



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Robertas Repeckas

**BEPAKOPIO GALIOS FAKTORIAUS VALDYMO ELGAMA SISTEMOMS
KŪRIMAS IR TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF CONTINUOUS POWER
FACTOR CONTROL FOR ELGAMA SYSTEMS**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX049

Atsinaujinančios elektros energetikos inžinerijos, elektros energetikos technologijų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)
doc. dr. S. Tolvaišienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

Robertas Repeckas

**BEPAKOPIO GALIOS FAKTORIAUS VALDYMO ELGAMA SISTEMOMS
KŪRIMAS IR TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF CONTINUOUS POWER
FACTOR CONTROL FOR ELGAMA SYSTEMS**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX049
Atsinaujinančios elektros energetikos inžinerijos, elektros energetikos technologijų specializacija
Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Voitech Stankevič
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Anželika Gaidienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Elektros inžinerijos studijų kryptis
Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 6211EX049
Elektros energetikos technologijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)
doc. dr. S. Tolvaišienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Robertui Repeckui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Bepakopio galios faktoriaus valdymo ELGAMA sistemoms kūrimas ir tyrimas

patvirtinta 2019 m. spalio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. 232 el

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. birželio 4 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Sukurti simuliacinį modelį, ištirti tiristorių įjungimo laiko įtaką tinklo grandinės kompensavimui, ištirti srovės ir įtampų priklausomybę nuo SVC darbo, atlikti eksperimentą su realiu įrenginiu ir gautus rezultatus palyginti su gautais simuliuojant.

Aiškinamasis raštas: ĮVADAS; 1. TIRIAMOJI METODINĖ DALIS; 1.1. Nuoseklusis aktyvusis filtras; 1.2. Šuntuojantis aktyvusis filtras; 1.3. Reaktyviosios galios kompensavimas sinchroniniu varikliu; 1.4. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius; 1.5. Statinis sinchroninis kompensatorius; 2. TIRIAMOJI EKSPERIMENTINĖ DALIS; 2.1 TCR grandinės tyrimas; 2.2 SVC tyrimas simetrinei tinklo apkrovai; 2.3 SVC tyrimas nesimetrinei tinklo apkrovai; IŠVADOS; LITERATŪROS SĄRAŠAS; PRIEDAI.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

dr. Anželika Gaidienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

prof. dr. Voitech Stankevič
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Robertas Repeckas
(Vardas, pavardė)
2020 lapkričio 15 d.
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Elektronikos fakultetas Elektros inžinerijos katedra		ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Elektros energetikos sistemų inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas			
Pavadinimas	Bepakopio galios faktoriaus valdymo ELGAMA sistemoms kūrimas ir tyrimas Autorius Robertas Repeckas		
Vadovas	Voitech Stankevič		
Kalba: lietuvių			
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami galios faktoriaus valdymo įrenginiai. Projektuojamas statinis reaktyviosios galios kompensatorius simetrinei bei nesimetrinei tinklo apkrovai. Naudojant kompiuterinio simuliacinio programą, ištiriamas kompensatoriaus veikimas keičiant SVC paleidimo kampą esant įvairiems tinklo veikimo režimams. Naudojant SVC įrenginį, atliekami praktiniai bandymai elektros tinkle bei gauti rezultatai palyginami su gautais kompiuterine programa. Atlikus teorinį ir praktinį tyrimą, pateikiamos išvados. Darbą sudaro: įvadas, reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių teorinė analizė, SVC įrenginio tyrimas, grandinės teoriniai skaičiavimai, eksperimentinis tyrimas, gautų rezultatų palyginimas, išvados. Darbo apimtis 55 p. Teksto be priedų, 44 iliustr., 6 lent., 17 bibliografiniai šaltiniai			
Prasminiai žodžiai: reaktyvioji galia, kompensavimas, galios faktorius, induktyvumas, talpumas			

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Electronics Department of Electrical Engineering	ISBN Copies No. Date-.....-.....	ISSN
Master Degree Studies Electrical Energetics Systems Engineering study programme Master Graduation Thesis Title Development and Investigation of Continuous Power Factor Control for ELGAMA Systems Author Robertas Repeckas Academic supervisor Voitech Stankevič		
Thesis language: Lithuanian		
Annotation This final paper examined power factor control devices. Designed static VAR compensator for symmetrical and asymmetrical grid loads. Using computer software analysed SVC influence on grid parameters in different configurations. Examined a real SVC device under load which measurement results were compared with theoretical. After theoretical and experimental investigation conclusions were provided. Paper's composition: introduction, analysis of theoretical investigation in power factor correction devices, SVC analysis, grid theoretical calculations, experimental analysis, comparison of results, conclusions. Amount of paper – 55p. of text without appendixes, 44 fig., 6 tables, 17 bibliographical sources.		
Keywords: reactive power, compensation, power factor, inductance, capacitance		

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Robertas Repeckas, 20152847

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektros energetikos sistemų inžinerija, EETfm-19

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2021 m. gegužės 19 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Bepakopio galios faktoriaus valdymo ELGAMA sistemoms kūrimas ir tyrimas“ patvirtintas 2019 m. spalio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. 232el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: profesorius daktaras Voitech Stankevič. Mano darbo vadovas profesorius daktaras Voitech Stankevič.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Robertas Repeckas

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

ĮVADAS.....	12
1. TIRIAMOJI METODINĖ DALIS	13
1.1. Nuoseklusis aktyvusis filtras.....	13
1.2. Šuntuojantis aktyvusis filtras.....	13
1.3. Reaktyviosios galios kompensavimas sinchroniniu varikliu	15
1.4. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius.....	16
1.4.1. SVC harmoninis iškraipymas	20
1.4.2. Tinklo įtampų balansavimas naudojant SVC	20
1.5. Statinis sinchroninis kompensatorius	21
2. TIRIAMOJI EKSPERIMENTINĖ DALIS	24
2.1. TCR grandinės tyrimas.....	25
2.2. SVC tyrimas simetrinei tinklo apkrovai.....	28
2.2.1. Nekompensuotos apkrovos parinkimas ir skaičiavimas.....	28
2.2.2. Tinklo perdavimo linijos skaičiavimas.....	30
2.2.3. Šuntuojančio kondensatoriaus skaičiavimas galios faktoriaus korekcijai.....	34
2.2.4. Šuntuojančio kondensatoriaus skaičiavimas įtampos balansavimui	36
2.2.5. Reaktyviosios galios kompensavimas grandinėje naudojant SVC.....	39
2.3. Eksperimentinis SVC tyrimas nesimetrinei tinklo apkrovai	42
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	57
PRIEDAI	60

SANTRUMPOS

FC (angl. *fixed capacitor*) – šuntuojantis kondensatorius.

GTO (angl. *gate turn-off thyristor*) – išjungiamas tiristorius.

IGBT (angl. *insulated-gate bipolar transistor*) – dvipolis tranzistorius su izoliuota užtūra.

PI (angl. *proportional–integral*) – proporcinis integralinis reguliatorius.

PID (angl. *proportional–integral–derivative*) – proporcinis integralinis diferencialinis reguliatorius.

SVC (angl. *static VAR compensator*) – statinis reaktyviosios galios kompensatorius.

STATCOM (angl. *Static synchronous compensator*) – statinis sinchroninis kompensatorius.

TCR (angl. *thyrostor controlled reactor*) – tiristoriais valdomas reaktorius.

TSC (angl. *thyrostor switched capacitor*) – tiristoriais jungiamas kondensatorius.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Nuoseklusis aktyvusis filtras (Kumar and Ilango, 2014).....	13
1.2 pav. (a) aktyvusis filtras su srovės šaltiniu; (b) aktyvusis filtras su įtampos šaltiniu (Mikkili and Panda, 2014)	14
1.3 pav. Aktyviojo filtro principinė schema trifazėje grandinėje (Milasi, Lynch, and Li 2013)	15
1.4 pav. Sinchroninio variklio statoriaus srovės priklausomybė nuo sužadavimo srovės.....	15
1.5 pav. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius (What is the Static Var Compensator (SVC)? n.d.).....	17
1.6 pav. a) SVC įrenginių vertės. b) SVC kompensuojamos reaktyviosios galios ir paleidimo kampo grafikas (Acha, Miller, 2002)	18
1.7 pav. TCR grandinės įtampos, paleidimo signalo ir srovės grafikai	19
1.8 pav. STATCOM principinė schema (Jahns, 2002).....	22
2.1 pav. Tiriamos grandinės struktūrinė schema.	24
2.2 pav. Visa tiriamos grandinės schema.....	25
2.3 pav. TCR tyrimo schema	25
2.4 pav. TCR įtampos U_{L1} , apkrovos srovės I_{L1} ir tiristorių paleidimo $U_{U1.G}$, $U_{U2.G}$ grafikai A fazei.	26
2.5 pav. TCR įtampos U_{L1} ir srovių $I_{L1.20\%}$ - $I_{L1.100\%}$ grafikai.....	27
2.6 pav. TCR įtampos U_{L1} , tiristorių paleidimo įtampos $U_{U1.G}$, $U_{U2.G}$, grandinės srovės grafikai komutuojant tiristorius 1-ame ir 3-iame įtampos sinuso ketvirčiuose.....	27
2.7 pav. a) Struktūrinė apkrovos schema; b) skaičiuojamoji apkrovos schema	28
2.8 pav. a) Tinklo perdavimo linijos struktūrinė schema; b) perdavimo linijos skaičiuojamoji schema	31
2.9 pav. Grandinės vektorių diagrama	33
2.10 pav. Šaltinio U_{S1} , apkrovos U_{R1} įtampų ir grandinės srovės I_{L1} grafikai.....	33
2.11 pav. a) Struktūrinė schema; b) skaičiuojamoji schema.....	34
2.12 pav. Kompensuotos apkrovos įtampos U_{R1} ir srovės I_{L1} grafikai.....	35
2.13 pav. Galių vektorinė diagrama.....	36
2.14 pav. Šaltinio įtampos U_{L1} ir apkrovos įtampos U_{R1} grafikai.....	38
2.15 pav. Galių vektorinė diagrama po įtampų balansavimo.....	38
2.16 pav. Grandinės schema su SVC.....	39

2.17 pav. Kompensuotos grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.	41
2.18 pav. Perkompensuotos grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.	41
2.19 pav. Nepakankamo kompensavimo grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.	42
2.20 pav. Subalansuotos (a) ir nesubalansuotos (b) apkrovos vektorių grafikai.	43
2.21 pav. Tyrime naudojamas SVC induktorius.	44
2.22 pav. Tyrime naudojamas kondensatorius.	44
2.23 pav. Galios kokybės analizatorius.	45
2.24 pav. Nulinės sankirtos detektavimo schema.	46
2.25 pav. SVC puslaidininkinė relė.	46
2.26 pav. Visa tyrimo schema.	47
2.27 pav. a) Vektorių diagrama; b) grandinės matavimai.	48
2.28 pav. A fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).	49
2.29 pav. A fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova sukompensuota SVC (50 %).	50
2.30 pav. A fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova perkompensuota SVC (100 %).	51
2.31 pav. B fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).	52
2.32 pav. B fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova visiškai sukompensuota SVC (82 %).	52
2.33 pav. B fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova perkompensuota SVC (100 %).	53
2.34 pav. C fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).	54
2.35 pav. C fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova sukompensuota (100 %).	54
2.36 pav. Sukompensuotos trifazės grandinės vektorių diagrama.	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Apkrovos parametrai	28
2 lentelė. Kabelinės linijos parametrai	31
3 lentelė. A fazės matavimai visais bandymais	51
4 lentelė. B fazės matavimai visais bandymais.....	53
5 lentelė. C fazės matavimai visais bandymais.....	55
6 lentelė. Dydžio $\vartheta - \sin\vartheta$ reikšmių lentelė nuo kampo ϑ	61

IVADAS

Plečiantis pramonei, vis daugiau elektros energijos suvartojama įvairių elektros mašinų bei pavary, didelės galios transformatorių bei elektromagnetų. Šie įrenginiai pasižymi didele reaktyviąja varža, dėl kurios atsiranda dideli reaktyviosios galios nuostoliai grandinėje, atsiranda papildomos harmonikos dedamosios, kurios iškraipo tinklą. Iš to iškyla ir daugiau problemų: mažėja galios faktorius, dėl ko mažėja tinkle esančių įrenginių efektyvumas.

Dėl tinklo nuostolių, iškraipymų energetikos sektorius gauna didelius nuostolius (Shuai et al. 2018). Pasak Mao Shuai, vien dėl tinklo trūkių, patirtų dėl tinklo nestabilumo, įvairūs verslai praranda apie 6.5 milijonų dolerių kiekvieną valandą ir apie 10 milijardų eurų kasmet.

Viena iš šių sutrikimų priežasčių yra per didelis reaktyviosios galios generavimas tinkle. Dėl šių priežasčių būtina naudoti L-C filtrus, dar kitaip vadinamus pasyviaisiais filtrais, tam, kad sumažinti reaktyviąją galią kintamos srovės grandinėje bei padidinti galios koeficientą. Tačiau pasyvūs L-C filtrai turi ir nemažai trūkumų: jų elektrinės vertės yra fiksuotos ir nekintamos, todėl keičiantis tinklo apkrovai šie pasyvūs elementai nebeužtikrins tinkamo reaktyviosios galios kompensavimo kaip anksčiau. Taip pat pasyvūs filtrai komutacijos metu sukelia didelius šuolius, rezonansus, tokie komponentai užima daug vietos.

Dėl šių priežasčių atsirado poreikis sukurti tokį galios faktoriaus valdymo įrenginį, kuris būtų pažangesnis už anksčiau naudojamus. Tuomet pasirodė dinaminiai bei reguliuojami galios faktoriaus valdymo įrenginiai, kurie dar kitaip vadinami aktyvūs filtrai. Šie filtrai būna įvairių tipų, tačiau visi yra bepakopiai bei veikia visiškai autonomiškai. Šie aktyvūs galios kompensavimo įrenginiai pagal konstrukciją bei naudojimo paskirtį būna vienfaziai (dviejų laidų), trifaziai simetrinei ir nesimetrinei apkrovai. Be to verta paminėti, jog yra ir įvairių aktyvių filtrų, kurie balansuoja įtampos šuolius grandinėje. Šie filtrai yra dažnai naudojami kartu su reaktyviosios galios kompensavimo filtrais.

Tyrimo tikslas. Sukurti bepakopę reaktyviosios galios kompensavimo sistemą naudojant statinį reaktyviosios galios kompensatorių ir jį ištirti.

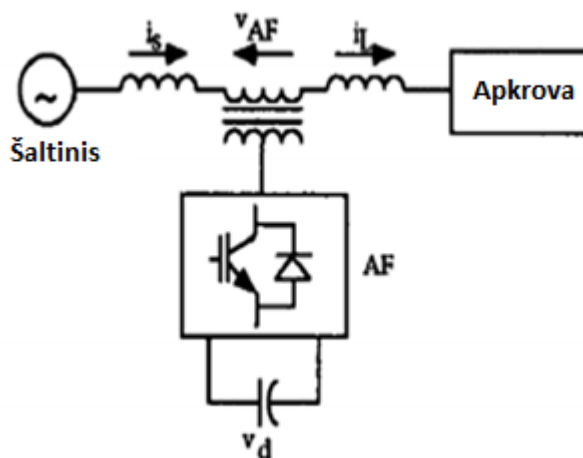
Tyrimo uždaviniai:

- Naudojant kompiuterinę simuliacijos programą sukurti reaktyviosios galios kompensavimo grandinę.
- Ištirti tiristorių įjungimo laiko įtaką grandinės kompensavimui.
- Ištirti srovės ir įtampų priklausomybę nuo SVC darbo.
- Atlikti eksperimentą su realiu įrenginiu ir gautus rezultatus palyginti su gautais simuliuojant.

1. TIRIAMOJI METODINĖ DALIS

1.1. Nuoseklusis aktyvusis filtras

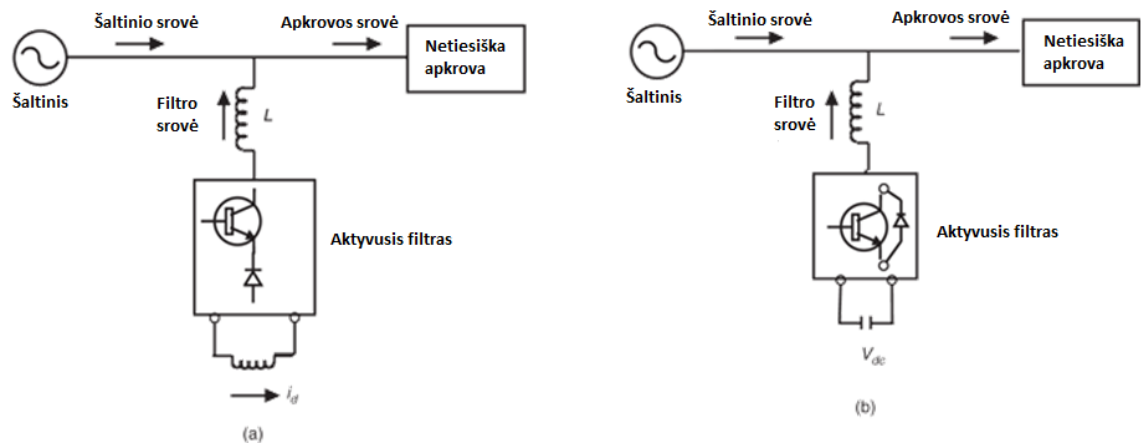
Nuoseklusis aktyvusis filtras daugiausiai naudojamas įtampos papildomų harmonikų, šuolių bei fazių poslinkiui kompensuoti (Kumar and Ilango, 2014). Šis filtras yra visiškai izoliuotas nuo grandinės bei jungiamas per skiriamąjį transformatorių kaip pavaizduota 1.1 paveiksle. Toks visiškai valdomas filtras užtikrina tikslų įtampos stabilizavimą parinkdamas reikiamą harmonikų stabilizavimo signalą. Šis filtras negali kompensuoti reaktyviosios galios kintamosios srovės grandinėse, tačiau dažnai yra naudojamas kartu su šuntuojančiais aktyviaisiais filtrais papildomam tinklo elektros kokybės gerinimui.



1.1 pav. Nuoseklusis aktyvusis filtras (Kumar and Ilango 2014)

1.2. Šuntuojantis aktyvusis filtras

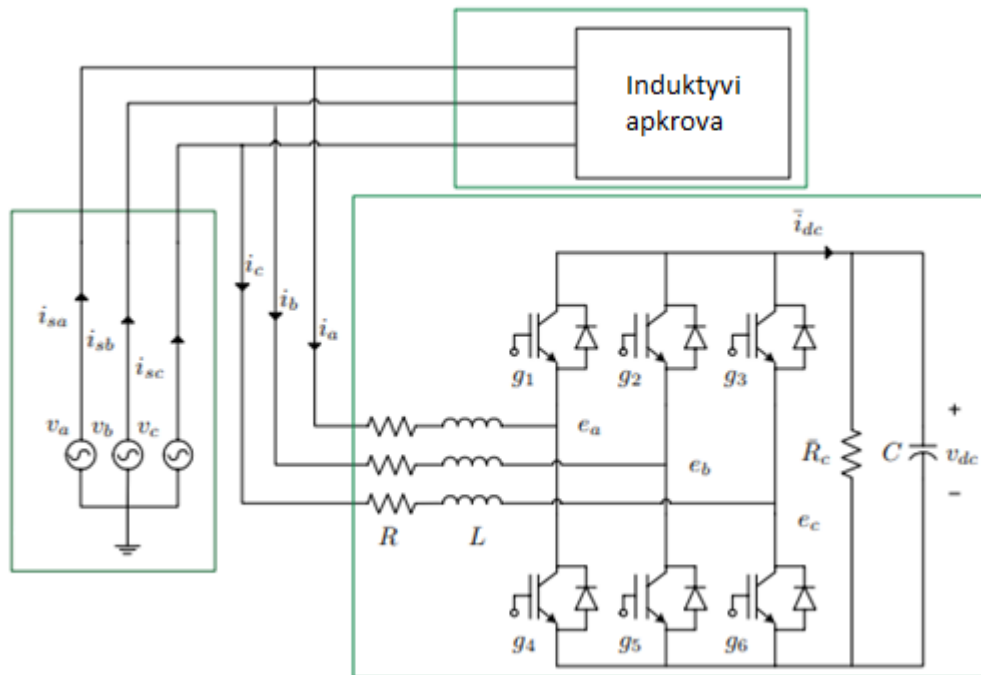
Šuntuojantys aktyvieji filtrai naudojami grandinės srovės papildomoms harmonikoms filtruoti bei galios faktoriui gerinti. Šie filtrai nuo nuoseklių aktyviųjų filtrų skiriasi tuo, jog yra jungiami fiziškai prie grandinės. Šie filtrai būna dviejų tipų: srovės šaltinio bei įtampos šaltinio. Bet kokio aktyviojo filtro pagrindinis skirtumas nuo pasyviojo filtro yra tas, jog jis yra valdomas ventiliais (Singh et al. 1999). Šie ventiliai yra valdomi signalo pločio moduliacija. Aktyvieji filtrai valdomi tiristoriais, tranzistoriais bei lauko tranzistoriais. Atsiradus didelės galios IGBT tranzistoriams, šių filtrų taikymas buvo pradėtas naudoti industrijoje. Taip pat didelę įtaką šių filtrų efektyvumui išaugti turėjo mikrovaldiklių taikymas jiems valdyti: jų dėka pradėti taikyti įvairūs valdymo algoritmai, PI bei PID, neraiškioji logika, neuroniniai tinklai, dėl ko nustatomi bei net į ateitį numatomi tikslūs veiksmai, reikalingi nuostoliams mažinti.



1.2 pav. (a) aktyvusis filtras su srovės šaltiniu; (b) aktyvusis filtras su įtampos šaltiniu (Mikkili and Panda 2014)

Priklausomai nuo to, kokio tipo tai aktyvusis filtras, jis veikia kaip netiesinis įtampos arba srovės šaltinis (Mikkili and Panda 2014). Paprasčiausias aktyvusis filtras, kuris veikia kaip srovės šaltinis, yra pavaizduotas 1.2 paveiksle a) skiltyje. Šie filtrai yra mažai naudojami, kadangi jų naudingumas yra ganėtinai mažas, o naudojami induktoriai yra dideli bei brangūs. Kita vertus, aktyvieji filtrai (1.2 b pav.), kurie veikia kaip įtampos šaltiniai, yra žymiai dažniau naudojami. Jų pagrindinis pasyvus elementas – didelės talpos kondensatorius. Šio tipo filtrai turi mažesnius nuostolius visame dažnių diapazone. Taip pat kondensatorių baterijos yra daug pigesnės bei lengvesnės už induktorius.

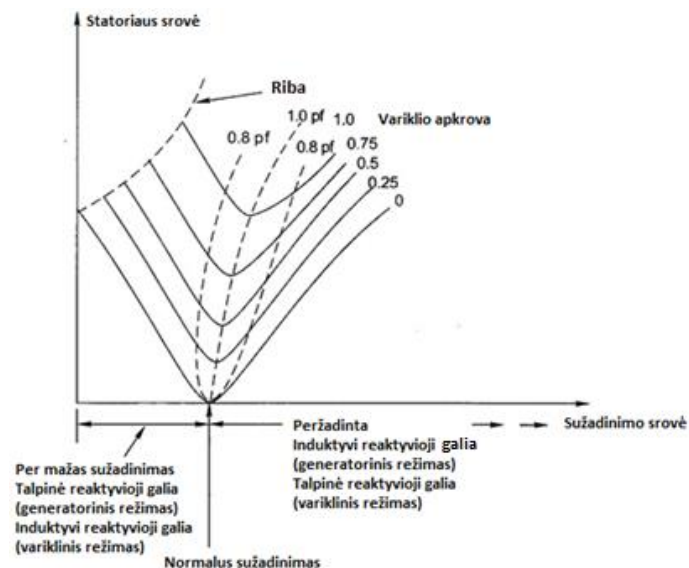
Dažniausiai naudojamo galios faktoriaus kompensavimo schema naudojant įtampos šaltinio tipo aktyvųjų filtrą trifazėje grandinėje yra pavaizduota 1.3 paveiksle. Šiam filtrui valdyti yra naudojama H tiltelio topologija. Tinkamu laiku atidarant ventilius iškreipta srovė yra kompensuojama papildoma harmonika, taip sulyginami įtampos bei srovės vektoriai iki reikiamo galios faktoriaus (Milasi, Lynch, and Li 2013). Pavaizduotoje schemoje naudojami IGBT moduliai. Taip pat šių ventilių valdymui būtinas stiprintuvas dėl susidarantios didelės valdymo srovės esant dideliame dažniui.



1.3 pav. Aktyviojo filtro principinė schema trifazėje grandinėje (Milasi, Lynch, and Li 2013)

1.3. Reaktyviosios galios kompensavimas sinchroniniu varikliu

Apkrautas sinchroninis variklis priklausomai nuo sužadinimo gali apkrauti tinklą aktyviaja, aktyviaja bei induktyviaja arba aktyviaja bei talpine apkrova. Toks variklis veikdamas visiškai laisvos eigos režimu sumažina aktyviosios galios dedamąją, todėl gali veikti kaip reaktyviosios galios kompensatorius.



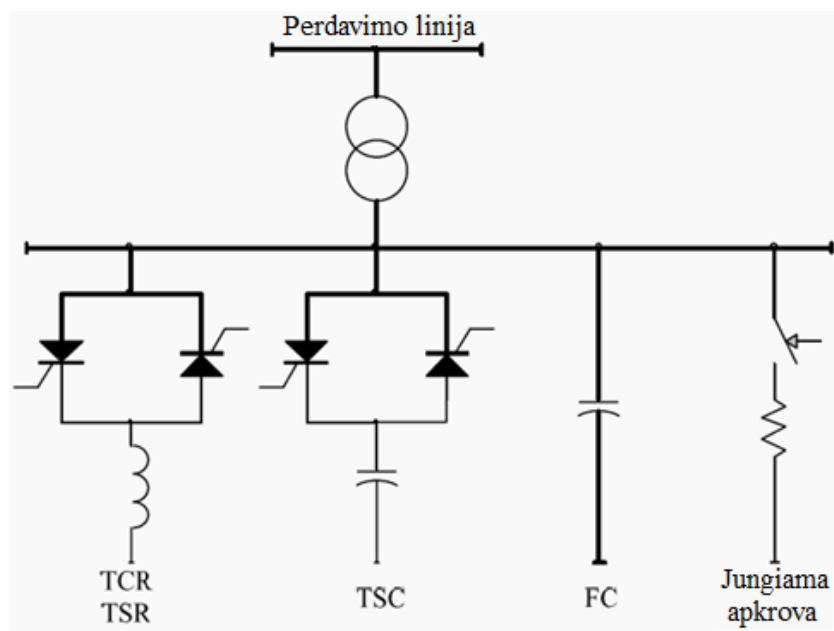
1.4 pav. Sinchroninio variklio statoriaus srovės priklausomybė nuo sužadinimo srovės

Iš 1.4 grafiko matoma, kai variklis neapkrautas, jis veikia žemiausios kreivės režime (galios faktorius lygus 0). Tokiu atveju aktyviosios galios dydis beveik lygus 0. Priklausomai nuo reikiamo reaktyviosios galios generavimo pobūdžio ir dydžio, keičiama sužadavimo srovė. Tuomet, kai tinkle dominuoja induktyviojo pobūdžio reaktyvioji galia, sinchroninis variklis turi veikti peržadintu varikliniu režimu. Tuomet tinkle jis veikia kaip kondensatorius ir jo srovės vektorius yra 90° priekyje lyginant su įtampos vektoriumi. Norint sinchroniniu varikliu tiekti induktyviojo pobūdžio reaktyviąją galią, jis turi veikti nesužadintu varikliniu režimu.

Tokios reaktyviosios galios kompensavimo sistemos privalumai yra didelis patikimumas, bepakopis kompensavimas, neiškraipo tinklo įtampos ir srovės. Šie kompensatoriai turi greitą suveikimo laiką, geba kompensuoti trumpalaikius tinklo galios pokyčius. Tačiau šie varikliai yra brangūs, neefektyvūs mažos reaktyviosios galios kompensavimui. Taip pat reikalingas pradinis paleidimo sukimo momentas. Tuomet kai reaktyviosios galios kompensuoti tinkle nereikia, variklis turi veikti tuščiąją eiga, dėl to visuomet skleidžia garsą.

1.4. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius

SVC yra jungiamas šuntuojančiai tinklo bei apkrovos atžvilgiu. Šie kompensatoriai yra dažnai naudojami pramonėje kaip alternatyva sinchroninėms reaktyviosios galios kompensavimo mašinoms, kurios užtikrina dinamišką reaktyviosios galios reguliavimą (Schauder, C., & Mehta 1993). 1.4 paveiksle pavaizduoti šio kompensatoriaus elementai. Dažniausiai naudojami du šio SVC jungimo deriniai: FC kartu su TCR bei TSC kartu su TCR (Canizares, C. A., & Faur 1999). Pirmasis būdas yra paprastesnis valdymo atžvilgiu, kadangi komutuojamas tik reaktyvusis elementas. Antrojo jungimo tipo privalumas yra didesnis kompensavimo diapazonas. Tai yra ypač svarbu kuomet linija visiškai nėra apkrauta, kadangi tokiu atveju statinis kondensatorius pradėtų tiekti talpinę galią į tinklą. Taip pat SVC talpiniai ir reaktyvieji įrenginiai dažniausiai valdomi GTO tiristoriais, kurie kitaip nei paprasti tiristoriai geba atsijungti.



1.5 pav. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius(What is the Static Var Compensator (SVC)?
n.d.)

Tiristoriais jungiamas kondensatorius negali būti komutuojamas impulso pločio moduliacija kaip induktoriai dėl savo talpinės varžos savybių esant dideliame komutacijos dažniui (Igbinovia et al. 2015). Kondensatoriai tokioje grandinėje naudojami statiškai: visiškai įjungti arba atjungti. Naudojant TSC reaktyvioji galia gali būti kompensuojama palaipsniui priklausomai nuo to, kiek kondensatorių baterijų yra grandinėje. Dėl kondensatoriaus talpinių savybių, kondensatoriai komutuojami gali būti tik tuomet, kai pasiekiamas įtampos maksimumas arba minimumas, kai srovė lygi nuliui (Jahns 2002). Taip yra dėl to, jog tenkant srovei į kondensatorių atjungimo metu įvyksta dideli pereinamieji procesai. Taip pat yra ir jungiant kondensatorių į tinklą, kai tinklo ir kondensatoriaus įtampos nesutampa. Tokiu atveju srovė gali išaugti arti begalybės, todėl labai trumpam laiko momentui įvyksta trumpas jungimas, taip išbalansuojant viso tinklo parametrus.

Kaip ir kondensatoriai, induktoriai irgi naudojami kaip statiniai elementai tiristoriais jungiamose droselių grandinėse. Kadangi kompensavimas induktoriais yra galimas impulso pločio moduliacija, statinis induktorių jungimas į grandinę yra retai naudojamas.

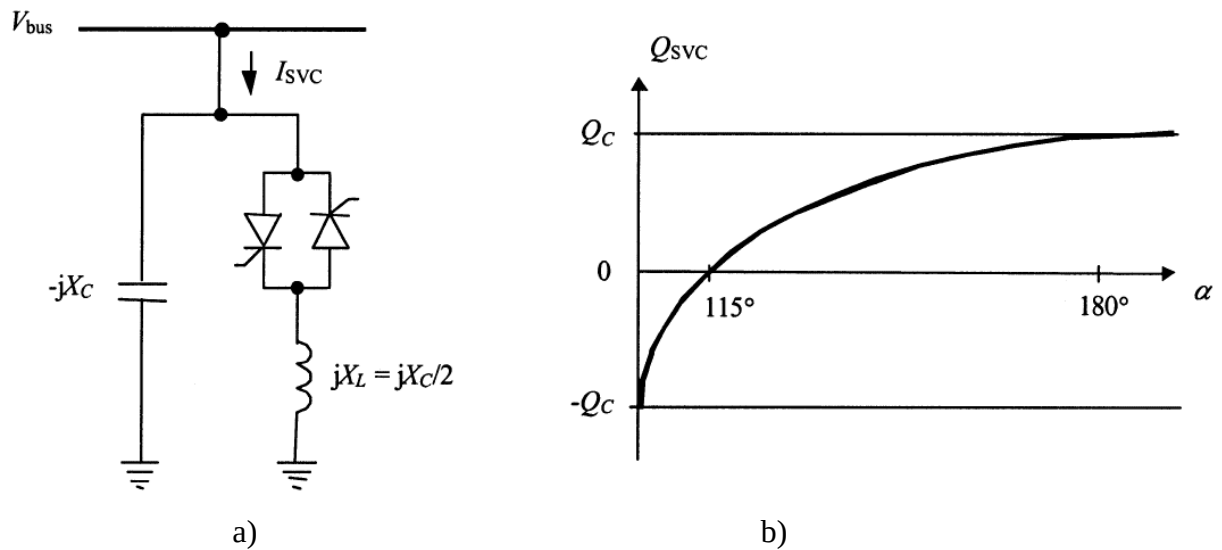
TCR grandinės valdomos dviem lygiagrečiais priešingu poliškumu jungtais tiristoriais arba izoliuotomis puslaidininkėmis relėmis. TCR yra dažniausiai naudojamas lygiagrečiai su TSC, kuris veikia reaktyviosios galios perkompensavimo režimu, t. y. tiekia į grandinę daugiau talpinės apkrovos nei reikia. Tuomet perteklinė talpinė apkrova yra kompensuojama TCR kol reaktyviosios galios vertė grandinėje pasiekia 0. Tokia TSC bei TCR sistema turi užtikrinti greitą reagavimą į apkrovos

grandinėje pasikeitimus, kurie atsiranda naudojant trumpo veikimo įrenginius, kurie generuoja reaktyviąją galią.

TCR tiristoriai yra paleidžiami tik 2-ame bei 4-ame sinusoidės ketvirtyje. Paleidus signalą tiristoriams atsidaryti antro ketvirčio pradžioje ($\alpha = 90^\circ$), srovės sinusoidė buvo pilno ilgio ir truko 180° . Kai srovės dydis grandinėje pasiekia nulį, tiristoriai savaime išsijungia. Keičiant tiristorių paleidimo kampą ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$), keisis ir srovės tekėjimo per reaktorių laikas. Todėl reguliuojant šį paleidimo kampą, buvo reguliuojamas reaktyviosios galios tiekimas į grandinę TCR įrenginiu.

SVC kompensuojamos induktyvinės ir talpinės galios yra parenkamos pagal poreikį. Šie dydžiai gali būti simetriški ir asimetriški, pavyzdžiui, vertės gali būti 200 Mvar induktyvinės galios bei 200 Mvar talpinės galios arba 100 Mvar induktyvinės galios bei 200 Mvar talpinės galios (Noroozian et al. 2003).

SVC privalumas - didelis kompensuojamos reaktyviosios galios diapazonas, kuris gali būti parenkamas pagal poreikį. Taip pat valdymo grandinė bei algoritmas yra ganėtinai paprasti, nes komutuojami tiristoriai žemame dažnyje. Šie tiristoriai šuntuoja reaktyviuosius įrenginius tinklo atžvilgiu. Esminis trūkumas yra tas, jog šiems įrenginiams yra būtini reaktyvieji elementai, kurie dažnu atveju yra didelių gabaritų, todėl ir kaina yra sąlyginai didelė.



1.6 pav. a) SVC įrenginių vertės. b) SVC kompensuojamos reaktyviosios galios ir paleidimo kampo grafikas (E. Acha, T. Miller 2002)

Norint gauti platų reaktyviosios galios kompensavimo diapazoną, optimaliausia naudoti induktorių, kurio reaktyvioji galia yra dvigubai didesnė nei talpinio elemento reaktyvioji galia. Tokiu atveju gaunamas vienodas induktyviojo bei talpinio pobūdžio reaktyviosios galios kompensavimas. Pagal 1.5 paveikslo b grafiką matome, kaip keičiant tiristoriaus paleidimo kampą, yra keičiamas SVC

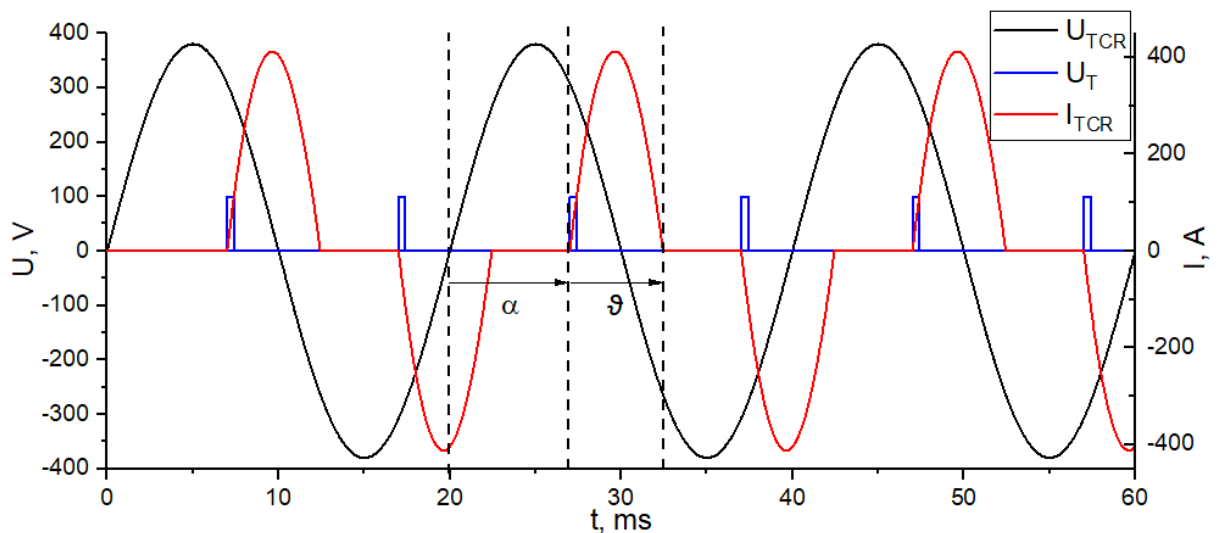
talpinės reaktyviosios galios dydis: esant paleidimo kampui iki 115° SVC tiekia induktyviojo pobūdžio reaktyviąją galią, esant paleidimo kampui virš 115° , sistema tiekia talpinio pobūdžio reaktyviąją galią.

SVC tinkamam veikimui būtinas paleidimo kampo skaičiavimo algoritmas. Priklausomai nuo to kokių režimu SVC veikia: reaktyviosios galios kompensavimo ar įtampos balansavimo, skirtingas paleidimo kampo skaičiavimas yra naudojamas. Reaktyviosios galios kompensavimo režimu, paleidimo kampą galima apskaičiuoti pagal formulę (E. Acha, T. Miller 2002):

$$Q_{SVC} = U_f^2 \cdot \frac{X_C \cdot (2\pi - \alpha + \sin 2\alpha) - \pi X_L}{\pi X_C X_L},$$

čia: Q_{SVC} – reaktyviosios galios dydis, reikalingas grandinės kompensavimui; X_C – SVC talpinio elemento reaktyvioji varža; X_L – SVC induktyviojo elemento reaktyvioji varža; α – SVC tiristorių paleidimo kampas.

Parinkus SVC talpinius ir reaktyviuosius įrenginius apskaičiuojamas pradinis SVC paleidimo kampas. Pradiniu laiko momentu turi būti užtikrinta sąlyga, kad SVC veiks tuščiuoju režimu, t.y. netieks reaktyviosios galios į tinklą. Todėl pirma randamas kampas α , kai $Q_{SVC}(\alpha) = 0$. Gautas kampas yra 90° - 180° diapazone. Naudojant PI reguliatorių sukurama sistema, kuri priklausomai nuo pasikeitusios grandinės apkrovos, keistų SVC paleidimo kampą α .



1.7 pav. TCR grandinės įtampos, paleidimo signalo ir srovės grafikai

Pagal 6 paveikslą galima matyti, kaip TCR srovės grafikas priklauso nuo paleidimo kampo α . Veikimo ciklo kampas θ taip pat priklauso nuo paleidimo kampo, ku didesnis reaktyviosios galios dydis TCR grandinėje, tuo veikimo ciklo kampas yra didesnis. Kadangi TCR veikia kaip nelinejinė apkrova, gaunamas iškraipytas srovės sinuso grafikas. Dėl šios priežasties iškraipomas suminis grandinės srovės grafikas, todėl atsiranda netikslumų skaičiuojant sukompensuotos grandinės reaktyviąją galią bei galios faktorių $\cos \phi$.

SVC paleidimo kampo skaičiavimų sistema privalo sekti grandinės parametrus. Tam yra būtinos įtampos ir srovės matavimo grandinės. Pagal šiuos matavimus apskaičiuojamas kampas tarp srovės ir įtampos vektorių, pagal gautą kampą randamas galios faktorius, aktyviosios ir reaktyviosios galios dydis. SVC reaktyviosios galios dydžio ir apkrovos reaktyviosios galios dydžio suma turi būti lygi 0.

1.4.1. SVC harmoninis iškraipymas

Naudojant SVC įrenginius galios kompensavimui grandinėse gali atsirasti įtampų bei srovių iškraipymai (Liberado, Pomilio, and Marafão 2016). E. Liberado savo straipsnyje aprašo SVC induktyviųjų ir talpinių elementų poveikį tinklo srovės ir įtampos stabilumui. Buvo atlikti bandymai su stabiliu tinklu ir su nestabilaus įtampos tinklu kuriame papildoma 5 lygio harmonika. Rezultate bandymo autorius teigia, jog tinkle esant tik aktyviosios ir induktyviosios galios apkrovai, srovės grafikai nėra iškraipomi net esant pradiniam įtampos harmoniniam iškraipymui. Tačiau pagrindiniai srovės harmoniniai iškraipymai atsiranda tuomet, kai į tinklą jungiami statiniai kondensatoriai. Tokiu atveju iškraipomi srovės bei galios grafikai.

Visiškai išspręsti šios problemos neina, tačiau yra būdų kaip sumažinti aukštesnio lygio harmonikų skaičių. Vienas iš jų yra naudojant mažesnės reaktyviosios galios statinius kondensatorius. Tai yra pasiekama tiksliai apskaičiuojant kiek maksimaliai reaktyviosios galios gali reikėti kompensuoti tinkle ir pagal šį skaičiavimą naudoti atitinkamus statinius kondensatorius SVC projektavimui.

Dar vienas metodas aprašytas E. Liberado straipsnyje yra naudoti nedidelio induktyvumo droselius, jungiamus nuosekliai statiniui kondensatoriui. Tokiu būdu šie droseliai veikia kaip srovės papildomų harmonikų filtrai. Šie filtrai esant skirtingoms tinklo apkrovoms gali keisti savo filtravimo savybes todėl dar efektyvesnis metodas būtų naudoti TCR bei aktyviojo filtro grandinę sujungtą nuosekliai su statiniu kondensatoriumi. TCR šiuo atveju pagal tinklo kokybės matavimus parinktų tinkamą harmonikų filtravimo lygį.

1.4.2. Tinklo įtampų balansavimas naudojant SVC

Bet kokį tinklą galima išskaidyti į 3 pagrindines dalis:

- elektros tiekėjas (šaltinis),
- perdavimo linija,
- partotojas (apkrova).

Idealiu atveju tinklas būtų sudarytas tik iš šaltinio ir apkrovos, tačiau realybėje privaloma atsižvelgti ir į perdavimo linijos įtaką elektros energijos tiekimui. Perdavimo linijoje dažniausiu atveju dominuoja aktyviosios varžos bei induktyvioji dedamosios, kurios jungiamos nuosekliai tarp apkrovos

ir šaltinio. Taip pat perdavimo linijose atsiranda ir talpinės dedamosios tarp perdavimo linijų, tačiau jos yra sąlyginai mažos ir jas galima ignoruoti.

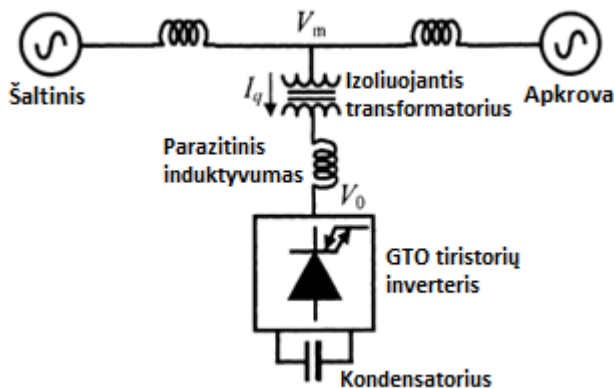
Aktyvioji varža perdavimo linijos grandinėje veikia kaip įtampos kryptis. Šis įtampos kryptis priklauso nuo srovės, tekančios perdavimo linija dydžio. Dėl šios priežasties tinklo įtampa gali svyruoti skirtinguose tinklo taškuose. Pagrindinis būdas kompensuoti perdavimo linijoje atsirandantį įtampos kritimą yra pakeliant šaltinio įtampą. Tokiu būdu vartotojai gauna nustatytą tinklo įtampą su apibrėžta paklaida. Taip pat įtampos paklaidos įvedimas padeda lengviau vienu šaltiniu aptarnauti daug skirtingose vietose esančių įrenginių. Pagal ESO reikalavimus 400V tinklas negali viršyti daugiau nei 10% nominalios įtampos.

Induktyvumas perdavimo linijose turi tendenciją keisti įtampos fazę. Šis fazės poslinkis priklauso nuo srovės dydžio grandinėje bei perdavimo linijos induktyvumo. Kadangi SVC keičia linijos, prie kurios pajungta įtampos fazę, galima šaltinio ir apkrovos įtampos fazes subalansuoti nepriklausomai nuo linijos induktyvumo ir tekančios srovės dydžio. Tačiau SVC negali tuo pačiu subalansuoti linijos įtampos bei kompensuoti galios faktorių, kadangi reikalingas skirtingas SVC tiekiamos reaktyviosios galios dydis.

1.5. Statinis sinchroninis kompensatorius

STATCOM reaktyviosios galios kompensavimui naudoja inverterį su įtampos šaltiniu. 1.7 paveiksle matoma principinė STATCOM schema. Kaip įtampos šaltinis šioje sistemoje naudojamas nuolatinės įtampos kondensatorius. STATCOM neprijungtas prie tinklo veikia kaip kintamos įtampos šaltinis, tačiau dėl to, jog naudojamas DC kondensatorius, aktyviosios galios tiekimas būtų labai mažas kol kondensatorius būtų pakrautas. Didesniam aktyviosios galios tiekimui į tinklą papildomai gali būti jungiamas kito tipo įtampos šaltinis lygiagrečiai kondensatoriui. Nuolatinės įtampos keitimui į reikiamą kintamos įtampos vertę yra naudojamas inverteris. STATCOM būna su dviem inverterių tipais (Benysek 2007):

- GTO tiristorių inverteriais;
- IGBT tranzistorių inverteriais.



1.8 pav. STATCOM principinė schema (Jahns 2002)

Inverterio išėjimas yra jungiamas prie izoliuojančio transformatoriaus, kurio antrinė apvija jungiama prie tinklo. STATCOM veikimas yra pagrįstas inverterio DC įtampos keitimu laiptuota sinusoide (Jahns 2002). Inverteris šią sinusoidę komutuoja taip, jog jos dažnis ir fazė sutampa su tinklo dažniu ir faze. Per izoliuojantį transformatorių šios dvi įtampos yra sujungtos. Kadangi izoliuojantis transformatorius turi induktyviąją apvijos dedamąją, į STATCOM tekanti srovė yra reaktyvioji (srovės fazė atsiliks 90° nuo įtampos fazės). Jeigu tinklo įtampos amplitudė yra didesnė nei inverterio įtampos amplitudė, srovė tekės į inverterio pusę bei yra vartojama reaktyvioji galia. Tai pat ir atvirkščiai: kai tinklo įtampos amplitudė yra mažesnė už inverterio įtampos amplitudę, inverteris tiekia srovę į tinklą, taip apkraunamas tinklas induktyviąja apkrova. Inverteriu generuojama sinusoidė privalo turėti kuo mažiau harmonikų. Harmonikų mažinimui yra naudojami du metodai (Benysek 2007):

- naudojant 12 impulsų inverterį. Šis inverteris naudoja 2 trifazius lygintuvus bei iš žvaigždės į trikampį jungimo konfigūracijos transformatorių, kurių apvijos elektriškai atskirtos 30° . Abu lygintuvai jungiami prie pirminės bei antrinės transformatorių apvių. Dėl skirtingo ventilių paleidimo kampo, gaunama išėjimo amplitudė, kurioje panaikinamos 5, 7, 11 bei 13 harmonikos (Plants 2016).
- naudojant aukšto dažnio PWM. Inverterio ventilius komutuojant kelis ar net keliasdešimt kartų kiekvienam sinusoidės periodui gaunama aukštos kokybės sinusoidė. Kuo didesnis ventilių komutavimo dažnis, tuo sinusoidės kokybė yra didesnė, tačiau didėja komutacijos nuostoliai, todėl būtina rasti optimalų dažnį. Keičiant ventilių komutacijos periodą gaunama skirtinga sinusoidės amplitudė, taip kontroliuojamas STATCOM veikimas.

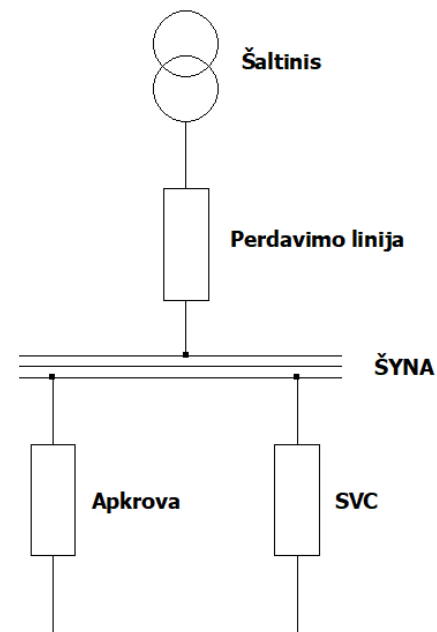
STATCOM dėl savo veikimo principo pasižymi labai greitu reagavimu į tinklo apkrovos pokyčius lyginant su kitais reaktyviosios galios kompensavimo metodais. Taip yra dėl nuolatos įkrautos nuolatinės įtampos linijos bei greito ir tikslaus inverterio veikimo. Taip pat šie įrenginiai geba stabilizuoti

trumpalaikius įtampos kritimus tinkle jungiamų įrenginių komutacijos metu. Standartinės STATCOM sistemos geba kompensuoti maždaug 10-15% įtampos skirtumo jeigu neviršijama maksimali leistina srovė inverterio ventilių (Noroozian et al. 2003). Taip pat STATCOM įrenginiai lyginti su tokios pačios galios SVC įrenginiais yra mažesnių gabaritų, kadangi nenaudoja statinių reaktyviųjų įrenginių.

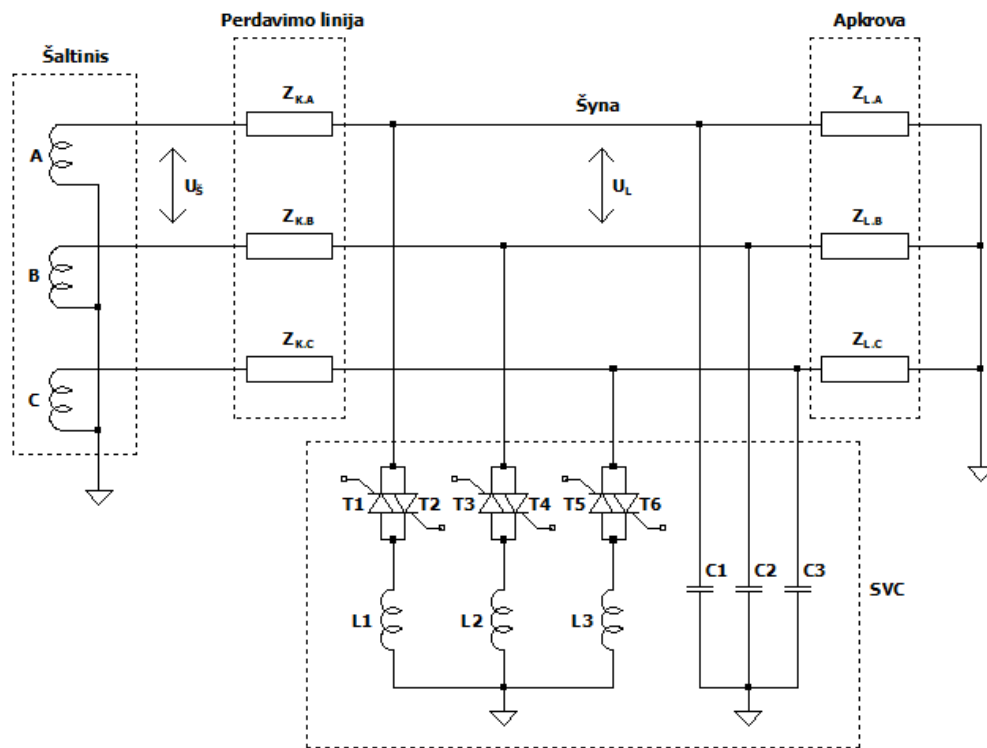
Kadangi STATCOM naudoja impulsų pločio moduliaciją inverteryje kilo hercų dažniu, didžioji dalis nuostolių atsiranda inverterių IGBT bei GTO tiristoriuose juos komutuojuant. Dėl šios priežasties šuntuojuantys induktoriai, kondensatoriai bei SVC yra kur kas efektyvesni, kadangi šio tipo nuostolių jie neturi arba yra labai maži. Taip pat STATCOM įrenginiams reikalingi didelės galios inverteriai, dėl kurių bendra sistemos kaina yra didesnė nei analogiškų SVC sistemų. Taip pat STATCOM valdymas yra kur kas sudėtingesnis nei SVC, kadangi invertuojama nuolatinė įtampa į kintamą dideliame dažnyje, kai SVC tiesiog statiška šuntuoja reaktyviuosius įrenginius tinklo atžvilgiu.

2. TIRIAMOJI EKSPERIMENTINĖ DALIS

Praktinės dalies tikslas – ištirti SVC veikimą įvairiais režimais. Pirma, atliekamas tyrimas pagrindiniam SVC elementui – TCR grandinei. Toliau tiriama nekompensuota tinklo grandinė, kai fazių apkrova vienoda: naudojant SVC sukompensuotas galios koeficientas bei sukompensuota tinklo įtampa. Paskutinėje bandymo dalyje ištirtas SVC veikimas, kai fazių apkrovos nesimetriškos. Tikslas buvo subalansuoti visų fazių galios koeficientą. Toliau pavaizduotos struktūrinė bei visa grandinės schemos.



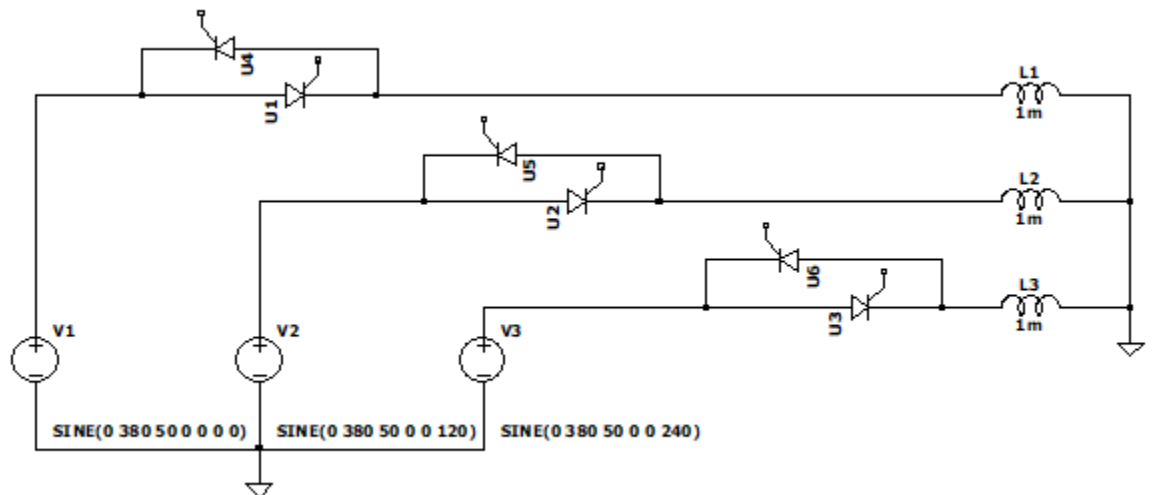
2.1 pav. Tiriamos grandinės struktūrinė schema.



2.2 pav. Visa tiriamos grandinės schema.

2.1. TCR grandinės tyrimas

Visi skaičiavimai atliekami „LTSpice“ programos aplinkoje.



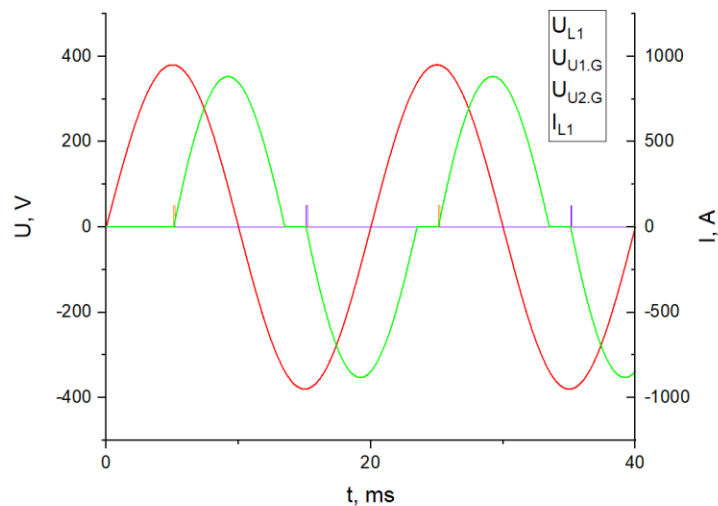
2.3 pav. TCR tyrimo schema

2.3 paveiksle pavaizduota grandinė yra skirta jungti į žemosios įtampos trifazį tinklą, todėl V1, V2 ir V3 šaltinių įtampa 380 V, kurių fazės skiriasi 120°. Grandinėje buvo naudojami trys 1 mH, 100 mΩ šuntuojantys induktoriai, kurie valdomi tiristoriais. Tiristoriai valdomi perduodant 50 V, 100 μs valdymo signalą. Kadangi sistema veikia 50 Hz dažniu, valdymo signalų periodas parenkamas 20 ms. Tiristoriai jungiami kiekvienai fazei po du: vienas - veikti 2-ame įtampos fazės ketvirtyje, antras – 4-ame, todėl abiejų tiristorių valdymo signalus skirs 10 ms laiko tarpas. Kad būtų išvengta klaidingo paleidimo, 1-ame arba 3-iame ketvirtyje nustatomas uždelimo laikas, kuris lygus 250 μs. Jį taikome tik maksimalios galios bandyme. Tai yra svarbu dėl to, jog tiristoriai negali būti paleisti tuomet, kai induktoriais teka srovė per priešingos pusės tiristorius.

Visų trijų fazių tiristorių paleidimas yra atskiriamas 120°, todėl juos skiria laikas Δt :

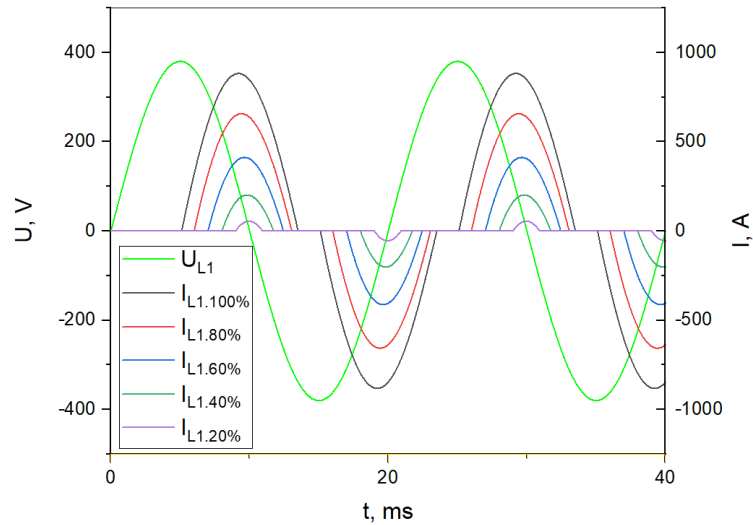
$$\Delta t = \frac{\varphi}{360 \cdot f} = \frac{120}{360 \cdot 50} = 0.00667 \text{ s} = 6.67 \text{ ms}.$$

Paleidus simuliaciją gauname tokį grafiką:



2.4 pav. TCR įtampos U_{L1} , apkrovos srovės I_{L1} ir tiristorių paleidimo $U_{U1.G}$, $U_{U2.G}$ grafikai A fazei.

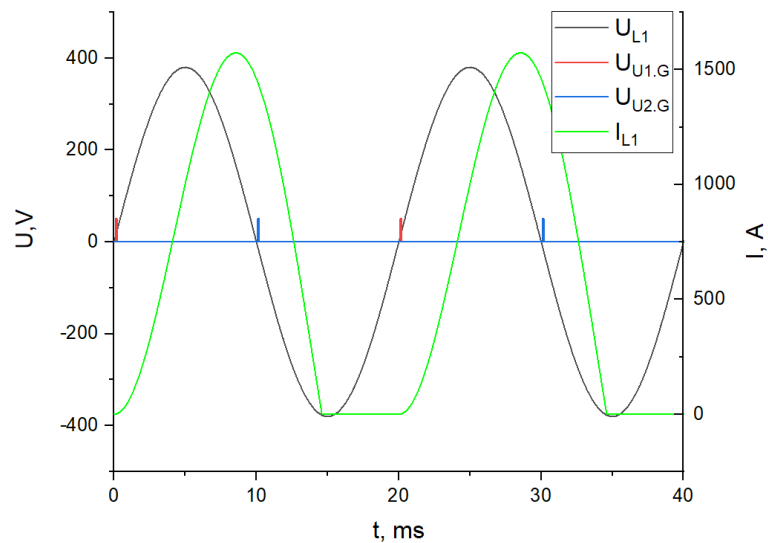
2.4 paveikslo grafike tiristoriai yra paleidžiami perduodant signalus ($U_{U1.G}$ bei $U_{U2.G}$) į valdymo elektrodus pačioje 2 bei 4 įtampos sinuso ketvirčių pradžioje praėjus 100 μs uždelimo laiko. Šiuo atveju srovė I_{L1} yra pasiekama didžiausia, $I_{L1.max} = 882 \text{ A}$. Dėl induktyviosios dedamosios srovės grafikas nuo įtampos atsilieka lygiai 90°. Vėlinant tiristorių paleidimo laiką galima sumažinti srovės vertę. Kadangi srovę galima reguliuoti tik vieno ketvirčio intervale (5 ms), vėlinama po 1 ms 5 kartus.



2.5 pav. TCR įtamos U_{L1} ir srovių $I_{L1.20\%} - I_{L1.100\%}$ grafikai.

Vėlinant tiristorių paleidimą 2.5 paveiksle matoma, jog srovės I_{L1} vertė mažėja atitinkamai. Grafikai atspindi 5 galimus galios režimus: žalias – didžiausios (100 % darbo ciklo), violetinis – mažiausios, kai tiristoriai uždelsiami 4 ms (20 % darbo ciklo). Galimi ir tarpiniai galios režimai. Jie pasiekiami dideliu tikslumu reguliuojant tiristorių paleidimo kampą uždara valdymo sistema.

Toliau atliekamas bandymas komutuojant induktorius 1-ame ir 3-iame ketvirtyje (žr. 2.6 pav.).



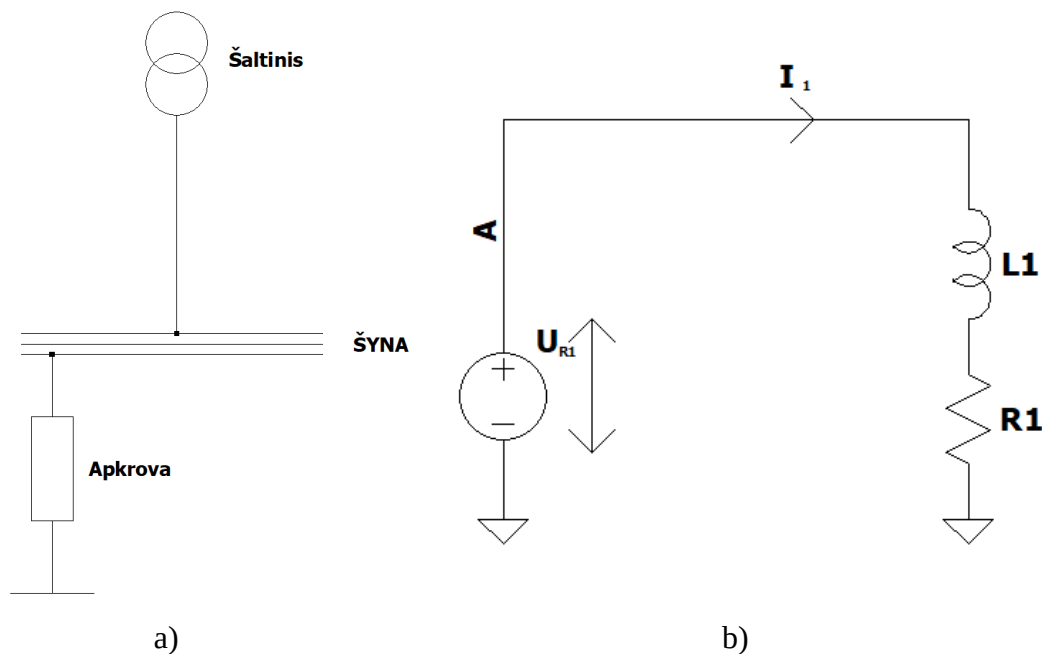
2.6 pav. TCR įtamos U_{L1} , tiristorių paleidimo įtamos $U_{U1.G}$, $U_{U2.G}$, grandinės srovės grafikai komutuojant tiristorius 1-ame ir 3-iame įtamos sinuso ketvirčiuose.

Pagal 2.6 paveikslą komutuoiant tiristorius valdymo signalais $U_{U1.G}$ bei $U_{U2.G}$ 1-ame arba 3- iame įtampos U_{L1} sinuso ketvirtyje srovės vertė I_{L1} išauga beveik du kartus didesnė nei praėjusių bandymų metu, kadangi tiristorius atviras pusę sinusoidės periodo vietoj ketvirčio. Kadangi srovė nuo įtampos atsilieka 90° , nespėja nusistovėti kai įtampa kerta 0 V ribą 3- iame įtampos sinuso ketvirtyje, priešingos krypties tiristorius nepasileidžia ir srovei po kiek laiko nusistovėjus, ji nebeteka priešinga kryptimi. Dėl to TCR privalo būti komutuojamasis tik 2-ame ir 4-ame įtampos sinuso ketvirčiuose.

2.2. SVC tyrimas simetrinei tinklo apkrovai

2.2.1. Nekompensuotos apkrovos parinkimas ir skaičiavimas

Pirmojo tyrimo metu visų fazių apkrovos vienodos $Z_{L,A} = Z_{L,B} = Z_{L,C}$, todėl trifazę schemą galima perdaryti į vienfazę grandinę. Tikslas yra rasti apkrovos grandinės parametrus bei gautus dydžius patikrinti „LTSpice“ programa.



2.7 pav. a) Struktūrinė apkrovos schema; b) skaičiuojamoji apkrovos schema

1 lentelė. Apkrovos parametrai

Fazių skaičius	Tinklo linijinė įtampa U_R , kV	Tinklo dažnis f , Hz	Apkrovos aktyvioji galia P_L , MW	Apkrovos galios faktorius $\cos\phi_L$
3	10	50	1	0,8

Kadangi apkrova jungiama prie trifazio šaltinio, bet skaičiavimai atliekami vienai fazei, būtina apskaičiuoti fazinę tinklo įtampą:

$$U_{R1f} = \frac{U_R}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

čia: U_{R1f} – fazinė įtampa.

$$U_{R1f} = \frac{10^4}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ kV}.$$

Fazinė tinklo įtampos vektorinė išraiška:

$$\overline{U_{R1f}} = 5,77 + j0 \text{ kV}.$$

Vienai fazei tenkanti galia:

$$P_{L1f} = \frac{P_L}{3}. \quad (2)$$

čia: P_{L1f} – vienos fazės aktyvioji galia.

$$P_{L1f} = \frac{10^6}{3} = 333 \text{ kW}.$$

Apskaičiuojama grandinė tekanti srovė:

$$I_{1f} = \frac{P_{L1f}}{U_{R1f} \cdot \cos\varphi_L}, \quad (3)$$

čia: I_{1f} – vienos fazės srovė.

$$I_{1f} = \frac{333 \cdot 10^3}{5,77 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 72,2 \text{ A}.$$

Iš $\cos\varphi$ apskaičiuojama $\sin\varphi$ reikšmė:

$$\varphi_L = \cos^{-1}(0,8) = 36,9^\circ.$$

$$\sin\varphi_L = \sin(36,9^\circ) = 0,6.$$

Apskaičiuojama srovės vektorinė išraiška:

$$\overline{I_{1f}} = I_{1f}(\cos\varphi_L - j\sin\varphi_L), \quad (4)$$

$$\overline{I_{1f}} = 72,2(0,8 - j0,6) = 57,76 - j43,32.$$

Apskaičiuojama apkrovos kompleksinė varža pagal formulę:

$$\overline{Z_L} = \frac{\overline{U_{R1f}}}{\overline{I_{1f}}}, \quad (5)$$

čia: $\overline{Z_L}$ – apkrovos kompleksinė varža.

$$\begin{aligned} \overline{Z_L} &= \frac{5770 + j0}{57,76 - j43,32} \cdot \frac{57,76 + j43,32}{57,76 + j43,32} = \frac{(5770 + j0)(57,76 + j43,32)}{57,76^2 - (j43,32)^2} = \frac{333275 + j249956}{3336 + 1877} \\ &= \frac{333275 + j249956}{3336 + 1877} = \frac{333275 + j249956}{5213} = 63,9 + j47,9 \, \Omega. \end{aligned}$$

Pagal gautą kompleksinės varžos išraišką matome, jog ji susideda iš aktyviosios (R) ir reaktyviosios (X_L) varžų dedamųjų. Toliau iš reaktyviosios varžos dedamosios apskaičiuojamas induktyvumas:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (5)$$

čia: L – induktyvumas.

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (6)$$

$$L_L = \frac{47.9}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.1525 \text{ H} = 152.5 \text{ mH}.$$

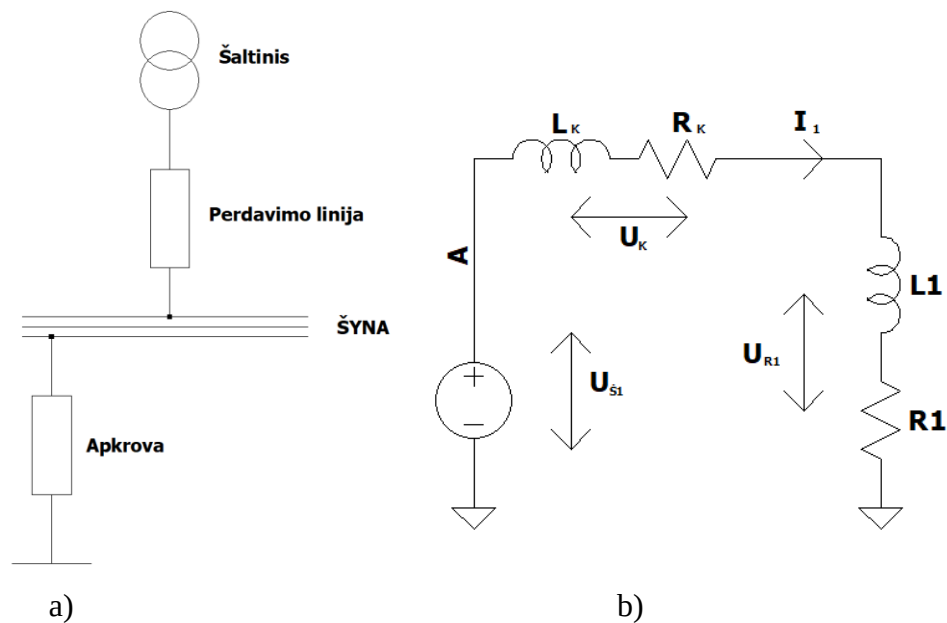
Pagal gautus grandinės dydžius „LTSpice“ programoje atliekame skaičiavimus patikrinimui. Tikslas rasti galios faktoriaus $\cos\varphi$ dydį. Tam, kad padidintume gautų rezultatų tikslumą skaičiavimus atliksime 3-iaame periode (40 – 60ms intervale), kadangi pirmojo periodo pereinamieji procesai nenusistovėję. Pirma naudojamos komandas įtampos bei srovės amplitudžių matavimui (`.meas TRAN Vpeak MAX v(A)` bei `.meas TRAN Ipeak MAX -I(V_A)`). Toliau randami šių taškų laikai t_1 ir t_2 (`.meas TRAN t1 WHEN V(A)=Vpeak` bei `.meas TRAN t2 WHEN -I(V_A)=Ipeak`). Skaičiuojamas laikas Δt , kuris parodo kiek laiko įtampos sinusoidė atsilieka nuo srovės sinusoidės. Naudojant žemiau pateiktą formulę randamas fazių skirtumo kampas:

$$\varphi = 360^\circ \cdot \Delta t \cdot f. \quad (7)$$

Apskaičiavus gauto kampo kosinusą rezultate gauname $\cos\varphi = 0.803$, kuris yra beveik lygus užduotyje duotam dydžiui.

2.2.2. Tinklo perdavimo linijos skaičiavimas

Perdavimo linijos pagrindinės dedamosios yra aktyvioji varža bei induktyvumas. Jos grandinėje yra jungiamos nuosekliai apkrovai. Tekant srovei atsiranda įtampos kryptis ir fazės poslinkis perdavimo linijoje. Todėl norint išlaikyti šynos įtampą U_R nepakitusia, būtina keisti šaltinio įtampą ir fazę.



2.8 pav. a) Tinklo perdavimo linijos struktūrinė schema; b) perdavimo linijos skaičiuojamoji schema

Pagal elektros įrenginių įrengimo bendrąsias taisykles (Lietuvos Respublikos energetikos ministerija 2012) bei anksčiau apskaičiuotą grandinės srovę parenkamas $3 \times 35 \text{ mm}^2$ oro kabelis.

2 lentelė. Kabelinės linijos parametrai

Kabelių skerspjūviai, mm^2	Leistinoji ilgalaikė srovė, A	Aktyvioji varža, Ω / km , (20 °C)	Induktyvioji varža, Ω / km	Leistinoji ilgalaikė 1 sek. trukmės trumpojo jungimo srovė, kA
3×35	115	0,87	0,14	3,4

Leistinoji ilgalaikė srovė yra didesnė už apskaičiuotą 72.2 A grandinės srovę. Vidutinis tokios 10 kV linijos ilgis yra apie 10 km, todėl visa kabelio aktyvioji varža $R_K = 8.7 \Omega$, visa kabelio reaktyvioji varža $X_{L,K} = 1.4 \Omega$. Randamas šios linijos induktyvumas pagal 6-ą formulę, kuris reikalingas „LTSpice“ simuliacijoje:

$$L_K = \frac{1.4}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.00446 \text{ H} = 4.46 \text{ mH}.$$

Kompleksinė perdavimo linijos varžos išraiška:

$$\overline{Z}_K = R_K + jX_{L,K} = 8.7 + j1.4 \Omega.$$

Kadangi srovė tekės per perdavimo liniją, įtampa joje kris. Apkrovos įtampa turi būti užtikrinta kokia yra apibrėžta sąlygoje, šaltinio įtampa pasikeis. Ši įtampa apskaičiuojama pagal formulę:

$$\overline{U}_{\text{š1f}} = \overline{U}_{R1f} + \overline{U}_K, \quad (8)$$

čia: $U_{\xi 1f}$ – šaltinio fazinė įtampa; U_{R1f} – apkrovos įtampa; U_K – įtampa, krentanti perdavimo linijos kabeliuose.

Kadangi nežinomas įtampos dydis U_K , tačiau žinome perdavimo linijos varžą bei tekančios srovės dydį, įtampą galima rasti pagal omio dėsnį:

$$\overline{U_K} = \overline{I_{1f}} \cdot \overline{Z_K}, \quad (10)$$

$$\overline{U_K} = (57.76 - j43.32) \cdot (8.7 + j1.4) = 502.5 + j80.86 - j376.9 + 60.65 = 624 - j296 \text{ V}.$$

Pagal 8-ą formulę randame šaltinio įtampą:

$$\overline{U_{\xi 1f}} = 5770 + 624 - j296 = 6394 - j296 \text{ V}.$$

Randame šaltinio įtampos vektoriaus ilgį:

$$|U_{\xi 1f}| = \sqrt{6394^2 + 296^2} = 6401 \text{ V}.$$

Toliau randamas šaltinio įtampos vektoriaus kampas, kuris atspindės kampą tarp šaltinio įtampos vektoriaus $\overline{U_{\xi 1f}}$ bei apkrovos įtampos vektoriaus $\overline{U_{R1f}}$:

$$\varphi_{V\xi} = \arctg \frac{-296}{6394} = -2.65^\circ.$$

Šaltinio įtampos vektorinė išraiška:

$$\overline{U_{\xi 1f}} = 6401e^{-j2.65^\circ}.$$

Toliau skaičiuojamas visos grandinės įtampos ir srovės vektorių kampas φ_ξ .

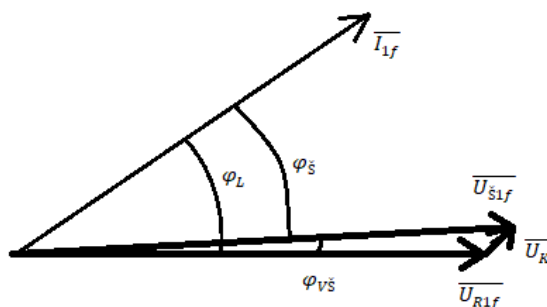
$$\varphi_\xi = \varphi_L + \varphi_{V\xi} = 36.9^\circ - 2.65^\circ = 34,25^\circ.$$

Kadangi šaltinio įtampos vektoriaus kampas $\varphi_{V\xi}$ lyginant su apkrovos įtampos vektoriumi φ_L yra neigiamas, kampas tarp šaltinio įtampos vektoriaus ir srovės vektoriaus yra mažesnis ($\varphi_\xi < \varphi_L$). Dėl to šios grandinės galios faktorius didėja:

$$\cos \varphi_\xi = 0.827.$$

Taip atsitiko dėl to, jog galios faktorius priklauso nuo visų grandinėje sujungtų apkrovų galios faktoriaus. Kadangi tinklo linijos reaktyviosios varžos dedamosios santykis su aktyviosios varžos dedamąja yra mažesnis nei pagrindinės apkrovos, tinklo linijos galios koeficientas yra didesnis. Sudėjus abi suminės galios dedamąsias bendras galios faktorius pagerėjo.

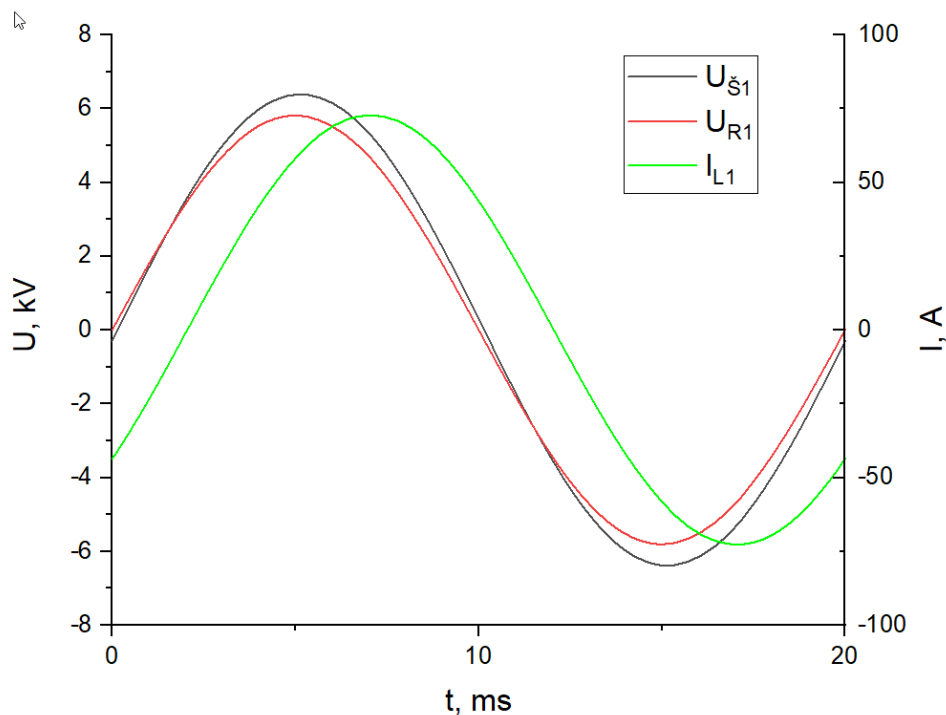
Visus gautus dydžius galima atvaizduoti vektorių diagramoje:



2.9 pav. Grandinės vektorių diagrama

Naudojant galios kompensavimo įrenginius tokiose grandinėse galima arba kompensuoti galios faktorių (apkrovos įtampos ir srovės vektorių kampas yra lygus 0) arba subalansuoti šaltinio bei apkrovos įtampas. Abi sąlygas vienu metu užtikrinti yra neįmanoma.

Pasinaudoję gautais dydžiais galime atlikti skaičiavimus „LTSpice“ programoje. Grandinėje yra pridėdamas papildomas grandinės induktyvumas bei aktyvioji varža, pakeičiami šaltinio parametrai.

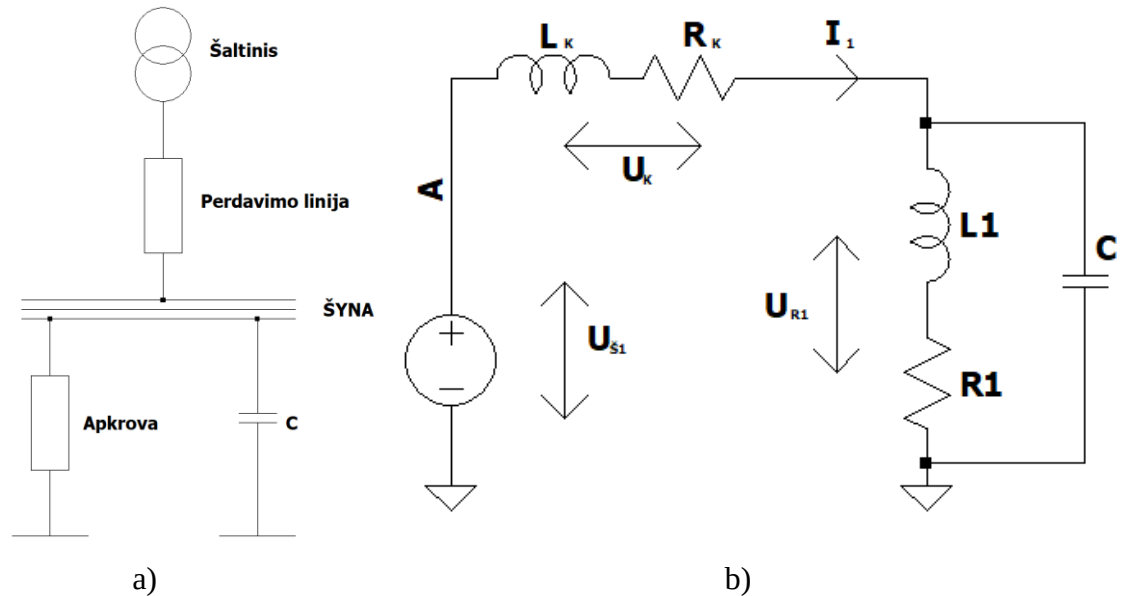


2.10 pav. Šaltinio U_{s1} , apkrovos U_{R1} įtampų ir grandinės srovės I_{L1} grafikai.

Iš 2.10 paveikslo matoma, jog šaltinio įtampa U_{s1} atsilieka nuo apkrovos įtampos U_{R1} . Taikant skaičiavimus „LTSpice“ aplinkoje, gaunamas $\cos\varphi_s = 0.829$, kuris yra labai panašus gautam atliekant skaičiavimus.

2.2.3. Šuntuojančio kondensatoriaus skaičiavimas galios faktoriaus korekcijai

Paprasčiausias galios faktoriaus korekcijos metodas yra jungti lygiagrečiai apkrovai šuntuojančią kondensatorių. Šis galios kompensavimo metodas yra naudojamas tik tuomet, kai apkrova grandinėje yra pastovi ir nekinta. Šis kondensatorius jungiamas taip, kad atjungus apkrovą, nuo tinklo būtų atjungtas ir pats kondensatorius. Tokiu būdu kai tinklas neapkrautas, nėra vartojama talpinė galia tinkle.



2.11 pav. a) Struktūrinė schema; b) skaičiuojamoji schema.

Tam, kad būtų kompensuotas galios faktorius grandinėje, būtina užtikrinti sąlygą:

$$Q'_1 = Q_{L1} - Q_C = 0, \quad (11)$$

čia: Q_1 – grandinės reaktyvioji galia; Q_C – talpuminio elemento reaktyvioji galia; Q'_1 – grandinės reaktyvioji galia po galios faktoriaus korekcijos.

Iš šios formulės galima daryti išvadą, jog šuntuojančio kondensatoriaus reaktyvioji galia turi būti lygi grandinės reaktyviajai galiai $Q_{L1} = Q_C$. Kadangi žinome reaktyviąją varžą bei grandinė tekančios srovės dydį, apkrovos reaktyviąją galią apskaičiuosime pagal formulę:

$$Q_{L1} = I_{1f}^2 \cdot X_L, \quad (12)$$

čia: I_{1f} – grandinės srovė; X_L – apkrovos reaktyvioji varža.

$$Q_{L1} = 72.2^2 \cdot 47.9 = 250 \text{ kVar}.$$

$$Q_C = Q_{L1} = 250 \text{ kVar}.$$

Suminė apkrovos galia:

$$S_{L1f} = \sqrt{P_{L1f}^2 + Q_{L1}^2} = \sqrt{(333 \cdot 10^3)^2 + (250 \cdot 10^3)^2} = 416 \text{ kVA}.$$

Kompleksinė apkrovos suminės galios išraiška:

$$\overline{S}_{L1f} = 416e^{j36.9^\circ} \text{ kVA}.$$

Kadangi kondensatorius jungiamas šuntuojančiai prie apkrovos, kondensatoriaus reaktyvioji varža yra randama pagal išraišką:

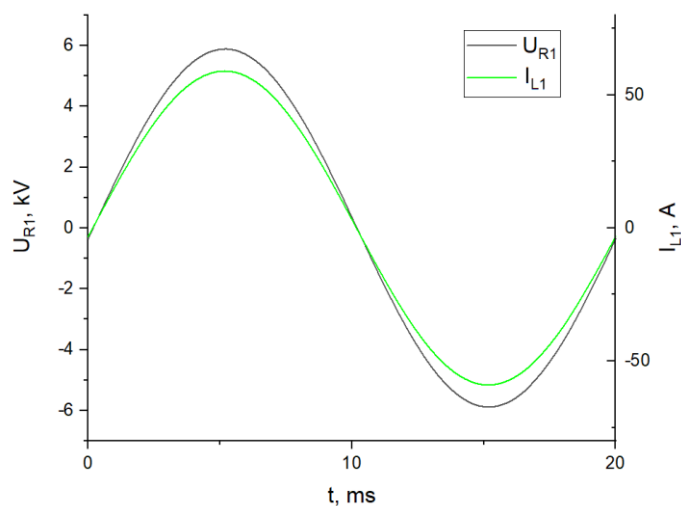
$$Q_C = \frac{U_{R1f}^2}{X_C}, \quad (13)$$

$$X_C = \frac{U_{R1f}^2}{Q_C} = \frac{5770^2}{250 \cdot 10^3} = 133.2 \, \Omega.$$

Kondensatoriaus talpa randama pagal formulę:

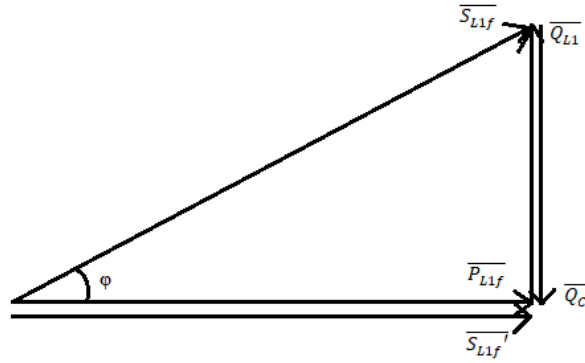
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 133.2} = 23.9 \, \mu\text{F}.$$



2.12 pav. Kompensuotos apkrovos įtampos U_{R1} ir srovės I_{L1} grafikai.

Pagal 2.12 paveikslą matome, jog srovės ir įtampos grafikų fazių kampai sutampa. Tai taip pat patvirtina ir „LTSpice“ $\cos\varphi$ skaičiavimas, kuris gaunamas lygiai 1.



2.13 pav. Galių vektorinė diagrama.

Pagal galių vektorinę diagramą matome, jog nekompensuotos grandinės pilnutinės galios $\overline{S_{L1f}}$ vektoriaus kampas nesutampa su aktyviosios galios vektoriaus kampu. Kompensavus reaktyviąją galią pilnutinės galios vektorius $\overline{S_{L1f}'}$ susislygina su aktyviosios galios vektoriumi. Kampas φ tampa lygiu 0 ir $\cos\varphi$ reikšmė tampa lygi 1. Po kompensavimo suminės galios kompleksinė išraiška $\overline{S_{L1f}'} = 333e^{j0^\circ} kVA$.

2.2.4. Šuntuojančio kondensatoriaus skaičiavimas įtampos balansavimui

Dėl perdavimo linijoje atsiradusio fazės poslinkio įtampoje, reaktyviosios galios kompensatorių galima naudoti kaip įtampos balansavimo įrenginį. Norint subalansuoti šaltinio ir apkrovos įtampą yra naudojama jungimo schema, kuri vaizduojama 8-ame paveiksle. Keisis kondensatoriaus reaktyviosios galios dydis. Šį dydį pasižymėsime kaip Q_1' ir apskaičiuosime pagal 11 išraišką.

Įtampos subalansavimui per perdavimo liniją būtina skaičiuoti kvadratinę lygtį. Kadangi mūsų perdavimo linijoje yra aktyviosios varžos dedamoji, joje atsiranda įtampos kryptis, todėl aktyviąją varžą šiam skaičiavimui reikės prilyginti 0. Tam kad šią lygtį užrašyti reikia sulygtinti šaltinio įtampą su apkrovos įtampa:

$$U_{\S1f} = U_{R1f} = U_{1f}. \quad (15)$$

Kvadratinės lygties išraiška:

$$U_{1f}^2 = \left(U_{1f} + \frac{X_K \cdot Q_1'}{U_{1f}} \right)^2 + \left(\frac{X_K \cdot P_{L1f}}{U_{1f}} \right)^2,$$

čia: X_K – perdavimo linijos reaktyvioji varža, P_{L1f} – apkrovos aktyvioji galia.

$$U_{1f}^2 = U_{1f}^2 + 2U_{1f} \cdot \frac{X_K \cdot Q_1'}{U_{1f}} + \frac{X_K^2 \cdot Q_1'^2}{U_{1f}^2} + \frac{X_K^2 \cdot P_{L1f}^2}{U_{1f}^2},$$

$$U_{1f}^2 - U_{1f}^2 = 2 \cdot (X_K \cdot Q_1') + \frac{X_K^2 \cdot Q_1'^2}{U_{1f}^2} + \frac{X_K^2 \cdot P_{L1f}^2}{U_{1f}^2},$$

$$0 = 2 \cdot U_{1f}^2 \cdot X_K \cdot Q_1' + X_K^2 \cdot Q_1'^2 + X_K^2 \cdot P_{L1f}^2.$$

Q_1' – nežinomas, todėl pertvarkoma lygtis:

$$X_K^2 \cdot Q_1'^2 + 2 \cdot U_{1f}^2 \cdot X_K \cdot Q_1' + X_K^2 \cdot P_{L1f}^2 = 0 | : X_K^2,$$

$$Q_1'^2 + Q_1' \cdot \frac{2 \cdot U_{1f}^2}{X_K} + P_{L1f}^2 = 0.$$

Toliau randamas kvadratinės lygties sprendinys. Naudosime tik sprendinį su pliusu:

$$Q_1' = -\frac{2 \cdot U_{1f}^2}{2 \cdot X_K} + \sqrt{\frac{\left(\frac{2 \cdot U_{1f}^2}{X_K}\right)^2}{4} + P_{L1f}^2},$$

$$Q_1' = -\frac{U_{1f}^2}{X_K} + \sqrt{\frac{U_{1f}^4}{X_K^2} + P_{L1f}^2}.$$

Skaičiavimai atliekami skaičiavimo programa, kadangi apvalinant tarpinius dydžius atsiranda didelė paklaida rezultate.

$$Q_1' = -\frac{5770^2}{1.4} + \sqrt{\frac{5770^4}{1.4^2} + 333000^2} = -2332 \text{ Var}.$$

Gautas neigiamas reaktyviosios galios dydis rodo, jog grandinė veiks perkompensuotame režime (talpinė dedamoji dominuoja). Pagal 11 formulę išsireiškiamas talpinės galios dydis:

$$Q_C = Q_{L1} - Q_1' = 250 \cdot 10^3 - (-2332) = 252.3 \text{ kVar}.$$

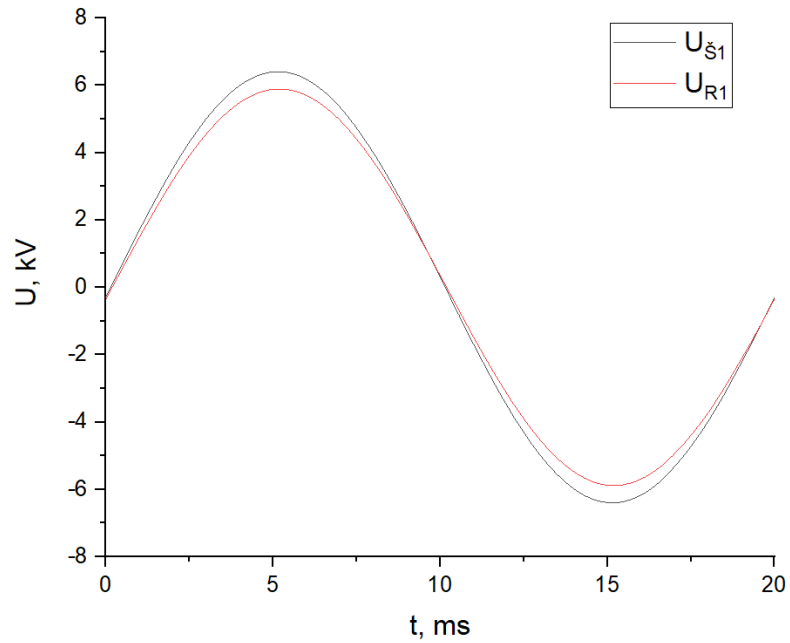
Pagal 13 išraišką skaičiuojama šuntuojančio kondensatoriaus reaktyvioji varža:

$$X_C = \frac{U_{R1f}^2}{Q_C} = \frac{5770^2}{252.3 \cdot 10^3} = 131.9 \Omega.$$

Pagal 14 išraišką skaičiuojama šuntuojančio kondensatoriaus talpa:

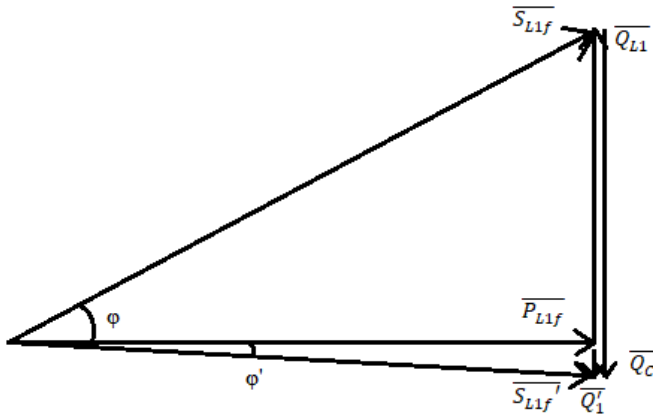
$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 131.9} = 24.1 \mu F.$$

Įstačius dydžius gaunami tokie įtampų grafikai:



2.14 pav. Šaltinio įtamos U_{L1} ir apkrovos įtamos U_{R1} grafikai.

2.14 paveiksle juodos spalvos grafikas vaizduoja šaltinio įtampą $U_{\dot{S}1}$, raudonas – apkrovos įtampą U_{R1} . Abiejų grafikų fazės sutampa, amplitudės nesutampa dėl įtamos kryčio ant perdavimo linijos aktyviosios varžos dedamosios.

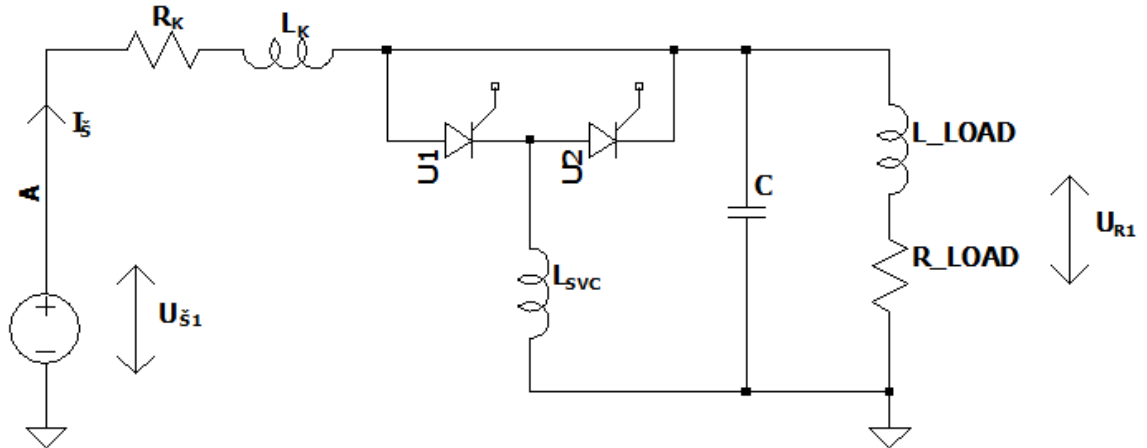


2.15 pav. Galių vektorinė diagrama po įtampų balansavimo.

Iš vektorių diagramos matome, jog grandinė buvo perkompensuota, nes kampas φ' po įtampų balansavimo gavosi neigiamas lyginant su pradiniu kampu φ .

2.2.5. Reaktyviosios galios kompensavimas grandinėje naudojant SVC

Pagrindinis šios dalies tikslas yra pagal parinktus SVC įrenginius kompensuoti grandinės galios koeficientą. Pirma parinkamas TCR ir statinio kondensatoriaus parametrus, tuomet pagal reikiamą reaktyviosios galios kompensavimo dydį, apskaičiuojamas TCR ventilių paleidimo kampas.



2.16 pav. Grandinės schema su SVC.

Šuntuojantis kondensatorius nekomutuojamas ir veikia pilnu ciklu, jo reikšmė turi užtikrinti kad jo pakaks plačiam reaktyviosios galios kompensavimo diapazonui. Pasirenkamas 100 μF talpos kondensatorius, kurio maksimali įtampa 12 kV. Randamas šio kondensatoriaus reaktyviosios varžos dydis pagal 14-ą formulę:

$$X_{FC} = \frac{1}{2\pi f C_{FC}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 10^{-4}} = 31.8 \, \Omega.$$

Pagal 13-ą formulę randama reaktyvioji kondensatoriaus galia:

$$Q_{FC} = \frac{U_{R1f}^2}{X_{FC}} = \frac{5770^2}{31.8} = 1.05 \, \text{MVar}.$$

Kadangi tam tikru momentu tinklas gali būti apkrautas tik aktyviaja galia arba visai neapkrautas, būtina parinkti TCR induktorių tokio dydžio, kad veikiant pilnu ciklu kompensuotų visą talpinę galią. Tokiu atveju $Q_{TCR} = Q_{FC}$ bei $X_{FC} = X_{TCR}$. Randamas TCR induktyvumas pagal 5-ą formulę:

$$L_{TCR}' = \frac{X_{TCR}}{2\pi f} = \frac{31.8}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 101 \, \text{mH}.$$

Parenkamas 100 mH induktorius, $L_{TCR} = 100 \text{mH}$. Kaip ir TCR tyrime naudojami SCR tiristoriai, kurių maksimali įtampa padidinta iki 24 kV. Jų jungimo konfigūracija išliks tokia pati kaip ir TCR tyrime.

Norint kompensuoti reaktyviąją galią apkrovoje naudojant šiuos elementus būtina skaičiuoti tiristorių paleidimo kampą, kadangi mažinant veikimo ciklą, mažės TCR reaktyvioji galia. Kadangi statinių kondensatorių reaktyvioji galia nepasikeis, mažinant TCR galią didės į grandinę tiekiamos talpinės reaktyviosios galios kiekis. Šis galios dydis turi būti lygus apkrovos reaktyviajai varžai.

Apkrovos reaktyvioji galia grandinėje jau buvo apskaičiuota ir yra lygi $Q_{L1} = 250 \text{ kVar}$. Norint kompensuoti šią reaktyviąją galią, į tinklą turės būti tiekama tiek pat talpinės reaktyviosios galios $Q_{C1} = Q_{L1} = 250 \text{ kVar}$. Kadangi šuntuojančio kondensatoriaus visa reaktyvioji galia yra didesnė ir lygi 1.05 MVar , papildomai šią galią turės kompensuoti TSC. Ši galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$Q'_{TCR} = Q_{FC} - Q_{C1} = 1050 \cdot 10^3 - 250 \cdot 10^3 = 800 \text{ kVar}.$$

Norint surasti paleidimo kampą, pagal reaktyviąją TCR galią būtina apskaičiuoti laidumą:

$$B'_{TCR} = \frac{Q'_{TCR}}{U_{R1f}} = \frac{800 \cdot 10^3}{5770^2} = 0.024 \text{ S}.$$

Toliau skaičiuojamas ventilių veikimo ciklo kampas ϑ :

$$\vartheta - \sin\vartheta = B_L \pi X_L, \quad (15)$$

$$\vartheta_1 - \sin\vartheta_1 = 0.024 \cdot 3.14 \cdot 31.8 = 2.396 \text{ rad}.$$

Išsireikšti ϑ iš $\vartheta - \sin\vartheta$ yra sunku, todėl lengvesnis būdas yra pasidaryti reikšmių lentelę naudojant skaičiavimo programą MS Excel (6 lentelė prieduose), gauta reikšmė lygi $\vartheta_1 = 159^\circ$. Paleidimo kampas α yra išreiškiamas intervale $0^\circ - 90^\circ$ ir apskaičiuojamas pagal formulę:

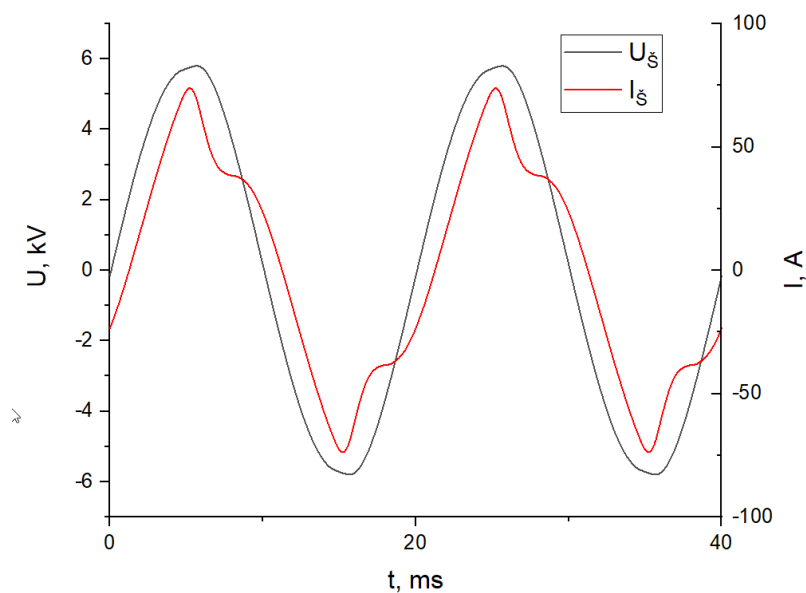
$$\alpha = \frac{\pi - \vartheta}{2}, \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \frac{180^\circ - 159^\circ}{2} = 10.5^\circ.$$

Paleidimo kampo uždelsimo laikas t_1 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$t = \frac{\alpha}{360^\circ \cdot f}, \quad (17)$$

$$t_1 = \frac{10.5^\circ}{360^\circ \cdot 50} = 0.583 \text{ ms}.$$

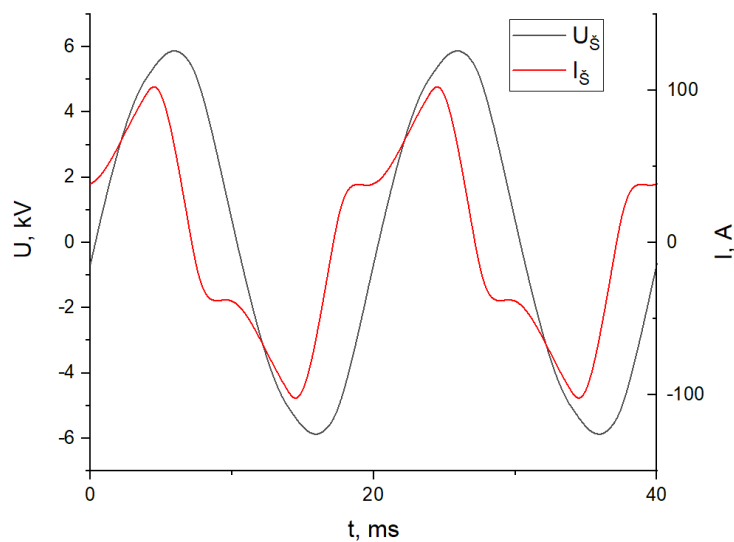


2.17 pav. Kompensuotos grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.

Iš 2.17 grafiko galima teigti kad grandinės galios faktorius yra visiškai kompensuotas, nes srovės I_s ir įtampos fazijų kampai U_s sutampa. Srovės grafikas praranda sinuso formą, kadangi SVC grandinės apkrova nelinejinė – tiristoriai tik dalį laiko praleidžia srovę. Programoje apskaičiuotas $\cos\varphi = 0.999$.

Tam, kad patikrintume perkompensuotos galios faktoriaus režimą, paleidimo kampą parinksime $\alpha_2 = 36^\circ$, tokiu atveju paleidimo laikas t_2 :

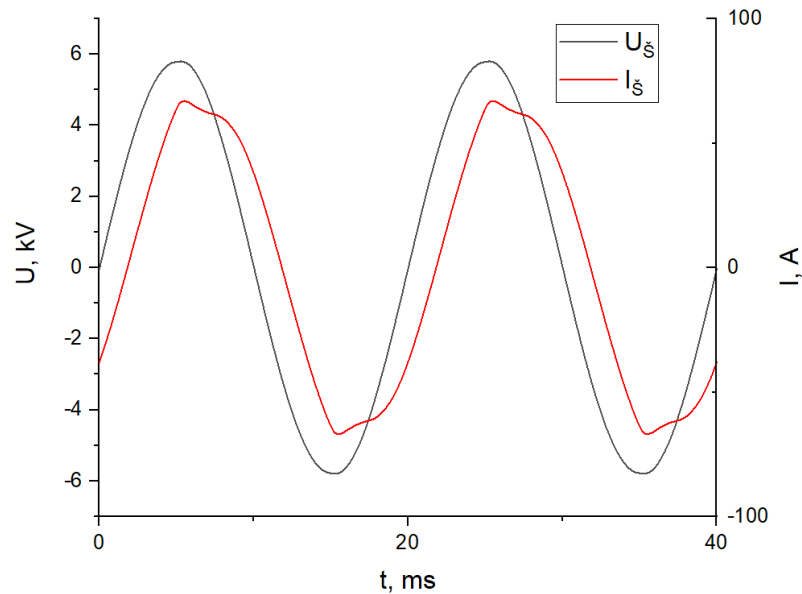
$$t_2 = \frac{36^\circ}{360^\circ \cdot 50} = 2 \text{ ms.}$$



2.18 pav. Perkompensuotos grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.

Pagal 2.18 paveikslą matoma, kad srovės I_s grafikas yra priekyje įtampos U_s grafiko. Tai reiškia, jog grandinėje yra dominuojanti talpinė reaktyviosios galios dedamoji, kuri tiekama SVC įrenginio.

Toliau tiriamas SVC veikimas grandinėje, kai SVC kompensavimas nepakankamas. Tokiu atveju paleidimo kampas turi būti per mažas, todėl parenkamas $\alpha_3 = 4^\circ$, Paleidimo laikas lygus $t_3 = 0.222 \text{ ms}$.



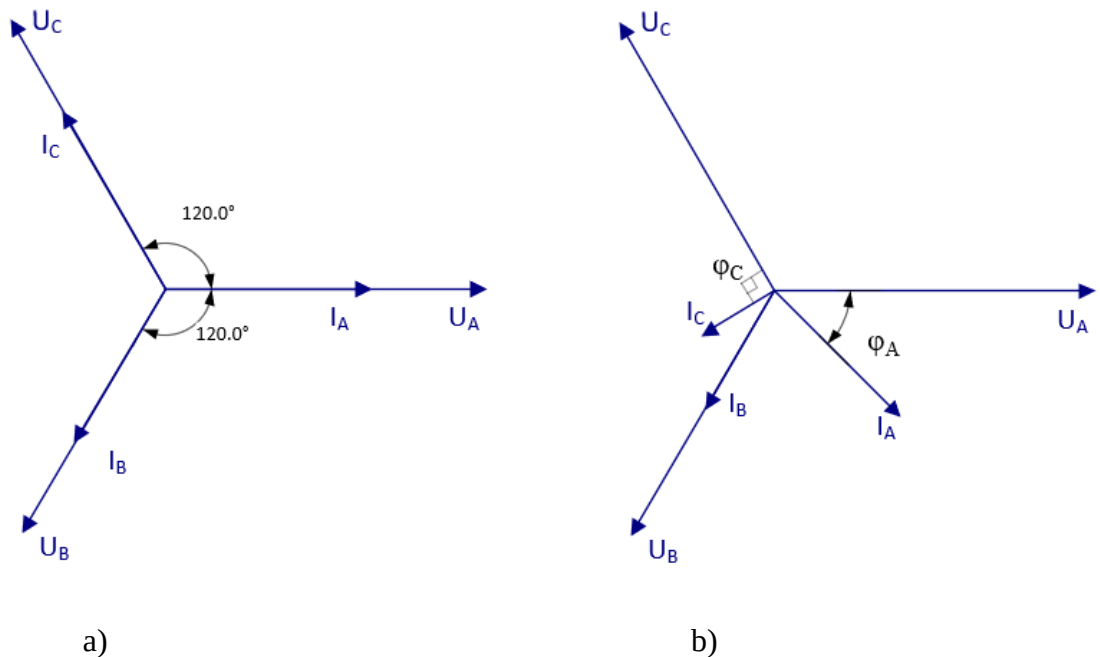
2.19 pav. Nepakankamo kompensavimo grandinės srovės I_s ir įtampos U_s grafikai.

Iš 2.19 grafikų matoma, jog grandinės srovė I_s atsilieka nuo įtampos U_s grafiko, SVC kompensavimas yra nepakankamas.

Gauti grafikai parodo kaip veikia SVC visais režimais. Tikslus SVC valdymo signalo skaičiavimo algoritmas yra labai svarbus tinkamam SVC veikimui visais reaktyviosios galios apkrovoje kompensavimo atvejais.

2.3. Eksperimentinis SVC tyrimas nesimetrinei tinklo apkrovai

Žemos įtampos tinkluose didelė dalis elektros energijos yra sunaudojama buitinių vartotojų. Tokiu atveju naudojama tiek trifazė tiek vienfazė įtampa. Problema atsiranda naudojant vienfazius įrenginius. Dažnu atveju suminė galia fazėse tampa netolygi dėl nevienodų kompleksinių apkrovos varžų $Z_{L,A} \neq Z_{L,B} \neq Z_{L,C}$. Dėl šios priežasties srovių vektoriai tampa nevienodi ir tinklas išsibalansuoja:

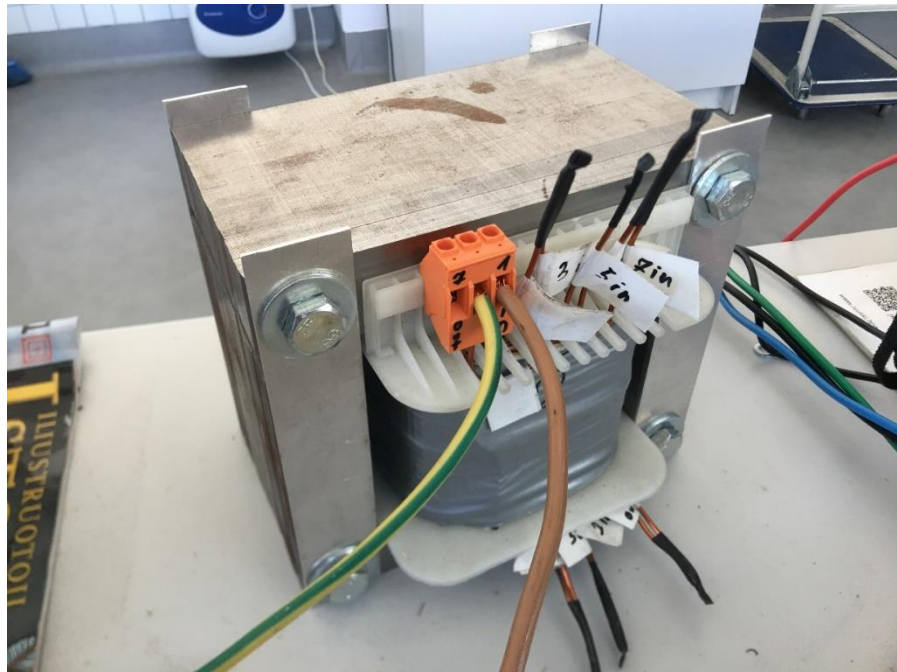


2.20 pav. Subalansuotos (a) ir nesubalansuotos (b) apkrovos vektorių grafikai.

2.20 paveikslo b dalyje matome, kaip atrodo nesubalansuota apkrova. A fazės apkrova šiame pavyzdyje aktyviosios varžos ir induktyvumo, B fazėje – tik aktyviosios varžos, C fazėje – tik talpinė apkrova. Norint šias fazes išbalansuoti, kiekvienai fazei būtina naudoti SVC skirtingu režimu: A fazei SVC turi tiekti talpinio pobūdžio reaktyviąją galią, B fazei – neturi tiekti reaktyviosios galios, C fazei – induktyviojo pobūdžio reaktyviąją galią.

Šio tyrimo bandymas buvo atliekamas naudojant tikrą įrenginį, visi bandymai buvo palyginami su „LTSpice“ simuliacijomis. Principinė jungimo schema pavaizduota 2.2 paveiksle.

Tyrimas buvo atliekamas 400V linijinės įtampos tinkle. SVC induktorių kiekvienai fazei reaktyvioji galia 4 kVar. RCL matuokliu pamatuotas apvijos induktyvumas lygus 40 mH ir aktyvioji varža lygi 1 Ω .



2.21 pav. Tyrime naudojamas SVC induktorius.

SVC grandinės kompensavimo kondensatoriaus yra 2,5 kVar reaktyviosios galios kiekvienai fazei. Pagal 13 ir 14 formulę apskaičiuota talpa lygi 250 μF .



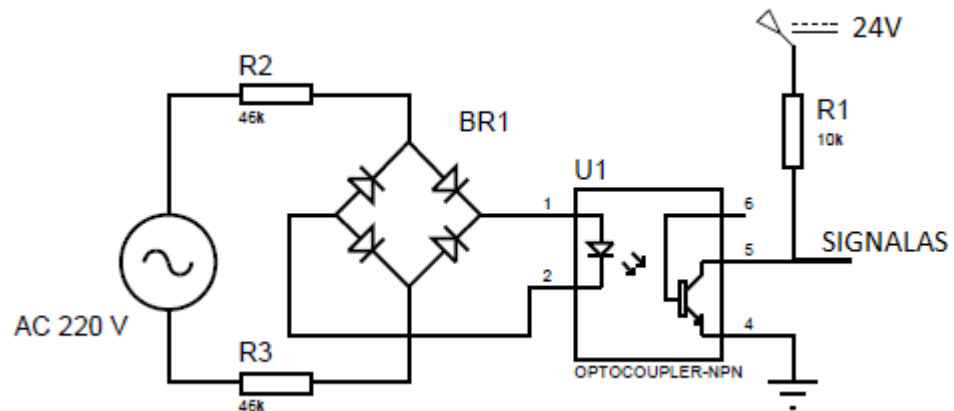
2.22 pav. Tyrime naudojamas kondensatorius.

Matavimui buvo naudojamas KYORITSU KEW6310 tinklo kokybės analizatorius. Jis jungiamas į kiekvieną fazę bei nulinį laidą, tokiu būdu matuojama tiksli kiekvienos fazės fazinė įtampa. Srovės matavimui buvo naudojamos srovės matavimo replės. Srovės matavimo replės veikia kaip transformatorius ir jų nereikia jungti fiziškai į tinklą, užtenka uždėti ant matuojamos linijos. Tinklo kokybės analizatorius matuoja kampą tarp srovės ir įtampos vektorių, pagal kurį apskaičiuoja galios faktorių. Pagal galios faktorių įrenginys apskaičiuoja aktyviąją, reaktyviąją bei suminę grandinės galias.



2.23 pav. Galios kokybės analizatorius.

SVC veikimui yra būtina nulinės sankirtos (angl. *zero crossing*) detektavimo schema. Ši schema tuo metu kai įtampos reikšmė fazėje kerta 0V ribą trumpam laikui pakelia aukštą signalą. Pagal šį signalą valdiklis žino apie tinklo įtampos fazės padėtį laike. Visai grandinei užtenka vienos nulinės sankirtos detektavimo schemos, kadangi žinoma kad įtampų fazės skiriasi 120°, tačiau dėl didesnio tikslumo naudojami 3 nulinės sankirtos detektavimo schemos, po vieną kiekvienai fazei.



2.24 pav. Nulinės sankirtos detektavimo schema.

Valdant buvo naudojamas pramoninis PLC valdiklis. Valdiklis šiame bandyme pagal gautą nulinės sankirtos signalą apskaičiuoja laiką, kada buvo paleidžiami tiristoriai. Tiristorių paleidimo kampas yra apskaičiuojamas pagal rankiniu būdu įvestą kompensavimo lygį intervale 0–100%. Tam, kad būtų išvengta klaidingo SVC paleidimo, 1-ame arba 3-iaame ketvirčiuose būtinas tiristorių paleidimo uždelimo laikas (angl. *dead time*), kuris yra lygus 10 % viso paleidimo laiko, po 5 % paleidimo intervalo pradžioje ir pabaigoje. Visas uždelimo laikas gaunamas 500 μ s arba po 250 μ s pradžioje ir pabaigoje. Paleidimas galimas 4,5 ms intervale 2-ame bei 4-ame ketvirčiuose.

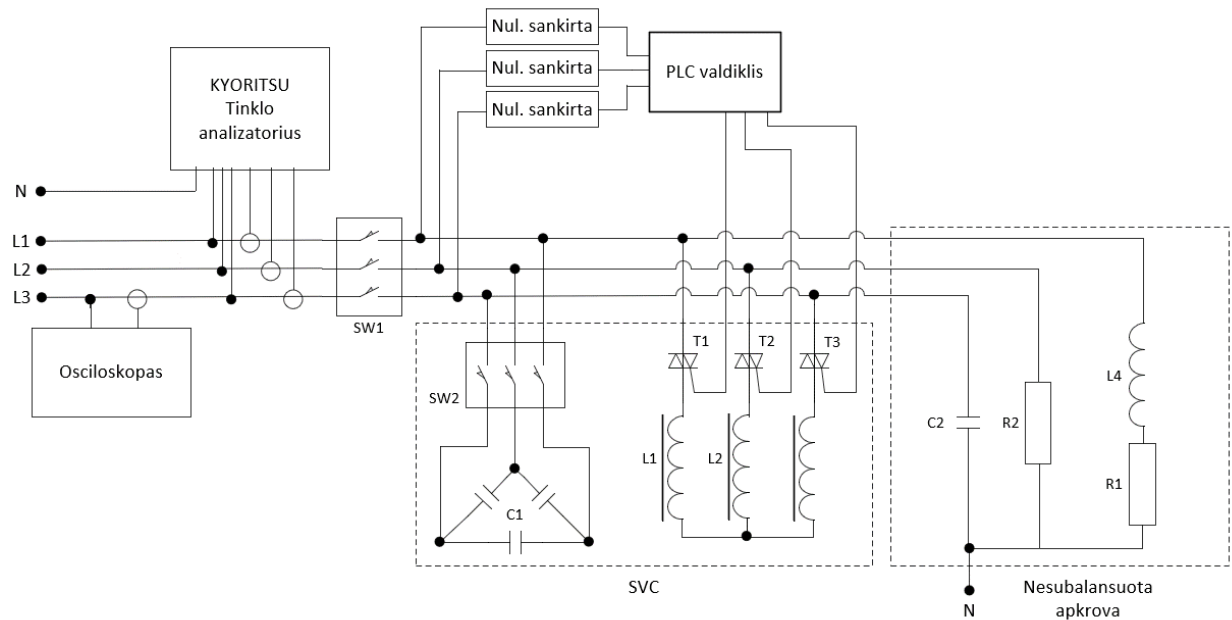
SVC induktoriaus valdymui buvo naudojamos puslaidininkinės relės. Puslaidininkinės relės yra du tiristoriai, sujungti lygiagrečiai priešingomis kryptimis. Tai yra būtina tam, kad būtų galima komutuoti apkrovą teigiamoje ir neigiamoje įtampos sinuso pusėse. Puslaidininkinės relės valdymui yra naudojamas optronas tam, kad būtų apsaugotas valdiklio išėjimas nuo kito įtampos lygio grandinės. Bandymo atveju buvo naudojamos SR1-1440R puslaidininkinės relės.



2.25 pav. SVC puslaidininkinė relė.

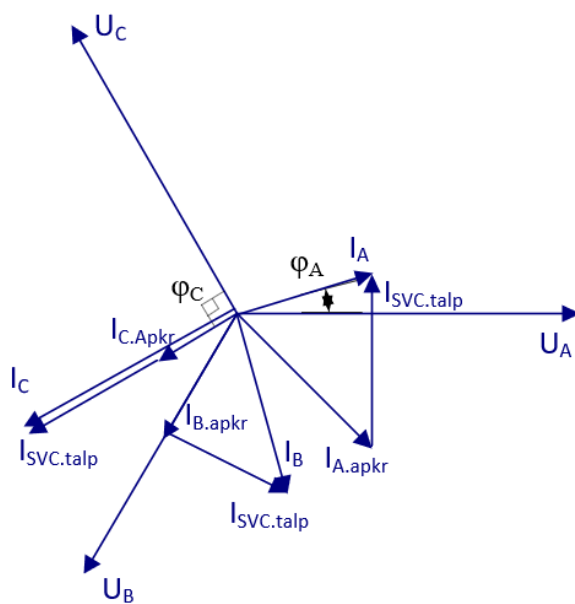
Apkrovai buvo naudojami šie įrenginiai:

- A fazei – transformatoriaus apvija. Apkrovos induktyvumas $L4 = 133 \text{ mH}$, aktyvioji varža $R1 = 5 \text{ }\Omega$;
- B fazei – šildytuvai. Apkrovos aktyvioji varža $R2 = 24 \text{ }\Omega$;
- C fazei – kondensatorius. Apkrovos talpa $C2 = 40 \text{ }\mu\text{F}$.



2.26 pav. Visa tyrimo schema.

Nekompensuotos SVC įrenginių apkrovos vektorinė diagrama yra pavaizduota 2.20 paveikslo b dalyje, tikslas sukompensuoti sroves taip, kad srovės vektorių kampai sutaptų su įtampos vektoriais kaip pavaizduota 2.20 paveiksle a dalyje. Pirmo bandymo metu į tinklą buvo jungiamas tik SVC talpinis elementas. Visų fazių galia buvo perkompensuota ir talpinio pobūdžio.



a)

	1ch	2ch	3ch	
V :	0.234	0.232	0.239	kV
A :	6.47	13.79	14.65	A
P :	-0.21	-1.91	0.00	kW
Q :	1.50	2.58	3.50	kvar
S :	1.52	3.21	3.50	kVA
PF:	0.136	0.596	0.011	
PA:	97.8	126.5	89.3	deg
P :	-2.08	kW	f :	50.00 Hz
Q :	7.96	kvar	An:	14.35 A
S :	8.23	kVA		
PF:	0.253	DC1:	1.18	mV
PA:	104.6	deg	DC2:	2.55 mV
Start		Zoom		

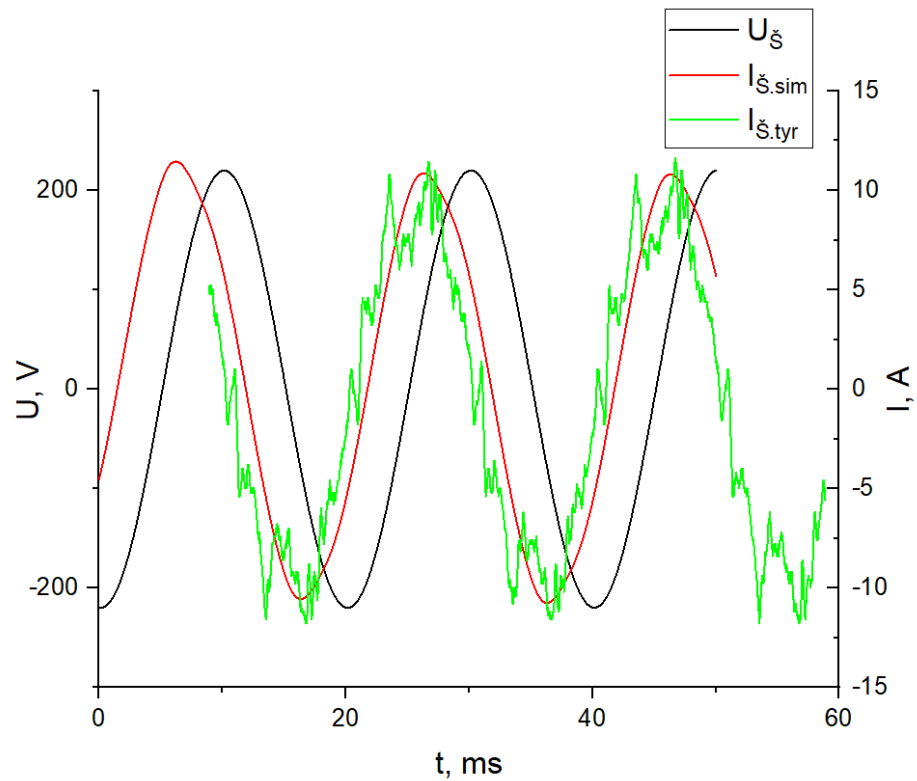
b)

2.27 pav. a) Vektorių diagrama; b) grandinės matavimai.

2.27 paveikslo b dalyje 1-3 kanalai prijungti prie A-C fazių atitinkamai. Šiuo atveju galima matyti visų fazių tinklo analizatoriaus matavimus, kai TCR nėra komutuojamas.

Kadangi visose fazėse prijungti SVC kondensatoriai, visų srovių vektoriai pasikeičia (2.27 a pav.). Iš paveikslo b dalies matome, kad reaktyvioji galia visose fazėse yra talpinio pobūdžio (aktyviosios ir reaktyviosios galios dydžiai turi būti priešingo ženklo, kadangi srovės replės buvo uždėtos priešinga kryptimi). Didžiausia reaktyvioji galia gauta C fazėje, nes sudedami du vienodos krypties srovės vektoriai. Mažiausia reaktyvioji galia gaunama A fazėje, kadangi talpinės reaktyviosios galios vektorius yra priešingos krypties induktyviojo pobūdžio reaktyviajai galiai ir jos viena kitą kompensuoja. A fazei taip pat reikės mažiausio SVC tiristorių veikimo laiko.

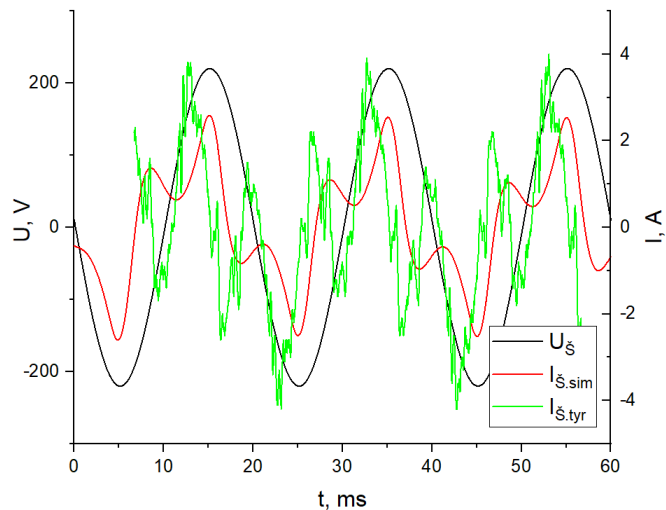
Toliau atliekami bandymai A fazėje. Pirmo bandymo metu matuosime įtampas ir srovės grafikus grandinėje, kai SVC paleidimo kampas lygus 0%. Kadangi A fazėje esantis transformatorius neapkrautas (laisvos eigos režimas), aktyvioji galia grandinėje yra labai maža lyginant su reaktyviaja galia.



2.28 pav. A fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s.tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s.sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).

2.28 paveiksle yra palyginamas realaus bandymo metu gautas srovės dydis $I_{s.tyr}$ su gauta „LTSpice“ programoje $I_{s.sim}$. Eksperimento ir simuliacijos įtampos grafikai sulygtinti, todėl atvaizduojamas tik vienas bendras šaltinio įtampos U_s grafikas. Abiem atvejais matome, jog srovės grafikas priekyje, todėl galima teigti, kad talpinio pobūdžio galia tinkle dominuoja. Lyginant simuliacijos ir tikro bandymo srovės kreives matome, kad tikro bandymo atveju atsiranda papildomos harmonikos, kurios iškraipo sinusoidę. Šios harmonikos atsiranda dėl talpinių elementų grandinėje.

Toliau didinant SVC paleidimo kampą randamas toks paleidimo kampas, kuriam esant srovės ir įtampos vektoriai sutampa. Visiškai grandinė sukompensuota esant 50% veikimo ciklo.

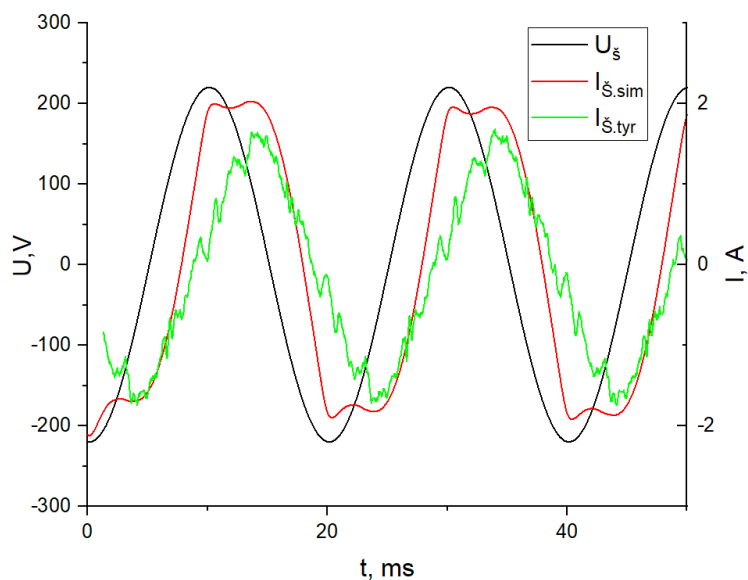


2.29 pav. A fazės šaltinio įtamos U_s ir eksperimento ($I_{s.tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s.sim}$) srovių grafikai, kai apkrova sukompensuota SVC (50 %).

Sukompensavus grandinę pagal 2.29 paveikslą matoma, jog abu srovės ($I_{s.tyr}$ ir $I_{s.sim}$) grafikai pasislenka arčiau įtampų grafiko, tačiau iškraipymas didėja. Šio iškraipymo priežastis yra SVC komutavimas puslaidininkais. SVC veikia kaip nelinijinė apkrova, dėl šios priežasties srovės grafikas visiškai praranda sinusinę formą. Ši tendencija matoma tiek realiam bandyme tiek simuliacijoje.

Pagal 3-ios lentelės matavimus matome, kad reaktyvioji galia šio bandymo metu buvo 0.68 kVar. Dėl papildomų srovės harmonikų, matavimo įrenginiai fiksuoja reaktyvią induktyviąją arba talpinę galią net ir tuo atveju, kai grandinė yra visiškai kompensuota. Pasiiekti reaktyviosios galios vertę artimą nuliui bandymo metu nepavyko. Kadangi aktyvioji galia yra labai maža, tinklo analizatoriaus apskaičiuojamas galios faktorius yra labai mažas (0.349).

Sekančio bandymo metu buvo tiriami grandinės parametrai kai SVC veikia 100% režimu.



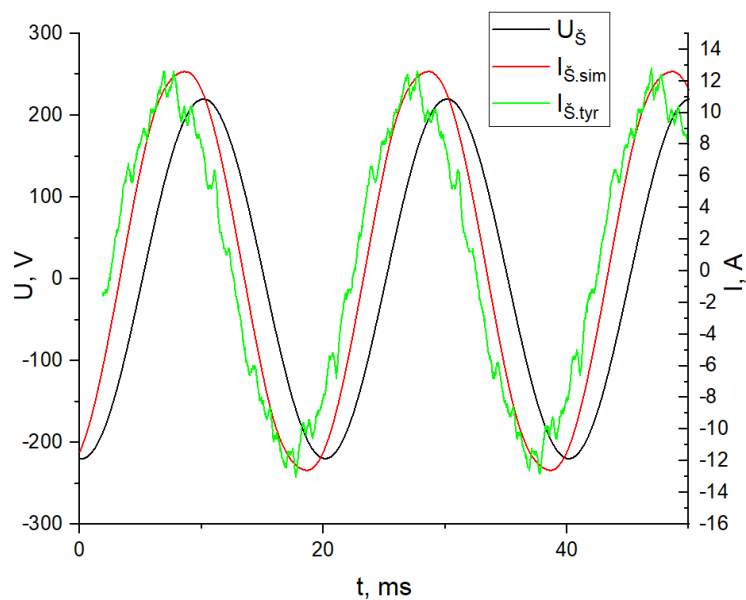
2.30 pav. A fazės šaltinio įtampos U_s ir eksperimento ($I_{s.tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s.sim}$) srovių grafikai, kai apkrova perkompensuota SVC (100 %).

Iš 2.30 paveikslo matome, kad srovės grafikas realaus matavimo atveju $I_{s.tyr}$ bei kompiuteriniam tyrime $I_{s.sim}$ atsilieka nuo įtampos grafiko. Todėl galima teigti, jog šiuo atveju grandinė perkompensuota. Tai patvirtina ir 3-ioje lentelėje pateikti matavimai. Reaktyvioji galia yra padidėjusi ir induktyviojo pobūdžio. Kadangi SVC veikia 100% režimu, sinusoidės iškraipymas gaunamas mažesnis nei 50% SVC veikimo atveju. Taip yra dėl to, kad SVC apkrova 100% veikimo atveju yra labiau linijinė nei 50% SVC veikimo atveju. 100% veikimo atveju SVC apkrovos nelineiškumas priklauso tik nuo apibrėžto uždelimo laiko (angl. dead time), kuris mūsų atveju yra 250 μ s.

3 lentelė. A fazės matavimai visais bandymais

Paleidimo kampas	U , V	I , A	P , kW	Q , kVar	S , kVA	$\cos\varphi$	φ , °
0% SVC (4.75 ms)	234	6.47	0.25	-1.5	1.52	0.136	82
50 % SVC (2.5 ms)	234	3.12	0.25	0.68	0.73	0.349	67
100% SVC (0.25 ms)	235	6.49	0.21	1.51	1.53	0.141	82

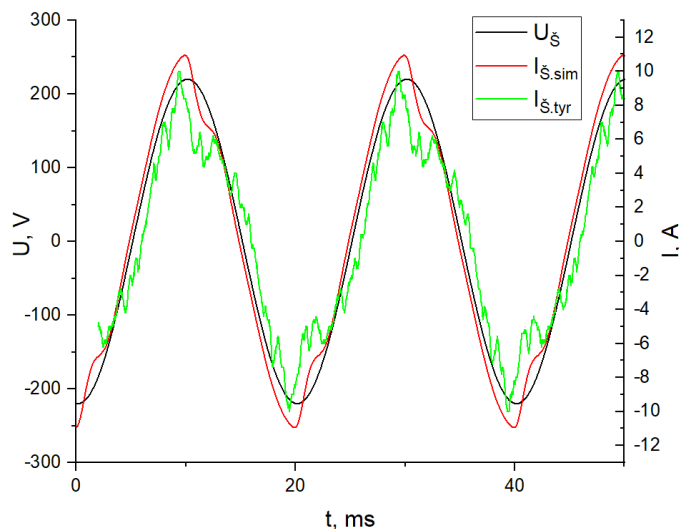
Toliau atliekamas tyrimas B fazėje, kurioje apkrova yra tik aktyvioji (šildytuvai). Šiuo atveju SVC induktorių veikimas buvo reikalingas tik tam, kad kompensuoti SVC kondensatoriaus generuojamą talpinio pobūdžio reaktyviąją galią.



2.31 pav. B fazės šaltinio įtamos U_s ir eksperimento ($I_{s.tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s.sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).

Iš srovės ir įtamos grafikų (2.31 pav.) matoma kad apkrova talpinio pobūdžio. Kadangi aktyvioji apkrova grandinėje yra didelė, SVC kondensatorius tiekiamos galios dydžio santykis su aktyviąja galia yra mažesnis nei A fazėje, galios faktorius šiuo atveju didesnis. Dėl šios priežasties srovės grafikas mažesniu kampu priekyje lyginant su įtamos grafiku.

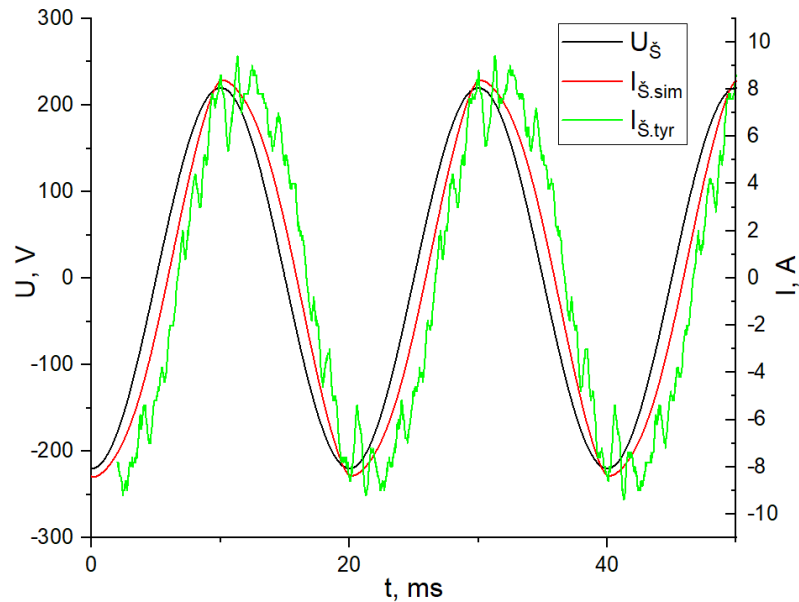
Keičiant SVC tiristorių paleidimo kampą buvo parinktas 82% veikimo laikas, kada grandinė visiškai sukompensuota.



2.32 pav. B fazės šaltinio įtamos U_s ir eksperimento ($I_{s.tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s.sim}$) srovių grafikai, kai apkrova visiškai sukompensuota SVC (82 %).

Iš 2.32 grafiko matoma, jog sukompensavus grandinę srovės abiem atvejais ($I_{\text{š.tyr}}$ ir $I_{\text{š.sim}}$) sutampa su įtampos $U_{\text{š}}$ grafiku atsižvelgiant į nedidelę paklaidą. Grandinė yra visiškai kompensuota. Srovės dydis sukompensavus pamažėjo, kadangi induktyviųjų ir talpinių elementų srovės viena kitą kompensuoja. Iš simuliacijos srovės grafiko matyti, kad iškraipymas galimas bet koku SVC veikimo ciklu.

Toliau atliekamas bandymas su perkompensuota grandine B fazėje (100% SVC veikimas).



2.33 pav. B fazės šaltinio įtampos $U_{\text{š}}$ ir eksperimento ($I_{\text{š.tyr}}$) bei simuliacijos ($I_{\text{š.sim}}$) srovių grafikai, kai apkrova perkompensuota SVC (100 %).

Šiuo atveju (2.33 pav.) eksperimento srovės $I_{\text{š.tyr}}$ ir įtampos $U_{\text{š}}$ vektorių kampas didesnis nei simuliacijoje gautos srovės $I_{\text{š.sim}}$. Taip galėjo atsitikti dėl paklaidos matuojant jungiamos apkrovos ar SVC įrenginių parametrus. Abiejų srovių grafikai yra atsilieka nuo įtampos, todėl galios faktorius šiuo atveju bus mažesnis nei praėjusio bandymo metu.

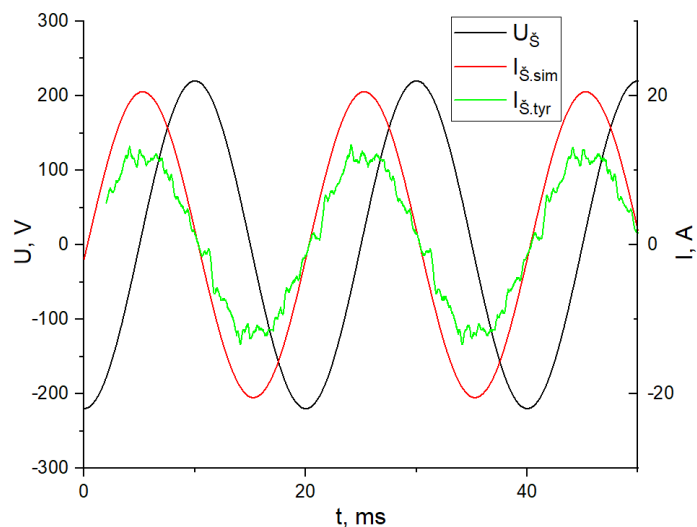
4 lentelė. B fazės matavimai visais bandymais

Paleidimo kampas	U , V	I , A	P , kW	Q , kVar	S , kVA	$\cos\varphi$	φ , °
0% SVC (4.75 ms)	231	13.49	1.86	-2.5	3.12	0.596	53.4
82 % SVC (1.56 ms)	232	9.07	2.04	-0.53	2.1	0.968	14.6
100% SVC (0.25 ms)	231	10.25	2.12	1.05	2.37	0.896	26.4

Pagal gautus bandymų duomenis matoma, jog B fazėje $\cos\varphi$ matavimai tikslesni nei A fazėje, kadangi aktyvioji apkrova R_L šioje fazėje yra kur kas didesnė. Visiškai sukompensuotos grandinės galios

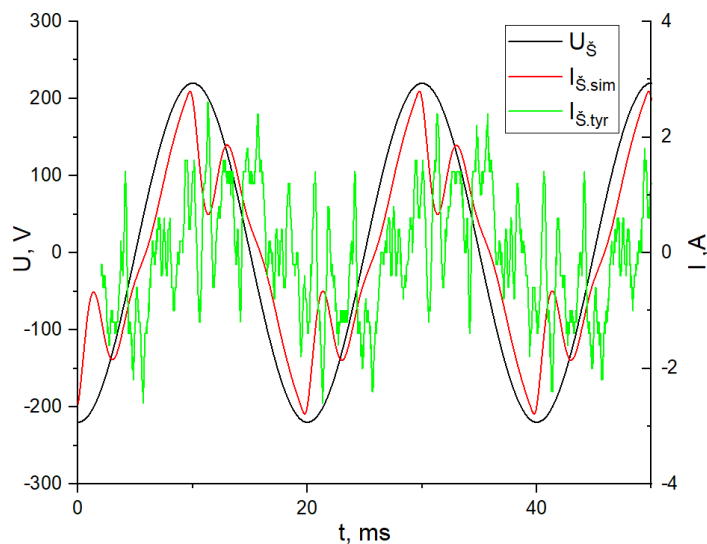
faktorius lygus 0.968. Šis dydis būtų kur kas didesnis jeigu srovės grafikas būtų išfiltruotas nuo papildomų harmonikų. Tam reikia naudoti RL filtrus grandinėje.

C fazėje apkrovai yra pajungtas kondensatorius. Pirmą buvo tiriama neapkrauta SVC induktorių grandinė.



2.34 pav. C fazės šaltinio įtamos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova nesukompensuota SVC induktoriais (0 %).

Pagal 2.34 srovės $I_{s,tyr}$ ir $I_{s,sim}$ bei įtamos U_s grafikus matoma, jog apkrova yra vien talpinė, kadangi srovės grafikai priekyje 90° lyginant su įtamos grafiku. Pamatytos srovės amplitudė yra gerokai didesnė nei gauta simuliacijoje. Tai galėjo atsitikti dėl netikslaus grandinės parametrų matavimo.



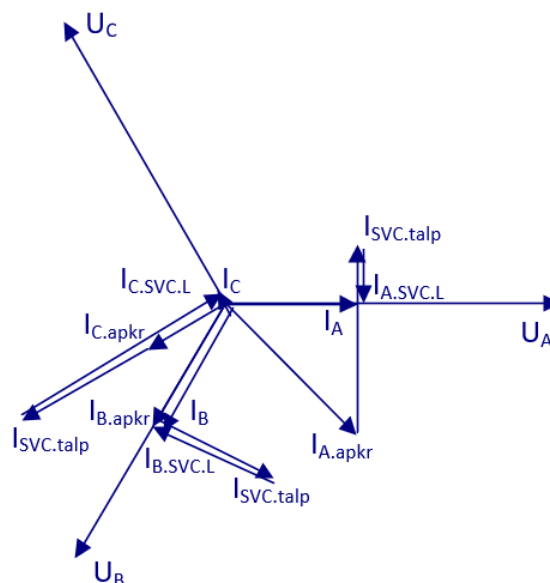
2.35 pav. C fazės šaltinio įtamos U_s ir eksperimento ($I_{s,tyr}$) bei simuliacijos ($I_{s,sim}$) srovių grafikai, kai apkrova sukompensuota (100 %).

Visam grandinės sukompensavimui SVC tiristoriai turi būti komutuojami 100% kadangi C fazėje talpinė reaktyviosios galios dedamoji yra pati didžiausia. Šios grandinės perkompensavimui reikalingas didesnės reaktyviosios galios induktorius. Iš 2.35 pav. matoma, jog srovė abiem atvejais ($I_{s.tyr}$ ir $I_{s.sim}$) yra gerokai mažesnė nei nesukompensuoto bandymo atveju. Taip yra dėl to, jog induktoriaus ir kondensatorių srovės vertės yra priešingos krypties, todėl viena kitą kompensuoja. Realaus bandymo atveju srovės $I_{s.tyr}$ grafiko iškraipymas yra didelis ir prarandama sinuso forma. Taip yra tik dėl to, jog aukštesnio lygio harmonikų amplitudės nepasikeitė, nors pagrindinės srovės amplitudės vertė sumažėjo kelis kartus.

5 lentelė. C fazės matavimai visais bandymais

Paleidimo kampas	U , V	I , A	P , kW	Q , kVar	S , kVA	$\cos\varphi$	φ , °
0% SVC (4.75 ms)	240	14.7	0	-3.52	3.52	0.011	89.4
100% SVC (0.25 ms)	238	1.68	0.13	0.38	0.40	0.315	71.6

Nesukompensuotos grandinės (0% SVC) matavime matoma, jog aktyviosios apkrovos R_L varža yra labai didelė, galios faktorius lygus 0. Sukompensuotos apkrovos atveju atsiranda aktyvioji apkrova dėl SVC induktoriaus aktyviosios varžos dedamosios. Kaip ir A fazės atveju, dėl mažos grandinėje esančios aktyviosios apkrovos, pasiekti aukštą galios faktoriaus matavimą sunku dėl reaktyviosios galios matavimo paklaidos kai grandinė sukompensuota. Tiristorius komutuoiant 100% matoma, kad visą talpinę reaktyviąją galią sukompensuojame. Taip pat lyginant A, B ir C fazių fazines įtampas galima pastebėti, kad apkrovus tinklą talpine apkrova, fazinė įtampa gaunama didesnė nei apkrovus induktyviąją apkrova.



2.36 pav. Sukompensuotos trifazės grandinės vektorių diagrama.

Sukompensavus visų fazių apkrovas gaunama vektorinė diagrama, kuriose srovės ir įtampos vektorių kampai sutampa. Šioje vektorių diagramoje pavaizduotos visos srovių dedamosios, pagal kurias galima matyti kokio dydžio ir kokio pobūdžio reaktyviosios galios turi tiekti SVC įrenginys į tinklą tam, kad skirtingo pobūdžio apkrovos būtų sukompensuotos.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

- Tiriamojoje metodinėje dalyje atlikus literatūros analizę buvo patvirtinta, kad naudojant įvairius kompensatorių įrenginius galima efektyviai kontroliuoti galios faktorių ir linijos įtampos fazę. Atliekant tiriamąją eksperimentinę dalį buvo projektuotas SVC įrenginys, kuriuo buvo kompensuojamas galios faktorius ir įtampos fazė.
- Tiriant TCR įrenginį „LTSpice“ programa buvo išanalizuotas jo veikimas esant skirtingiems tiristorių paleidimo kampams gaunant skirtingas reaktyviojo elemento sroves. Taip pat analizuojamas suminės srovės iškraipymas dėl šio įrenginio netiesiško veikimo. Komutuojuant tiristorius skirtingu atžvilgiui įtampos metu buvo pastebėta, kad tiristoriai turi būti įjungiami tik 2-ame ir 4-iame įtampos sinuso ketvirčiuose, kadangi jungiant kitu laiku srovė stipriai išauga ir praranda sinuso formą.
- Apskaičiuotas reaktyviosios galios dydis, kurį reikia kompensuoti apkrovos grandinėje. Esant nesukompensuotai apkrovos grandinei kurios suminė galia $416e^{j36.9^\circ} \text{ kVA}$, naudojant vien talpinį elementą, kurio talpa $C = 23,9 \text{ } \mu\text{F}$ buvo sukompensuota grandinė o jos suminė galia sumažėjo iki $333e^{j0^\circ} \text{ kVA}$.
- Tam, kad subalansuoti šaltinio ir apkrovos įtampas naudojant vien tik talpinį elementą reikalingas $24,1 \text{ } \mu\text{F}$ talpos kondensatorius. Po šaltinio ir apkrovos įtampų kompensavimo fazių skirtumo kampas gautas lygus 0° . Todėl galios faktoriaus kompensatoriai gali būti naudojami galios faktoriaus gerinimui bei įtampos kompensavimui.
- Naudojant $100 \text{ } \mu\text{F}$ talpinį elementą bei 100 mH induktyvųjį elementą, suprojektuota SVC grandinė. Atlikus skaičiavimus rasta, kad norint sukompensuoti 250 kVar reaktyviosios galios, tiristorių paleidimo kampas turi būti $10,5^\circ$. Taip pat ištirta kokią įtaką srovės ir įtampos fazei daro nesukompensuota arba perkompensuota grandinė.
- Atliktas eksperimentinis bandymas su trifaze nesimetrine apkrova, kai visų fazių apkrovos skirtingo pobūdžio: A fazėje – induktyvioji (133 mH), B fazėje – aktyvioji ($24 \text{ } \Omega$), C fazėje – talpinė ($40 \text{ } \mu\text{F}$). SVC įrenginiu buvo kompensuotas galios faktorius su maždaug $0,5 \text{ kVar}$ reaktyviosios galios paklaida naudojant skirtingus SVC veikimo laikus kiekvienai fazei: A fazei – 50% , B fazei – 82% , C fazei – 100% .
- Atlikus eksperimentinį bandymą kompiuterine simuliacijos programa gauti panašūs rezultatai keliu laipsnių tikslumu. Realaus bandymo metu srovės grafikai gaunami labiau iškraipyti dėl papildomų harmonikų dedamųjų, kurių nebuvo kompiuterinės simuliacijos grafikuose. Tolimesni bandymai reikalingi nustatyti šių iškraipymų priežastis.

LITERATŪROS ŠARŠAS

- Benysek, Grzegorz. 2007. 27 *Power Systems Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy Using Power Electronics Systems*.
- Canizares, C. A., & Faur, Z. T. 1999. "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse." *IEEE Transactions on Power Systems* 14: 158–165.
- E. Acha, T. Miller, V.G Agelidis. 2002. *Power Electronic Control in Electrical Systems Power Electronic Control in Electrical Systems*.
- Igbinovia, Famous O. et al. 2015. "Comparative Review of Reactive Power Compensation Technologies." *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2015*: 2–7.
- Jahns, T. Miller; D. Hanselman; T. M. 2002. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices the Kluwer International Series*.
- Kumar, Kalyanapu Pradeep, and K. Ilango. 2014. "Design of Series Active Filter for Power Quality Improvement." *2014 International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering, ICECCE 2014*: 78–82.
- Liberado, E. V., J. A. Pomilio, and F. P. Marafão. 2016. "Harmonic Analysis of Static Var Compensator Operating under Distorted Voltages." *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2016-Decem(3)*: 60–65.
- Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. 2012. "ELEKTROS ĮRENGINIŲ ĮRENGIMO BENDROSIS TAISYKLĖS." <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.418124>.
- Mikkili, Suresh, and Anup Kumar Panda. 2014. "Real-Time Implementation of Type-2 FLC-Based Shunt Active Filter Control Strategies (p-q and Id-Iq) with Different Fuzzy MFs for Power Quality Improvement." *International Journal of Emerging Electric Power Systems* 15(3): 217–36.
- Milasi, Rasoul M., Alan F. Lynch, and Yun Wei Li. 2013. "Adaptive Control of a Voltage Source Converter for Power Factor Correction." *IEEE Transactions on Power Electronics* 28(10): 4767–79.
- Noroozian, M. et al. 2003. "Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application." *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference* 3: 1143–50.

- Plants, Steel. 2016. “Chapter 2 Controlled Power Operation of 12-Pulse Converter.” : 42–69.
- Schauder, C., & Mehta, H. 1993. “Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators.” *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*.
- Shuai, Mao et al. 2018. “Review on Economic Loss Assessment of Power Outages.” *Procedia Computer Science* 130: 1158–63. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.151>.
- Singh, Bhim, Kamal Al-haddad, Senior Member, and Ambrish Chandra. 1999. “Power Quality Improvement.” *October* 46(5): 960–71.
- “What Is the Static Var Compensator (SVC)?” <https://electrical-engineering-portal.com/what-is-the-static-var-compensator-svc> (February 11, 2020).

PRIEDAI

A PRIEDAS.

6 lentelė. Dydžio $\vartheta - \sin\vartheta$ reikšmių lentelė nuo kampo ϑ

$\vartheta, ^\circ$	$\vartheta - \sin\vartheta$	$\vartheta, ^\circ$	$\vartheta - \sin\vartheta$	$\vartheta, ^\circ$	$\vartheta - \sin\vartheta$	$\vartheta, ^\circ$	$\vartheta - \sin\vartheta$
1	0.000	46	0.084	91	0.588	136	1.679
2	0.000	47	0.089	92	0.606	137	1.709
3	0.000	48	0.095	93	0.625	138	1.739
4	0.000	49	0.101	94	0.643	139	1.770
5	0.000	50	0.107	95	0.662	140	1.801
6	0.000	51	0.113	96	0.681	141	1.832
7	0.000	52	0.120	97	0.700	142	1.863
8	0.000	53	0.126	98	0.720	143	1.894
9	0.001	54	0.133	99	0.740	144	1.925
10	0.001	55	0.141	100	0.761	145	1.957
11	0.001	56	0.148	101	0.781	146	1.989
12	0.002	57	0.156	102	0.802	147	2.021
13	0.002	58	0.164	103	0.823	148	2.053
14	0.002	59	0.173	104	0.845	149	2.086
15	0.003	60	0.181	105	0.867	150	2.118
16	0.004	61	0.190	106	0.889	151	2.151
17	0.004	62	0.199	107	0.911	152	2.183
18	0.005	63	0.209	108	0.934	153	2.216
19	0.006	64	0.218	109	0.957	154	2.249
20	0.007	65	0.228	110	0.980	155	2.283
21	0.008	66	0.238	111	1.004	156	2.316
22	0.009	67	0.249	112	1.028	157	2.349
23	0.011	68	0.260	113	1.052	158	2.383
24	0.012	69	0.271	114	1.076	159	2.417
25	0.014	70	0.282	115	1.101	160	2.451
26	0.015	71	0.294	116	1.126	161	2.484
27	0.017	72	0.306	117	1.151	162	2.518
28	0.019	73	0.318	118	1.177	163	2.553

29	0.021	74	0.330	119	1.202	164	2.587
30	0.024	75	0.343	120	1.228	165	2.621
31	0.026	76	0.356	121	1.255	166	2.655
32	0.029	77	0.370	122	1.281	167	2.690
33	0.031	78	0.383	123	1.308	168	2.724
34	0.034	79	0.397	124	1.335	169	2.759
35	0.037	80	0.411	125	1.363	170	2.793
36	0.041	81	0.426	126	1.390	171	2.828
37	0.044	82	0.441	127	1.418	172	2.863
38	0.048	83	0.456	128	1.446	173	2.898
39	0.051	84	0.472	129	1.474	174	2.932
40	0.055	85	0.487	130	1.503	175	2.967
41	0.060	86	0.503	131	1.532	176	3.002
42	0.064	87	0.520	132	1.561	177	3.037
43	0.068	88	0.536	133	1.590	178	3.072
44	0.073	89	0.553	134	1.619	179	3.107
45	0.078	90	0.571	135	1.649	180	3.142