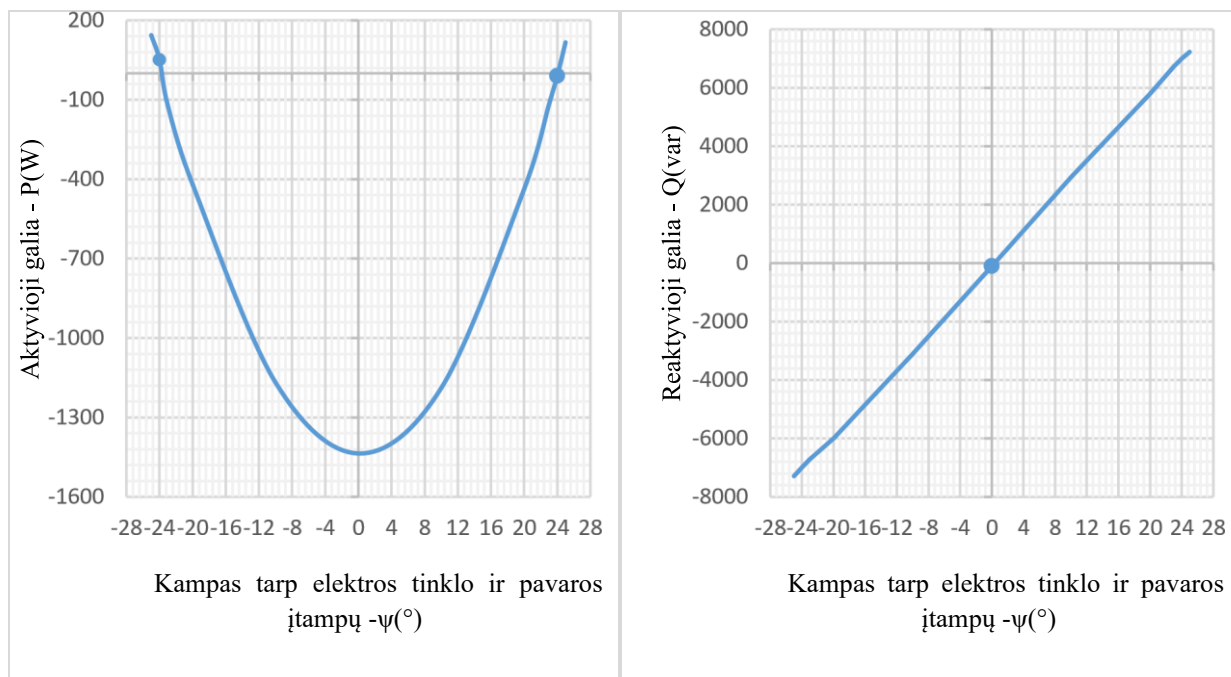


**8 pav.** Aktyvios ir Reaktyvios galios priklausomybė nuo fazinės įtampos

Aktyvioji galia yra tikroji galia, kuri iš tikrųjų perduodama apkrovai, transformatoriui, varikliui ar generatoriui. Šiame modelyje aktyvioji gali matuojama tarp dviejų elektros šaltinių. Elektros tinklą atitinkantis įtampos šaltinis generuoja pastovios efektyvios vertės įtampą (linijinė įtampa 400V, 50Hz), pavaros įtampos fazinė efektyvioji vertė yra keičiama. Pateiktame paveikslėlyje (8 pav.) įtampos rezultatai pateikiami santykinė forma, kur pavaros įtampa ( $U_p$ ) yra dalinama iš tinklo įtampos ( $U_t$ ), taip gaunant santykinę įtampų vertę. Iš charakteristikų (8 pav.) matyti, kad aktyviosios galios priklausomybė yra linijinė. Teigiama aktyviosios galios vertė reiškia aktyviosios galios kryptį iš elektros tinklo į pavarą. Kai pavaros įtampa yra didesnė už tinklo įtampą 1,117 karto, tada pavara pradeda gražinti aktyviają galią atgal į tinklą, Lietuvos elektros tinklo sąlygomis. Iš gautų rezultatų daroma prielaida, kad pavara gražina aktyviają galią atgal į tinklą, kai atitinka sąlygą:  $U_p > 1,117 \times U_t$ . Ši sąlyga priklauso nuo tinklą imituojančios modelio dalies varžų (elektros linijos ilgio) ir nuo pavaros įtampos formos.

Reaktyvioji galia, kaip išsklaidyta galia, yra veikiamą talpinių ir indukcinų reiškinių, kurie didina srovę ir mažina įtampą, šilumos pavidalu. Reaktyviają galią generuoja kondensatoriai ir generatoriai, o ją sunaudoja indukciniai elementai kurie būtini, lygiagrečio ryšio grandinėse galios koeficiento valdymui ir elektros perdavimo linijos. Reaktyviosios galios valdymo ir įtampos stabilumo aspektai yra veiksmingi elektros tinklų patikimumui užtikrinti. Įtampos nestabilumas dažniausiai atsiranda dėl reaktyviosios galios trūkumo. Tendencijos yra mažinti reaktyviają galią ir didinti įtampos stabilumą, siekiant pagerinti energijos sistemų efektyvumą ir veikimą. Tarp reaktyviosios galios ir įtampos elgsenos yra tiesioginis ryšys, dėl kurio elektros energijos sistemose atsiranda įtampos žlugimas ir didėjantys efektai. Reaktyviosios galios ir įtampos reguliavimas turi būti atliekamas pagal lanksčius ir greitai valdomus prietaisus. Reaktyviosios galios išdėstymas ir reguliavimas atlieka svarbų vaidmenį veikiant reaktyviosios galios kompensavimui ir įtampos valdymui.

Didinant pavaros įtampą, proporcingai auga ir reaktyvioji galia. Teigiama reaktyvioji įtampa atsiranda, dėl indukcinų reiškinių ar elementų. Charakteristikoje ( 8 pav.) reaktyvioji galia yra teigiama kol pavara veikia įprastu darbo režimu, tačiau padidinus pavaros įtampos vertę taip, kad pavara grąžintų energiją atgal į tinklą, pavara pereina į regeneracinį darbo režimą ir reaktyvioji galia pakeičia kryptį. Neigiama reaktyvioji galia reiškia, kad reaktyvioji galia yra perduodama iš elektros tinklo į pavara. Taip atsitinka kai pavaros magnetinis laukas yra nepakankamai sužadintas arba pavara veikia regeneraciniame darbo režime. Šiame modelyje, pavaros reaktyvios galios kryptis pasikeičia, dėl naudojamo įtampos formavimo būdo.

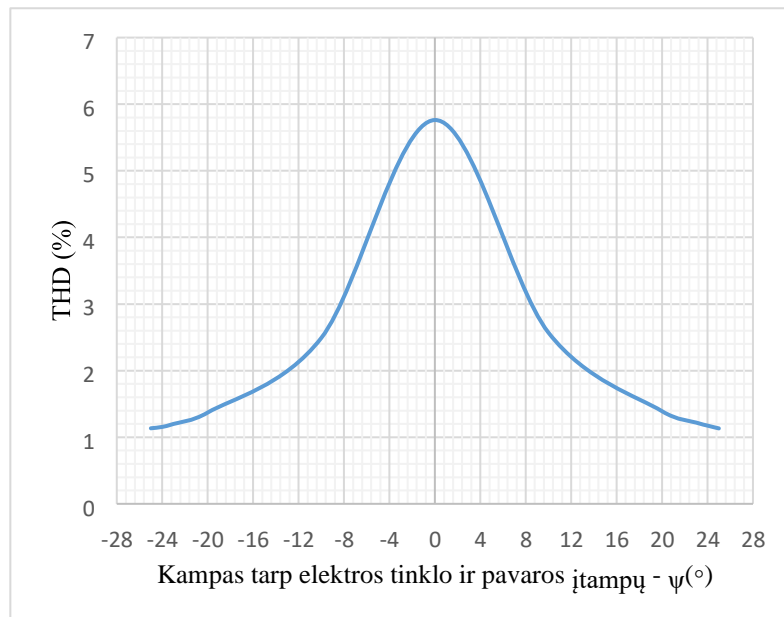


**9 pav.** Aktyvios ir Reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų

Sudarant energetines charakteristikas, kurių vertės priklauso nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, keičiama pradinė pavaros įtampos fazių vertė. Fazės yra paslenkamos į dešinę arba į kairę, priklausomai nuo užduoto fazės poslinkio kampo. Kampo pokytis yra atliekamas sveiko skaičius tikslumu. Sudarytoms charakteristikoms pavaros ir tinklo įtampų santykinė vertė atitiko: 1,2. Tai reiškia, kad pavara yra regeneraciniame darbo režime. Keičiant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, matomas poveikis aktyviajai galiai (9 pav.). Kai kampas tarp elektros tinklo ir pavaros viršija valdymo diapazoną:  $-24^{\circ} < \psi \leq 24^{\circ}$ , pavara pereina iš regeneracinio darbo režimo atgal į įprastą darbo režimą. Aktyvios galios charakteristika yra beveik simetriška y ašies atžvilgiu, o tai reiškia, kad neigiamos kampo  $\psi$  vertės, turės tokią pačią aktyvios galios vertę kaip ir teigiamos. Toliau didinant skirtumą tarp pavaros ir elektros tinklo įtampų, stipriai išauga aktyvioji pavaros galia.

Taip pat kampas tarp elektros tinklo ir pavaros turi poveikį ir reaktyviajai galiai. Didinant kampą:  $0 \leq \psi$ , reaktyvioji galia yra teigiama ir jos absoliutinė vertė auga tiesiškai. Reaktyvios galios charakteristika yra simetriška koordinačių susikirtimo taškui, tai reiškia, kad kai  $\psi$  yra neigiamas reaktyvios galios vertės yra neigiamos. Kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų valdymas, gali būti naudojamas kaip būdas valdyti pavaros aktyvios ir reaktyvios galios efektyvias vertes, priklausomai nuo galios poreikio. Iš charakteristikų (8 pav.) galima nustatyti, kad pavara veikia regeneraciniame darbo režime, kol kampas tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų atitinka sąlygą:  $-24^{\circ} < \psi \leq 24^{\circ}$ .





**10 pav.** Suminio šalutinių harmonikų iškraipymo priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų.

Bendras harmoninis iškraipymas (THD) yra iškraipytos galios ir pagrindinės signalo galios santykis ir dažniausiai naudojamas signalo iškraipymo dydžiui nurodyti. Pateiktoje suminiame šalutinių harmonikų iškraipymo charakteristikoje matomas THD pokytis, keičiant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų. Kai pavara yra regeneraciniame darbo režime, gaunamas didžiausias šalutinių harmonikų iškraipymas, kuris siekia 5,8%. Tačiau keičiant kampą, pavaros aktyvioji galia, regeneraciniame darbo režime mažėja, reaktyvioji didėja ir THD procentas taip pat mažėja. Kai kampas tarp elektros tinklo ir pavaros padidinamas iki tokios ribos, kad pavara pereina iš regeneracinio darbo režimo į įprastą darbo režimą, tolimesnis kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų didinimas, suminiam harmonikų iškraipymui poveikio neturi.

### 3. Pavarų energetinių charakteristikų, prijungimo prie elektros tinklo taške, tyrimas

Šiame tyrimo etape atliekama netiesinės (IMC), netiesinės retintos (SMC) ir netiesinė labai retintos (VSMC) matricinių pavarų analizė naudojant impulso pločio valdymą. Šiems pavarų tyrimams atlikti yra sudaromi atitinkami modeliai naudojant „Matlab Simulink“ programinį paketą.

Netiesioginės matricinės pavaros (žr. 1 priedas), retintos matricinės pavaros (žr. 2 priedas), labai retintos matricinės pavaros (žr. 3 priedas) modeliais sudaryti iš elektros tinklą imituojančios dalies, matricinės pavaros galios grandinės ir valdymo grandinės skirtos lygintuvo jungiklių valdymui. Elektros tinklą imituojanti modelio dalis sudaryta iš trifazio įtampos šaltinio ir aktyvių varžų imituojančių 40kV – 0,4kV pastotę, ir elektros linijos ilgį. Trifazės įtampos šaltiniui buvo panaudotas „Three-phase source“ funkcinis blokas. Trijų fazių serijos RLC šakų blokas buvo panaudotas įgyvendinti tris subalansuotas šakas, kurie kiekviena susideda iš rezistoriaus.

Matricinės pavaros galios grandinė sudaryta iš dviejų dalių: variklio ir galios keitiklio. „Induction machine“ funkcinis blokas įgyvendina trifazę asinchroninę mašiną. Statoriaus ir rotorius apvijos yra sujungtos su vidiniu neutraliu tašku. Blokas veikia generatoriaus arba variklio režimu. Veikimo režimą diktuoja mechaninio sukimo momento ženklas kuris nustatomas naudojant išorinį signalų generatorių. Laiptuoto signalo generatoriaus blokas generuoja signalą, besikeičiantį nurodytu pereinamuoju laiku. Kai šio bloko generuojamo signalo amplitudė yra teigiama, tai variklis veikia varikliniame darbo režime, kai neigiama – stabdymo režime. Variklio rotorius tipas yra voverės narvelio. Naudotas 400 V, 4 KW, 50hz ir 1430 RPM modifikacijos asinchorinio variklio modelis. Tyrimo metu priimta, kad naudojamo variklio nominalus sukimo momentas yra lygus 27 Nm.

Netiesioginio matricinio galios keitiklio topologija sudaryta iš lygintuvo, inverterio ir tarpinės nuolatinės srovės grandies. Lygintuvas sudarytas iš vienkrypčių arba dvikrypčių jungiklių, kurie sujungti taip, kad lygintuvas turėtų dvikryptį energijos srautą. Jungiklis sudarytas naudojant „IGBT/Diode“ funkcinį bloką. IGBT/diodų blokas yra supaprastintas IGBT (arba GTO arba MOSFET)/diodų poros režimas, kai nepaisoma priverstinio komutavimo įrenginio ir diodo tiesioginės įtampos. Šių tranzistorių valdymui sudaroma papildoma valdymo grandinė. Tarpinėje nuolatinės srovės grandyje naudojamas kondensatorius kurio vertė yra 750  $\mu$ F. Inverteris sudarytas naudojant universalus tilto bloką, kuris įgyvendina universalų trifazį galios keitiklį. Inverterį sudaro iki šešių maitinimo jungiklių, sujungtų tilto konfigūracijoje. Maitinimo jungiklio tipą ir keitiklio konfigūraciją galima pasirinkti dialogo lange. Universalus tilto blokas leidžia modeliuoti keitiklius, naudojant tiek natūraliai komutuojamus (arba linijinius) galios elektroninius įrenginius (diodus ar tiristorius), tiek priverstinio komutavimo įrenginius (GTO, IGBT, MOSFET). Inverterio valdymui naudojamas išorinis impulso pločio moduliacijos funkcinis blokas (PWM). PWM generatoriaus (2 lygių) blokas generuoja impulsus nešikliu pagrįsto impulsų pločio moduliavimo (PWM) keitikliams naudojant dviejų lygių topologiją. Blokas gali valdyti trijų skirtingų tipų keitiklių perjungimo įrenginius (FET, GTO arba IGBT): vienfazis pusiau tiltas (1 svirtis), vienfazis pilnas tiltas (2 atšakos) arba trifazis tiltas (3 rankos). Atskaitos signalas (Uref įvestis), dar vadinamas moduluojančiu signalu, lyginamas su simetriniu trikampio nešikliu. Kai atskaitos signalas yra didesnis nei nešlio, viršutinio perjungimo įrenginio impulsas yra didelis (1), o apatinio įrenginio impulsas yra žemas (0). Universalus tilto blokas yra pagrindinis blokas, skirtas dviejų lygių įtampos keitikliams kurti.

Sudaryta valdymo grandinė, skirta pilnai valdomu lygintuvo jungiklių valdymui, varikliniame ir stabdymo režimuose. Impulso pločio valdymo būdą imituoti, naudojami impulsų generatoriaus

funkcinis blokas. Impulsų generatoriaus (tiristoriaus) blokas generuoja vidines wt rampas impulsams valdyti. Alfa delsos kampas išreiškiamas elektriniais laipsniais, kuriais impulsas vėluoja, palyginti su jo komutacinės įtampos nuliniu kampu. Impulsų generatoriaus (tiristoriaus) blokas valdomas alfa kampo atskaitos signalu ir sinchronizacijos signalu wt. Wt signalas yra kampas, kintantis tarp 0 ir

$2\pi$  radianų, sinchronizuotas keitiklio transformatoriaus pirminės įtampos A fazės pagrindinės (teigiamos sekos) nulinėje sankryžoje. Wt signalas paprastai gaunamas naudojant papildomą „PLL“ funkcinį bloką. PLL (3ph) blokas modeliuoja uždarojo ciklo valdymo sistemą, kuri seka sinusinio trifazio signalo dažnį ir fazę naudodama vidinį dažnio generatorių. Valdymo sistema reguliuoja vidinio generatoriaus dažnį, kad fazių skirtumas būtų lygus 0. Taip pat impulsų generatoriaus blokas gali būti sukonfigūruotas dirbti dvigubo impulso režimu. Šiuo režimu į kiekvieną tiristorių siunčiami du impulsai: pirmasis impulsas, kai pasiekiamas alfa kampas, ir antras impulsas 60 laipsnių vėliau, kai suveikia kitas tiristorius. Impulsų generatoriaus signalų priskyrimui prie atitinkamo jungiklio naudojamas „Selector“ funkcinis blokas. Šis funkcinis blokas, priskiria pasirinktus įvesties vektorius, matricos arba daugiamačio signalo elementus pagal aprašytus indeksus.

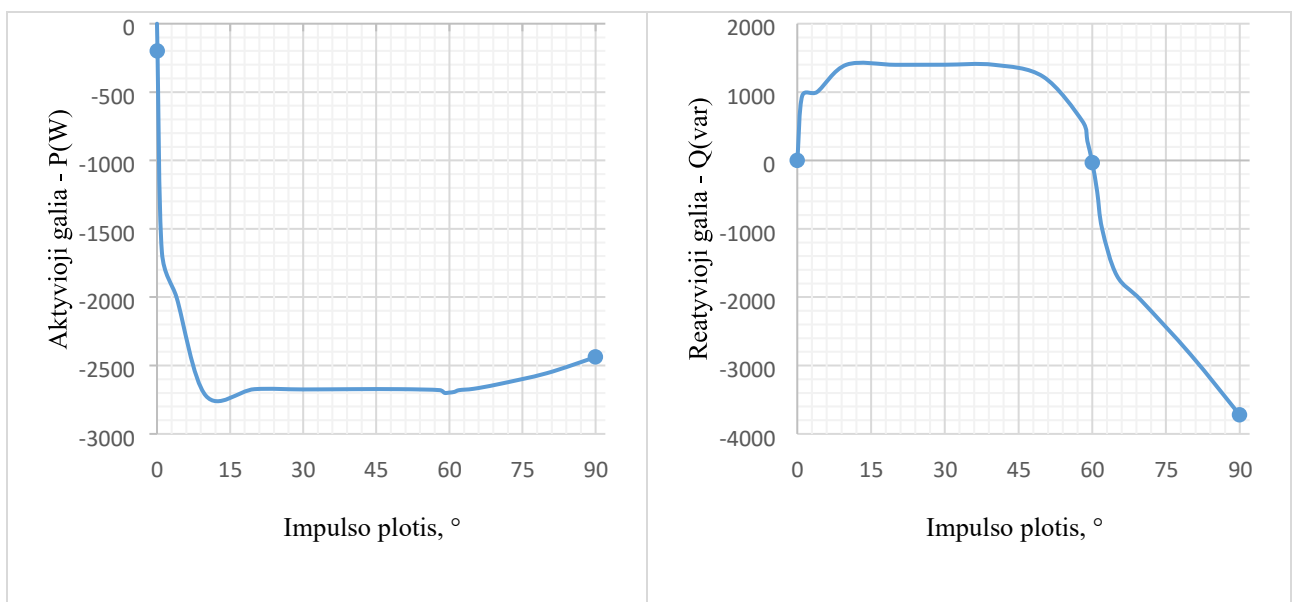
Kadangi atliekamas tyrimas yra prijungimo prie elektros tinklo taške, tai tarp elektros tinklo ir pavaros įterpiamas matavimo blokas. Energetinių charakteristikų matavimas naudotas trifazis V-I matavimo blokas. Šis blokas naudojamas momentinei trifazei įtampai ir srovėms grandinėje matuoti. Sujungus nuosekliai su trifaziais elementais, jis grąžina trijų fazių į žemę arba fazės į fazę didžiausias įtampas ir sroves. Blokas gali išvesti įtampas ir sroves vieneto vertėmis arba voltais ir amperais. Galios (PLL varomas, teigiama seka) blokas apskaičiuoja periodinio trifazių įtampų ir srovių rinkinio teigiamos sekos aktyviąją galią P (vatais) ir reaktyviąją galią Q (vars). Norėdami atlikti šį skaičiavimą, blokas pirmiausia apskaičiuoja teigiamą įėjimo įtampų ir srovių seką su veikiančiu langu per vieną pagrindinio dažnio ciklą, kuri suteikia įėjimas 1. Skaičiavimui reikalingas atskaitos rėmas pateikiamas 2 įėjimu. Srovės matavimo blokas naudojamas matuoti momentinę srovę, tekančią bet kuriame elektros bloke ar prijungimo linijoje. Registruojant momentinės srovės vertes THD blokas apskaičiuoja periodinio iškraipyto signalo bendrą harmoninį iškraipymą (THD). THD apibrėžiamas kaip visų signalo harmonikų vidutinė kvadratinė (RMS) vertė, padalyta iš pagrindinio signalo RMS vertės. Kampui tarp tinklo ir pavaros įtampų matuoti naudojama įtampa kurios vertė yra siunčiama į „Fourier“ funkcinį bloką. Furjė blokas atlieka Furjė įvesties signalo analizę per vieną pagrindinio signalo dažnio ciklo langą. Furjė blokas gali būti užprogramuotas apskaičiuoti nuolatinės srovės komponento, pagrindinio ar bet kurio harmoninio įvesties signalo komponento dydį ir fazę. Palyginus pavaros fazės ir tinklo fazės išvestis iš Furjė bloko gaunamas kampas tarp tinklo ir pavaros įtampų. Kampas tarp tinklo ir pavaros įtampų keičiamas naudojant jungiklių dažnį. Jungiklių junginėjimo dažnis yra nustatomas naudojant papildoma trifazės sinusinės įtampos šaltinis, kurio fazės yra paslenkamos į dešinę arba kairę puses.

### **3.1. Netiesioginės matricinės pavaros energetinės charakteristikos.**

Netiesioginės matricinės pavaros lygintuvas susideda iš 12 jungikliu, kurių kiekvienas sudarytas iš IGBT tranzistoriaus ir diodo. Pavarai veikiant varikliniu darbo režimu, pavaros galios konvertavimą lygintuvo lygmenyje atlieka 6 jungikliai arba 3 jungiklių poros. Pavaros darbą regeneraciniame darbo režime, galios konvertavimą atlieka kiti 6 jungikliai arba 3 jungiklių poros. Varikliniame ir regeneraciniame darbo režimuose veikia skirtingos jungiklių poros, kurios būtent ir suteikia šiai pavarai savybę dirbti tiek varikliniame tiek regeneraciniame darbo režimuose. Dėl tokios pavaros

valdymo topologijos yra supaprastinamas pavaros valdymas, kadangi modeliuojant pavaros valdymą, jungiklių poros varikliniame ir regeneraciniame darbo režimuose yra nepriklausomos viena nuo kitos.

IMC pavana yra valdoma, naudojant impulso pločio valdymą, kadangi šis valdymo būdas yra ganėtinai nesudėtingas ir lengvai įgyvendinamas. Pavaros modelis sudarytas naudojant Matlab Simulink programinį paketą. Impulso pločio valdymo būdas pavarai sudarytas naudojant impulsų generatoriaus funkcinį bloką. Šis funkcinis blokas naudojamas jungiklių valdymui, kuris generuoja impulsų seką pagal užduotą dažnį. Laikas nuo jungiklio atsidarymo iki užsidarymo yra vadinamas impulso pločiu (PW) ir yra matuojamas laipsniais. Impulsų generatoriaus blokas, sugeneruoja 6 impulsus, atitinkamiems jungikliams, pagal nurodytą impulso plotį. Tačiau, šiam valdymo būdai taip pat reikalingas sinusinės įtampos kampo ir dažnio sintonizavimas su tinklo įtampa. Šiai užduočiai įgyvendinti yra naudojamas atskiras trifazis įtampos šaltinis ir PLL uždarojo ciklo valdymo sistema, kuri seka sinusinio trifazio signalo dažnį ir fazę naudodama vidinį dažnio generatorių. Naudojami papildomi trifazės kintamos įtampos šaltiniai, kurie yra reikalingi valdyti tinklo ir generuojamos įtampos fazių skirtumui. IMC pavaros darbu regeneraciniame režime, naudojamas dvigubo impulso funkcija. Ši funkcija leidžia į jungiklį išsiųsti du impulsus: pirmas impulsas siunčiamas, kai pasiekiamas kampas alfa ( $\alpha = 0$ ), o antrasis impulsas siunčiamas 60 laipsnių vėliau. Abiejų impulsų pločiai yra vienodi. Nenaudojant dvigubo impulso funkcijos, pavara negali veikti regeneraciniame darbo režime, kadangi pavaros generuojamos įtampos vertė yra per maža. Taip pat, naudojant dvigubo impulso funkciją, pavaros įtampos forma tampa laiptuota. Impulso plotis yra pagrindinis šios pavaros valdymo parametras. Kai naudojamas dvigubo impulso parametras, formuojamos įtampos amplitudė atitinka matricinio galios keitiklio DC įtampos vertę.

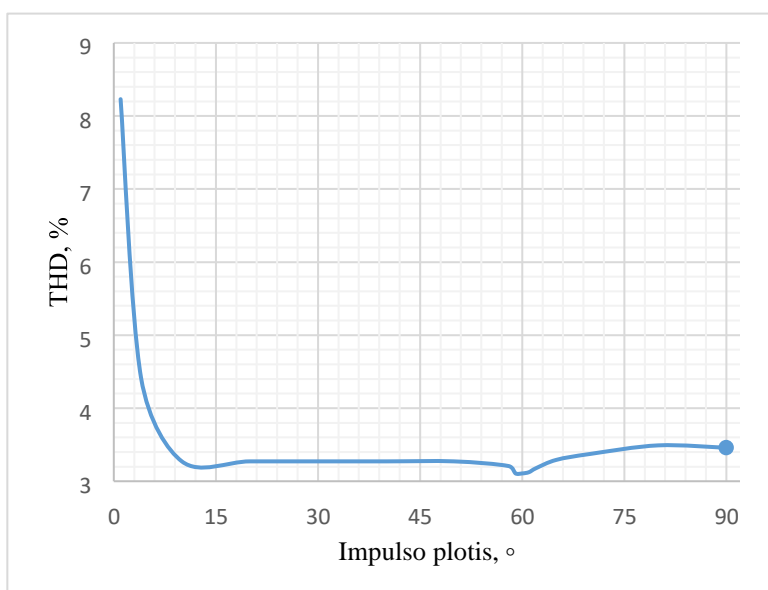


**11 pav.** IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio.

Kintan valdymo impulso pločiui, keičiasi aktyvios bei reaktyvios galios absoliutinė vertė ir kryptis (11 pav.). Pavara pradeda veikti regeneraciniame darbo režime, kai naudojamo variklio rotorius greitis viršija nominalų greitį. Ši sąlyga yra gaunama kai pakeičiama apkrovos kryptis ir rotorius yra sukamas tikra jėga kuri užtikrina, kad slydimas būtų neigiamas ( $s < 0$ ). Šiuo atveju naudojamas 15 Nm jėgos momentas. Kai pavaros DC grandies srovė pakeičia kryptį, tai reiškia, kad pavara grąžina energija atgal į tinklą. Kad pavaros galia būtų neigiama, impulso plotis turi atitikti sąlygą:  $0^\circ < PW \leq 90^\circ$ . Kai impulso plotis yra didesnis už 90 laipsnių pavara tampa nestabili, kadangi pavaros

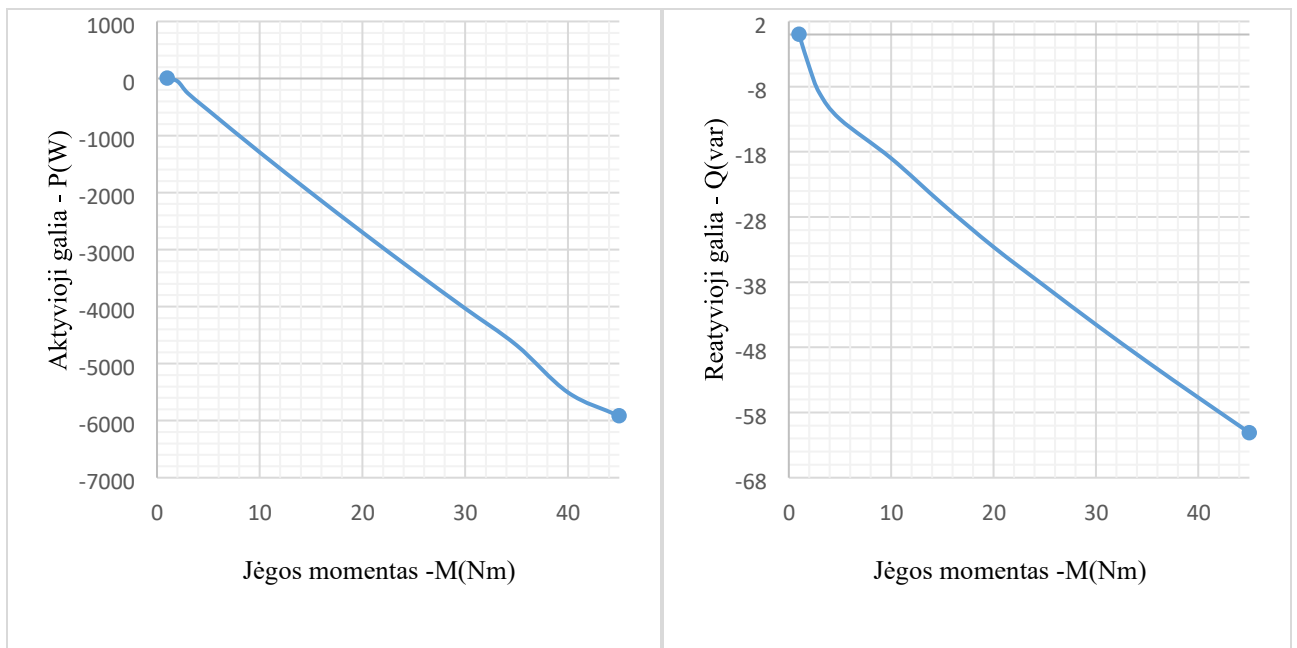
greitis nenusistovi. Mažiausias matavimas atliktas, kai impulso plotis atitiko  $PW = 0.1^\circ$ . Šiuo atveju aktyvioji galia  $P = -200$  W, o reaktyvioji galia  $Q = 112$  var. Pavaros didžiausia neigiama aktyvioji galia yra kai impulso plotis yra ribose:  $10^\circ < PW < 65^\circ$ . Šiame intervale aktyvioji galia apytiksliai lygi:  $P = -2690$  W  $\pm$  15 W. Toliau didinant impulso plotį, aktyviosios galios absoliutinė vertė sumažėja apie 10 %.

Valdant impulso plotį, taip pat galima valdyti ir reaktyvios galios kryptį. Reaktyvioji galia yra teigiama ribose:  $0^\circ < PW < 60^\circ$ . Ribose:  $10^\circ \leq PW \leq 40^\circ$ , reaktyvioji galia nekinta ir atitinka  $Q = 1400$  var. Kai impulso plotis atitinka  $PW = 60^\circ$ , reaktyviosios galios absoliuti vertė yra mažiausia  $Q = -32$  var,  $P = -2690$ . Mažiausia absoliuti galios vertė yra laikoma vertė arčiausiai 0, kadangi matavimai atlikti sveiko skaičiaus tikslumu. Toliau didinant impulso plotį  $PW > 60^\circ$ , neigiamos reaktyvinės galios absoliutinė vertė didėja. Maksimali neigiama reaktyvioji galia pasiekta kai  $PW = 90^\circ$ ,  $Q = -3724$  var.



**12 pav.** IMC pavaros suminio šalutinių harmonikų iškraipymo priklausomybė nuo impulso pločio.

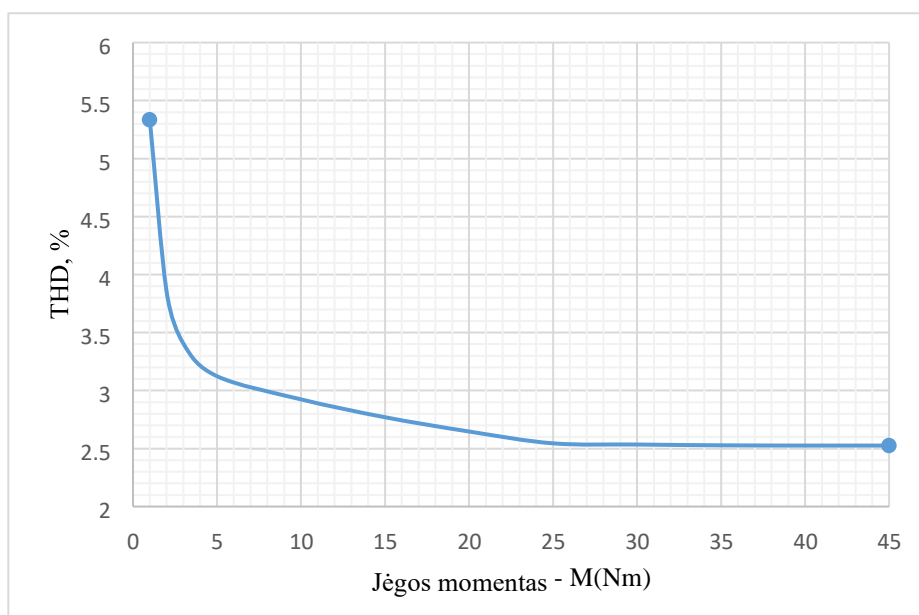
THD kinta ribose:  $0 < PW < 90$ . Toliau didinant impulso plotį THD pokytis yra minimalus. Kai impulso plotis minimalus  $PW = 1^\circ$ , THD siekia 8,23 %. Jeigu impulso plotį dar labiau mažintume THD gali išaugti iki 28 %, ar daugiau. Valdymo diapazone:  $10^\circ < PW < 60^\circ$ , THD vertė kinta kinta minimaliai,  $THD = 3,2 \pm 0,1\%$ . Rekomenduojamos šalutinių suminių harmonikų iškraipymų ribos yra 5 % ir 3 % bet kuriai harmonikai. Svarbu pažymėti, kad nurodytame standarte pateikti pasiūlymai ir vertybės yra visiškai savanoriškos. Tačiau išlaikant žemas THD vertes sistemoje bus užtikrintas tinkamas įrangos veikimas ir ilgesnė įrangos eksploataavimo trukmė [41].



**13 pav.** IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento.

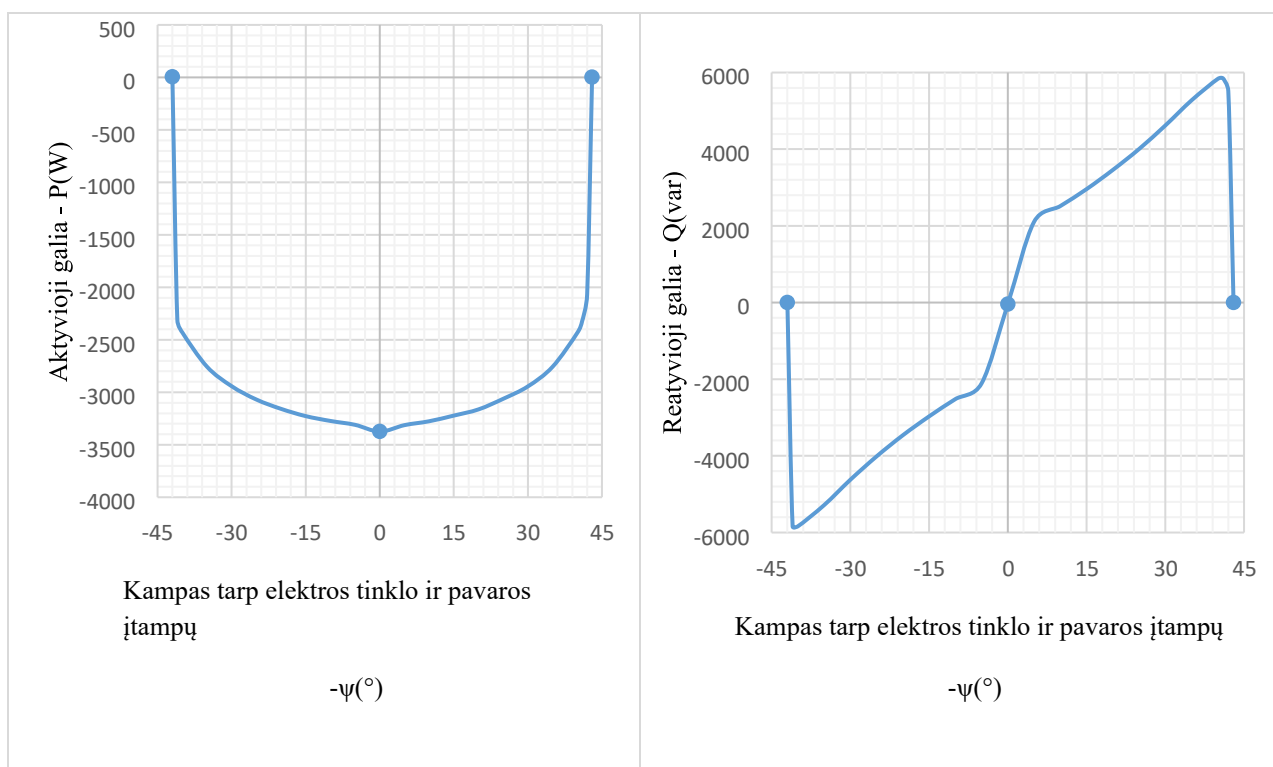
Modelyje yra naudojamas asinchroninis variklis. Kai variklis veikia varikliniame darbo režime, rotoriaus greitis yra mažesnis už oro tarp magnetinio lauko sukimosi greitį. Šis santykis išreiškiamas, slydimu ( $s$ ). Kai  $0 < s < 1$ , tai pavara dirba varikliniu režimu. Jeigu pradėsime rotorius sukti papildoma išorine jėga ta pačia kryptimi taip, kad rotoriaus greitis taptu didesnis už magnetinio lauko sukimosi greitį  $s < 0$ , tada sukamas rotorius yra stabdomas ir variklis veikia generatoriniu darbo režimu.

Elektros energijos tiekimo tikslais generatoriaus sukimosi greitis turi būti didesnis už sinchroninį greitį [42]. Iš pateiktų charakteristikų (13 pav.) matome, kad pavara pradeda tiekti aktyvią galią į tinklą kai jėgos momentas sukantis rotorius yra:  $M \geq 2 \text{ Nm}$ . Kai jėgos momentas yra mažesnis tada aktyvioji galia yra teigiama ir pavara į tinklą energijos negražina. Didinant jėgos momentą didėja statoriaus srovė ir įtampa. Įtampos pokytis nedidelis. Kadangi didėja statoriaus srovė, didėja ir pavaros galios keitiklio tarpinės nuolatinės grandies srovės absoliutinė vertė. Kai pavara veikia regeneraciniame darbo režime, tarpinės nuolatinės grandies srovė yra neigiama. Proporcingai didėjant DC grandies srovei, proporcingai didėja ir aktyvi bei reaktyvi galia. Impulso pločio valdymo ribos gali šiek tiek skirtis, priklausomai nuo jėgos momento. Charakteristikos (13 pav.) buvo sudaromos, kai impulso plotis atitiko  $PW = 60^\circ$ . Kai  $PW = 60^\circ$  absoliutinė reaktyvios galios vertė yra minimali:  $Q = -32 \text{ var}$ . Reaktyvios galios vertė nėra lygi 0, o tik minimali, nes matavimai atlikti sveiko skaičiaus tikslumu.



**14 pav.** IMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento.

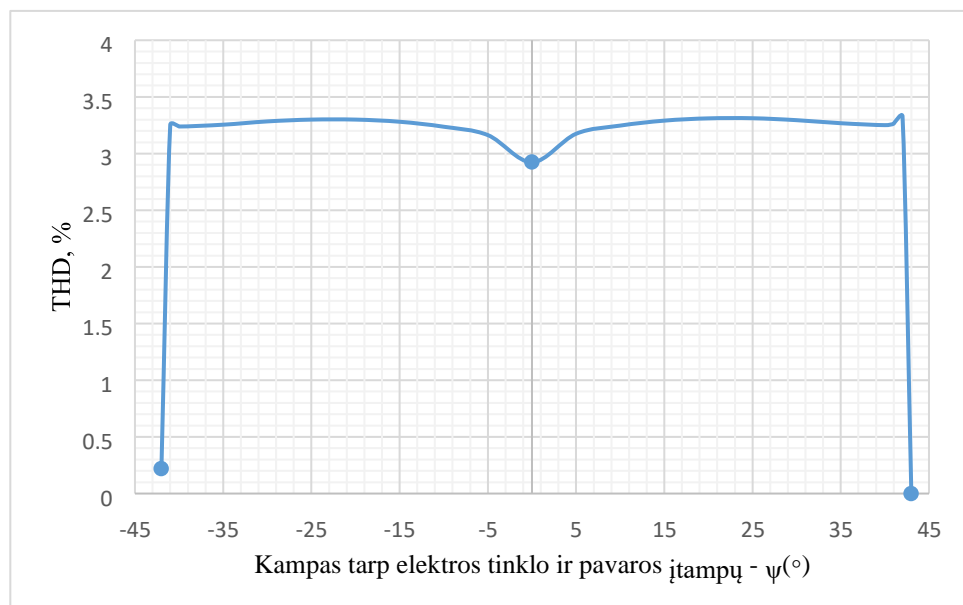
Kai didinamas jėgos momentas, mažėja suminis šalutinių harmonikų iškraipymas (14 pav.). Taip pat iš charakteristikos galima teigti, kad kai variklio rotorių veikiantis jėgos momentas yra mažesnis už 5Nm, pavaros THD išauga. Didinant jėgos momentą:  $M > 25 \text{ Nm}$ , suminių šalutinių harmonikų iškraipymo procentinė vertė nekinta.



**15 pav.** IMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų.

Charakteristikos (15 – 16 pav.) sudarytos, kai  $PW = 60^{\circ}$ , ir  $M = 25 \text{ Nm}$ . Kampas tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų buvo gaunamas naudojant papildoma elektros tinklą, kurio generuojamos trifazės

įtampos fazė buvo keičiama ir sinchronizuojama su pavaros jungiklių įjungimo ir išjungimo dažniu. Iš charakteristikų matomas kampo tarp tinklo ir pavaros valdymo diapazonas:  $-42^\circ < \psi < 43^\circ$ , kuriama pavara gražina energija atgal į tinklą. Kai kampas tarp tinklo ir pavaros įtampų neatitinka užbrėžto valdymo diapazono, pavaros nuolatinės įtampos grandies srovė tampa teigiama ir pavara nebetiekia tinklui galios, tačiau ją vartoja. Maksimali aktyvioji gali yra gaunama tada, kai kampas tarp pavaros ir elektros tinklo įtampų yra minimalus arba lygus nuliui  $P = -3374$  W. Tačiau didinant arba mažinant kampą absoliutinė aktyviosios galios vertė mažėja: kai  $\psi = -41^\circ$ , tai  $P = -2310$  W, kai  $\psi = 42^\circ$ , tai  $P = -2066$  W. Keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų gaunamas santykinai nedidelis aktyvios galios pokytis, tačiau reaktyvioji galia reaguoja kitaip. Iš charakteristikos galima pasakyti, kad keičiant kampą, išauga absoliutinė reaktyvios galios vertė. Reaktyviosios galios tipas priklausys nuo to į kurią pusę buvo paslinktos pavaros įtampos fazės. Jeigu kampas tarp tinklo ir pavaros yra neigiamas, tai reaktyvioji galia irgi yra neigiama (talpinė), jeigu kampas teigiamas, tai reaktyvioji galia – teigiama (indukcinė). Didžiausia talpinė ir indukcinė reaktyvios galios gautos: kai  $\psi = -41^\circ$ , tai  $Q = -5841$  var, kai  $\psi = 41^\circ$ , tai  $Q = 5847$  var. Esant kitokiam impulso pločiui, pavaros aktyvios galios priklausomybės nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros išliktų panaši, tačiau reaktyvios galios charakteristika pasislinktų į kairę arba į dešinę pusę. Tai parodo, kad valdant kampą, tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų galima valdyti reaktyvią galią, prarandant tik iki 35% aktyvios galios.



**16 pav.** IMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų.

Iš charakteristikos (16 pav.) matoma, kad mažiausias šalutinių harmonikų iškraipymas yra kai kampas tarp elektros tinklo ir pavaros yra minimalūs arba lygūs nuliui:  $THD = 2,92$  %. Kai kampas yra keičiamas, THD pokytis nėra didelis, kadangi aukščiausia THD vertė yra, kai  $\psi = 42^\circ$ ,  $THD = 3,28$  %. Taigi galime matyti, kad kampo pokytis suminiams šalutinių harmonikų iškraipymams turi tik minimalų poveikį.

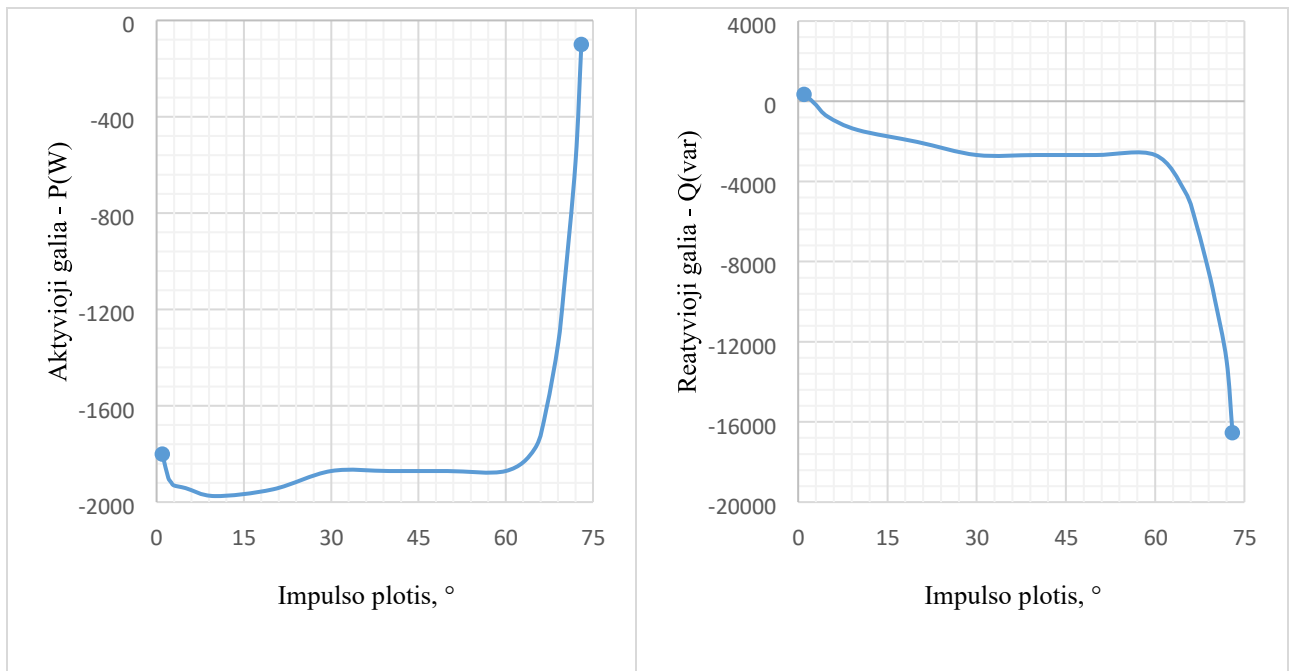
Atlikus netiesioginio jungimo matricinės pavaros tyrimą, galima teigti, kad optimalus pavaros veikimas regeneraciniame darbo režime yra, kai naudojama dvigubo impulso signalas jungikliui, impulso plotis yra  $PW = 60^\circ$ , kampas tarp tinklo ir pavaros įtampų  $\psi = 0^\circ$ . Esant šioms sąlygoms pavara į tinklą tiekia aktyvią galią su minimalia reaktyvia galia, kurios tiesiškai priklauso nuo



rotoriaus sukimo momento. Valdant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, galima padidinti reaktyvios galios absoliutinę vertę ir jos kryptį (indukcinė, reaktyvinė).

### 3.2. Retintos netiesioginės matricinės pavaros energetinės charakteristikos.

Netiesioginė retinta pavara struktūriškai nuo netiesiogės pavaros skiriasi aktyvių elementų skaičiumi. Pavaros lygintuvas susideda iš 9 IGBT tipo tranzistorių. Topologiją sudaro 3 IGBT tranzistorių grupės. Pirmą grupę naudojama kai pavara veikia varikliniame darbo režime, antra – regeneraciniame, trečia – naudojama ir varikliniame ir regeneraciniame darbo režimuose. Jungiklių valdymui yra naudojama dvigubo impulso funkcija: pirmas impulsas siunčiamas, kai pasiekiamas kampas alfa ( $\alpha = 0$ ), o antrasis impulsas siunčiamas 60 laipsnių vėliau. Tokia SMC pavaros struktūra reikalauja valdyti kiekvieną tranzistorių grupę atskirai naudojant 3 signalus su apibrėžtu impulso pločiu. Pavarai veikiant regeneraciniame darbo režime, naudojama impulso pločio valdymo būdas valdyti tiek jungiklių grupę kuri veikia regeneraciniame darbo režime, tiek bendrą jungiklių grupę, veikiančią varikliniame ir regeneraciniame darbo režimuose. Abi jungiklių grupės veikia pagal sinchronizuotą fazinės įtampos dažnį, kurio kampą galima keisti ir turi vieną nuo kitos nepriklausomą impulso pločio apibrėžimo parametą.

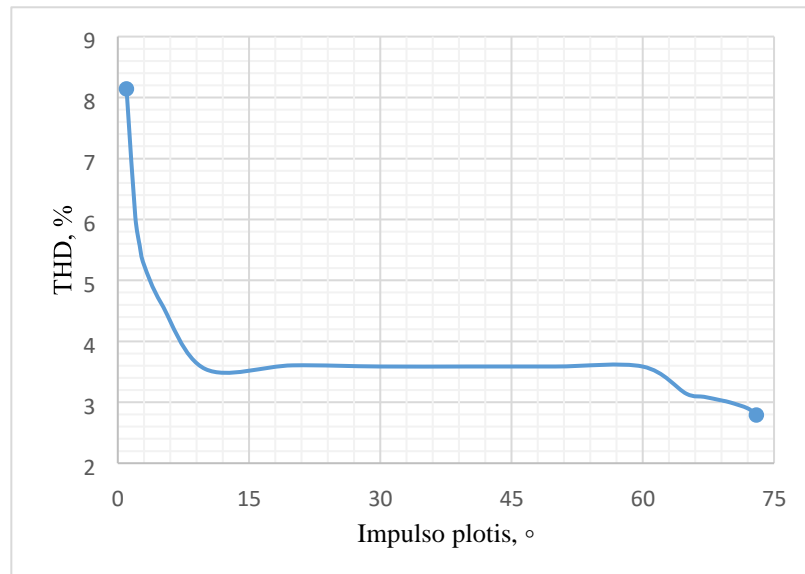


17 pav. SMC pavaros Aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio.

Jungiklių grupės kuri veikia tik regeneraciniame darbo režime, turi atitikti tik vieną sąlygą:  $0^\circ < PW < 74^\circ$ . Jeigu impulso plotis neatitinka šios sąlygos, tarpinės nuolatinės srovės grandies srovė yra artima nuliui. Tai reiškia pavara negrąžina energijos atgal į tinklą. Todėl charakteristikose (17 pav.) yra keičiamas bendros jungiklių grupės impulso plotis. Pavaros rotoriaus sukimo momentas

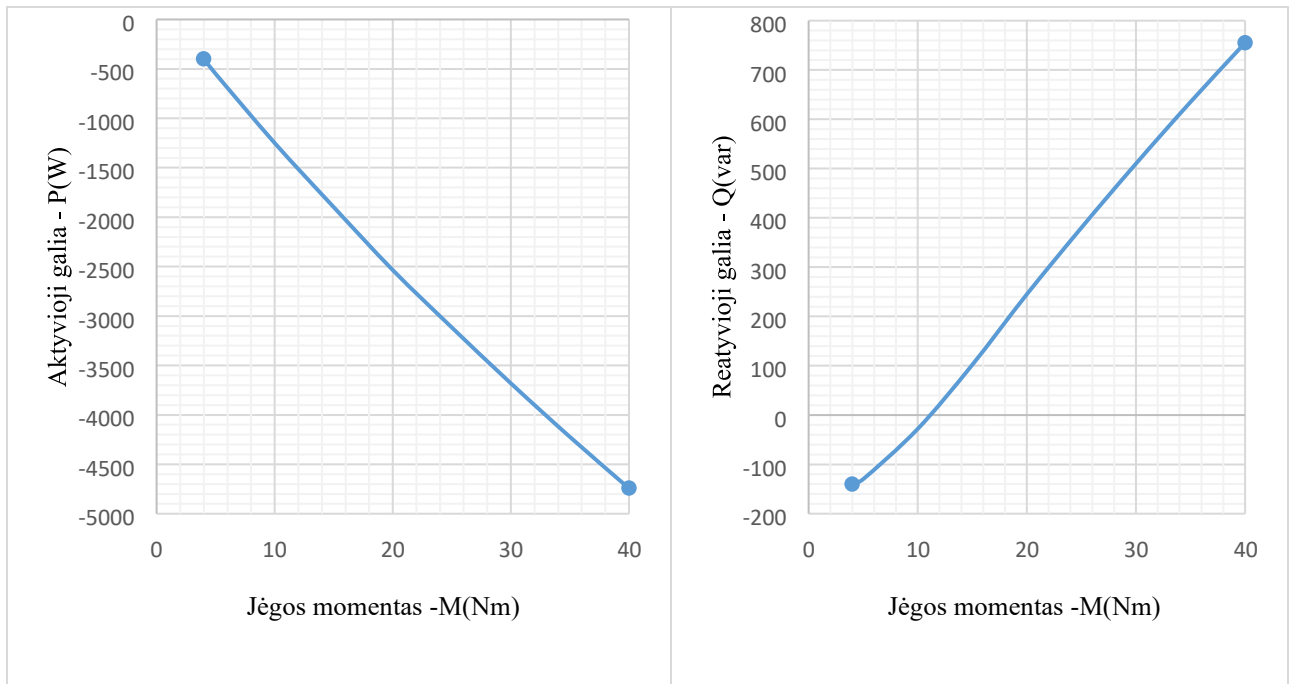
$M = 15\text{Nm}$ . Bendros jungiklių grupės impulso plotis turi poveikį tiek aktyviai tiek reaktyviai galiai. Minimali reaktyvi galia gaunama kai impulso plotis  $PW = 2,5^\circ$ , tada pavaros reaktyvios ir aktyvioji galio atitinka:  $P = -1918$ ,  $Q = -43$  var. Iš šių rezultatų galima teigti, kai pavarą veikiantis sukimo momentas  $M = 15\text{Nm}$ , netiesinio jungimo pavara gražina į tinklą didesnę aktyvios galios kiekį ( $P_{\text{IMC}_60} = -2675$  W,  $Q_{\text{IMC}_60} = -32$  var), esant mažiausiai reaktyvios galios vertei.

Aktyvioji galia yra didžiausia kai  $PW = 10^\circ$ ,  $P = -1975W$ . Aktyvioji ir reaktyvioji galia išlieka pastovi ( $P = -1871 W, Q = -2682 \text{ var}$ ) ir nekinta kai impulso plotis kinta:  $30^\circ \leq PW \leq 60^\circ$ . Kai impulso plotis toliau didinamas, aktyvioji galia pradeda mažėti, tačiau reaktyvioji galia didėja. Kai impulso plotis:  $73^\circ \leq PW$ , aktyvioji galia tampa teigiama, kadangi srovė, pavara keitiklio tarpinėje nuolatinės srovės grandyje, pakeičia kryptį. Kai impulso plotis yra  $PW = 73^\circ$ , pavara vis dar veikia regeneraciniame darbo režime,  $P = 100W$ , tačiau reaktyvioji galia yra stipriai padidėjusi ir siekia  $Q = -16549 \text{ var}$ . Ribose  $60 < PW < 73$ , pagal poreikį galima didinti neigiamos reaktyvinės galios vertę, prarandant iki 100% aktyviosios galios. Taip pat galima sumažinti reaktyvios galios absoiutinę vertę ribose:  $2,5^\circ \leq PW < 30^\circ$ . Norint gauti teigiamą reaktyvią galią impulso plotį reikia naudoti minimalų impulso plotį:  $0^\circ < PW < 2,5^\circ$ .



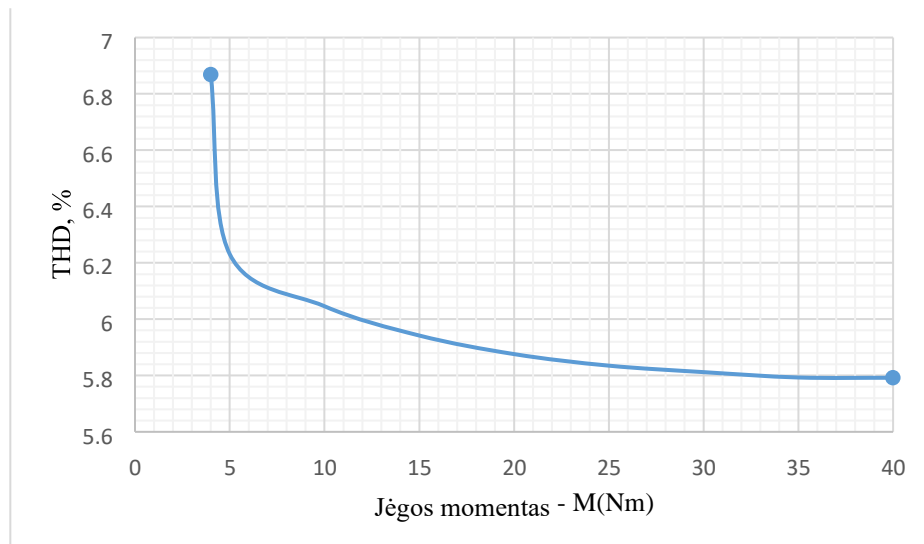
**18 pav.** SMC pavaros THD priklausomybė nuo impulso pločio.

Kai impulso plotis  $PW < 10^\circ$ , suminiai šalutinių harmonikų iškraipymai auga. Tačiau nekinta  $10^\circ < PW < 60^\circ$  ribose iš išlieka pastovus:  $THD = 3.587\%$ . Iš to matoma, kad netiesioginio jungimo pavara ( $THD_{imc\_60} = 3,2 \%$ ) taip pat turi mažesnę THD nei SMC pavara ( $THD_{SMC\_2,5} = 5,573 \%$ ), kai reaktyvioji galia yra minimali. Naudojant impulso pločio valdymą iš aptartų rezultatų galima teigti, kad IMC pavara siūlo didesnę lankstumą, didesnę aktyvią galią prie mažiausios reaktyvios galios, mažesnius suminius šalutinių harmonikų iškraipymus ir lengvesnį valdymą nei SMC tipo pavara.



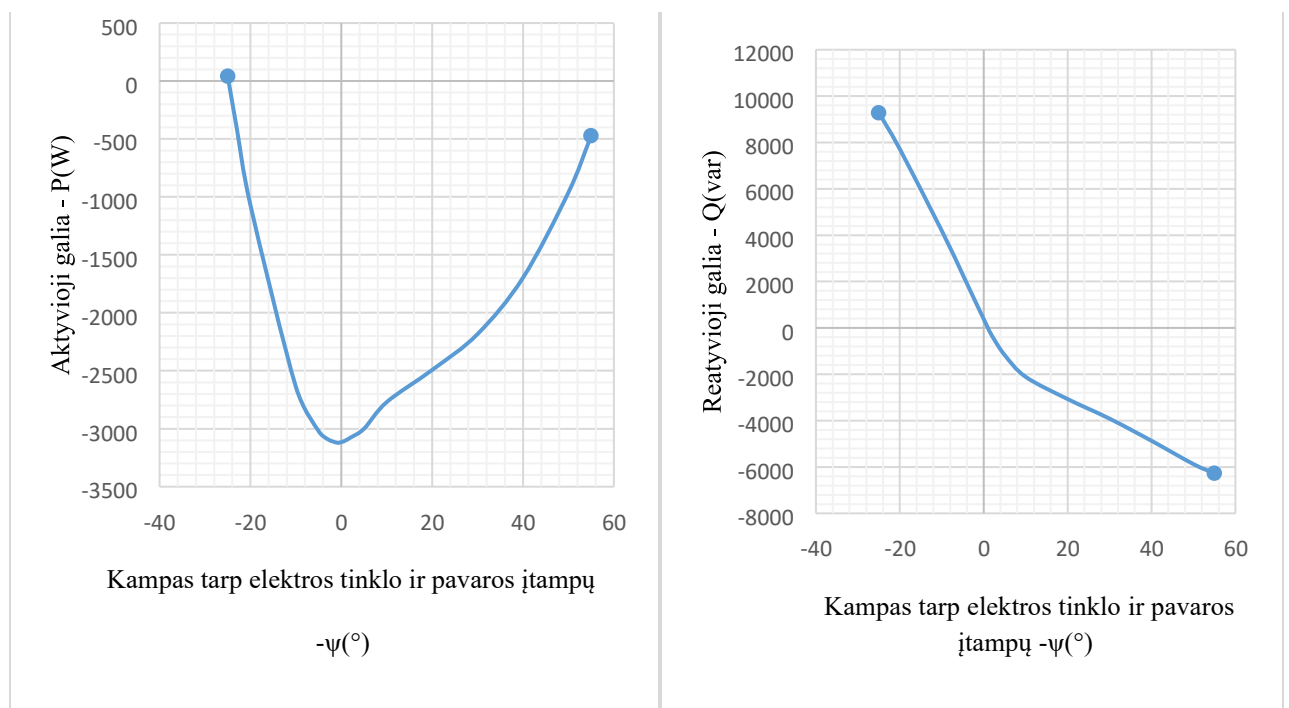
**19 pav.** SMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento.

Iš pateiktų charakteristikų (19 pav.) matome, kad pavara pradeda tiekti aktyvią galią į tinklą kai rotorius sukantis jėgos momentas yra:  $M \geq 4\text{Nm}$ . Charakteristika sudaryta, kai bendro veikimo tranzistorių grupės impulso plotis  $PW = 2^\circ$ . Jeigu pavaros rotorius veikia mažesnė jėga, tai pavaros greitis nenusistovi, tarpinės nuolatinės srovės grandies srovė svyruoja tarp teigiamos ir neigiamos reikšmių. Jėgos momento poveikis išlieka tiesiškas, tačiau matome išskirtinę reaktyvios galios reakcija į mažą jėgos momentą. Priešingai, nei IMC tipo pavaros (13 pav.), didinant jėgos momentą, reaktyvioji galia pakeičia kryptį iš neigiamos į teigiamą. Naudojant mažą jėgos momentą:  $M \leq 10\text{Nm}$ , yra gaunama neigiama reaktyvioji galia, tačiau kai pavarą veikiantis jėgos momentas viršija  $M > 10\text{Nm}$ , reaktyvinė galia tampa teigiama ir didėja tiesiškai. Reaktyvios galios pasikeitimas iš indukcinės į talpinę reiškia, kad kampas tarp įtampos ir srovės pasikeičia į priešingą. IMC tipo pavaros, didinant jėgos momentą 5Nm, reaktyviosios galios pokytis atitinka:  $\Delta Q = -6\text{var}$ , SMC pavaros:  $\Delta Q = 120\text{var}$ .



20 pav. SMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento.

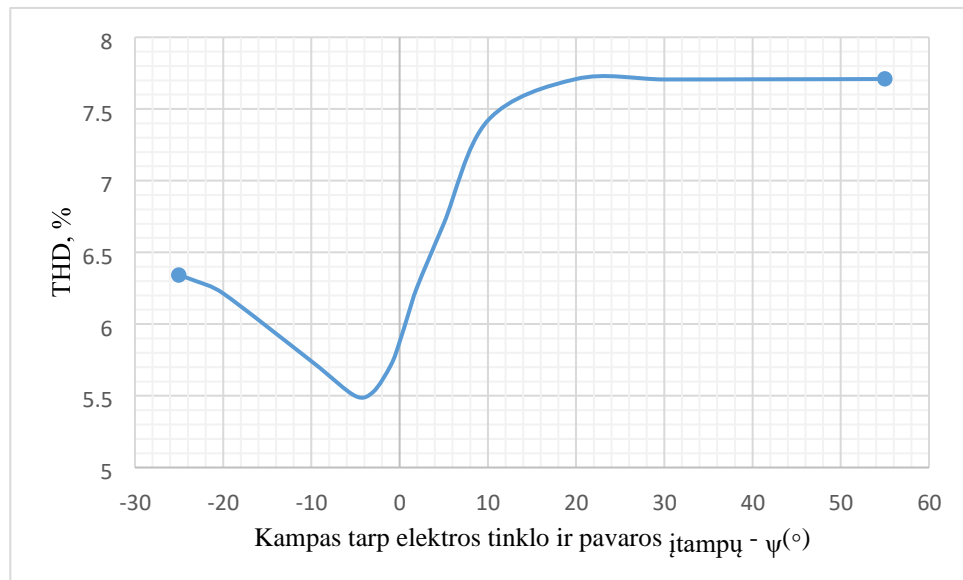
Taip pat iš suminių šalutinių harmonikų iškraipymo charakteristikų (14 – 20 pav.) matoma, kad esant mažam jėgos momentui visada gaunamas didesnis THD. Taip pat vidutiniškai paskaičiuavus skirtumą tarp THD, visais IMC ir SMC matuotais jėgos momento taškais, gauta:  $THD_{smc} \approx THD_{imc} \times 1,8$ .



21 pav. SMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.

Charakteristikoms (21 pav.) sudaryti naudojamas 25Nm jėgos momentas, 90° impulso plotis jungiklių grupei veikiančioje tik regeneraciniame darbo režime ir 2° impulso plotis bendro veikimo tranzistorių grupei. Šiuo atveju pavaros reakcija skiriasi nuo kitų pavarų tuo, kad kampas tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų  $\psi$  teigiamą ir neigiamą pusę, nėra simetriškas y ašies atžvilgiu. SMC pavaros kampo tarp elektros tinklo ir įtampos ribos:  $-55^\circ \leq \psi < 25^\circ$ . Kai kampas neatitinka kampo tarp tinklo ir pavaros valdymo diapazono, pavaros DC grandies srovė tampa teigiama ir pavara nebegražina į tinklą į energijos. Panašumas su IMC tipo pavara yra tas, kad keičiant kampą nuo 0° iki 25°, pavaros

teigiamos reaktyvios galios absoliutinė vertė didėja, keičiant kampą nuo  $0^\circ$  iki  $-55^\circ$ , pavaros neigiamos reaktyvios galios absoliutinė vertė didėja. Abiejų pavarų atvejais, jeigu norima gauti atitinkamą reaktyvios galios kiekį, keičiant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampos, visada yra prarandama aktyvi galia. Ribinėse kampo vertėse, kol pavara dar yra regeneraciniame darbo režime, reaktyvioji galia siekia:  $Q = 8666\text{var}$ , kai  $\psi = 25^\circ$ ,  $Q = -6273\text{var}$ , kai  $\psi = -55^\circ$ . Tai parodo, kad SMC pavara yra pranašesnė už IMC tipo pavara, kai reikalinga didesnė absoliutinė reaktyvios galios vertė.



**22 pav.** SMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.

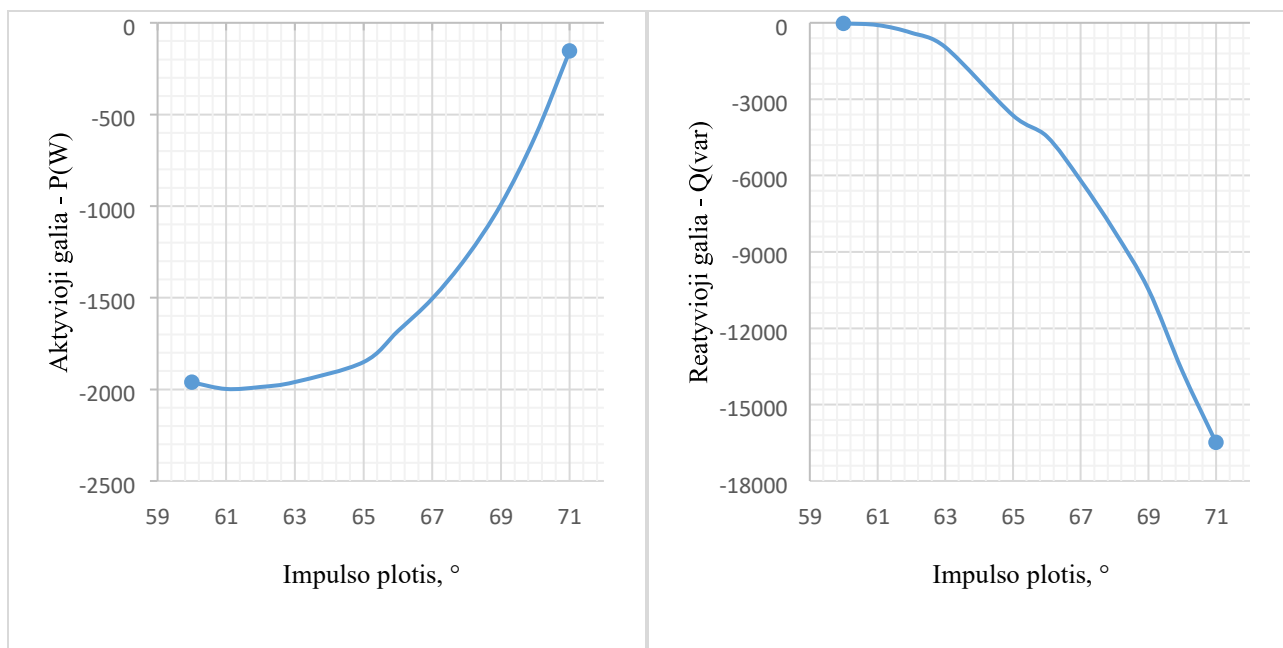
Keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų į neigiamą pusę  $-20^\circ < \psi \leq -55^\circ$ , THD išauga iki aukščiausios vertės  $\text{THD} = 7,71\%$ . Keičiant kampą į teigiamą pusę, kai reaktyvioji galia yra teigiama, THD pasiekia  $6,34\%$ . IMC pavaros suminiai šalutinių harmonikų iškreipymai, keičiant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, kinta minimaliai, tačiau SMC pavaros THD gali išaugti net 1,4 karto.

Retintos matricinės pavaros valdymas yra sudėtingesnis nei netiesioginio jungimo matricinės pavaros. SMC pavara yra pranašesnė tuo, kad valdant impulso plotį galima gauti didelę neigiamos reaktyvios galios absoliutinę vertę ir valdyti ją intervale ( $338\text{var} : -14737\text{var}$ ). IMC pavara yra pranašesnė kai reikiamas didesnis aktyvios galios kiekis su pakankamai maža reaktyvia galia.

### 3.3. Labai retintos matricinės pavaros energetinės charakteristikos

Labai praretinto tipo matricinės pavaros jungiklių skaičius sumažinamas dar labiau. Šios pavaros lygintuvą sudaro tik 6 dvikrypčiai IGBT tipo jungikliai, kurie kiekvienas sudarytas iš IGBT tranzistoriaus ir diodo. Visi 6 jungikliai yra naudojami tiek įprastam varikliam režimui, tiek regeneraciniam darbo režimui. Šios pavaros valdymui naudojamas vienas impulsų generatorius, kurio impulso plotis yra valdomas ir dažnis sinchronizuojamas su tinklo dažniu. Jungiklių valdymui yra naudojama dvigubo impulso funkcija: pirmas impulsas siunčiamas, kai pasiekiamas kampas alfa ( $\alpha = 0^\circ$ ), o antrasis impulsas siunčiamas 60 laipsnių vėliau. Nors, varikliam ir regeneraciniam darbo režimams, naudojamas vienas impulso pločio valdymas, su valdymu susiję parametrai tokie kaip impulso plotis ir kampas tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, tyrimo metu nebuvo vienodi. Kadangi atliename tyrime nagrinėjamas pavarų veikimas regeneraciniame darbo režimuose, buvo keičiami

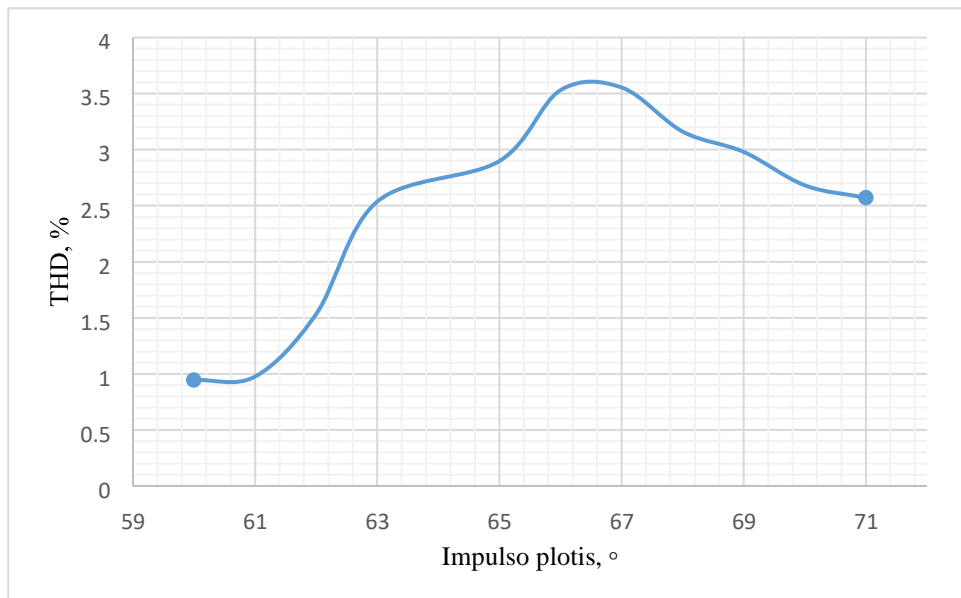
parametrai pavarai veikiant tik regeneraciniu darbo režimu. VSMC parametrai varikliniame darbo režime nekintantys.



**23 pav.** VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo impulso pločio.

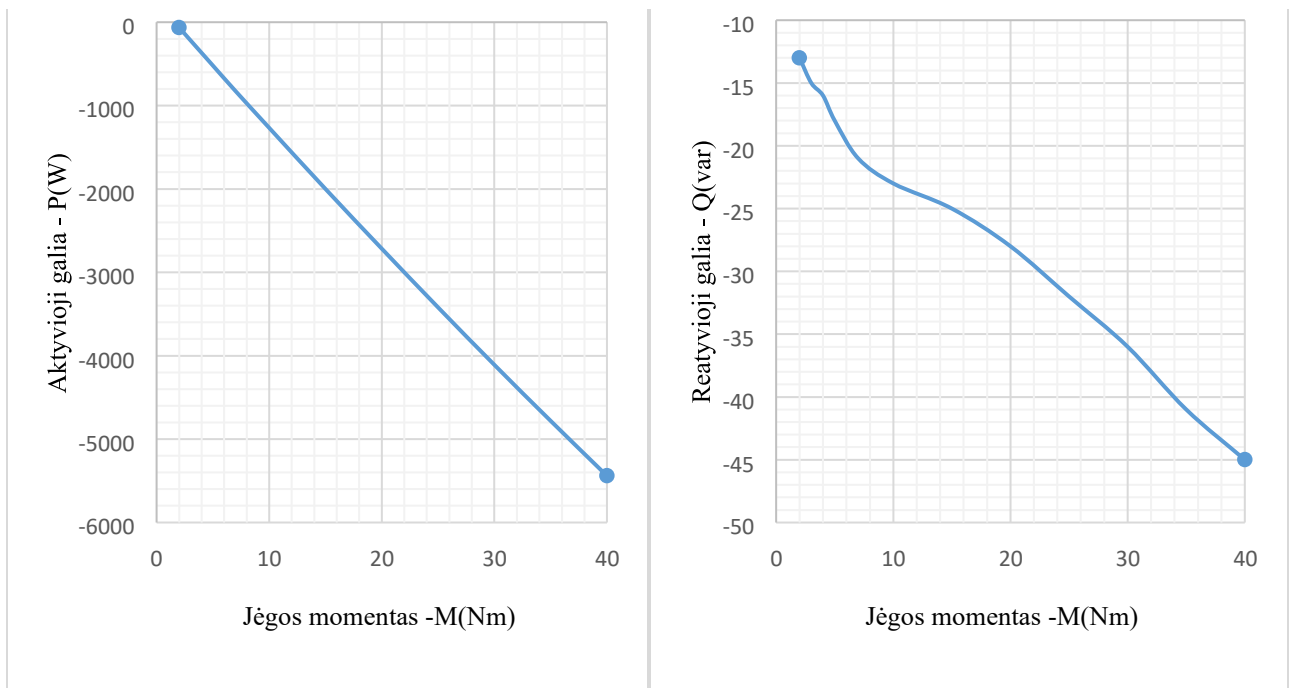
Iš charakteristikų (23 pav.) matome, kad impulso pločio diapazonas, kuriame pavara veikia regeneraciniame darbo režime, yra ganėtinai mažas. VSMC pavaros impulso pločio diapazonas atitinka šias ribas:  $60^\circ \leq PW \leq 71^\circ$ . Kai impulso plotis atitinka sąlyga:  $PW > 71^\circ$ , tai aktyvioji galia pakeičia kryptį. Tai reiškia, kad pavara energijos negrąžina atgal į tinklą. Mažinant impulso plotį, pavaros neigiamos aktyviosios galios absoliutinė vertė didėja, o reaktyvi galia mažėja. Panašus efektas matomas yra SMC tipo pavaroje. Impulso pločio dešinioji riba yra artima abiem SMC ir

VSMC tipo pavaroms. VSMC pavara pasiekia maksimalią aktyviosios galios absoliutinę vertę, kai  $PW = 61^\circ$ , tai  $P = -1998 \text{ W}$ ,  $Q = -89 \text{ var}$ . SMC tipo pavaros aktyvioji galia išauga iki  $P = -1871 \text{ W}$ , kai  $PW = 61^\circ$ . Toliau mažinant kampą pavaros galia kinta minimaliai. Tačiau, SMC pavaros reaktyvioji galia išlieka pakankamai didelė:  $Q = -2683 \text{ var}$ . Taigi aktyviosios galios reakcija SMC ir VSMC pavaroms yra panaši diapazone:  $60^\circ < PW < 71^\circ$ . Toliau mažinant VSMC pavaros impulso valdymo kampą:  $PW < 60^\circ$ , pavaros darbas tampa nestabilus. Nestabili reakcija pasižymi DC grandies srovės krypties ir įtampos svyravimais, pavaros greičio svyravimu, bei aktyvios galios krypties svyravimais. Galima kitokia pavaros reakcija suprojektavus papildomus pasyvius elementus DC grandyje. Iš pavarų aktyvios ir reaktyvios galios charakteristikų pastebėta, kad mažinant aktyviųjų elementų skaičių, mažėja ir impulso pločio diapazonas, kuriame pavara grąžina energiją atgal į tinklą.



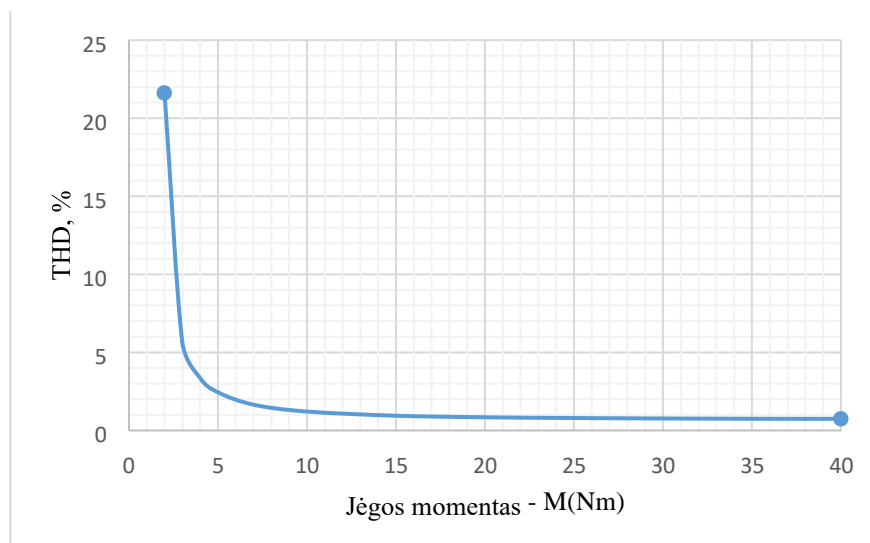
**24 pav.** VSMC pavaros THD priklausomybė nuo impulso pločio.

Pavaros veikimas su mažiausia reaktyvia galia pasiekiamas, kai  $PW = 60^\circ$ , tai  $P = -1962 \text{ W}$ ,  $Q = -25 \text{ var}$ , ir  $THD = 0,95 \%$ . VSMC pavara pasiekia didesnę aktyvios galios vertę, kai minimali reaktyvi galia, už SMC tipo pavara, tačiau mažesnę už IMC tipo pavara:  $P_{VSMC} = -1962 \text{ W}$ ,  $P_{SMC} = -1918 \text{ W}$ ,  $P_{IMC} = -2675 \text{ W}$ . Vis dėl to VSMC pavara turi vieną pranašumą, lyginant su kitomis pavaramis. Iš charakteristikos (24 pav.) matome, kad maksimali pasiekama pavaros suminių šalutinių harmonikų vertė siekia tik 3,6 %. Taip pat THD vertė yra mažiausia, kai pavaros reaktyvios galios absoliutinė vertė yra mažiausia, lyginant su IMC ir SMC pavaramis:  $THD_{VSMC} = 0,95 \%$ ,  $THD_{SMC} = 5,573 \%$ ,  $THD_{IMC} = 3,2 \%$ .



**25 pav.** VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo jėgos momento.

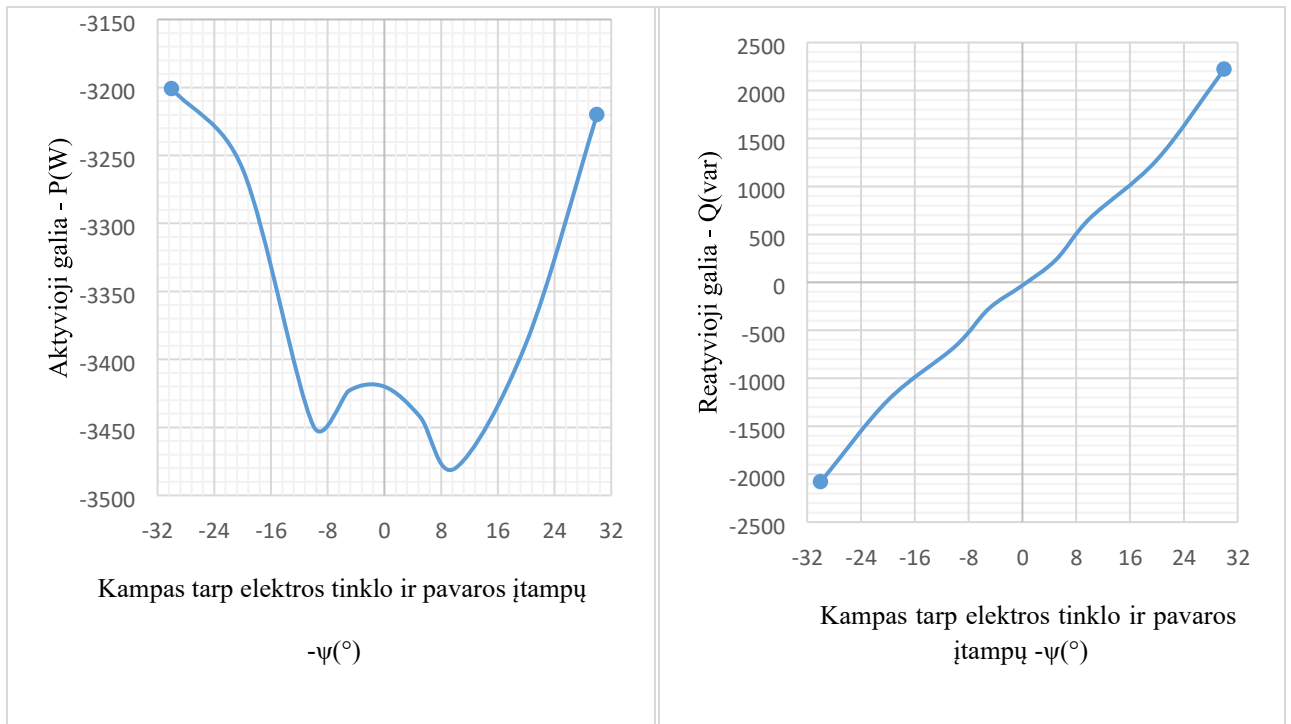
VSMC pavarą veikia regeneraciniu darbo režimu kai jos rotorius yra sukamas papildoma išorine jėga (25 pav.):  $M \geq 2\text{Nm}$ . Charakteristikoms sudaryti naudojamas impulso plotis  $PW = 60^\circ$ , kai pavaros reaktyvios galios absoliutinė vertė yra minimali. Jeigu rotorius yra veikiamas mažesne nei  $2\text{Nm}$  jėga, tai tarpinės nuolatinės srovės grandies srovės absoliutinė vertė yra artima 0. VSMC, SMC ir IMC pavarų aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybės nuo jėgos momento yra tiesinės. Sukant rotorių didesne jėga didėja statoriaus srovė, todėl didėja ir DC grandies absoliutinė srovės vertė. Nuo DC srovės krypties priklauso pavaros aktyvios galios kryptis (teigiama, neigiama). VSMC pavaros reaktyvioji galia, didinant jėgos momentą, yra neigiama, taip pat kaip IMC tipo pavaros. Reaktyvioji gali vidutiniškai per  $5\text{Nm}$  išauga:  $\Delta Q = 2,8\text{var}$ . Didžiausia charakteristikoje matoma reaktyvios galios vertė pasiekama kai:  $M = 40\text{Nm}$ , tai  $Q = -45\text{var}$ . Lyginant su kitomis pavaros, esant  $40\text{ Nm}$  jėgos momentui, šios pavaros absoliutinė reaktyvios galios vertė yra mažiausia:  $Q_{\text{VSMC}} = -45\text{ var}$ ,  $Q_{\text{SMC}} = 755\text{ var}$ ,  $Q_{\text{IMC}} = -56\text{ var}$ .



**26 pav.** VSMC pavaros THD priklausomybė nuo jėgos momento.

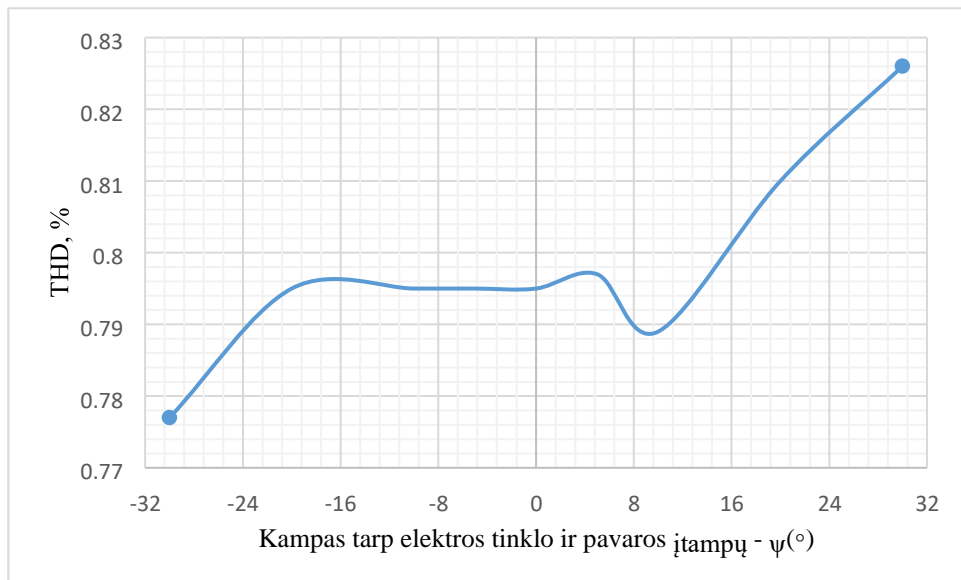
Iš charakteristikos (26 pav.), matomas šalutinių suminių harmonikų iškraipymas, didinant jėgos momentą. Minimalus THD pasiektas kai:  $M = 40\text{Nm}$ , tai  $\text{THD} = 0,74\%$ . Lyginant su kitomis pavaromis, THD yra pasiekiamas labai mažas, kadangi esant  $40\text{Nm}$  apkrovai:  $\text{THD}_{\text{IMC}} = 2,6\%$ ,  $\text{THD}_{\text{SMC}} = 5,79\%$ .





**27 pav.** VSMC pavaros aktyvios ir reaktyvios galios priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.

Naudojant VSMC pavaros topologija, atsiranda galimybė dar padidinti, aktyvios galios vertę regeneraciniame darbo režime, keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų (27 pav.). Charakteristikos sudarytos naudojam parametrus:  $PW = 60^\circ$ ,  $M = 25 \text{ Nm}$ . Iš pateiktų charakteristikų matome aiškią kampo valdymo ribą:  $-30^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$ . Kai kampas neatitinka šių ribų, pavaros energetinių charakteristikų vertės nenusistovi ir pavaros greitis pastoviai kinta. Ši pavaros topologija, nuo prieš tai aptartų, skiriasi tuo, kad pakeitus kampą  $10^\circ$  aktyvios galios absoliutinė vertė yra didesnė: kai  $\psi = 10^\circ$ , tai  $P = -3480\text{W}$ , kai  $\psi = 0$ , tai  $P = -3420\text{W}$ . Kai kampas, tarp tinklo ir pavaros įtampų, yra ribose:  $-30^\circ \leq \psi < 10^\circ$ ,  $10^\circ < \psi \leq 30^\circ$ , aktyvios galios absoliutinė vertė mažėja ir yra mažiausia kai:  $\psi = -30^\circ$ ,  $P = -3202\text{W}$ . Lygiai taip pat, kaip ir IMC ir SMC tipo pavarose, keičiant kampą tarp elektros tinklo ir pavaros įtampų, galime valdyti reaktyvią galią, keičiant ją iš talpinę į indukcinę ir atvirkščiai. Kai  $\psi < 0^\circ$ , tai reaktyvioji galia yra laikoma talpinio pobūdžio, kai  $\psi > 0^\circ$ , tai reaktyvioji galia yra laikoma indukcinio pobūdžio. SMC ir IMC topologijų pavaros yra pranašesnės už VSMC pavarą tuo, kad keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų, maksimali VSMC pavaros absoliutinė reaktyvios galios vertė yra  $\approx 3$  mažesnė.



**28 pav.** VSMC pavaros THD priklausomybė nuo kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų.

VSMC tipo pavara, taip pat turi mažesnį kampo, tarp tinklo ir pavaros įtampų, valdymo diapazoną. Tačiau ši pavara yra pranašesnė už IMC ir SMC pavaras tuo, kad jos suminiai šalutinių harmonikų iškreipimai yra minimalūs (28 pav.). Keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų, gaunamas ir nedidelis THD pokytis, tačiau jis yra minimalus: nuo 0,777 % iki 0,826 %.

## Išvados

1. Parengtinio tyrimo metu, naudojant supaprastintą modelį, nustatyta, kad pavara gražina aktyviają galią atgal į tinklą, kai pavaros įtampa yra 1,117 karto didesnė už tinklo įtampą:  $U_p > 1,117 \times U_t$ . Keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų, galima valdyti pavaros reaktyvios galios kryptį ir absoliutinę vertę, kai kampas yra ribose:  $-24^\circ < \psi \leq 24^\circ$ .
2. Siekiant pavaros atpigimo ir dėl to mažinant aktyvių elementų skaičių matricinės pavaros galios grandinėje, mažėja impulso pločio valdymo diapazonas, kuriame pavara gražina energiją atgal į tinklą. Naudojant impulso pločio valdymą, reaktyvios galios teigiamą absoliutinę vertę valdyti galima tik naudojant netiesioginę matricinę pavara. Neigiamos absoliutinės vertės valdymas galimas visoms tyrime naudotoms pavaroms. Kai pavaros reaktyvios galios vertė minimali, didžiausia aktyvi galia pasiekama naudojant netiesioginę matricinę pavara, mažiausia – retinta matricinę pavara. Mažinant impulso plotį, didėja suminis šalutinių harmonikų iškraipymas. Mažiausias suminis šalutinių harmonikų iškraipymas pasiekiamas naudojant labai retinta netiesioginę matricinę pavara.
3. Aktyvios, reaktyvios galios priklausomybės nuo jėgos momento yra tiesinės. Nuo jėgos momento priklauso reaktyvios galios kiekis. Mažiausiai jautrios jėgos momento poveikiui pavaros yra netiesioginė matricinė pavara ir labai retinta netiesioginė matricinė pavara. Kai variklio rotorų veikiantis jėgos momentas yra 2,7 karto mažesnis už vardinį, suminis šalutinių harmonikų iškraipymas išauga.
4. Keičiant kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų, valdoma aktyvios ir reaktyvios galios kryptis ir absoliutinė vertė. Netiesinio jungimo pavaros diapazonas, kuriame galime keisti kampą tarp tinklo ir pavaros įtampų:  $-42^\circ < \psi < 43^\circ$ , retintos matricinės pavaros:  $-25^\circ < \psi \leq 55^\circ$ , labai retintos matricinės pavaros:  $-30^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$ . Kai kampo tarp tinklo ir pavaros įtampų kampas teigiamas, netiesinio jungimo ir labai retintos pavaros, reaktyvioji galia yra teigiama, tačiau retintos matricinės pavaros – neigiama. Labai retintos netiesioginės matricinės pavaros suminis šalutinių harmonikų iškraipymas yra 5,8 karto mažesnis už retintos netiesioginės matricinės pavaros ir 3,4 karto mažesnis už netiesioginės matricinės pavaros.

## Literatūros sąrašas

1. Kolar, J. W. Friedli, T. Rodriguez, J. and Wheeler, P. W. Review of three-phase PWM AC-AC converter topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011, **58**(11), 4988–5006, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/TIE.2011.2159353](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2159353). ISSN 1557-9948.
2. Vilathgamuwa D. M. and Jayasinghe, S. D. G. Rectifier systems for variable speed wind generation - A review. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2012, 1058–1065, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/ISIE.2012.6237235](https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237235). ISSN 2163-5145.
3. Baroudi, J. A. Dinavahi, V. and Knight, A. M. A review of power converter topologies for wind generators. *Renewable Energy*. 2007, **32**(14), 2369–2385, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1016/j.renene.2006.12.002](https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.002). ISSN 0960-1481.
4. Wang, H. Wang, H. Zhu, G. and Blaabjerg, F. An Overview of Capacitive DC-Links-Topology Derivation and Scalability Analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020, **35**(2), 1805–1829, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/TPEL.2019.2920257](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2920257). ISSN 1941-0107.
5. Dharmasena, S. Olowu, T. O. Sarwat, A. I. Bidirectional AC/DC Converter Topologies: A Review. *SoutheastCon*. 2019, 1–5, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020287](https://doi.org/10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020287). ISSN 1558-058X.
6. Zhao, Z. Davari, P. Lu, W. Wang, H. and Blaabjerg, F. An Overview of Condition Monitoring Techniques for Capacitors in DC-Link Applications. *IEEE Transaction Power Electronics*. 2021, **36**(4), 3692–3716, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/TPEL.2020.3023469](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3023469). ISSN 1941-0107.
7. Afshari, E. Khodabandeh, M. and Amirabadi, M. A Single-Stage Capacitive AC-Link AC-AC Power Converter. *IEEE Transactions Power Electronics*. 2019, **34**(3), 2104–2118, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/TPEL.2018.2841398](https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2841398). ISSN 1941-0107.
8. Fundamentals of Matrix Converter. [Žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [http://www.die.ing.unibo.it/dottorato\\_it/Matteini/Matteini\\_PhD\\_part2.pdf](http://www.die.ing.unibo.it/dottorato_it/Matteini/Matteini_PhD_part2.pdf)
9. Avci, E. and Uçar, M. Analysis and design of grid-connected 3-phase 3-level AT-NPC inverter for low-voltage applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2017, **25**(3), 2464–2478, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.3906/elk-1603-159](https://doi.org/10.3906/elk-1603-159). ISSN 1300-0632.
10. Wheeler, P. W. Rodríguez, J. Clare, J. C. Empringham, L. and Weinstein, A. Matrix converters: A technology review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002, **49**(2), 276–288, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/41.993260](https://doi.org/10.1109/41.993260). ISSN 1557-9948.
11. Bento, A. et al. On the potential contributions of matrix converters for the future grid operation, sustainable transportation and electrical drives innovation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, **11**(10), [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.3390/app11104597](https://doi.org/10.3390/app11104597). ISSN 2076-3417.
12. Szczeniak, P. Kaniewski, J. Power electronics converters without DC energy storage in the future electrical power network. *Electrical Power Systems Research*. 2015, **129**, 194-207, [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1016/j.epsr.2015.08.006](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.006). ISSN 0378-7796.

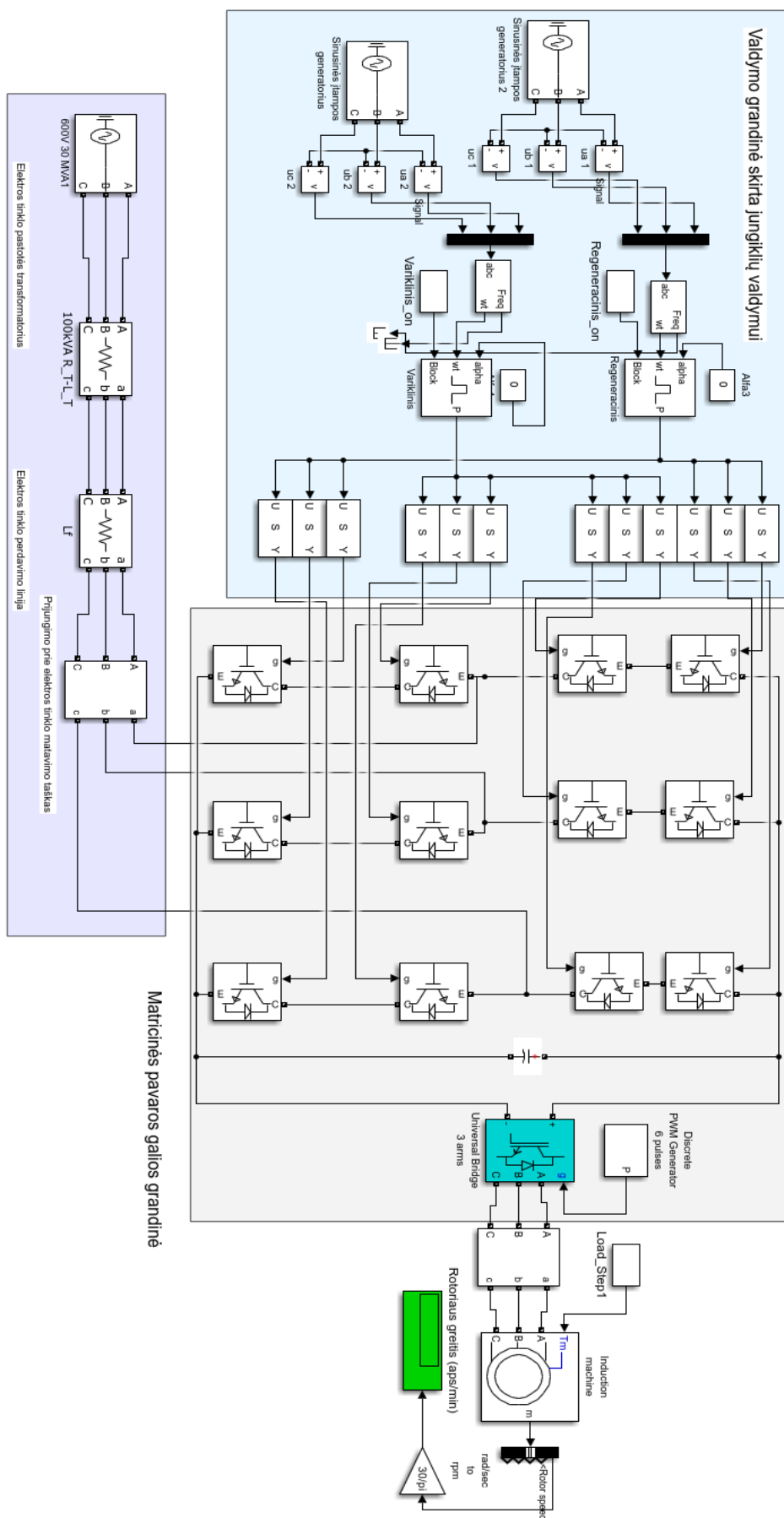
13. Ellabban, O. Abu-Rub, H. and Bayhan, S. Z-Source Matrix Converter: An Overview. *IEEE Transactions Power Electronics*. 2016, **31**(11), 7436–7450, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1109/TPEL.2015.2471799](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2471799). ISSN 1941-0107.
14. Malekjamshidi, Z. Jafari, M. Zhu, J. and Xiao, D. Bidirectional power flow control with stability analysis of the matrix converter for microgrid applications. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2019, **110**, 725–736, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.1016/j.ijepes.2019.03.053](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.053). ISSN 0142-0615.
15. Sri, V. D. and Venkatesan, T. A review on performance analysis of matrix converter fed AC motor drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2016, **7**(1), 85–93, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: [10.11591/ijpeds.v7.i1.pp85-93](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i1.pp85-93). ISSN 2722-256X.
16. Szczesniak, P. Review of AC-AC frequency converters. *Power Systems*. 2013, **77**, 17–86, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1007/978-1-4471-4896-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4896-8_2). ISBN 978-1-4471-4896-8
17. Rodriguez, J. Kolar, J. Espinoza, J. Rivera, M. and Rojas, C. Predictive current control with reactive power minimization in an indirect matrix converter. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2010, 1839–1844, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/ICIT.2010.5472527](https://doi.org/10.1109/ICIT.2010.5472527). ISBN 978-1-4244-5697-0.
18. Rmili, L. Rahmani, S. and Al-Haddad, K. Sparse matrix converter: Modeling and PWM control. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2015, 411–416, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/ISIE.2015.7281503](https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281503). ISSN 2163-5145.
19. Gong, Z. Zheng, X. Zhang, H. Dai, P. Wu, X. and Li, M. A QPR-Based Low-Complexity Input Current Control Strategy for the Indirect Matrix Converters with Unity Grid Power Factor. *IEEE 24<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Electronics*. 2019, **7**, 38766–38777, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/ACCESS.2019.2906697](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906697). ISSN 2163-5145.
20. Bottenberg, A. L. et al. INDIRECT MATRIX CONVERTER FOR AC INDUCTION MOTOR DRIVE: EXPERIMENTAL RESULTS. *Conference: Congresso Brasileiro de Automatica*. 2010, **1**, 4316–4322, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.13140/RG.2.1.4962.6721](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4962.6721).
21. Takuma, S. Orikawa, K. Itoh, J. I. Oshima, R. and Takahashi, H. Isolated DC to three-phase AC converter using indirect matrix converter with ZVS applied to all switches. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*. 2015, 4678–4684, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/ECCE.2015.7310321](https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310321). ISSN 2329-3748.
22. Rodriguez, J. Rivera, M. Kolar, J. W. and Wheeler, P. W. A review of control and modulation methods for matrix converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012, **59**(1), 58–70, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/TIE.2011.2165310](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165310). ISSN 1557-9948.
23. Ammar, A. et al. A Review on Three-phase AC/AC Power Converters Derived from the Conventional Indirect Matrix Converter. *2020 IEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2020, 432-437, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/ICIT45562.2020.9067114](https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067114). ISSN 2643-2978.

24. Chiang G. T. and Itoh, J. I. Comparison of two overmodulation strategies in an indirect matrix converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013, **60**(1), 43–53, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/TIE.2012.2185021](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2185021). ISSN 1557-9948.
25. Jappe, T. K. Mussa, S. A. and Heldwein, M. L. Analysis of indirect matrix converter topologies in voltage step-up operation mode. *11th Brazilian Power Electronics Conference*. 2011, 930–935, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/COBEP.2011.6085332](https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085332). ISSN 2175-8603
26. Tuyen, N. D. and Dzung, P. Q. Space Vector Modulation for an Indirect Matrix Converter with Improved Input Power Factor. *Power Electronics and Power Quality*. 2017, **10**(5), [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.3390/en10050588](https://doi.org/10.3390/en10050588). ISSN 1996-1073.
27. Lee, E. Lee, K. B. Lim, J. S. Lee, Y. and Song, J. H. Predictive current control for a sparse matrix converter. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2012, 36–40, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/IPEMC.2012.6258840](https://doi.org/10.1109/IPEMC.2012.6258840). ISBN 978-1-4577-2085-7.
28. Khosravi, M. et al. Review of model predictive control strategies for matrix converters. *IET Power Electronics*. 2019, 12(12), 3021–3032, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1049/iet-pel.2019.0212](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0212). ISSN 1755-4535.
29. Round, S. et al. Comparison of Performance and Realization Effort of a Very Sparse Matrix Converter to a Voltage DC Link PWM Inverter with Active Front End. *Ieej Transaction on Industry Applications*. 2006, **126**(5), [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1541/ieejias.126.578](https://doi.org/10.1541/ieejias.126.578). ISSN 1348-8163.
30. Kolar, J. W. Baumann, M. Schafmeister, F. and Ertl, H. Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter. *APEC. 17th Annual IEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2002, **2**, 777–791, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/apec.2002.989333](https://doi.org/10.1109/apec.2002.989333). ISBN 0-7803-7404-5.
31. Zhang, J. Li, L. and Dorrell, D. G. Control and Applications of Direct Matrix Converters: A Review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2018, **4**(2), 18–27, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.23919/CJEE.2018.8409346](https://doi.org/10.23919/CJEE.2018.8409346). ISSN 2096-1529.
32. Kolar, J. W. Schafmeister, F. Round, S. D. and Ertl, H. Novel three-Phase AC-AC sparse matrix converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007, **22**(5), 1649–1661, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/TPEL.2007.904178](https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.904178). ISSN 1941-0107.
33. Alammari, R. Aleem, Z. Iqbal, A. and Winberg, S. Matrix converters for electric power conversion: Review of topologies and basic control techniques. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2019, **29**(10), [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1002/2050-7038.12063](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12063). ISSN 2050-7038.
34. Bak, Y. Lee, E. and Lee, K. B. Indirect matrix converter for hybrid electric vehicle application with three-phase and single-phase outputs. *Advanced in Plug-in Hybrid Vehicles and Hybrid Vehicles*. 2015, 8(5), 3849–3866, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.3390/en8053849](https://doi.org/10.3390/en8053849). ISSN 1996-1073.
35. Correa, P. Rodríguez, J. Rivera, M. Espinozav, J. R. and Kolar, J. W. Predictive control of an indirect matrix converter. *IEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, **56**(6), 1847–1853, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/TIE.2009.2013686](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2013686). ISSN 1557-9948.

36. Patel, P. P. and Mulla, M. A. A Single Carrier-Based Pulsewidth Modulation Technique for Three-to-Three Phase Indirect Matrix Converter. *IEEE Transaction Power Electronics*. 2020, **35**(11), 11589–11601, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1109/TPEL.2020.2988594](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2988594). ISSN 1941-0107.
37. Tran, Q. H. and Lee, H. H. An effective carrier-based modulation strategy to reduce the switching losses for indirect matrix converters. *Journal of Power Electronics*. 2015, **15**(3), 702–711, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.6113/JPE.2015.15.3.702](https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.3.702). ISSN 1598-2092.
38. Nguyen, D. T. Lee, H. H. and Chun, T. W. A carrier-based pulse width modulation method for indirect matrix converters. *Journal of Power Electronics*. 2012, **12**(3), 448–457, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.6113/JPE.2012.12.3.448](https://doi.org/10.6113/JPE.2012.12.3.448). ISSN 1598-2092.
39. Zhang, W. F. Yu, Y. H. Comparison of three SVPWM strategies. *Journal of Electronic Science and Technology of China*. 2007, **5**(3), 283-287, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: <https://www.scribd.com/document/533625567/2007-3-283>. ISSN 1674-862X.
40. Kumar, K. V. Michael, A. John, J. P. and Kumar, S. S. Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control for Three Phase Inverter. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010, **5**(7), 61-74, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/267801173\\_Simulation\\_and\\_comparison\\_of\\_S\\_PWM\\_and\\_SVPWM\\_control\\_for\\_three\\_phase\\_inverter](https://www.researchgate.net/publication/267801173_Simulation_and_comparison_of_S_PWM_and_SVPWM_control_for_three_phase_inverter). ISSN 1819-6608.
41. Manias, S. N. Power Electronics and Motor Drive Systems. 2017, 807-842, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811798-9.00011-1>. ISSN 978-0-12-811798-9.
42. Khan, S. P. K. Chatterjee, J. K. Three-phase induction generators: A discussion on performance. *Electric Machines and Power Systems*. 1999, **27**(8), 813–832, [žiūrēta 2023-05-06]. Prieiga per: doi: [10.1080/073135699268867](https://doi.org/10.1080/073135699268867). ISSN 0731-356X.

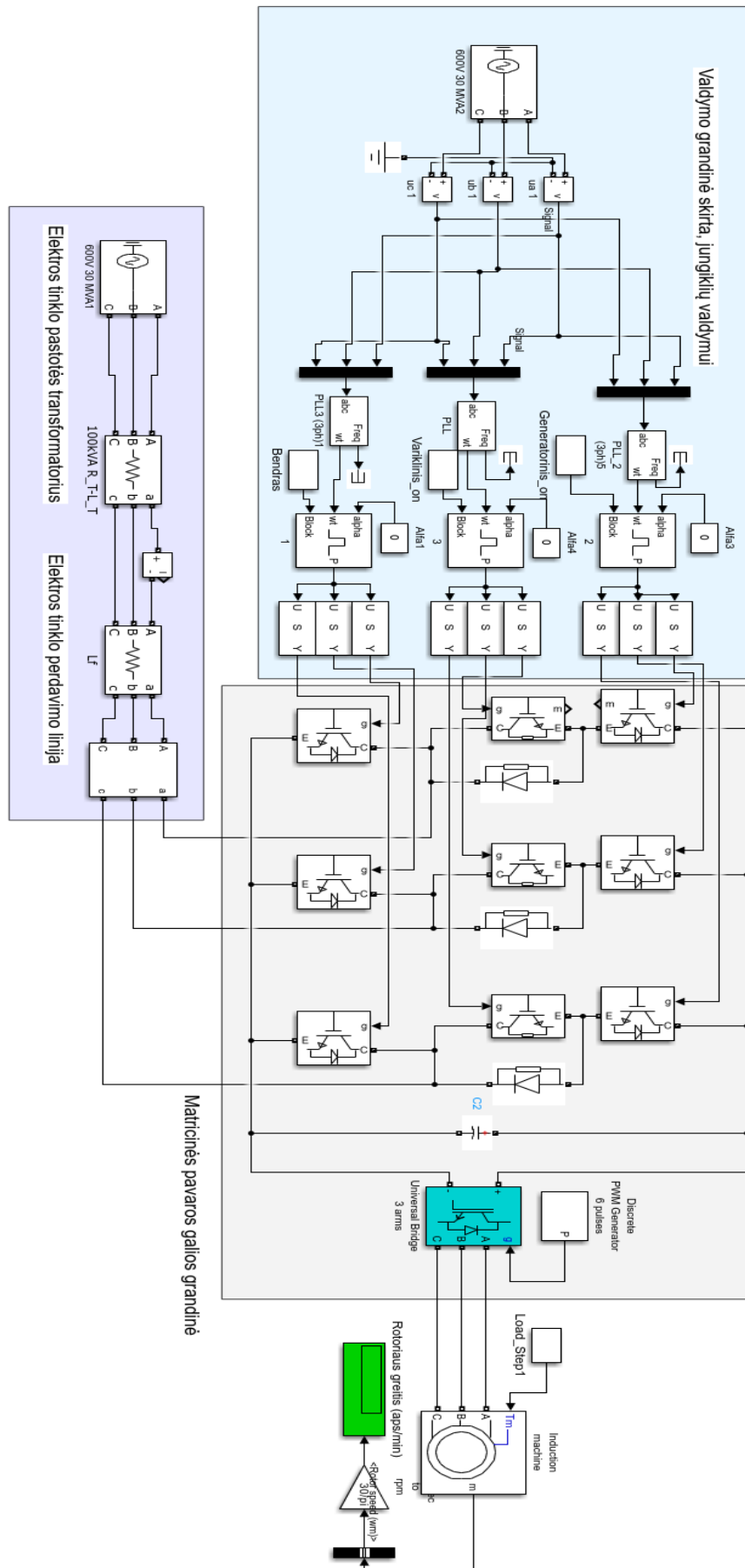
# Priedai

## 1 Priedas. Netiesioginio jungimo matricinės pavaros modelis





## 2 Priedas. Retintos matricinės pavaros modelis



### 3 Priedas. Labai retintos matricinės pavaros modelis

