



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Marius Medonas**

**JŪRINIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO, PRIJUNGTO PRIE  
ELEKTROS TINKLO NAUDOJANT AUKŠTOS ĮTAMPOS  
NUOLATINĖS SROVĖS PERDAVIMO TECHNOLOGIJĄ,  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Almantas Bandza

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**JŪRINIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO, PRIJUNGTO PRIE  
ELEKTROS TINKLO NAUDOJANT AUKŠTOS ĮTAMPOS  
NUOLATINĖS SROVĖS PERDAVIMO TECHNOLOGIJĄ,  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

**Vadovas**

Doc. dr. Almantas Bandza

**Recenzentas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

**Projektą atliko**

Marius Medonas

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Marius Medonas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Jūrinių vėjo elektrinių parko, prijungto prie elektros tinklo naudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologiją, tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. 05 30 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Mariaus Medono** baigiamasis projektas tema „Jūrinių vėjo elektrinių parko, prijungto prie elektros tinklo naudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologiją, tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Medonas, Marius. Jūrinių vėjo elektrinių parko, prijungto prie elektros tinklo naudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologiją, tyrimas. Magistrinis baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *Aukštos įtampos nuolatinės srovės, jūrinių vėjo elektrinių parkas, įtampos šaltinio keitiklis, vėjo elektrinė.*

Kaunas, 2017. 54 p.

## SANTRAUKA

**Kintamosios srovės perdavimo sistemoms priartėjus prie savo technologinio limito bei sparčiai augantis elektros energijos poreikis, verčia naujų technologijų paieškai ir kūrimui. Viena iš jų yra aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema, leidžianti ekonomiškai perduoti didelius elektros energijos kiekius.**

**Pagrindinis šio baigiamojo magistrinio darbo tikslas yra naudojantis „MATLAB/Simulink“ programiniu paketu sumodeliuoti ir ištirti aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemą, kuri jungia jūrinių vėjo elektrinių parką su pagrindiniu elektros tinklu. Sistemos tyrimo rezultatuose pateikiama kompiuterinio modelio struktūrinė schema bei dinaminės charakteristikos.**

Medonas, Marius. Research on Offshore Wind Farm Connected to Power Grid Using High Voltage Direct Current Transmission System: *Master's thesis in Master's qualification degree / supervisor doc. dr. Almantas Bandza. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems,*

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

Key words: High Voltage Direct Current Transmission, Offshore Wind Farm, Voltage Source Converter, wind turbine.

Kaunas, 2017. 54 p.

## SUMMARY

**Alternating current transmission systems getting closer to its technological limit also the rapidly growing demand for electricity energy have triggered the interest in new technology development. One of the new technologies is the High Voltage Direct Current transmission system which enabling economically transmit large amounts of electrical energy.**

**The main purpose of the final master project is to model and analyze High-Voltage Direct Current transmission system that connects the offshore wind power park with the main power grid. System investigation results include “MATLAB/Simulink“ model and dynamic characteristics.**

## TURINYS

IVADAS.....	7
1. AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS TECHNOLOGIJOS.....	8
1.1 Vienpolė energijos perdavimo sistema .....	8
1.2 Dvipolė energijos perdavimo sistema.....	9
2. AĖNS PERDAVIMO SISTEMA SU LINIJOS KOMUTUOJAMU SROVĖS ŠALTINIO KEITIKLIU .....	10
2.1 Trumpojo jungimo galios koeficientas.....	11
2.2 Reaktyviosios galios kompensavimas .....	12
2.3 Linijos komutuojamo srovės šaltinio keitiklis.....	12
2.4 Ventiliai .....	15
2.5 Keitiklio transformatoriai.....	15
2.6 Kiti reikalingi sistemos komponentai.....	15
3. AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS PERDAVIMO SISTEMA SU ĮTAMPOS KEITIKLIU .....	16
3.1 Impulso pločio moduliacija .....	16
3.2 Dviejų lygių įtampos šaltinio inverteris su impulso pločio moduliacija.....	18
3.3 Kintamos srovės filtrai ir keitiklio reaktoriai .....	20
3.4 Nuolatinės srovės kondensatoriai.....	21
4. NUOLATINĖS IR KINTAMOSIOS SROVĖS PERDAVIMO SISTEMŲ PALYGINIMAS.....	22
4.1 Kintamosios srovės perdavimo sistemos trūkumai .....	22
4.2 Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos pranašumai.....	22
4.3 Perdavimo sistemų technologinis limitas .....	23
5. JŪRINIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ PARKAI.....	24
5.1 Jūrinių vėjo elektrinių parko struktūra.....	25
5.2 Vėjo elektrinių tipai .....	25
5.2.1 Vėjo elektrinė su narveliniu asinchroniniu generatoriumi.....	26
5.2.2 Vėjo elektrinė su fazinio rotoriaus asinchroniniu generatoriumi.....	26
5.2.3 Vėjo elektrinė su dvigubo maitinimo indukciniu generatoriumi.....	27
5.2.4 Vėjo elektrinė prijungta prie tinklo per nuolatinės srovės intarpą.....	28
5.3 Jūrinių vėjo elektrinių tvirtinimo konstrukcijos ir pamatai .....	28
5.4 Perdavimo tinklai naudojami prijungiant VE prie pagrindinio elektros tinklo .....	29
5.4.1 Aukštos įtampos kintamos srovės perdavimo sistema .....	30
5.4.2 Nuolatinės srovės perdavimo sistema su tiesiogiai linijos komutuojamu keitikliu.....	31
5.4.3 Nuolatinės srovės perdavimo sistema su įtampos šaltinio keitikliu.....	32
5.4.4 Žemo dažnio kintamos srovės povandeninių kabelių perdavimo sistema .....	32
5.5 Vėjo elektrinių parko vidinis elektros tinklas .....	33

5.6	<i>Elektros perdavimo tinklų naudojamų prijungiant VE prie pagrindinio elektros tinklo palyginimas</i> .....	34
5.6.1	<i>Jūrinių vėjo elektrinių parkas iki 200 MW</i> .....	35
5.6.2	<i>Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 200 MW ir 350 MW</i> .....	36
5.6.3	<i>Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 350 MW ir 600 MW</i> .....	36
5.6.4	<i>Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 600 ir 900 MW</i> .....	36
5.6.5	<i>Jūrinių vėjo elektrinių parkai 900 MW ir daugiau</i> .....	36
5.7	<i>Jūrinių vėjo elektrinių galimas poveikis aplinkai</i> .....	37
6.	<i>AĮNS PERDAVIMO SISTEMOS MODELIS MATLAB/SIMULINK APLINKOJE</i> .....	38
6.1	<i>Tiriamos sistemos apibūdinimas</i> .....	38
6.2	<i>AĮNS-ĮŠK tiriamosios schemos komponentai</i> .....	38
6.3	<i>Sistemos parametrai</i> .....	40
6.4	<i>Aukštos įtampos nuolatinės srovės ĮŠK keitiklio valdikliai</i> .....	40
6.5	<i>Koordinačių sistemos transformacija</i> .....	41
6.6	<i>Dažnio nustatymo blokas</i> .....	42
6.7	<i>Aktyviosios/reaktyviosios galios ir įtampos valdiklis</i> .....	42
6.8	<i>Nuolatinės srovės ir įtampos valdiklis</i> .....	43
7.	<i>TYRIMO REZULTATAI</i> .....	44
	<i>IŠVADOS</i> .....	52
	<i>INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS</i> .....	53

## IVADAS

Šias laikais sparčiai augant energijos poreikiams, atsinaujinančios energetikos šaltiniai yra viena iš patikimų ir taupių alternatyvų, senamadiškam iškastiniui kurui. Tarp visų atsinaujinančių energijos šaltinių vėjo energetika yra viena iš geriausiai išvystytų sektorių technologijų. Prognozuojama, kad artimoje ateityje vėjo energetika persikels į jūras dėl išaugusių vėjo elektrinių dydžio, skleidžiamo trukšmo, poveikio kraštovaizdžiui. Tačiau šie sprendimai iškelia daugybę iššūkių susijusių su konstrukcija, instaliavimu ir žinoma elektros energijos perdavimu. Energijos perdavimas ypač reikalauja daug pastangų norint prijungti jūrinius vėjo elektrinių parkus per didelį nuotolį.

Vienas šios problemos sprendimo būdų yra aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos. Nuolatinės srovės perdavimo linijų atgimimas prasidėjo 1954 metais, kai ASEA pirmtakas dabartinės ABB įmonės sujungė Gotlando salą su žemynine Švedija panaudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo liniją (ang. - *HVDC -high-voltage direct-current*) [5].

Pagrindinės priežastys kodėl aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos per pastaruosius metus tapo patrauklia elektros energetikos plėtrai:

1. kintamos srovės perdavimo sistemos priartėjo prie savo galimybių limitu,
2. sparčiai augantis elektros energijos poreikis.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra sumodeliuoti ir ištirti įtampos šaltinio keitikliu (ang. *VSC -voltage source converter*) paremtos aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos funkcionavimą, kuri naudojama prijungiant jūrinį vėjo elektrinių parką prie pagrindinio elektros tinklo.

Darbo uždaviniai yra šie:

1. Suvokti įtampos šaltinio keitikliu paremtos sistemos koncepciją ir jos elementų funkcionavimą (teorinė dalis).
2. Sumodeliuoti aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemą panaudojant „*MATLAB/Simulink*“ programinius paketus.
3. Analizuoti ir plėtoti sistemos funkcionavimą esant skirtingoms sąlygoms (įvykus trifaziui trumpajam jungimui elektros tinklo pusėje ir jūrinių vėjo elektrinių parko tinkle.)

# 1. AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS TECHNOLOGIJOS

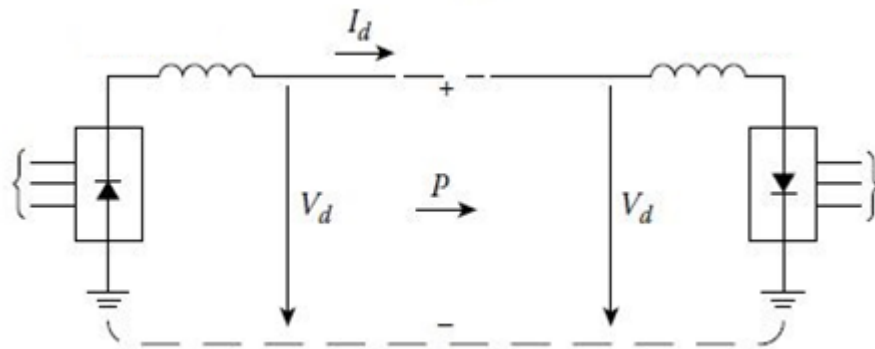
Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologijos elektros energetikos sistemose yra naudojamos ilgiau nei 50 metų [6].

Pagrindinės šios technologijos naudojimo sritys:

- nesinchroninių elektros energetikos tinklų jungtys (tarp sisteminės jungtys),
- elektros energijos perdavimas, kai energijos generavimas ir vartojimas yra nutolę dideliais atstumais,
- požeminės ir povandeninės kabelinės sistemos.

Šiuo metu didžioji dauguma egzistuojančių aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemų (toliau tekste naudojamas trumpinys - AĮNS) naudoja tiesiogiai linijos komutuojamą srovės šaltinio keitiklį (SŠK). Šiame keitiklyje naudojami pusiau valdomi tiristoriniai, jėgos elektronikos komutaciniai elementai. Tačiau pastaruosiu metu sparčiai vystoma įtampos šaltinio keitiklio (IŠK) technologija. IŠK keitikliuose naudojami greiti dvipoliai tranzistoriai su izoliuota užtūra (DTIU) bei impulso pločio moduliaciją (IPM) [3, 6].

## 1.1 Vienpolė energijos perdavimo sistema



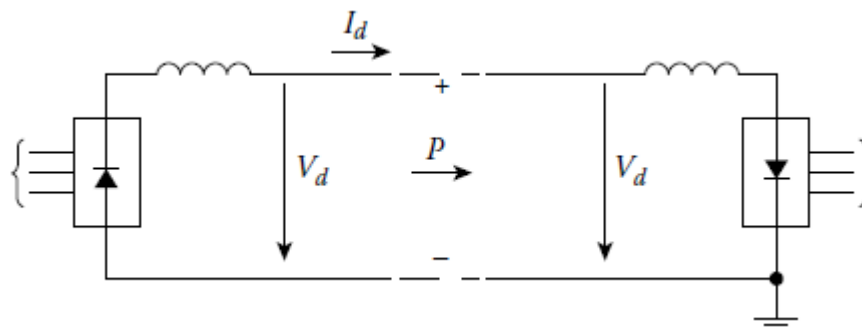
1.1 pav. Vienpolė perdavimo sistema su darbinio įžeminimo elektrodais [5].

Ši aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema, kurioje srovė teka vienu aukštos įtampos laidininku, vadinama vienpole (*ang. monopolar*) sistema. Šioje sistemoje darbinio įžeminimo elektrodai be apsauginės funkcijos atlieka ir darbinę funkciją, t.y. naudojami grįžtamajai srovei tekėti. Tokios aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos konfigūracija sukelia koroziją po žeme esantiems perdavimo kabeliams ir kitiems įrenginiams, t.y. kabelių izoliacijoms, įžeminimo elektrodas. Šis



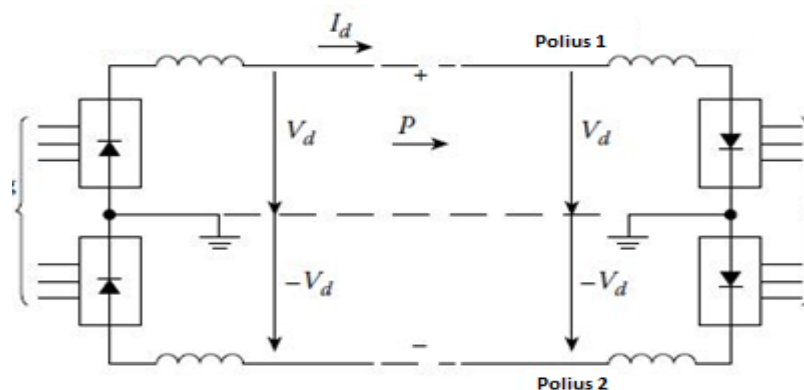
reiškinys atsiranda dėl elektrolizės reiškinio, kurį sukelia per įžeminimą grįžtanti srovė. Tokios sistemos dažniausiai naudojamos nedidelės galios jungtyse tai yra pagrinde povandeninės kabelinės linijos [9].

Darbinio įžemino elektrodams taikomi specifiniai reikalavimai todėl dažniausiai naudojama perdavimo sistema su įžemintais žemos įtampos laidininkais. Šios perdavimo sistemos konfigūracija pašalina anksčiau minėtą elektrolizės reiškinį. Tai dažniau naudojama energijos perdavimo sistema nei su darbinio įžeminimu [6, 9].



1.2 pav. Vienpolė sistema su grįžtamu įžemintu žemos įtampos laidininku [5].

## 1.2 Dvipolė energijos perdavimo sistema



1.3 pav. Dvipolė sistema [5].

Pastaruoju metu energijos perdavimui, dažnai naudojama dvipolė (ang. *bipolar*) aukštos įtampos nuolatinės srovės sistema. Tai sistema turinti du izoliuotus laidininkus. Vienas iš jų laikomas teigiamu poliumi, o kitas neigiamu. Kiekvienas iš polių gali būti naudojamas nepriklausomai, kai jų neutralė yra įžeminta. Šioje sistemoje įžeminimo funkcija yra apsauginė, tačiau galimi variantai, kai naudojami įžeminimo elektrodai ar įžeminti žemos įtampos laidininkai. Sugedus vienam iš polių, jis yra atjungiamas, o srovė grįžta žeme ar žemos įtampos laidininku, dėl to perduodama galia sumažėja per pusę. Šiuo atveju kiekvienoje pusėje yra naudojama po du keitiklius su įžemintu viduriniu tašku. Todėl perdavimo linijos įtampa žymima „±“ ženklu. Tai reiškia, kad pvz. vieno poliaus žemės atžvilgiu įtampa yra +150 kV, o kito -150 kV, o įtampa tarp polių yra 300 kV [6, 9].

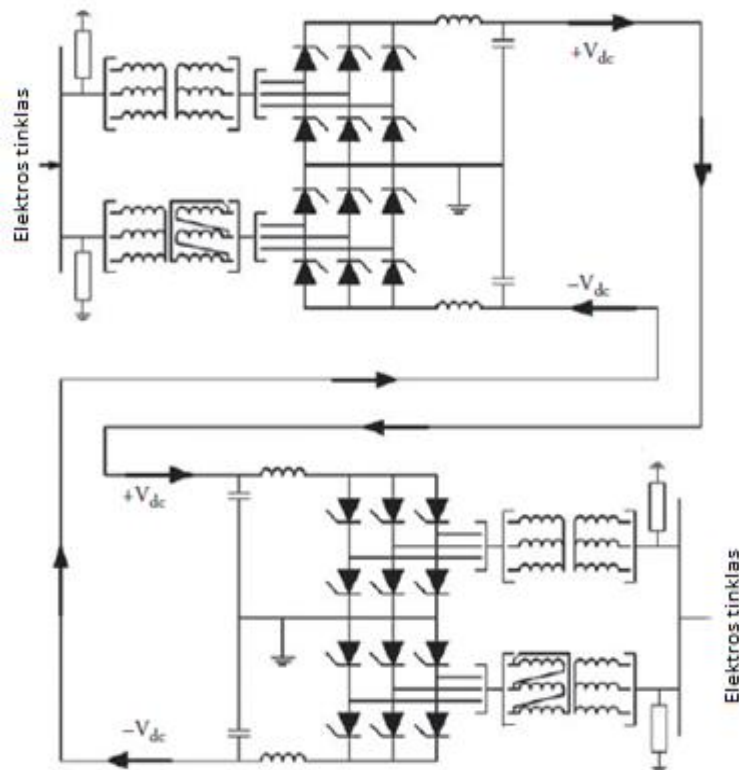
## 2. AĖNS PERDAVIMO SISTEMA SU LINIJOS KOMUTUOJAMU SROVĖS ŖALTINIO KEITIKLIU

Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema, kurioje naudojamas tiesiogiai linijos komutuojamas srovės keitiklis (ang. *Line-commutated converters*) taip pat dar žinomas kaip srovės šaltinio keitiklis (ang. *Current Source Converter*), šiuo metu plačiausiai naudojama technologija.

Pagrindiniai komponentai, kurie sudaro AĖNS-SŖK sistemą yra:

- nuolatinės srovės keitiklis (tiristorinių ventilių patalpos),
- kintamos srovės filtrai,
- keitiklių transformatoriai,
- išlyginimo reaktorius,
- reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiai (šuntavimo grupės);
- kitos pagalbinės ir techninio aptarnavimo patalpos [3].

AĖNS-SŖK sistemos schema pavaizduota paveikslėlyje pav. 3.1.



2.1 pav. Dažniausiai taikoma AĖNS-SŖK perdavimo sistema [5].

Aktyvioji ir reaktyvioji galia AĖNS-SŖK keitiklių pastotėje gali būti apskaičiuojama pagal šias

formules [6]:

$$P = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{ac} \cdot I_{dc} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{ac} \cdot I_{dc} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.2)$$

Kai nėra reaktyvios galios kompensavimo įrenginių, keitiklių pastotėse vartojama reaktyvioji galia sudaro 50 %-60 % nuo nominalios aktyviosios perduodamos galios.

## 2.1 Trumpojo jungimo galios koeficientas

AĮNS-SŠK perdavimo sistemos jungtis gali būti naudojama elektros tinkluose su aukštu trumpojo jungimo galios koeficientu (ang. *Short-Circuit Ratio*). Trumpojo jungimo galios koeficientas apskaičiuojamas vadovaujantis šiomis išraiškomis [6]:

$$SCR = \frac{\text{Tinklo trumpojo jungimo pilnutinė galia (MVA)}}{\text{NS keitiklio nominalioji galia (MW)}} \quad (2.3)$$

$$SC \text{ MVA} = \frac{U_{ac}^2}{Z_{th}} \quad (2.4)$$

Kai  $U_{ac}$  šynos įtampa esant nominaliai keitiklio galiai ir  $Z_{th}$  pilnutinė tinklo varža (*Thevenin* tinklo ekvivalentas). Šaltinyje [6] minimas efektyvus trumpojo jungimo galios koeficientas, kuris įvertina nuolatinės srovės intarpe esančius įrenginius, tai yra transformatorius, šuntinius kondensatorius, filtrus ir t.t..

Taigi efektyvus trumpojo jungimo koeficientas apskaičiuojamas naudojant tokią išraišką:

$$SCR = \frac{\text{Tinklo trumpojo jungimo pilnutinė galia (MVA)} - \text{Reaktyviosios galios kompensavimas}}{\text{NS keitiklio nominalioji galia (MW)}} \quad (2.5)$$

Trumpojo jungimo galios koeficiento klasifikavimas:

- Aukštas, kai " $SCR \geq 5$  ir  $ESCR \geq 4.5$ ".
- Vidutinis, kai " $3 < SCR < 5$  ir  $3 < ESCR < 5$ ".
- Žemas, kai " $SCR \leq 3$  ir  $ESCR \leq 2.5$ ".
- Labai žemas, kai " $SCR \leq 2$  ir  $ESCR \leq 1.5$ ".

Tiesiogiai linijos komutuojamam keitikliui reikalingas stiprus sinchroninės įtampos šaltinis. Norint, kad AĮNS – SŠK sistema veiktų sėkmingai, trumpojo jungimo galios koeficientas turi būti bent  $SCR = 3$  arba didesnis [3]. Priešingu atveju, esant žemam ir labai žemam trumpojo jungimo galios koeficientui, sukeliama tam tikri trikdžiai sistemoje, kai nuolatinės srovės intarpas yra prijungtas prie silpno elektros tinklo. Tai yra:

- dinaminis viršįtampius situacijose, kai nutrūksta galios perdavimas nuolatinės srovės sistemoje;
- įtampos nestabilumą ypač iverterio pusėje;
- harmonikų rezonansus;
- įtampos mirgėjimą [3].

Todėl nuolatinės srovės intarpo prijungimas tampa sudėtingas ir reikalauja papildomos įrangos.

## 2.2 Reaktyviosios galios kompensavimas

Reaktyviosios galios kompensavimas yra ypač svarbus. Jei artimai nėra jokio elektros energijos generavimo šaltinio, kuris galėtų kompensuoti reaktyviają galią, tuomet reikalingi papildomi įrenginiai. Todėl turi būti naudojami reaktyviosios galios kompensatoriai tokie kaip: šuntiniai kondensatoriai, statiniai reaktyviosios galios kompensatoriai (ang. *SVC*) ar statiniai sinchroniniai generatoriai (ang. *STATCOM*) [6].

## 2.3 Linijos komutuojamo srovės šaltinio keitiklis

Plačiai naudojamas trijų fazių, dvipusis (dviejų pusperiodžių) diodų tiltelis arba šešių impulsų tiltelis paprastai dar žinomas kaip Greco (Gretz) tiltelis. Šis kintamosios/nuolatinės srovės keitiklis veikia taip pat kaip ir tiristorinis keitiklis, kai ventilio valdymo kampas  $\alpha = 0$  [11, 15].

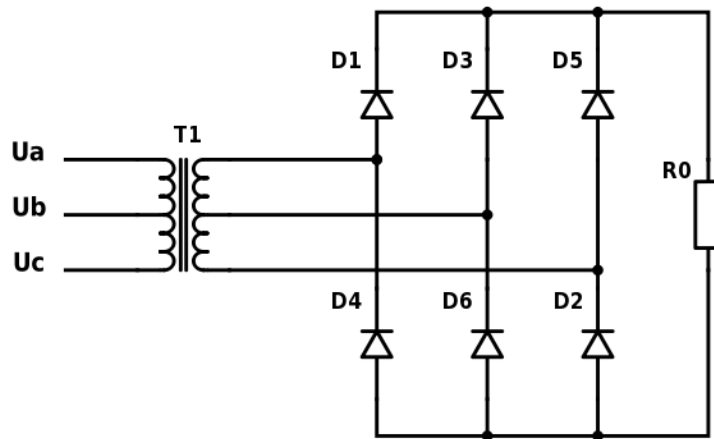
Kai lygintuvo fazinės įėjimo įtampos yra sinusinės jos aprašomos šiomis lygtimis (2.6, 2.7, 2.8):

$$U_a = U \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

$$U_b = U \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.7)$$

$$U_c = U \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.8)$$

Kai,  $U$ -įtampos amplitudė,  $\omega$ -kampinis dažnis.



2.2 pav. Trifazio dvipusio diodų tiltelio schema (Greatz tiltelis).

Tuomet dvipusio diodų tiltelio momentinė vidutinė išlyginta įtampos vertė apskaičiuojama pagal formules (2.9, 2.10) [15]:

$$u_0(t) = \sqrt{6} U_{in} \sin(\omega t), \quad \text{kai } \frac{n\pi}{3} < \omega t < \frac{(n+1)\pi}{3} \quad (2.9)$$

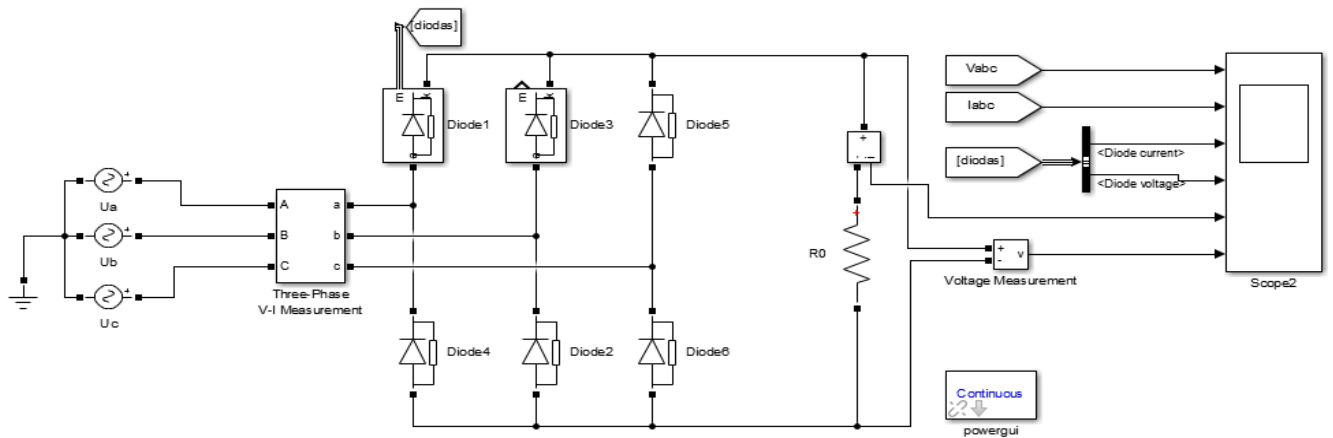
$$U_0 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{in} = 2,34 \cdot U_{in} \quad (2.10)$$

Kai,  $U_{in}$ -efektinė įtampa ir  $n - 1, 2, 3$ .

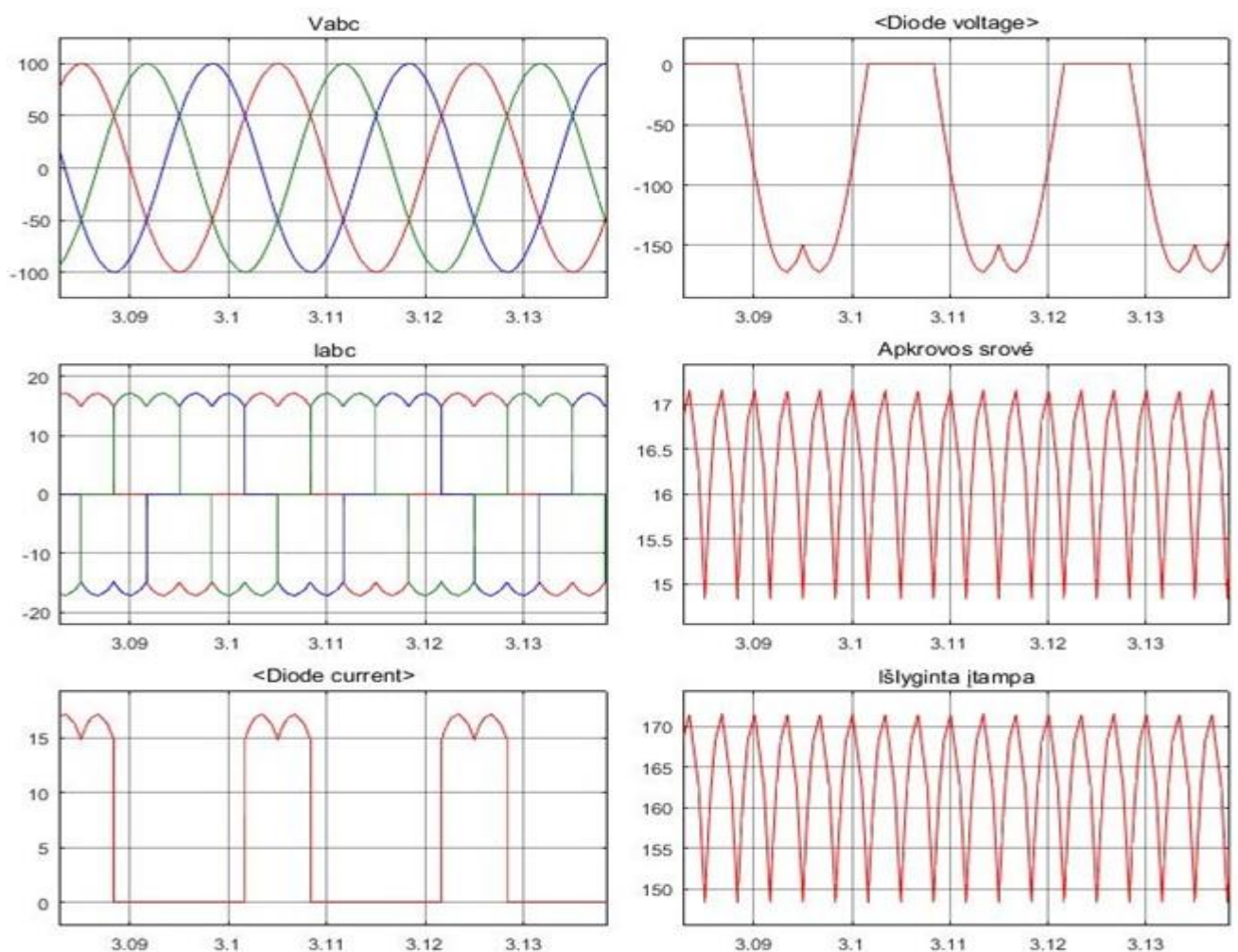
Srovė apkrovoje  $R_0$  apskaičiuojama pagal šias formules (2.11, 2.12):

$$i_0(t) = \frac{\sqrt{6} U_{in}}{R_0} \sin(\omega t), \quad \text{kai } \frac{n\pi}{3} < \omega t < \frac{(n+1)\pi}{3} \quad (2.11)$$

$$I_0 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{U_{in}}{R_0} = 2,34 \cdot \frac{U_{in}}{R_0} \quad (2.12)$$



2.3 pav. Diodų tiltelio modelis *MATLAB/Simulink* aplinkoje.



2.4 pav. Trifazio dvipusio diodų tiltelio charakteristikos.

Pusiau valdomo lygintuvo išjungimo momentas sutampa su natūraliuoju nevaldomo lygintuvo išjungimo momentu. Pusiau valdomo ventilio (šiuo atveju tiristoriaus) įjungimo momento skirtumas su nevaldomo ventilio natūraliuoju įjungimo momentu vadinamas valdymo kampu  $\alpha$  [15].

## 2.4 Ventiliai

AĮNS-SŠK sistemoje naudojami tiristoriai [6]:

- jungia kintamosios ir nuolatinės srovės elektros grandines;
- praleidžia aukštas sroves (daugiau kaip 5 kA);
- atlaiko aukštas įtampas (iki 8.5 kv);
- keičiant tiristorių valdymo kampą, valdoma nuolatinės srovės įtampa.

Kadangi nuolatinės srovės linijos įtampa yra aukštesnė nei maksimali vieno tiristoriaus blokavimo įtampa, todėl tiristoriai jungiami nuosekliai norint padidinti jų maksimalią įtampą. Panašumai susiję ir su tiristoriaus maksimalia srove, todėl keli tiristoriai gali būti sujungiami lygiagrečiai, tačiau dažniausiai tai nėra būtina. Paprastai tiristoriai yra sujungti į modulius, kurie yra sujungti į grupes, toks jungimo būdas leidžia supaprastinti jų priežiūrą [6].

## 2.5 Keitiklio transformatoriai

Transformatoriai ne visados yra būtini (tuo atveju, kai keitiklio ir elektros tinklo įtampos lygiai sutampa) AĮNS-SŠK sistemoje, tačiau praktikoje jie visados yra naudojami dėl šių priežasčių:

- tiekti reikalingo dydžio įtampą į keitiklių pastotę,
- slopina harmonikas (ypač 5 ir 7-ąją),
- mažina trumpojo jungimo sroves [3].

Priklausomai nuo poreikių skirtingi transformatoriai ir keitikliai gali būti naudojami norint pasiekti techniškai ir ekonomiškai optimalius sprendimus. Nuo transformatoriaus dydžio priklauso jo transportavimo išlaidos ir reikalinga erdvė keitiklio pastotėje [6].

## 2.6 Kiti reikalingi sistemos komponentai

- Įžeminimo elektrodai.
- Apsaugos įrenginiai.
- Viršįtampių ribotuvai.
- Kintamos ir nuolatinės srovės skirstyklos.
- Pagalbiniai įtaisai.
- Vėdinimo sistema.
- Valdymo sistema [6].

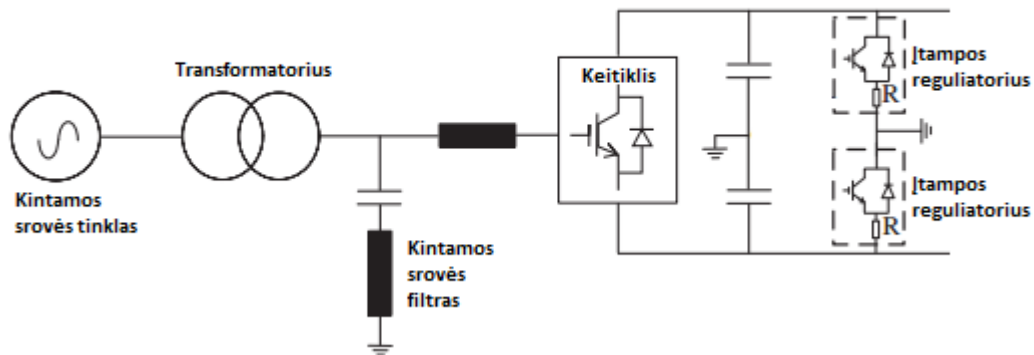
### 3. AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS PERDAVIMO SISTEMA SU ĮTAMPOS KEITIKLIU

Pastaruoju metu sparčiai plėtojantis galios elektronikos įrenginiams, o pagrinde, tai naujiems dvipoliams tranzistoriams su izoliuota užtūra (DTIU), atsiranda galimybė naujų technologijų kūrimui. Viena iš jų yra įtampos šaltinio keitiklis, skirtas aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo linijoms.

Šie ĮŠK keitikliai yra kompaktiškesni lyginant su tiesiogiai linijos komutuojamais keitikliais todėl juos įmanoma naudoti vietose, kur erdvė yra ribota (pvz. jūrinės platformos).

Dažniausiai sutinkama ĮŠK-AĮNS perdavimo sistema pavaizduota paveikslėlyje pav.3.1. ĮŠK-AĮNS sistemą sudaro šie pagrindiniai elementai:

- ĮŠK keitiklis,
- transformatoriai,
- kintamos srovės filtrai,
- keitiklių reaktoriai,
- nuolatinės srovės filtrai (filtruojantys kondensatoriai),
- nuolatinės srovės įtampos reguliatorius.



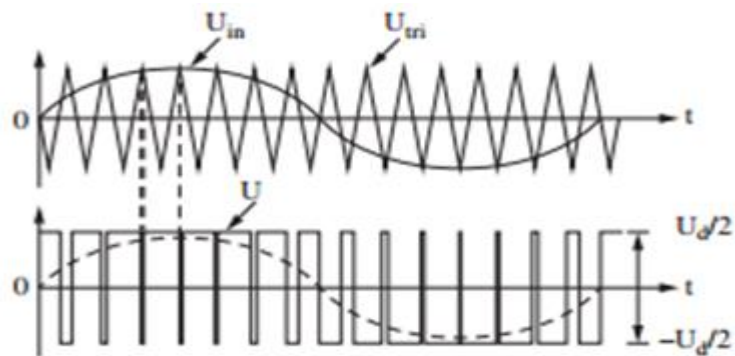
3.1 pav. Tipinė AĮNS – ĮŠK perdavimo sistema [6].

#### 3.1 Impulso pločio moduliacija

Pagrindinis įtampos šaltinio inverterio tikslas yra keisti nuolatinę įtampą į norimo dažnio ir amplitudės kintamąją įtampą. Tranzistoriai dirbdami raktų režimu sukuria impulsinę išėjimo įtampą tai reiškia, kad įtampa nėra sinusoidės formos. Todėl norint ją formuoti reikalinga impulso pločio moduliacija (IMP). Jeigu moduliacijos metu valdantys impulsų pločiai yra keičiami sinuso dėsnio tai ši moduliacija yra vadinama sinusoidine impulso pločio moduliacija (ang. *Sinusoidal Pulse Width*



*Modulation*) [13]. Paveiksle pav. 3.2 pavaizduota moduluojamas signalas ( $U_{in}$ ), kuris kinta sinuso dėsnio, nešlio signalas ( $U_{tri}$ ) (ang. carrier) t.y. trikampio formos banga, momentinė išėjimo įtampa  $U$  ir fundamentali sinuso dėsnio kintanti išėjimo įtampa.



3.2 pav. Impulso pločio moduliacija [7].

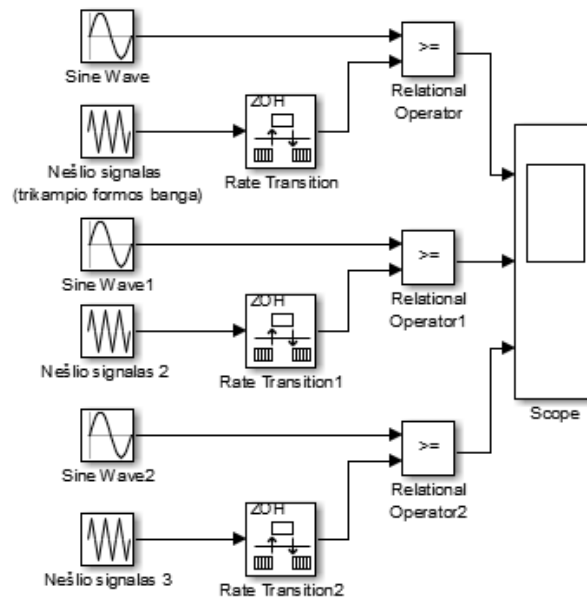
Amplitudės moduliacijos indeksas apskaičiuojamas:

$$m_a = \frac{U_{in}}{U_{tri}} \quad (3.1)$$

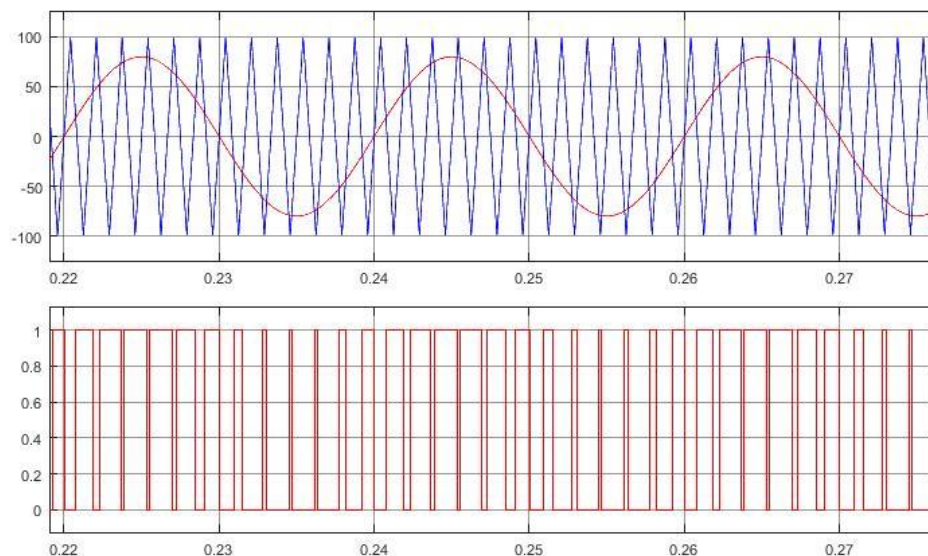
Dažnio moduliacijos indeksas apskaičiuojamas:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{in}} \quad (3.2)$$

Nešlio signalo dažnis  $f_{tri}$  turi būti didesnis už tiekiamo signalo dažnį  $f_{in}$ . Tačiau didinant dažnį didėja energijos nuostoliai.



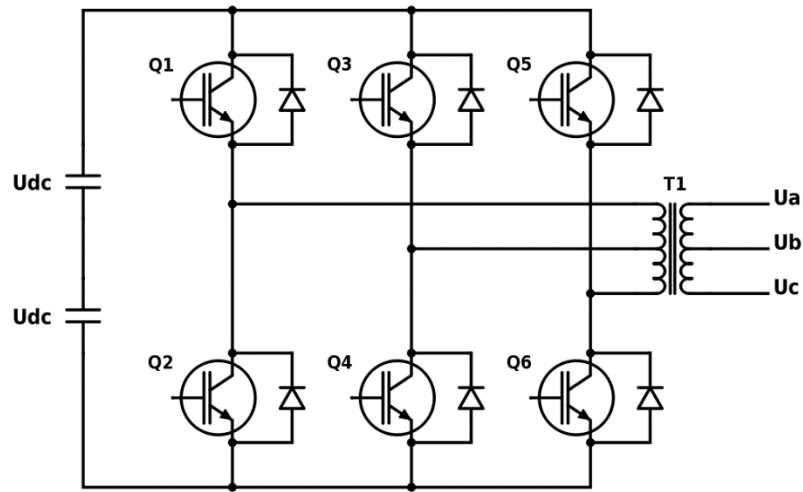
3.3 pav. Impulso pločio moduliacijos modelio struktūrinė schema, *MATLAB/Simulink* aplinkoje.



3.4 pav. Impulsų pločio moduliacijos signalų charakteristikos.

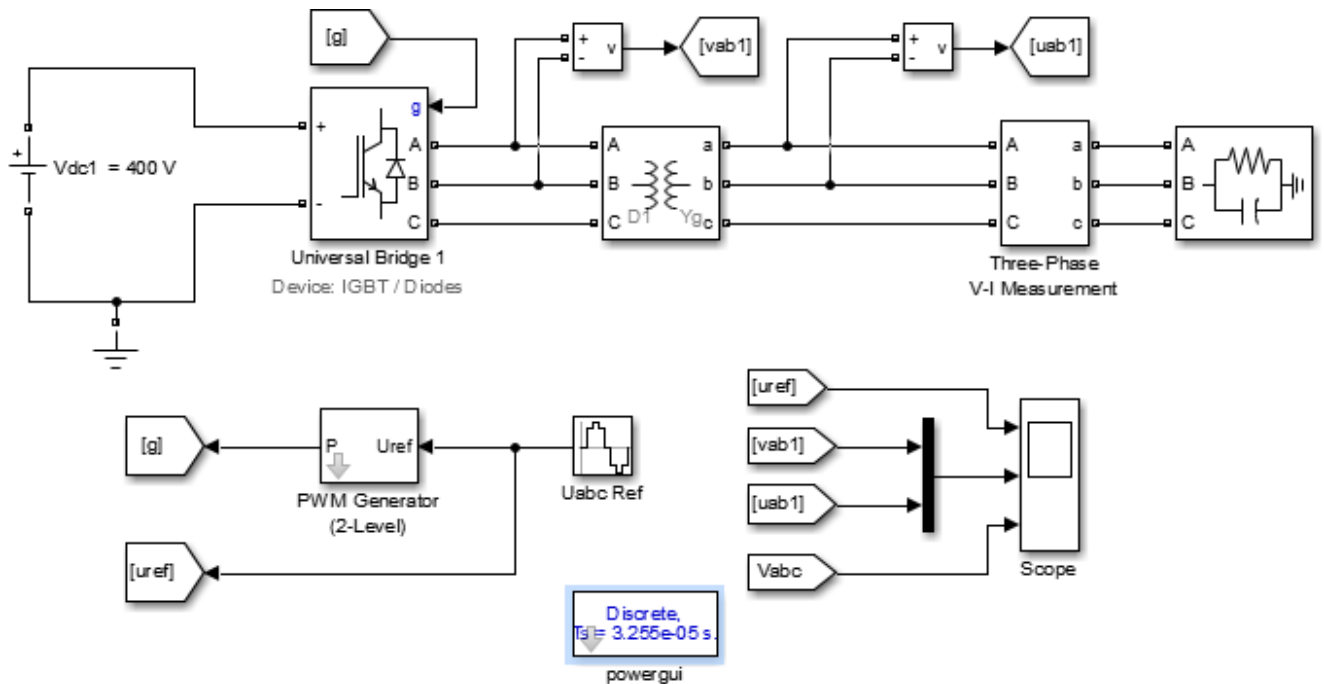
### 3.2 Dviejų lygių įtampos šaltinio inverteris su impulso pločio moduliacija

Nuo pačios pirmosios AĮNS-ĮŠK sistemos, kuri buvo instaliuota Švedijoje 1997 m. iki 2012 m., didžioji dauguma aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos yra paremtos dviejų lygių keitiklio technologija [6]. Dviejų lygių keitiklis yra pačio paprasčiausio tipo trifazis įtampos šaltinio keitiklis. Šį keitiklį galima palyginti su 6 – impulsų tiltelinio keitikliu, skirtumas tik tas, kad vietoje esančių tiristorių jie pakeičiami į DTIU tipo tranzistorius [7].

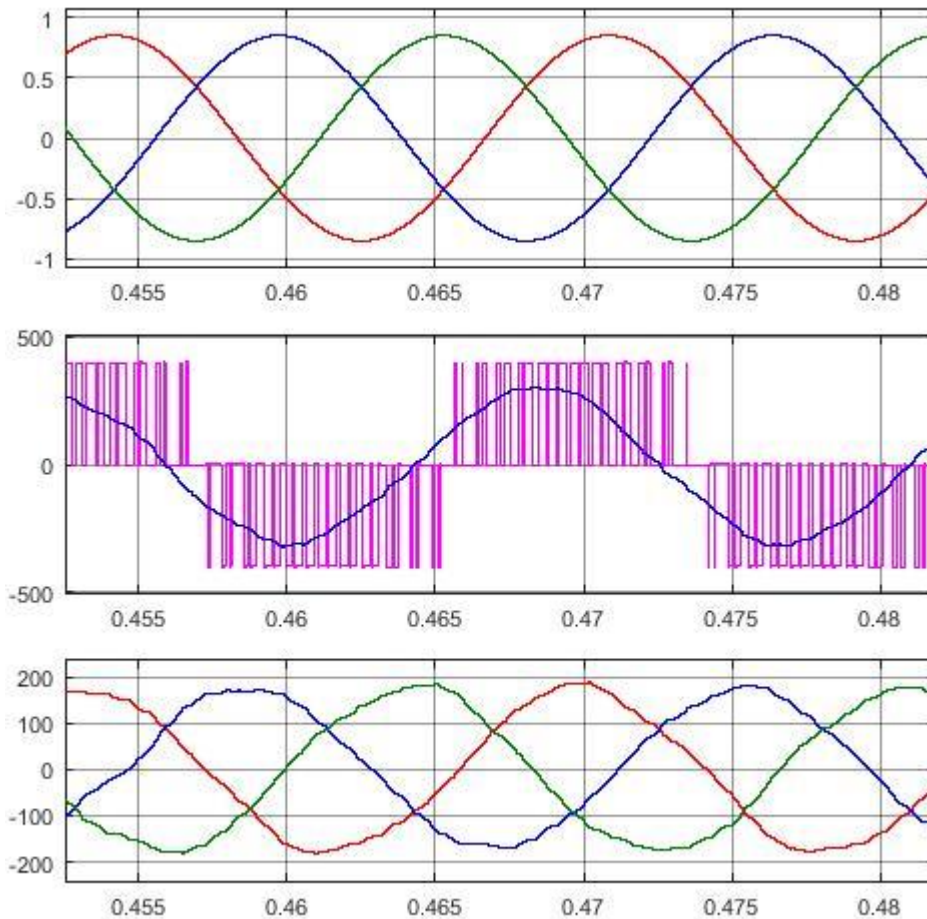


3.5 pav. Dviejų lygių įtampos šaltinio inverteris.

Dviejų lygių keitikliuose naudojamas daugialygis perjungimas, tai reiškia, kad nuolatinės srovės įtampa nėra perjungama didelėmis pakopomis. Vietoje to keitiklio grandinėje esantys kondensatoriai sukuria mažesnes įtampos pakopas, kurios yra valdomos impulsų pločio moduliacijos (IMP) nepriklausomai vieną nuo kitos. Toks keitiklio valdymas sukuria sinusoidės formos išėjimo įtampa su nedideliu harmonikų išskrypimu [3].



3.6 pav. Dviejų lygių IŠK modelis, *MATLAB/Simulink* programinio paketo aplinkoje.



3.7 pav. Trifazio dviejų lygių ĮŠK inverterio charakteristikos.

### 3.3 Kintamos srovės filtrai ir keitiklio reaktoriai

AĮNS-ĮŠK sistema priešingai nei tiesiogiai linijos komutuojamo keitiklio sistema, negeneruoja žemesnių dažnių harmonikų (ang. *lower order harmonics*). Taigi sistemose, kurių keitikliuose naudojamas impulso pločio moduliacija reikalinga filtruoti tik aukšto dažnio harmonikas.

Keitiklio lygintuvo generuojamos aukštesniosios srovės harmonikos, kurių spektras gali siekti iki 3 kHz patekdamos į elektros tinklą sukelia šiuos neigiamus padarinius:

- papildomus aktyviosios galios nuostolius elektros tinklo elementuose;
- papildomus nuostolius transformatoriuose ir jų šilimą,
- įtampos ir srovės sinusoidės formos iškraipymus,
- galios faktoriaus sumažėjimą.

Todėl norint sumažinti aukštesniųjų harmonikų patekimą į elektros tinklą yra naudojami keitiklių reaktoriai. Taip pat linijoje naudojamas reaktorius sumažina srovės pulsacijas ir netiesinius srovės iškraipymus.

Keitiklio reaktoriaus pagrindinės funkcijos:

- valdyti aktyviąją ir reaktyviąją galią;
- sumažina aukštesniosios srovės harmonikų komponentes kintamos srovės tinkle;
- sumažina trumpojo jungimo srovės atskiriant kintamos srovės tinklą nuo keitiklio prie, kurio yra prijungtas [10].

### **3.4 Nuolatinės srovės kondensatoriai**

Kondensatoriai nuolatinės srovės sistemoje naudojami norint stabilizuoti įtampą. Dėl impulsų pločio moduliacijos keitiklis generuoja srovės harmonikas, kurios sukelia nuolatinės srovės įtampos pulsacijas. Pulsacijos amplitudė priklauso nuo kondensatoriaus talpumo ir tranzistorių perjungimo dažnio. Įtampos stabilizavimas yra būtinas, kadangi įtampos pulsacijos gali persiduoti į kitus sistemos elementus.

Kondensatoriaus parinkimas priklauso nuo tranzistorių perjungimo dažnio, kuo dažnis yra didesnis tuo mažesnės talpos naudojamas kondensatorius. Parenkant taip pat svarbu įvertinti, galimus sistemos galios svyravimus, kurie gali sukelti viršįtampius keitiklio ventiliuose [6].

## 4. NUOLATINĖS IR KINTAMOSIOS SROVĖS PERDAVIMO SISTEMŲ PALYGINIMAS

### 4.1 Kintamosios srovės perdavimo sistemos trūkumai

Aukštos įtampos kintamosios srovės perdavimo sistemos trūkumai.

- Esant tam tikram linijos ilgiui, galios nuostoliai patiriami ne tik dėl aktyvinės varžos bet ir dėl linijos reaktyvumo.
- Linijos stabilumo problemos susijusios su parazitinių virpesių atsiradimu, kurie gali sukelti viršįtampius.
- Sukeliamos didelės talpuminės srovės dėl linijos išilginio talpumo. Kabelį galima sumodeliuoti kaip ilga cilindrinį kondensatorių, kurio talpumas  $C$  (apie 160-600 nF/km) [9] priklauso nuo dielektriko, laidininko skerspjūvio ploto ir izoliatoriaus storio. Tuomet talpuminė srovė apskaičiuojama:  $I_C = U_0 \cdot \omega \cdot C \cdot l$ , kai  $U_0$  - fazinė įtampa,  $\omega$  - kampinis dažnis.
- Laidininko paviršinis efektas (srovė laidininko išorėje yra didesnė nei jo viduje).
- Laidininko ekrane ir šarve indukuojamos sukūrinės srovės.
- Didinant perdavimo įtampą kintamosios srovės linijoje, vainikinio išlydžio nuostoliai didesni, už nuolatinės srovės perdavimo linijos [9].

### 4.2 Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos pranašumai

- Galimas sistemos atsistatymas po visuotinės elektros energetikos sistemos avarijos.
- Aktyviosios ir reaktyviosios galios srautų valdymas.
- ĮŠK – AĮNS sistemos atveju, nereikalingas reaktyviosios galios kompensavimas.
- Galimybė sujungti asinchronines elektros energetikos sistemas.
- Elektros energijos srautų valdymas.
- Galimybė perduoti didelius energijos kiekius [3].

### 4.3 Perdavimo sistemų technologinis limitas

4.1 *Lentelė.* Šiuo metu sausumoje naudojamų elektros energijos perdavimo technologijų limitas [6].

Kintamos srovės perdavimo sistema		
Požeminė kabelių perdavimo sistema	Iki 500 kV	Iki 1600 MVA
Orinės perdavimo linijos	Iki 765 kV (1200 kV eksperimentinis)	Iki 3550 MVA (keturi laidininkai kiekvienai fazei)
Nuolatinės srovės perdavimo sistema		
Požeminė kabelių perdavimo sistema	Iki +-500 kV	Iki 2500 MW
Orinės perdavimo linijos	Iki +-800 kV	Iki 7200 MW

4.2 *Lentelė.* Jūroje naudojamų elektros energijos perdavimo technologijų limitas [6].

Nuolatinės srovės povandeninis kabelis	Iki +-500 kV	Iki 2500 MW
Kintamos srovės povandeninis kabelis	Iki 275 kV	Iki 400 MW
Keitiklių pastotės (IŠK)	Iki +-320 kV	Iki 1200 MW

## 5. JŪRINIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ PARKAI

Vėjo elektrinių statyba jūroje tampa vis aktualesne ir labiau dominančia tema pastaraisiais metais visoje Europoje. Viena iš pagrindinių priežasčių kodėl taip yra, tai yra potencialiai didesnis ir pastovesnis vėjo greitis jūroje lyginant su žemyne esančiais vėjais. Taigi esant 10 % didesniai vėjo greičiui teoriškai pagaminama 30 % daugiau elektros energijos. Taip pat dėl mažesnių statybos ir aplinkosaugos apribojimų, jūroje galima statyti didesnes vėjo elektrines [1].

Šiuo metu didžioji dalis esančių jūrinių vėjo elektrinių parkų yra sąlyginai maži ir gana arti pakrantės. Dėl to pagamintą energiją galima perduoti per kintamos srovės elektros tinklus be jokių kliūčių. Taigi, artimoje ateityje jūros vėjo elektrinių parkai bus statomi labiau nutolę nuo pakrantės dėl tam tikrų priežasčių (aplinkosaugos reikalavimų, socialinių faktorių). Todėl dėl šių priežasčių vėjo elektrinių parko prijungimas prie el. tinklo naudojantis aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologija tampa vis labiau patrauklesnis.

5.1 *Lentelė.* Šiuo metu statomi vėjo elektrinių parkai.

VE parko pavadinimas	Galia (MW)	Šalis	VE modelis	Planuojama užbaigimo data
Gemini	600	Nyderlandai	150 x Siemens SWT- 4.0-130	2017
Gode Wind	582	Vokietija	97 x Siemens SWT-6.0-154	2016
Race Bank	580	Didžioji Britanija	91 x Siemens SWT-6.0-154	2018
Horns Rev 3	406,7	Danija	49 x MHI Vestas V164-8.3 MW	2019
Dudgeon	402	Didžioji Britanija	67 x Siemens SWT-6.0-154	2017
Veja Mate	402	Vokietija	67 x Siemens SWT-6.0-154	2017
Rampion	400	Didžioji Britanija	116 x MHI Vestas V112-3.45 MW	2018
Wikinger	350	Vokietija	70 x Adwen AD 5-135	2017
Nordsee One	332	Vokietija	54 x Senvion 6.2M126	2017
Sandbank	288	Vokietija	72 x Siemens SWT-4.0-130	2017



5.2 Lentelė. Jūrinių vėjo elektrinių parkai su aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologija.

Vėjo elektrinių parkai	Keitiklių pastotė	Bentroji instaluota galia (MW)	Šalis	Nuolatinės srovės perdavimo sistema	Metai
BorWin1	BorWin1	400	Vokietija	+150Kv, 125 km jūrinis kabelis ir 75 km požeminis kabelis	2015
Global Tech I, Deutsche Bucht, Veja Mate, Hohe See Extension	BorWin2	800	Vokietija	+300Kv, 125 km jūrinis kabelis ir 75 km požeminis kabelis	2015
Hohe See (497 MW) ...?	BorWin3	900	Vokietija	+320Kv, 130 km jūrinis kabelis ir 30 km požeminis kabelis	2019
Borkum Riffgrund I, Trianel Windpark Borkum II, Trianel Windpark	DolWin1	800	Vokietija	+320Kv, 75 km jūrinis kabelis ir 90 km požeminis kabelis	2015
Gode Wind 1 ir 2, Nordsee One	DolWin2	916	Vokietija	+320Kv, 45km jūrinis kabelis ir 90 km požeminis kabelis	2017
Merkur, Borkum Riffgrund 2	DolWin3	900	Vokietija	+320Kv, 80km jūrinis kabelis ir 45 km požeminis kabelis	2018
Nordsee Ost, Meerwind Süd-Ost	HelWin1	576	Vokietija	+250Kv, 85km jūrinis kabelis ir 80 km požeminis kabelis	2015
Amrumbank West	HelWin2	690	Vokietija	+320Kv, 85km jūrinis kabelis ir 45 km požeminis kabelis	2015
DanTysk, Butendiek, Sandbank	SylWin1	864	Vokietija	+320Kv, 160 km jūrinis kabelis ir 45 km požeminis kabelis	2015

## 5.1 Jūrinių vėjo elektrinių parko struktūra

Jūrinių vėjo elektrinių parką sudaro šie pagrindiniai elementai:

- vėjo elektrinės,
- vėjo elektrinių tvirtinimo konstrukcijos ir pamatai,
- jūrinė pastotė,
- vėjo elektrinių parko elektros tinklai.

## 5.2 Vėjo elektrinių tipai

Vėjo elektrines galima suskirstyti į šias grupes [12].

1) Pastovaus greičio vėjo elektrinės:

- vėjo elektrinė su narveliniu asinchroniniu generatoriumi,
- vėjo elektrinė su fazinio rotorius asinchroniniu generatoriumi.

2) Kintamo greičio vėjo elektrinės:

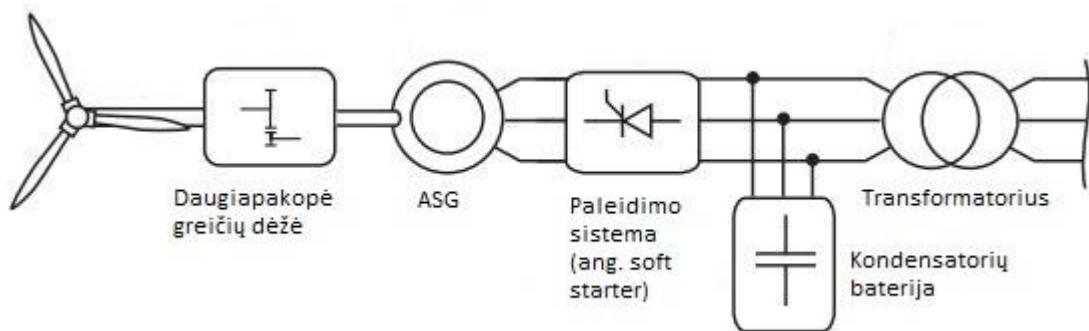
- vėjo elektrinė su dvigubo maitinimo indukcinium generatoriumi (ang. *DFIG*),
- vėjo elektrinė prijungta prie tinklo per nuolatinės srovės intarpą.

### 5.2.1 Vėjo elektrinė su narveliniu asinchroniniu generatoriumi

Ši vėjo elektrinė dar yra žinoma kaip „Daniškoji“ vėjo elektrinė. Tai pati paprasčiausia tiesiogiai prie elektros tinklo jungiama VE. Pagrindiniai vėjo elektrinės elementai:

- vėjaratis,
- daugiapakopė pavarų dėžė,
- narvelinis asinchroninis generatorius,
- kondensatorių baterija.

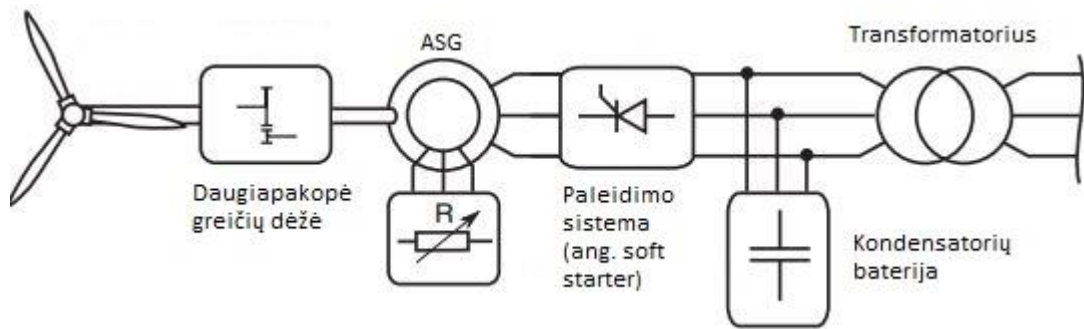
Norint, kad šios vėjo elektrinės indukcinis variklis dirbtų generatoriaus režimu, rotorius turi sukis didesniu greičiu už sinchroninį sukimosi greitį. T.y, rotoriaus sukimosi greitis turi būti didesnis nei statoriaus magnetinio lauko sukimosi greitis. Vėjo elektrinės paleidimui reikalinga įmagnetinančioji srovė, kuri gaunama iš elektros tinklo. Dėl šios priežasties VE reikalinga reaktyvioji galia, todėl yra naudojama kondensatorių baterija [6, 12].



5.1 pav. Vėjo elektrinė su narveliniu asinchroniniu generatoriumi [6].

### 5.2.2 Vėjo elektrinė su fazinio rotoriaus asinchroniniu generatoriumi

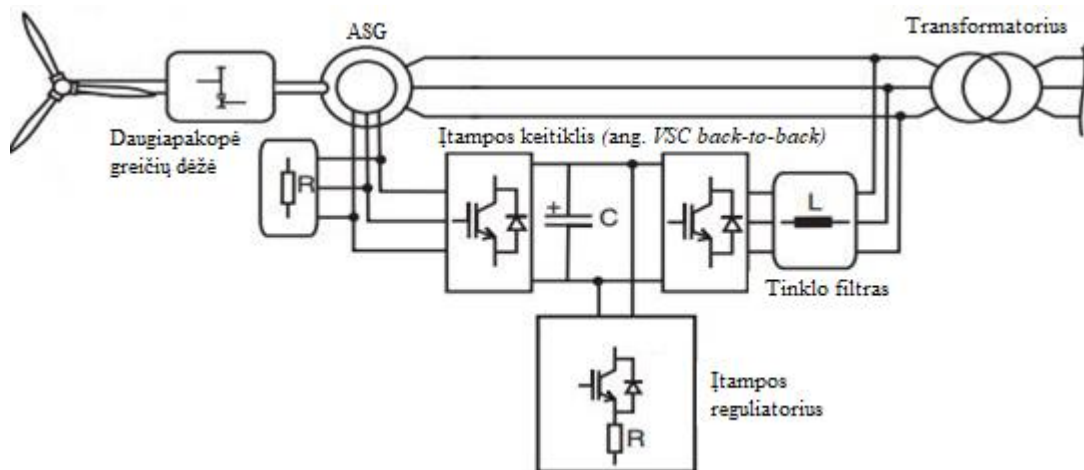
Vienas iš būdų valdyti generatoriaus apkrovą pagal vėjo greitį yra didinti generatoriaus slydimą. Slydimo valdymas atliekamas panaudojant asinchroninį generatorių su faziniu rotoriumi. Tai toks rotorius, prie kurio yra prijungti papildomi rezistoriai. Paprastai, tai sudaro du rezistoriai, kai vienas iš jų yra valdomas tiristorinių elementų. Generatoriaus slydimo ribos yra padidinamos keičiant tiristorių valdymo kampą. Tačiau toks generatoriaus slydimo valdymas yra nuostolingas, nes slydimo energija nėra atiduodama į tinklą. Dėl šios priežasties buvo pradėti pirmieji žingsniai kuriant vėjo elektrines su dvigubo maitinimo indukciniais generatoriais [12].



5.2 pav. VE su asinchroniniu generatoriumi ir faziniu rotoriumi [6].

### 5.2.3 Vėjo elektrinė su dvigubo maitinimo indukciniu generatoriumi

Šioje vėjo elektrinėje naudojant nuolatinės srovės intarpą galima sumažinti generatoriaus energijos nuostolius, kadangi slydimo energija yra atiduodama į elektros tinklą. Slydimo energija yra reguliuojama naudojant įtampos keitiklį (ang. *VSC back-to-back converter*), kurį sudaro KS/NS lygintuvas ir NS/KS inverteris su nuolatinės srovės filtrais. Taip pat nestandartinių parametrų generuojama elektros energija, keitiklio yra pakeičiama į elektros energiją, tinkamai tiekti į pagrindinį el. tinklą [12].

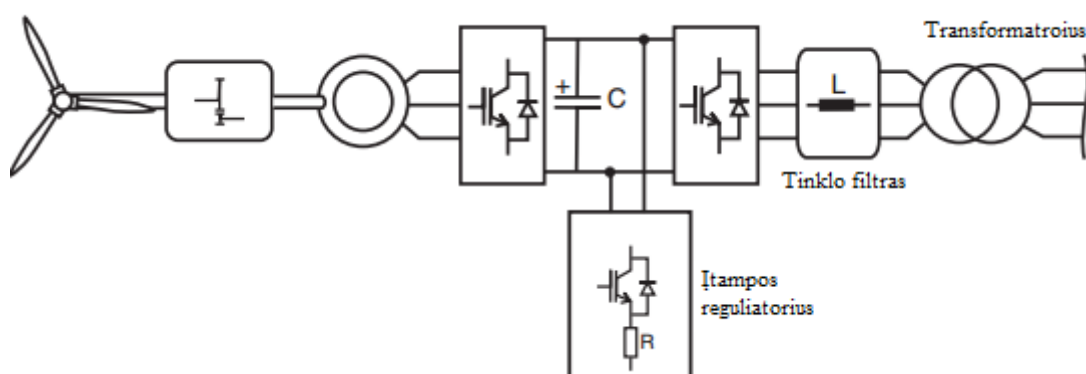


5.3 pav. Vėjo elektrinė su dvigubo maitinimo indukciniu generatoriumi [6].

Nuolatinės srovės ir įtampos reguliatoriai (ang. *DC chopper*) periodiškai prijungdami arba atjungdami apkrovą keičia iš lygintuvo tekančią vidutinę nuolatinę srovę ir įtampą apkrovoje. Tokiuose keitikliuose dėl nuolatos tiesiogiai veikiamos įtampos naudojami valdomieji elektroniniai jungikliai (tranzistoriai) [14].

## 5.2.4 Vėjo elektrinė prijungta prie tinklo per nuolatinės srovės intarpą

Vėjo elektrinė su nuolatinės srovės intarpu, prie elektros tinklo jungiama per tarpinę grandį, sudarytą iš lygintuvo ir inverterio.[12] Vėjo elektrinės generuojama, nestandartinių parametru elektros energija lygintuvo verčiama į NS galią ir tuomet inverteryje išlyginta srovė keičiama į standartinių parametru energiją tinkamą tiekti į elektros tinklą. Taigi šios vėjo elektrinės atiduodamos energijos parametrai nepriklauso nuo vėjaračio sukimosi greičio todėl generatoriaus apkrovą galima reguliuoti maksimalios galios režimu pagal momentinį vėjo greitį.



5.4 pav. Vėjo elektrinė su nuolatinės srovės intarpu (ang. *VSC back-to-back*) [6].

Vėjo elektrinės keitiklio funkcijos:

- nuolatinę srovę keisti į tinklo dažnio kintamąją srovę,
- suderinti išeinančios įtampos amplitudę su elektros tinklo įtampos amplitude,
- išeinančios ir tinklo įtampos fazių suderinimas,
- vėjo elektrinės galios maksimizavimas esant momentiniui vėjo greičiui (reguliuojama inverterio srovė) [12].

## 5.3 Jūrinių vėjo elektrinių tvirtinimo konstrukcijos ir pamatai

Jūrinių vėjo elektrinių tvirtinimo prie jūros dugno galimi sprendimai [4]:

1. Vėjo elektrinės tvirtinamos tiesiogiai prie jūros dugno. Paprastai tai daroma esant sekliai jūrai, tai yra kai gylis siekia iki 50 metrų.
2. Plūduriuojančios konstrukcijos tipas taikomas, kai vėjo elektrinės statomos gilesnėse jūrose. Šias tvirtinimo detales galima taikyti bet kurioje jūros vietoje. Taigi, VE parkai gali būti statomi jūroje, kurios gylis didesnis nei 50 metrų.

Pagrindiniai pamatų tvirtinimo prie jūros dugno konstrukciniai tipai [4]:

- masyvus gelžbetoninis pamatas;
- trikojis;
- vienpolis pamatas;
- karkasinis
- kombinuotas karkasinis;
- plūdrus.

#### 5.4 Perdavimo tinklai naudojami prijungiant VE prie pagrindinio elektros tinklo

Taikomos dvi pagrindinės energijos perdavimo technologijos prijungiant vėjo elektrines prie pagrindinio elektros tinklo.

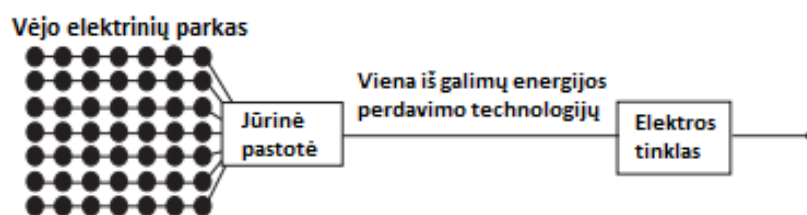
1) Aukštos įtampos kintamos srovės:

- a. trijų fazių kintamosios srovės povandeninių kabelių perdavimo sistema,
- b. žemo dažnio kintamosios srovės povandeninių kabelių perdavimo sistema.

2) Aukštos įtampos nuolatinės srovės:

- a. nuolatinės srovės perdavimo sistema su linijos komutuojama keitikliu.
- b. nuolatinės srovės perdavimo sistema su įtampos šaltinio keitikliu,

Bendroju atveju jūrinių vėjo elektrinių parko struktūrinė schema, nepriklausomai nuo perdavimo technologijos pavaizduotas pav. 5.5.

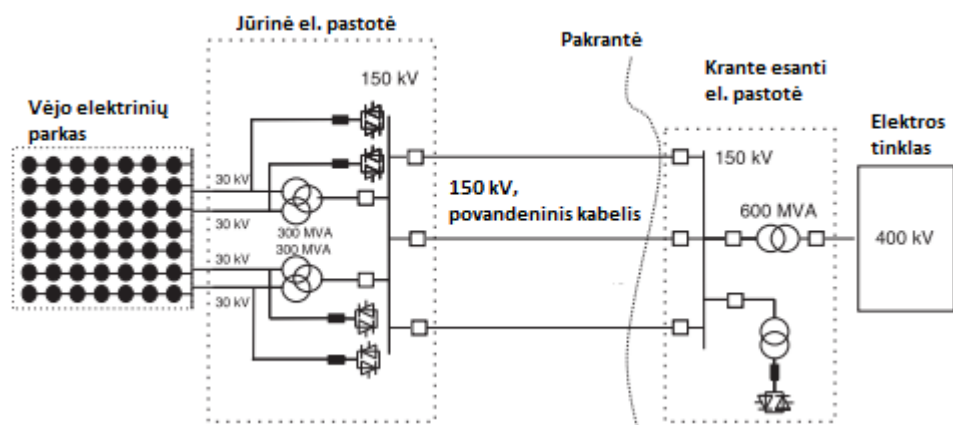


5.5 pav. Jūrinių vėjo elektrinių parko schema, kai vėjo elektrinių bendras sujungimo taškas yra jūrinė elektros pastotė [1].

Šiuo metu didžioji dauguma jūrinių vėjo elektrinių parkų dėl sąlyginai nedidelio atstumo iki kranto yra prijungti prie pagrindinio elektros tinklo naudojantis aukštos įtampos kintamosios srovės povandenines jungtis. Tačiau didėjant nuotoliui nuo pakrantės iki jūrinių vėjo elektrinių parko bei instaliuotai vėjo elektrinių galiai tikėta, kad bus pasirenkamos aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologijos.

### 5.4.1 Aukštos įtampos kintamos srovės perdavimo sistema

Aukštos įtampos kintamos srovės perdavimo sistema sudaryta iš šių pagrindinių elementų: kintamosios srovės vėjo elektrinių prijungimo tinklo (vidinio tinklo) (ang. *Collection grid*), jūrinės elektros pastotės su transformatoriais ir reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiais, trijų gyslų (XLPC) povandeninių kabelių, kurie jungia pakrantėje esančią elektros pastotę, kurioje galimi statiniai reaktyviosios galios kompensatoriai.



5.6 pav. 600 MW galios vėjo elektrinių parkas su aukštos įtampos kintamosios srovės perdavimo sistema [1].

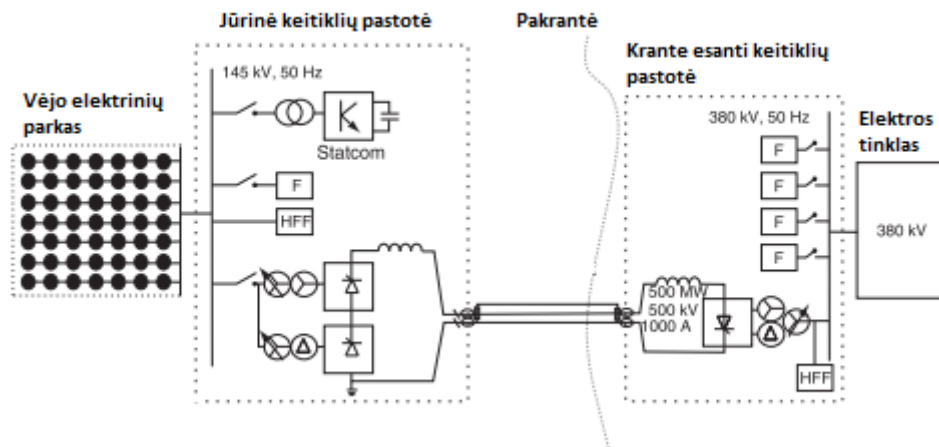
Ši elektros energijos perdavimo technologija buvo pasirinkta prijungiant vieną pirmųjų 160 MW galios jūrinių vėjo elektrinių parką „Horns Rev“ Danijoje. Vėjo elektrinių parkas yra nutolęs tik 21 km nuo pakrantės todėl buvo prijungtas 170 kV įtampos trijų gyslų XLPE variniais kintamosios srovės kabeliais. Reaktyviosios galios kompensavimas nebuvo reikalingas ties jūrine transformatorių pastote.

Didėjant nuotoliui iki pakrantės reaktyviosios galios kompensavimas bus reikalingas abejuose kabelio galuose (jūrinėje pastotėje ir pakrantėje). Pavyzdžiui, vėjo elektrinių parkui (400 MW galios su dviem 150 kV įtampos ir 120 km ilgio povandeniniais kabeliais) ir pakrantėje esančioje elektros pastotei bus reikalinga 150 MVar reaktyviosios galios kompensavimas. Maksimalus trijų fazių, 150-170 kV įtampos kabelio galios pralaidumas yra 200 MW.

Taigi didėjant atstumui iki kranto ir instaliuotai vėjo elektrinių galiai ženkliai išauga elektros energijos nuostoliai. Taip pat didinant perdavimo sistemos įtampą reikalingi brangesni įrenginiai t.y transformatoriai, povandeniniai kabeliai ir t.t [1].

## 5.4.2 Nuolatinės srovės perdavimo sistema su tiesiogiai linijos komutuojamu keitikliu

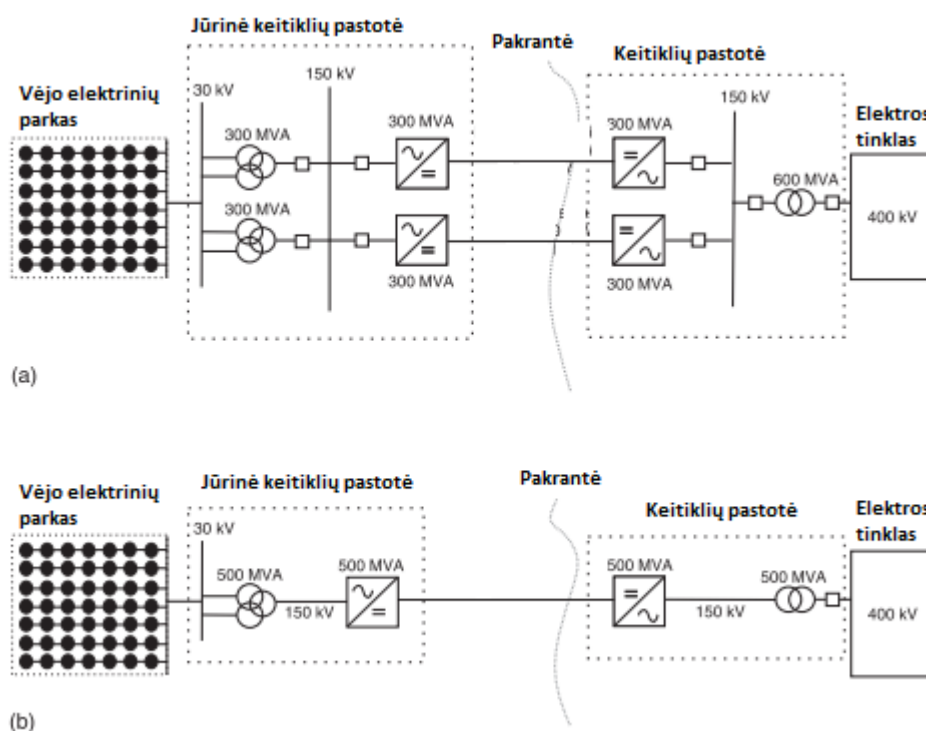
Nuolatinės srovės perdavimo sistema su tiesiogiai linijos komutuojamu keitikliu dažniausiai pasirenkama tuo atveju, kai reikia perduoti didelius energijos kiekius į geografiškai nutolusias apkrovas (ang. *bulk power transmission*). Taip pat naudojamos tarp sisteminiams jungtims ar sujungiant skirtingas salų energetikos sistemas (pvz. Japonijoje, Naujoje Zelandijoje ir t.t.).



5.7 pav. Vėjo elektrinių 500MW galios parkas prijungtas prie elektros tinklo naudojant AĮNS-SŠK [1].

Šiuo atveju, taip pat naudojama kintamoji srovė vėjo elektrinių vidiniame tinkle, t.y. prijungiant vėjo elektrines prie jūrinės elektros pastotės. Taip pat jūrinė elektros pastotė su trifaziais keitiklių transformatoriais, kintamosios srovės filtrais bei sinchroniniais reaktyviosios galios kompensatoriais. Pakrantėje esanti keitiklių pastotė yra sujungta su vienfaziu trijų apvių transformatoriumi bei kintamosios srovės filtrais. Šiai perdavimo technologijai reikalingos didelės erdvės keitiklių pastotėse jūroje ir krante. Keitiklių pastotėse esantys pagalbiniai įrenginiai turi užtikrinti SŠK keitiklio funkcionavimą laiko momentais, kai visiškai nėra arba pučiant silpnam vėjui. Dėl to reikalingi sinchroniniai reaktyviosios galios kompensatoriai arba tiesiog dizeliniai generatoriai, kurie užtikrina reikalingą keitiklių komutavimo įtampą ir reaktyviosios galios kompensavimą. Elektros energijos konvertavimo efektyvumas keičiant iš kintamosios į nuolatinę srovę ir atvirkščiai siekia 97-98 %. Sąlyginai maži energijos nuotoliai siekia 2 - 3 procentus, įskaitant abi keitiklių pastotes. Taip pat yra didesnis vieno jūrinio kabelio galios pralaidumas lyginant su aukštos įtampos kintamosios srovės perdavimo kabeliu [1].

### 5.4.3 Nuolatinės srovės perdavimo sistema su įtampos šaltinio keitikliu



5.8 pav. Vėjo elektrinių 600 MW galios parkas, kai naudojami du 300 MVA galios ĮŠK keitikliai (a) bei variantas (b), kai naudojamas vienas 500 MVA galios keitiklis. [1].

Ši perdavimo technologija žinoma kaip „HVDC Light“ kompanijos ABB ir „HVDC Plus“ kompanijos Siemens. Pirmą kartą ši technologija buvo panaudota prijungiant Gotlando salą Švedijoje Tai buvo 70 km, 60 MVA ir +/-80 kV povandeninė perdavimo linija [1].

Nuolatinės srovės perdavimo sistemą su įtampos šaltinio keitikliu galima naudoti bet kurioje kintamosios srovės tinklo vietoje, kadangi nėra apribojimų dėl trumpojo jungimo grandinės galios koeficiento. Šios perdavimo sistemos lankstumas leidžia atsikurti net po visuotinės energetikos sistemos avarijos. Tai reiškia kad ĮŠK keitiklis gali funkcionuoti kaip sinchroninis generatorius [3]. Taip pat aktyvioji ir reaktyvioji galia gali būti kontroliuojama nepriklausomai.

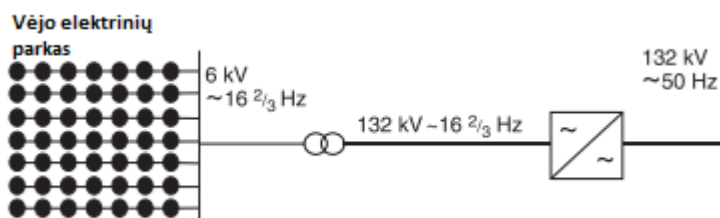
Kadangi naudojami dvipoliai tranzistoriai su izoliuota užtūra (DTIU), kurių perjungimų dažnis gali siekti 2 kHz, patiriami dideli energijos nuostoliai keitiklių pastotėse. Tačiau didelis tranzistorių perjungimų dažnis sumažina srovės harmonikų lygį bei reikalingus kintamosios srovės filtrus.

### 5.4.4 Žemo dažnio kintamos srovės povandeninių kabelių perdavimo sistema

Mokslininkai Schütte, Gustavsson ir Ström [1], pasiūlė naudoti žemo dažnio elektros tinklus prijungiant jūrines vėjo elektrines. Dažnis, kuris mažesnis už 50 Hz ar 60 Hz, naudojamas elektrifikuotų traukinių tinkluose (Vokietijoje, Austrijoje, Šveicarijoje, Švedijoje ir Norvegijoje – 16 2/3 Hz, 15 kV).



Jeigu pasirenkama AĮNS perdavimo technologija, žemo dažnio elektros tinklas gali būti naudojamas prijungiant vėjo elektrines prie jūrinės keitiklių pastotės. O jeigu aukštos įtampos kintamosios srovės perdavimo tinklas tuomet žemo dažnio sistema galima naudoti vidiniame vėjo elektrinių prijungimo tinkle ir perduodant elektros energiją į krante esančią keitiklių stotį.



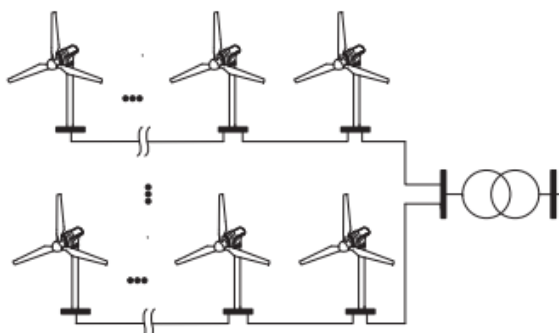
5.9 pav. Vėjo elektrinių parkas prijungtas prie elektros tinklo naudojant žemo dažnio perdavimo sistemą [1].

Žemo dažnio sistema padidina perdavimo linijos galios pralaidumą dėl sumažėjusių talpuminių srovių, tačiau reikalingi didesni ir brangesni transformatoriai bei dažnio keitikliai.

## 5.5 Vėjo elektrinių parko vidinis elektros tinklas

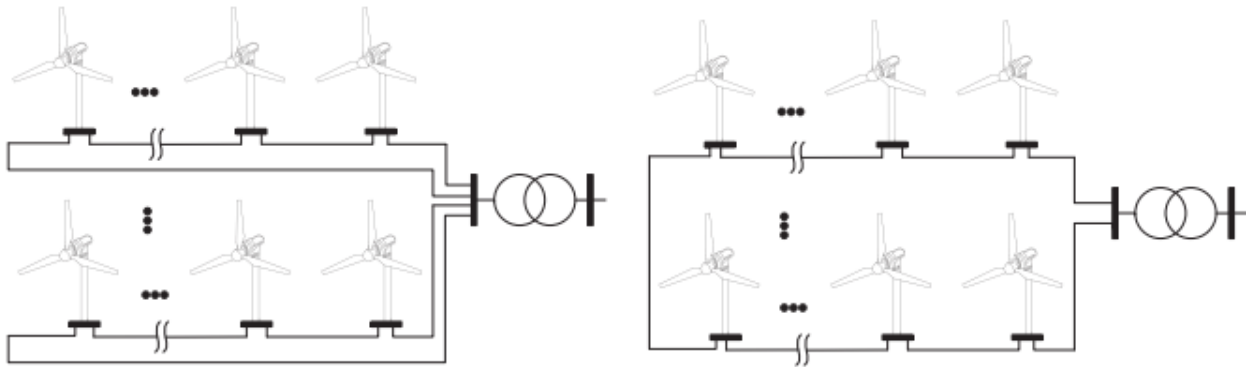
Nepriklausomai nuo to kokia energijos perdavimo technologija yra pasirenkama, egzistuoja trys pagrindiniai VE vidiniai prijungimo tinklai [2]:

- Spindulinis.
- Žiedinis.
- Žvaigždės.



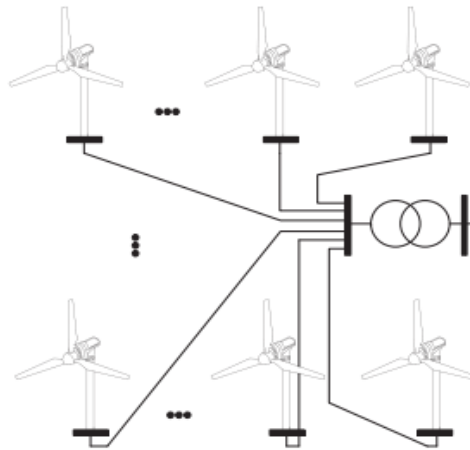
5.11 pav. Spindulinė vėjo elektrinių prijungimo schema [2].

Vėjo elektrinės yra prijungtos prie transformatoriaus (prijungimo taško) vienu pagrindiniu laidininku. Vėjo elektrinių skaičius galimas šioje sistemoje yra ribojamas kabelio maksimalios leistinos srovės. Ši vėjo elektrinių prijungimo sistema yra pati pigiausia ir paprasčiausia, tačiau turi patikimumo problemų, tai yra sugedus vienai vėjo elektrinei, energijos tiekimas nutrūksta iš viso elektrinių parko.



5.12 pav. Žiedinė vėjo elektrinių prijungimo schema [2].

Žiedinė sistema, tai patobulinta patikimumo prasme spindulinė prijungimo sistema. Galimi du atvejai, tai yra vienos ir dviejų magistralių žiediniai tinklai.



5.13 pav. Žvaigžde prijungtų vėjo elektrinių tinklas [2].

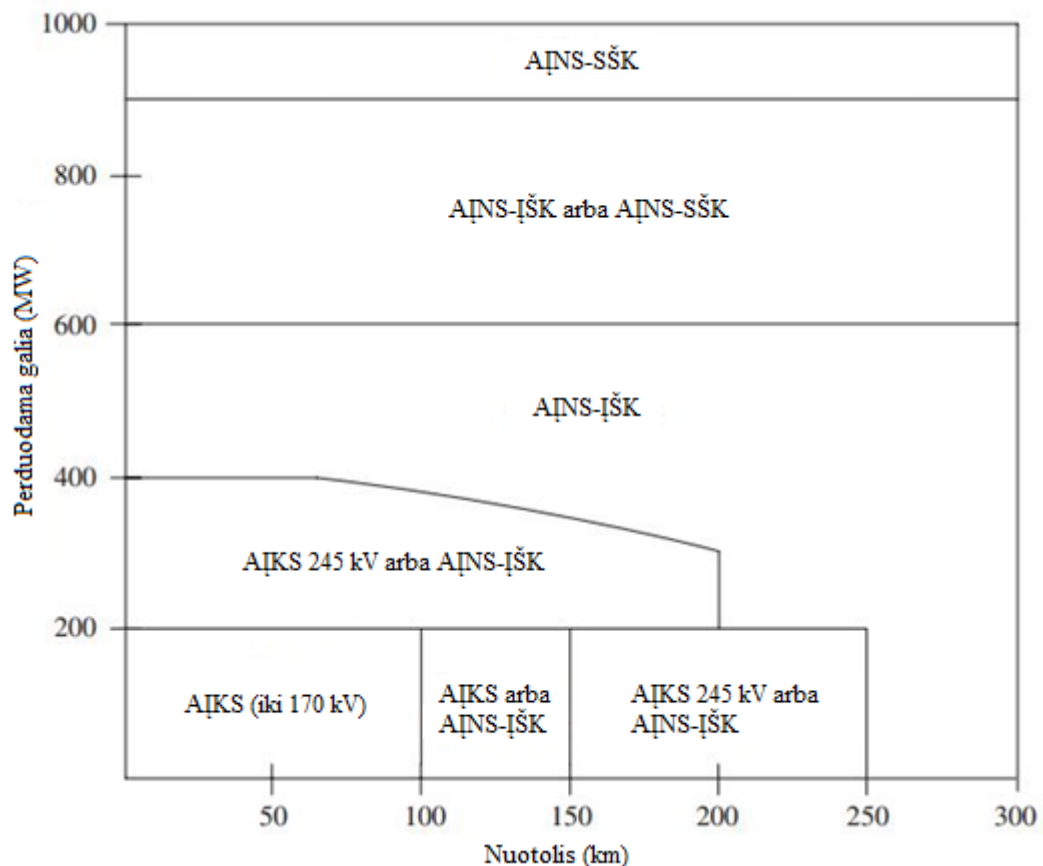
Šios sistemos esmė sumažinti tekančias sroves laidininkuose prie kurių yra prijungtos vėjo elektrinės. Bendrasis sujungimo taškas paprastai būna VE parko viduryje. Šios sistemos pranašumas lyginant su anksčiau minėtomis yra padidėjęs patikimumas. Tai reiškia, kad sugedus vienai linijai atjungiama tik viena vėjo elektrinė, kai kitos sėkmingai dirba toliau.

## 5.6 Elektros perdavimo tinklų naudojamų prijungiant VE prie pagrindinio elektros tinklo palyginimas

Pagrindiniai faktoriai nulemiantys pasirenkant elektros energijos perdavimo technologiją prijungiant jūrinių vėjo elektrinių parką prie elektros tinklo yra šie:

1. Vėjo elektrinių parko dydis (VE instaliuota galia).
2. Atstumas iki kranto.

### 3. Elektros energijos nuostoliai perdavimo linijoje.



5.14 pav. Energijos perdavimo technologijų pasirinkimo galimybės priklausomai nuo įrengtosios VE parko galios ir nuotolio iki krante esančio elektros tinklo [1].

#### 5.6.1 Jūrinių vėjo elektrinių parkas iki 200 MW

Bendruoju atveju investicijos yra panašios, kai lyginame dvipolį nuolatinės srovės kabelį ir vieną trijų gyslų 150 kV įtampos XLPE kintamosios srovės kabelį esant nuotoliui iki 200 km. Tačiau investicijos į nuolatinės srovės keitiklį yra 10 kartų didesnės nei kintamosios srovės sistemos infrastruktūros (transformatorių pastotės ir kt.) [1]. Taigi, esant 100 km nuotoliui iki kranto ir 200 MW instaliuotai vėjo elektrinių parko galiai ekonomiškiausias sprendimas yra kintamos srovės perdavimo linijos su maksimalia 170 kV įtampa. Esant didesniai atstumui nuo kranto investicijų išlaidos susilygina, kadangi patiriami didesni elektros energijos nuostoliai kintamosios srovės perdavimo linijose. Esant nuotoliui tarp 150 km ir 250 km, ekonominiu požiūriu, galima rinkti AIŠNS-IŠK perdavimo sistemą arba kintamosios srovės sistemą, kai maksimali įtampa yra 245 kV. Kai tik atstumas didesnis nei 250 km techniškai įmanoma tik nuolatinės srovės jungtis, nes kintamosios srovės perdavimo sistema esant tokiam nuotoliui galima tik su reaktyviosios galios kompensavimu. Tačiau tokiems įrenginiams reikalingos papildomos jūrinės platformos. Taip pat kintamosios srovės sistemos esant

didesniam atstumui už 150 km nėra tikėtinos, kadangi į bendrą linijos ilgį įsiskaičiuojama ir dalis tinklo esančio pakrantėje.

### **5.6.2 Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 200 MW ir 350 MW**

Jūrinių vėjo elektrinių parkui su instaliuota 200 MW arba 350 MW galia reikalingi du 150 kV trijų gyslų XLPE kintamos srovės kabeliai arba vienas 245 kV įtampos kabelis. Todėl kintamosios srovės perdavimo sistemos išlaidos padidėja ir HVDC VSC sistema tampa ekonomiškai konkurencinga. Tačiau atstumui esant didesniam nei 100 km ir 300 MW VE parko galiai kintamos srovės sistemos techninis įgyvendinimas tampa sudėtingas dėl maksimalaus įtampos kritimo linijoje. Įvertinus tai, HVDC su įtampos keitikliu sistema tikriausiai bus ekonomiškai naudingesnė nei kintamos srovės sistema su papildomu kabeliu.

### **5.6.3 Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 350 MW ir 600 MW**

Kintamosios srovės perdavimo sistemoms, kai instaliuota didelė vėjo elektrinių parko galia reikia mažiausiai dviejų 245 kV įtampos trijų gyslų XLPE kabelių arba netgi trijų 150 kV įtampos kabelių. O AĮNS-ĮŠK sistemai vis dar užtenka tik vieno dvipolio nuolatinės srovės kabelio. Vadinasi AĮNS-ĮŠK sistema yra ekonomiškesnė šiuo atveju. Kintamosios srovės perdavimo sistemos tampa konkurencingos tik tuo atveju, kai vėjo elektrinių parkai yra arti pakrantės.

### **5.6.4 Jūrinių vėjo elektrinių parkai tarp 600 ir 900 MW**

Vėjo elektrinių parkai su 600 MW instaliuota galia, kai energijai perduoti yra naudojama AĮNS-ĮŠK sistema, reikalingi du dvipoliai nuolatinės srovės kabeliai bei kelios keitiklių pastotės jūroje ir pakrantėje, o AĮNS-SŠK sistemai reikalingas tik vienas laidininkas ir po vieną keitiklių pastotę krante ir jūroje. Ekonominiu požiūriu abi šios sistemos yra labai panašios. Tačiau pirmenybė bus teikiama perdavimo sistemai su dviem kabeliais dėl didesnio patikimumo, nes sugedus vienai perdavimo linijai, energijos tiekimas bus nutrauktas iš viso VE parko.

### **5.6.5 Jūrinių vėjo elektrinių parkai 900 MW ir daugiau**

Vėjo elektrinių parkui su 900 MW instaliuota galia ekonomiškiausias energijos perdavimo būdas yra AĮNS-SŠK sistema. Tačiau kaip anksčiau minėjau dėl sistemos patikimo galima pasirinkti AĮNS-ĮŠK su dviem perdavimo kebeliais.

5.3 *Lentelė*. Reikalingas kabelių skaičius skirtingoms elektros energijos perdavimo technologijoms [1].

Vėjo elektrinių galia (MW), kai atstumas iki kranto 100 km	Kintamosios srovės perdavimo sistema (150 kV)	Nuolatinės srovės perdavimo sistema su ĮŠK keitikliu		Nuolatinės srovės perdavimo sistema su SŠK keitikliu	
		300 MW galios keitiklis ir dvipolis kabelis	500 MW galios keitiklis ir dvipolis kabelis	150 kV dvipolis kabelis	450 kV vienpolis kabelis
300	2	1+1	1+1	1+1	1
500	3	2+2	1+1	2+2	1
900	5	3+3	2+2	4+4	2
1200	6	4+4	3+3	5+5	2

### 5.7 Jūrinių vėjo elektrinių galimas poveikis aplinkai

Triukšmas, šešėliavimas, poveikis gamtovaizdžiui, paukščių migracijos kelių sutrikdymas. Visos šios problemos yra sukeltos sausumoje esančių vėjo elektrinių. Statant vėjo elektrines jūroje dalis šių problemų yra išsprendžiamos, tačiau atsiranda naujų. Vėjo elektrinių parkų statyba turi būti pasirenkama atsižvelgiant į prekybos laivų kelius, žvejybos plotus, saugomas gamtines zonas. Taip pat į esamas galimybes prijungti VE parką prie elektros tinklo [4].

## 6. AĪNS PERDAVIMO SISTEMOS MODELIS MATLAB/SIMULINK APLINKOJE

Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos su įtampos šaltinio keitikliu tampa efektyvesne išeitimi norint perduoti elektros energiją per ilgus nuotolius. Tai ypač aktualu prijungiant prie elektros tinklo jūrinių vėjo elektrinių parkus ar kitus nutolusius regionus. ĮŠK keitiklis nereikalauja komutuojančios įtampos iš elektros tinklo, todėl ši technologija tinkama efektyviai tiekti elektros energiją izoliuotoms ar nutolusioms apkrovoms. Dėl šių privalumų tikėtina, kad AĪNS-ĮŠK sistema ateityje taps svarbiu elektros energetikos komponentu.

### 6.1 Tiriamos sistemos apibūdinimas

„MATLAB/Simulink“ aplinkoje tiriama aukštos įtampos nuolatinės srovės elektros energijos perdavimo sistema jungianti jūrinių vėjo elektrinių parką nutolusį per 100 km nuo kranto su kintamos srovės elektros tinklu. Keitiklių pastotėje (1 ir 2) naudojami trijų-lygių ĮŠK keitikliai (ang. *three-level Neutral Point Clamped VSC converter*). Keitiklių pastotės (1 ir 2) tarpusavį yra sujungtos nuolatinės srovės perdavimo linijomis (100 km ilgio). Sinusinio impulso pločio moduliacijoje naudojamas trikampės įtampos signalas, kurio dažnis 27 kartus didesnis už fundamentalų dažnį (t.y.  $27 \cdot 50\text{Hz} = 1350\text{Hz}$ ). Naudojami keitiklių transformatoriai optimaliai įtampos transformacijai, kurių apvijų jungimo schema žvaigždė (su įžeminta neutralia)/trikampis. Tokiu būdu jungiami transformatoriai sumažina 3-ios, 9-ios, 15-osios harmonikas patekimą į elektros tinklą. Keitiklio reaktoriaus reguliuoja keitiklių išėjimo aktyviają ir reaktyviają galią bei išėjimo įtampos fazę ir amplitudę. Norint atitikti kintamos srovės kokybės reikalavimus naudojami kintamos srovės filtrai. Filtrai prijungiami prie el. grandinės kaip šuntiniai elementai kintamos srovės tinklo pusėje arba prie keitiklio transformatoriaus. Kadangi ĮŠK keitiklis į tinklą atiduoda pagrinde aukštesniąsias dažnio harmonikas reikalingas sąlyginai mažas šuntinis filtras lyginant su keitiklio nominalia galia. Aukštų dažnių filtras skirtas slopinti 27 ir 54 eilės harmonikoms.

### 6.2 AĪNS-ĮŠK tiriamosios schemos komponentai

AĪNS-ĮŠK perdavimo sistemos modelis pademonstruota paveiksle pav. 6.1. Ši sistema sudaryta iš šių elementų: vėjo elektrinių parko, transformatorių, keitiklių pastočių, nuolatinės srovės perdavimo linijų ir kintamos srovės elektros tinklo ekvivalento.

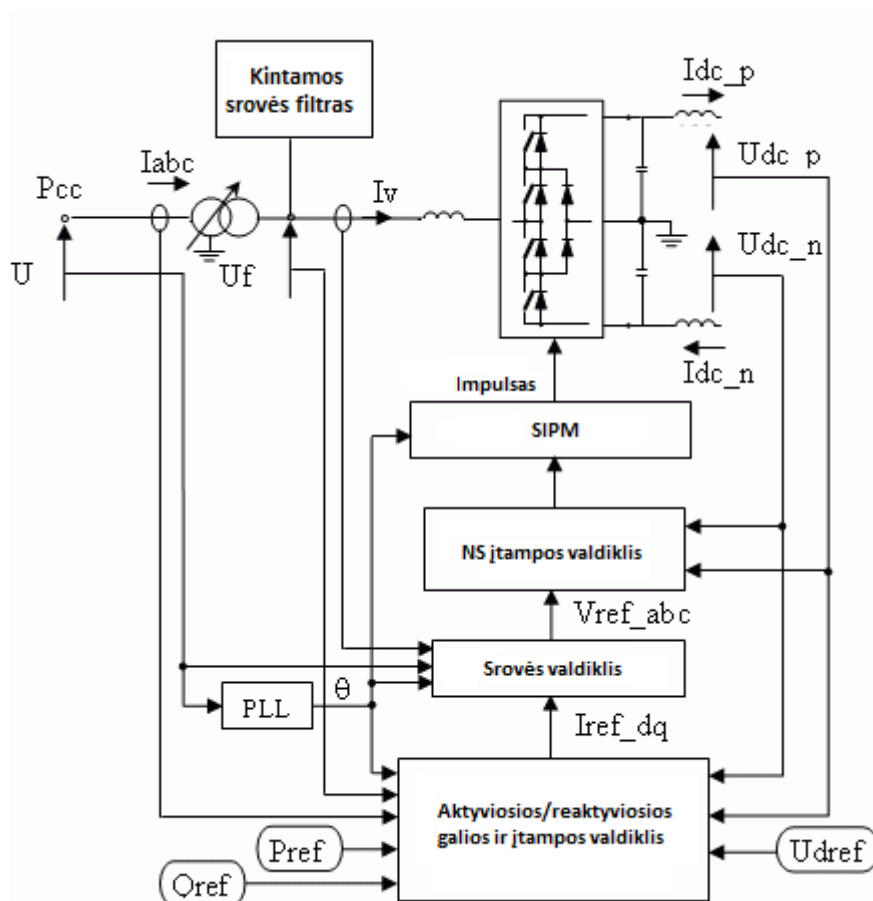


### 6.3 Sistemos parametrai

6.1 Lentelė. Tiriamos sistemos parametrai.

IŠK- keitiklis	450 MVA, 1350 Hz
Nuolatinės srovės perdavimo linijos	+/-150 kV, $R = 1.39e-2 \Omega/\text{km}$ , $L = 1.59e-4 \text{ H}/\text{km}$ , $C = 2.31e-7 \text{ F}/\text{km}$
Kintamos srovės tinklo ekvivalentas	230 kV, 2000 MVA, $L1 = 31,02 \text{ mH}$ , $R = 13,79 \Omega$ , $L2=62,23 \text{ mH}$
Keitiklių transformatoriai	Yg/Delta(D1), 155kV/150kV, 480 MVA
Nuolatinės srovės kondensatoriai, $C_{p1}, C_{n1}$	0.0002 F
Nuolatinės srovės filtrai ( $C_{p\_DCF1}$ ir $C_{n\_DCF1}$ )	12 $\mu\text{F}$
Lyginamieji stabilizatoriai ( $L_{p1}$ ir $L_{n1}$ )	$R = 0.0251$ , $L = 8 \text{ mH}$

### 6.4 Aukštos įtampos nuolatinės srovės IŠK keitiklio valdikliai



6.3 pav. A[NS]-I[KŠ] keitiklio valdiklis [16].



## 6.5 Koordinačių sistemos transformacija

Trifazės mašinos dinamika gali būti aprašoma ekvivalentine dvifaze lygčių sistema. Tai daroma tam, kad su sumažinti mašinos kintamųjų ir parametrų skaičių. Koordinačių transformacijos blokas transformuoja (perskaičiuoja) trifazės kintamos srovės vertes (fazinė koordinačių sistema) į erdvinio vektoriaus dedamąsias ( $\alpha$  ir  $\beta$  realiąją ir menamąją dalį), stacionarioje koordinačių sistemoje. Tuomet perskaičiuojama į sinchroniniu greičiu  $\omega$  besisukančias dedamąsias ( $d$ - $q$ ) [11, 15].

Fazinės koordinačių sistemos įtampos transformacijos matrica į ( $\alpha, \beta$ ) dedamąsias:

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Tuomet atvirkštinės transformacijos matrica:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

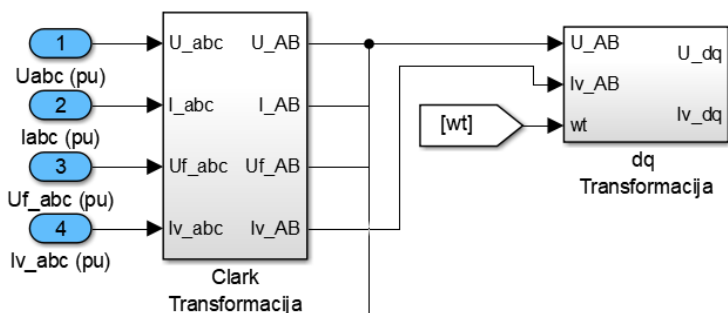
$u_0$ -nulinės fazių sekos komponentė, jos galima nepaisyti, kai sistema simetrinė.

Stacionarios koordinačių sistemos transformacija į sinchroniniu greičiu besisukančią koordinačių sistemą.

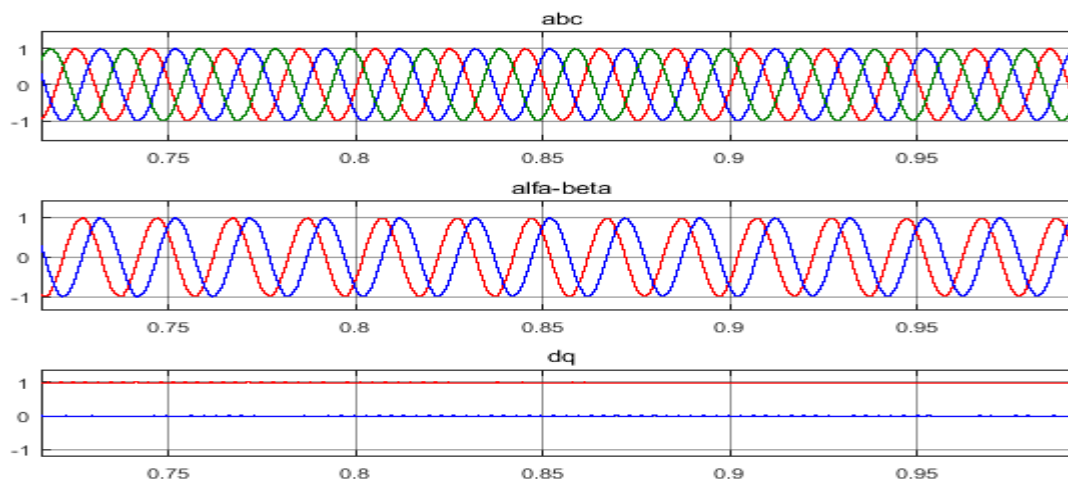
$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Atvirkštinė transformacija:

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$



6.4 pav. MATLAB/Simulink abc- $\alpha\beta$ 0-dq0 transformacija struktūrinė diagrama.



6.4 pav. MATLAB/Simulink abc- $\alpha\beta$ 0-dq0 transformacija.

## 6.6 Dažnio nustatymo blokas

Dažnio nustatymo blokas (ang. *Phase Locked Loop*) išmatuoja sistemos dažnį  $f$  ir elektrinį kampą  $\theta$  (tiksliau bazinius vektorius  $\sin(\theta)$ ,  $\cos(\theta)$ ) reikalingus erdviųjų vektorių  $d$ - $q$  transformacijoje. Nusistovėjusiame režime,  $\sin(\theta)$  fazė sutampa su fundamentalia (tiesioginės sekos) komponente  $a$  ir įtampos  $U_{abc}$  fazė [8, 16].

## 6.7 Aktyviosios/reaktyviosios galios ir įtampos valdiklis

Aktyvioji galia (Keitiklių pastotėje 1) arba nuolatinės srovės įtampa (Keitiklių pastotėje 2) reguliuojama keičiant kampą  $\delta$ , o reaktyvioji galia moduliacijos indeksą ( $m$ ). Keitiklio išėjimo momentinės aktyviosios ir reaktyviosios galios vertės išreiškiamos įtampos ir srovės  $d$ - $q$  dedamosiomis. Tuomet atitinkamai  $p$  ir  $q$  užrašomos šiomis lygtimis [8]:

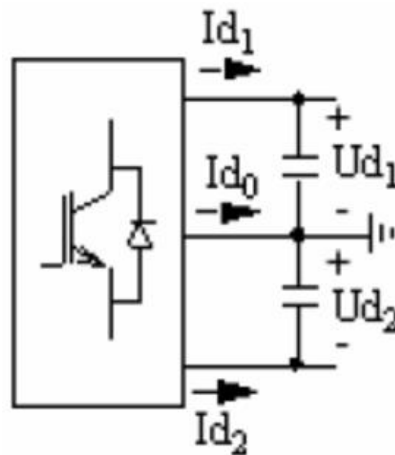
$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left( \dot{u}_f^{dq} \dot{i}_v^{*dq} \right) = \frac{3}{2} (u_{fd} i_{vd} + u_{fq} i_{vq}) \quad (6.5)$$

$$q = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left( \vec{u}_f^{dq} \cdot \vec{i}_v^{*dq} \right) = \frac{3}{2} (-u_{fd} i_{vq} + u_{fq} i_{vd}) \quad (6.6)$$

Kai  $d$ - $q$  koordinacių sistema pasirenkama taip, kad įtampos dedamosios  $u_{fq}$  galima nepaisyti t.y. ( $u_{fq} \approx 0$ ), tuomet vadovaujantis lygtimis 6.6 ir 6.7 aktyvioji ir reaktyvioji galia yra atitinkamai proporcinga srovės  $d$  ir  $q$  dedamosioms ( $i_{vd}$ ,  $i_{vq}$ ). Tokiu atveju atitinkamai reguliuojant srovės komponentes  $i_{vd}$ ,  $i_{vq}$  galima valdyti aktyviają galią (arba nuolatinę srovę ir įtampą) ir reaktyviają galią (arba kintamos srovės šynos įtampą). Taigi aktyviosios ir reaktyviosios galios ir įtampos reguliatorius apskaičiuoja keitiklio srovės vektoriaus ( $I_{ref\_dq}$ ) vertę [8, 16].

## 6.8 Nuolatinės srovės ir įtampos valdiklis

Nuolatinės srovės teigiamo ir neigiamo poliaus įtampų pokytis yra reguliuojamas siekiant išlaikyti įtampų pusiausvyrą, kadangi nusistovėjusio darbo režime polių įtampos turi būti vienodos. Nedidelis įtampos nuokrypis gali atsirasti pasikeitus aktyviosios ir reaktyvios galios srovėms arba dėl netikslios impulso pločio moduliacijos.



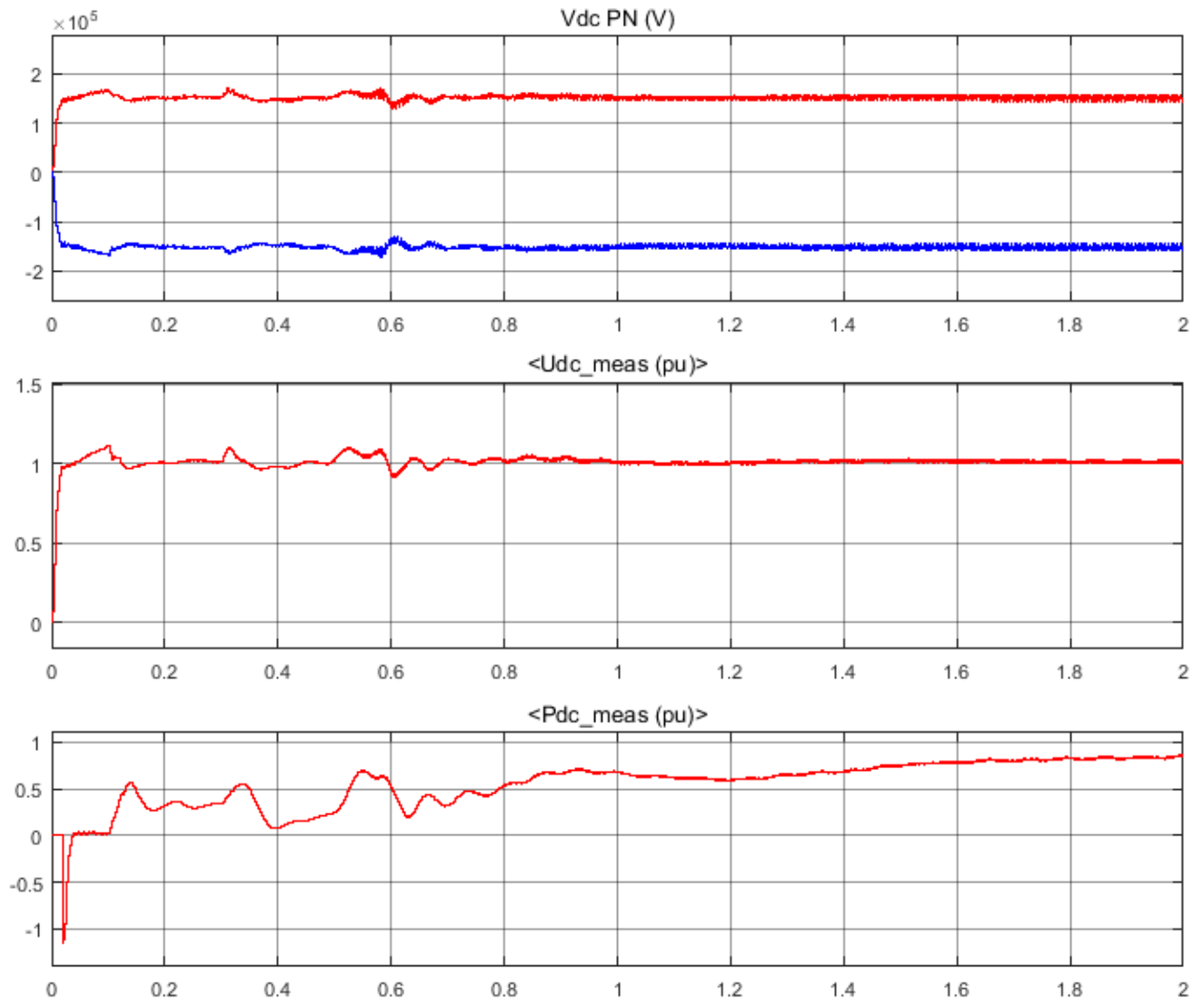
6.5 pav. Nuolatinės srovė ir įtampa trijų-lygių tiltelyje [16].

Keičiant elektroninių jungiklių laidumo trukmę galima pakeisti vidutinę vidurinio mazgo srovę  $I_{d0}$  kartu valdant įtampos pokytį  $U_{d0} = U_{d1} - U_{d2}$ . Tarkime teigiamas įtampos pokytis ( $U_{d0} \geq 0$ ) gali būti sumažintas jei padidinama nustatytosios įtampos amplitudė, kuri generuoja teigiamą  $I_{d0}$  srovę, o tuo tarpu kai mažinama nustatytoji įtampos amplitudė generuojama neigiamą  $I_{d0}$  srovė. Pakeitimai atliekami pridendant papildomą kompensavimo dedamąją prie sinusinės nustatytosios įtampos [16].

$$I_{d0} = -(I_{d1} + I_{d2}) = -C \cdot \frac{d}{dt} (U_{d1} - U_{d2}) = -C \cdot \frac{d}{dt} (U_{d0}) \quad 6.7$$

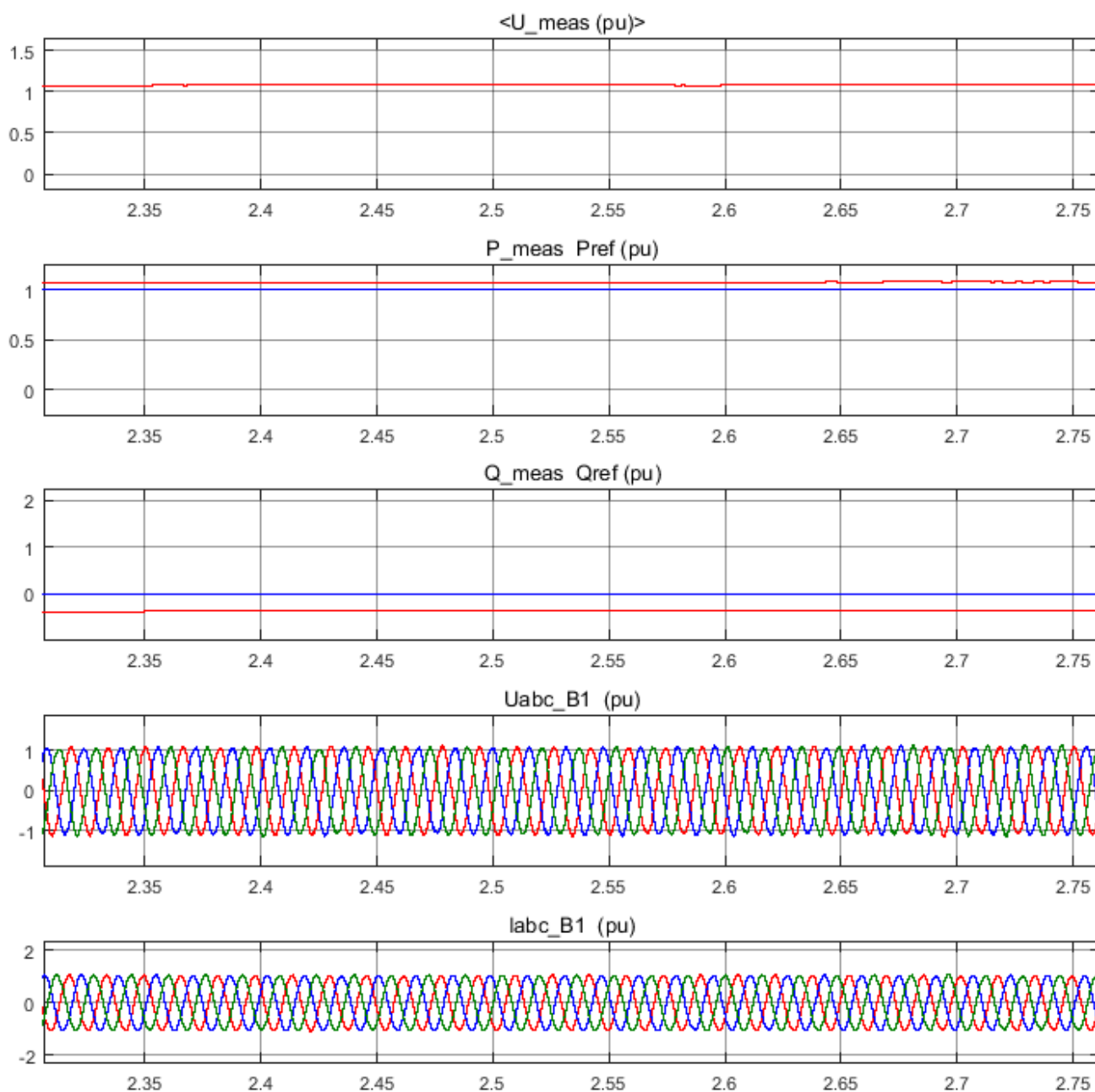
## 7. TYRIMO REZULTATAI

Pirmojo tyrimo atveju buvo siekiama išsiaiškinti po kurio laiko aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema jungianti 400 MW vėjo elektrinių parką su elektros tinklu pasieks stabilų sistemos darbo režimą. Taigi kaip matyti iš pav. 7.1, pav. 7.2, pav. 7.3, pav. 7.4 ir pav. 7.5, pateiktų charakteristikų sistemos stabilus darbo režimas nusistovi praėjus  $t = 0.8$  s.



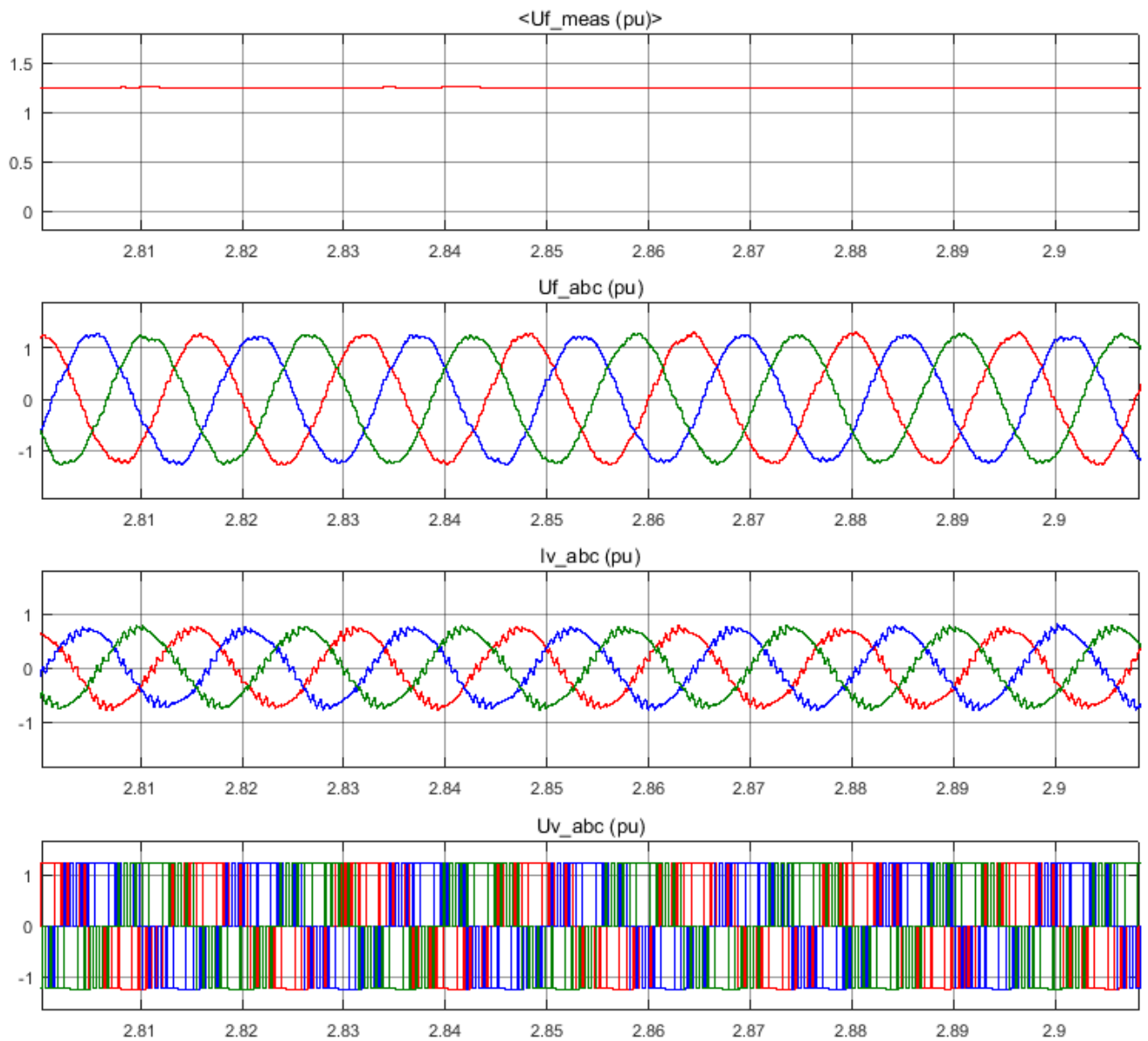
7.1 pav. IŠK keitiklio tyrimo rezultatų charakteristikos.

1.  $Vdc PN(V)$  - nuolatinės srovės teigiamo ir neigiamo poliaus įtampa.
2.  $Udc\_meas (pu)$  - vidutinė nuolatinės srovės įtampa santykiniais vienetais.
3.  $Pdc\_meas (pu)$  - vidutinė nuolatinės srovės galia santykiniais vienetais.



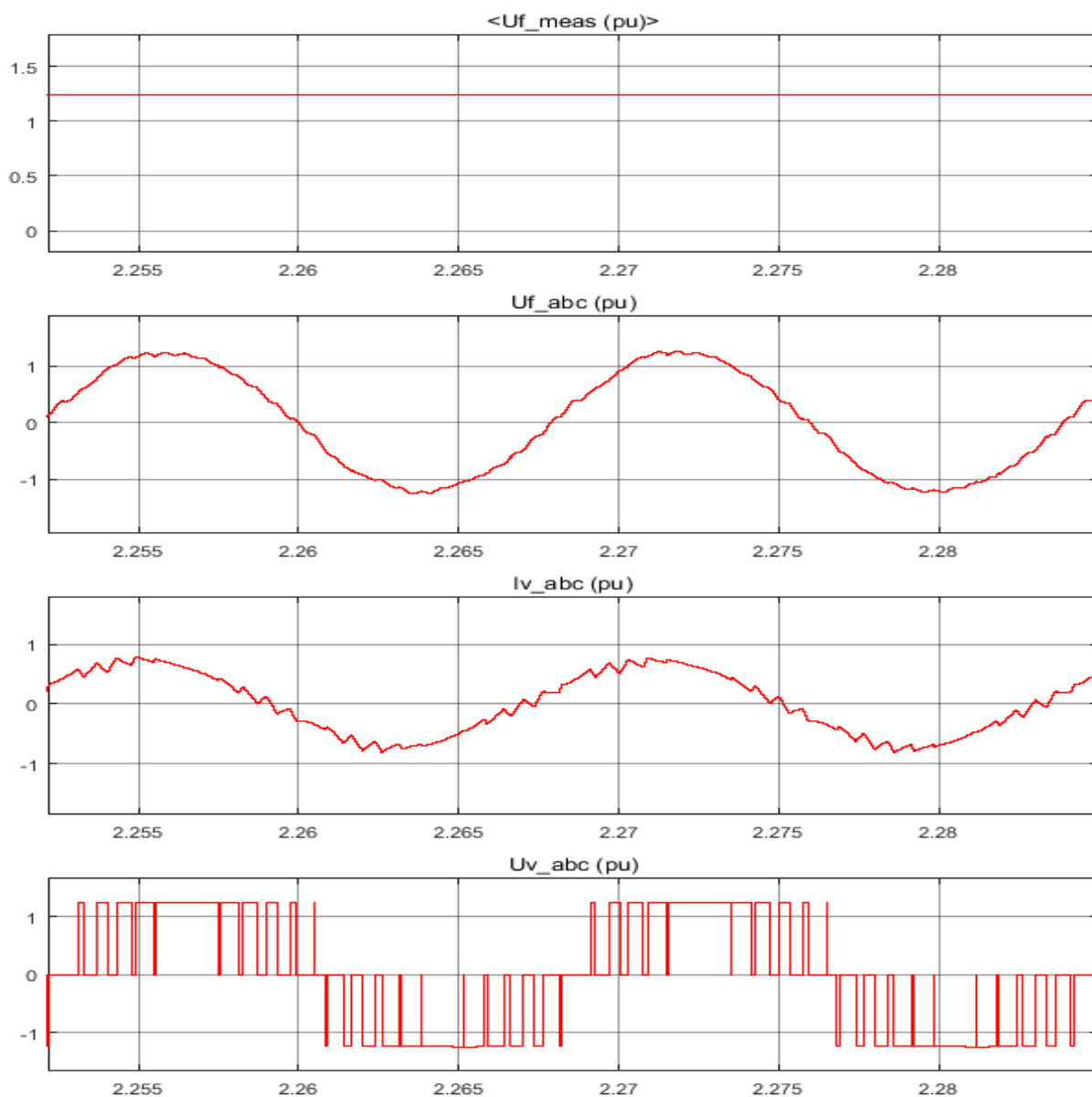
7.2 pav. Šynos B1 tyrimo rezultatų charakteristikos.

1.  $U_{meas} (pu)$  - vidutinė kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais;
2.  $P_{meas} (pu)$  - vidutinė kintamosios srovės aktyvioji galia santykiniais vienetais;
3.  $Q_{meas} (pu)$  - vidutinė kintamosios srovės reaktyvioji galia santykiniais vienetais;
4.  $U_{abc\_B1} (pu)$  - trifazė kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais šynoje B1;
5.  $I_{abc\_B1} (pu)$  - trifazė kintamoji srovės santykiniais vienetais šynoje B1.



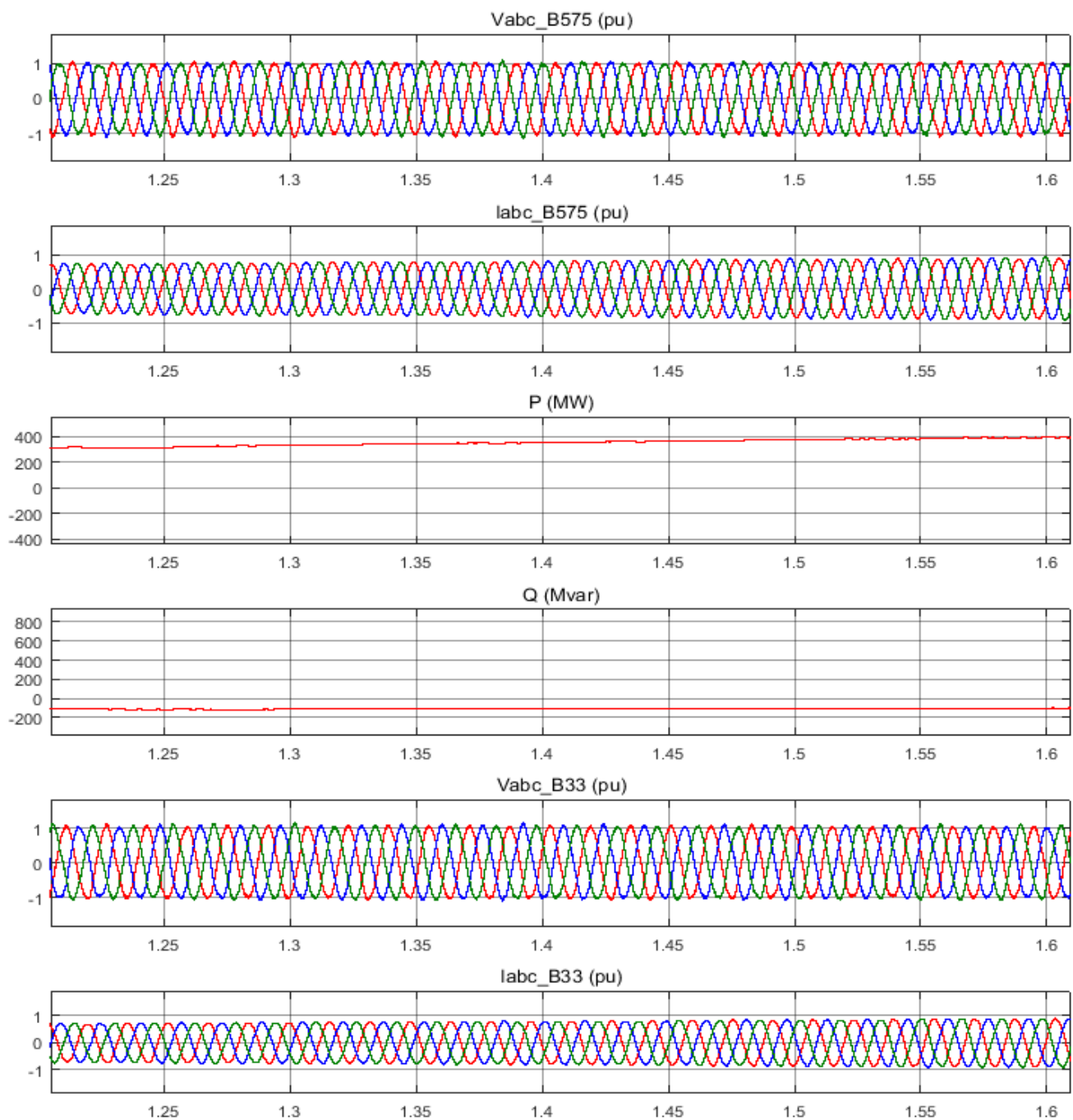
7.3 pav. Vėjo elektrinių parko pusėje esančio elektros tinklo dalies tyrimo rezultatų charakteristikos.

1.  $Uf\_meas (pu)$  - kintamosios srovės vidutinė įtampa ties tinklo filtru, santykiniais vienetai.
2.  $Uf\_abc (pu)$  - trifazė kintamosios srovės įtampa ties tinklo filtro šyna, santykiniais vienetais.
3.  $Iv\_abc (pu)$  - trifazė kintamoji srovė prie keitiklių pastotės, santykiniais vienetais.
4.  $Uv\_abc (pu)$  - keitiklio išėjimo trifazė kintamosios srovės įtampa, santykiniais vienetais.



7.4 pav. Vėjo elektrinių parko pusėje esančio elektros tinklo dalies (fazės  $U_a$ ), tyrimo rezultatų charakteristikos

1.  $Uf\_meas (pu)$  - kintamosios srovės (fazės  $U_a$ ) vidutinė įtampa ties tinklo filtru, santykiniais vienetais.
2.  $Uf\_abc (pu)$  - kintamosios srovės (fazės  $U_a$ ) įtampa ties tinklo filtro šyna, santykiniais vienetais.
3.  $Iv\_abc (pu)$  - kintamoji (fazės  $U_a$ ) srovė prie keitiklių pastotės, santykiniais vienetais.
4.  $Uv\_abc (pu)$  - keitiklio išėjimo (fazės  $U_a$ ) kintamosios srovės įtampa, santykiniais vienetais.

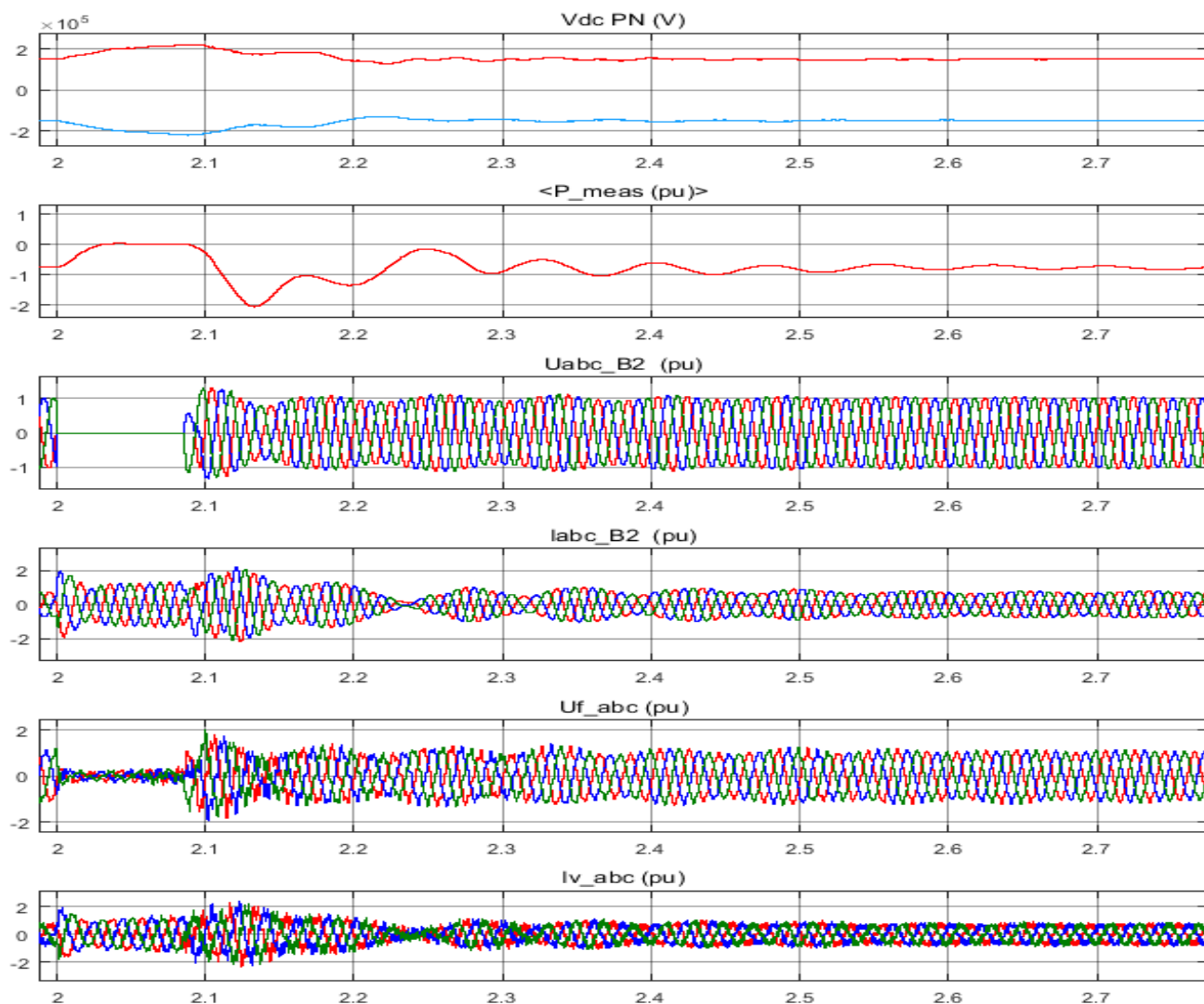


7.5 pav. Vėjo elektrinių parko elektros tinklo, tyrimo rezultatų charakteristikos.

1.  $V_{abc\_B575}$  (pu) - trifazė kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais, šnyoje B575.
2.  $I_{abc\_B575}$  (pu) - trifazė kintamoji srovė santykiniais vienetais, šnyoje B575.
3.  $P$  (MW) – vėjo elektrinių parko aktyvioji galia.
4.  $Q$  (Mvar) - vėjo elektrinių parko reaktyvioji galia.
5.  $V_{abc\_B33}$  (pu) - trifazė kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais, šnyoje B33.
6.  $I_{abc\_B33}$  (pu) - trifazė kintamoji srovė santykiniais vienetais, šnyoje B33.



Antruoju atveju buvo siekiama išsiaiškinti, kas nutinka aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemoje įvykus trifaziam trumpajam jungimui elektros tinklo pusėje (tarp keitiklių pastotės 2 ir elektros tinklo ekvivalento). Taigi iš gautų tyrimo charakteristikų pateiktų pav. 7.6 galima pastebėti, kad įvykus trifaziam trumpajam jungimui laiko tarpu nuo  $t_1 = 2$  s iki  $t_2 = 2.1$  s, sistema grįžta į stabilų darbo režimą po  $0.4$  s laiko momentu  $t_s = 2.4$  s.

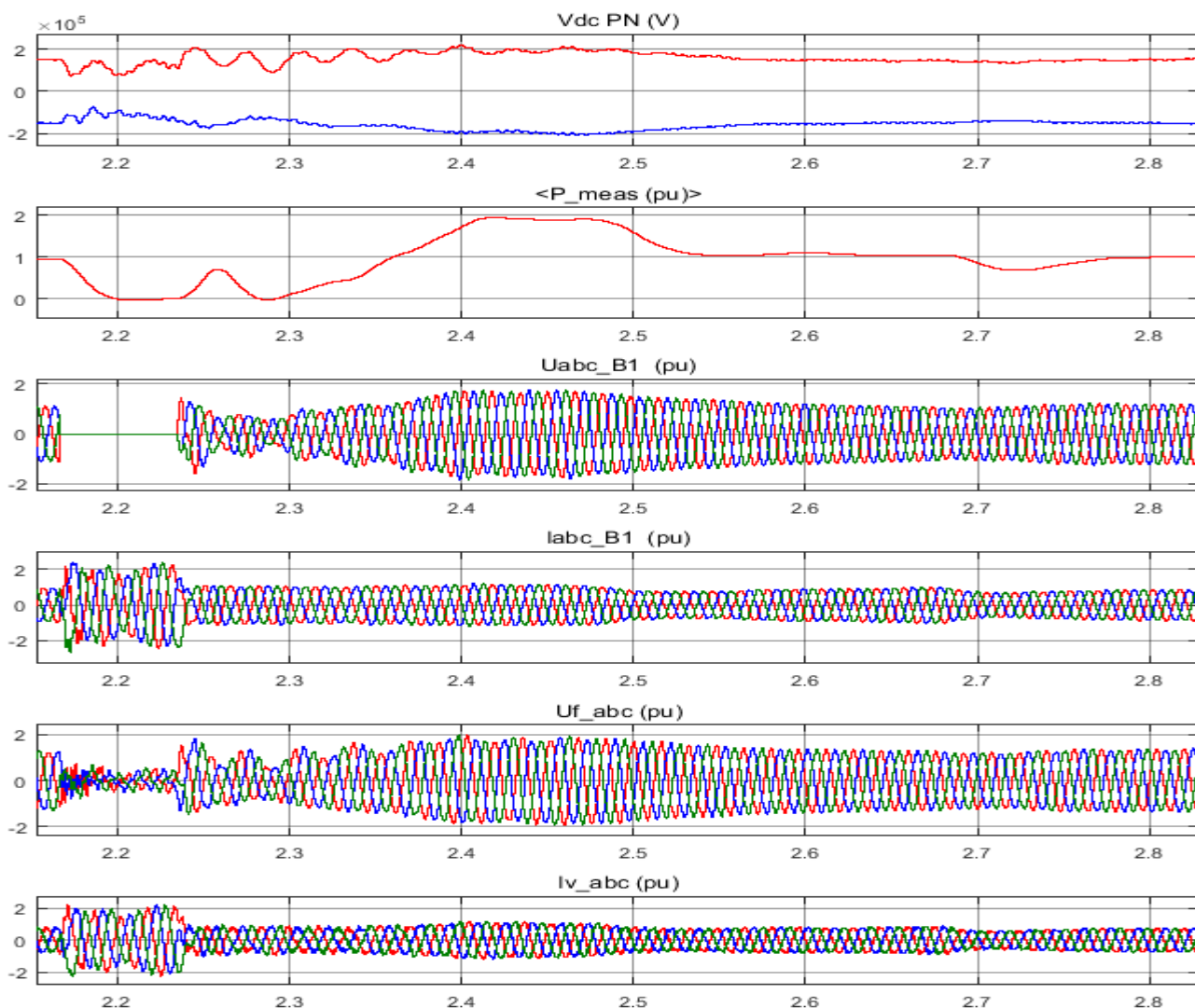


7.6 pav. Elektros tinklo pusėje esančio dalies tyrimo rezultatų charakteristikos įvykus trifaziam trumpajam jungimui.

1.  $V_{dc PN}(V)$  - nuolatinės srovės teigiamo ir neigiamo poliaus įtampa, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.
2.  $P_{meas} (pu)$  - vidutinė kintamosios srovės aktyvioji galia santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.
3.  $U_{abc\_B2} (pu)$  - trifazės kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais šnyoje B2, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.

4.  $I_{abc\_B2}$  (pu) - trifazė kintamoji srovės santykiniais vienetais šynoje B2, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.
5.  $U_{f\_abc}$  (pu) - trifazė kintamosios srovės įtampa ties tinklo filtro šyna, santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.
6.  $I_{v\_abc}$  (pu) - trifazė kintamoji srovė prie keitiklių pastotės, santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.

Trečiuoju atveju buvo siekiama nustatyti, kas nutinka aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemoje įvykus trifaziam trumpajam jungimui vėjo elektrinių parko pusėje (tarp keitiklių pastotės 1 ir vėjo elektrinių parko (200 x 2 MW)). Taigi iš gautų tyrimo charakteristikų pateiktų pav. 7.7 galima pastebėti, kad įvykus trifaziam trumpajam jungimui laiko tarpu nuo  $t_1 = 2.16$  s iki  $t_2 = 2.24$  s, sistema grįžta į stabilų darbo režimą po  $0.36$  s laiko momentu  $t_s = 2.6$  s.



7.7 pav. Vėjo elektrinių parko pusėje esančio elektros tinklo dalies tyrimo rezultatų charakteristikos įvykus trifaziam trumpajam jungimui.

1.  $V_{dc} PN(V)$  - nuolatinės srovės teigiamo ir neigiamo poliaus įtampa, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.
2.  $P_{meas} (pu)$  - vidutinė kintamosios srovės aktyvioji galia santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.
3.  $U_{abc\_B1} (pu)$  - trifazė kintamosios srovės įtampa santykiniais vienetais šynoje B1, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.
4.  $I_{abc\_B1} (pu)$  - trifazė kintamoji srovės santykiniais vienetais šynoje B1, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.
5.  $U_{f\_abc} (pu)$  - trifazė kintamosios srovės įtampa ties tinklo filtro šyna, santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.
6.  $I_{v\_abc} (pu)$  - trifazė kintamoji srovė prie keitiklių pastotės, santykiniais vienetais, po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.

## IŠVADOS

„*Matlab/Simulink*“ programiniame pakete sumodeliuota ir iširta aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema jungianti 400 MW galios vėjo elektrinių parką su kintamosios srovės elektros tinklo ekvivalentu.

Buvo iširti trys atvejai:

1. Pirmojo tyrimo atveju buvo siekiama nustatyti laiko momentą kuomet aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema pasieks stabilų darbo režimą.
2. Antruoju tyrimo atveju buvo siekiama nustatyti laiko momentą kuomet aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema pasieks stabilų darbo režimą po trifazio trumpojo jungimo elektros tinklo pusėje.
3. Trečiuoju tyrimo atveju buvo siekiama nustatyti laiko momentą kuomet aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema pasieks stabilų darbo režimą po trifazio trumpojo jungimo vėjo elektrinių parko pusėje.

Gautuose tyrimo rezultatuose galima pastebėti, kad pirmuoju tyrimo atveju aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema pasiekia stabilų darbo režimą praėjus  $t = 0.8$  s. Antruoju tyrimo atveju įvykus trifaziam trumpajam jungimui laiko tarpe  $t_1 = 2$  s iki  $t_2 = 2.1$  s, sistema grįžta į stabilų darbo režimą po 0.4 s, laiko momentu  $t_s = 2.4$  s ir trečiuoju atveju įvykus trifaziam trumpajam jungimui laiko tarpu nuo  $t_1 = 2.16$  s iki  $t_2 = 2.24$  s, sistema grįžta į stabilų darbo režimą po 0.36 s, laiko momentu  $t_s = 2.6$  s.

Taigi atlikęs AĮNS sistemos modeliavimą „*Matlab/Simulink*“ aplinkoje, visais tyrimų atvejais sistema labai greitai po gedimo pradeda veikti stabiliai. Todėl galima teigti, kad IŠK-AĮNS sistema yra tinkama perduoti elektros energiją iš jūrinio vėjo elektrinių parko.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Ackerman, T. 2012. Wind Power in Power Systems. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 293-327.
2. Anaya-Lara, O., et al. 2014. Offshore Wind Energy Generation Control, Protection, and Integration to Electrical Systems. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 113-153.
3. Belickas, V., et al. 2010. *400 kV elektros energijos perdavimo oro linijos nuo Alytaus transformatorių pastotės iki Lietuvos – Lenkijos Respublikų valstybinės sienos statybos ir eksploatacijos poveikio aplinkai vertinimas. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita. Knyga L – 1* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017 m. gegužės 17 d.]. Prieiga per internetą <[http://www.litpollink.com/assets/documentsLT/2010\\_12\\_02\\_Litpollink\\_PAV\\_ataskaita\\_L-1.pdf](http://www.litpollink.com/assets/documentsLT/2010_12_02_Litpollink_PAV_ataskaita_L-1.pdf)>.
4. Blažauskas, N; Wlodarski, M; Paulauskas, S. 2013. Jūros vėjo energetikos plėtros perspektyvos pietryčių Baltijoje [interaktyvus]. Klaipėda [žiūrėta 2017 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.southbaltic-offshore.eu/news/imgs-media/SBO\\_Manual\\_for\\_investors\\_LT.pdf](http://www.southbaltic-offshore.eu/news/imgs-media/SBO_Manual_for_investors_LT.pdf)>.
5. Grigsby, L. L. 2012. Electric Power Generation, Transmission, and Distribution Third Edition. Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 22(1)-22(19).
6. Hertem, van D.; Gomis-Bellmunt, O.; Liang, J. 2016. HVDC GRIDS For Offshore and Supergrid of the Future. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 45-109.
7. Jovicic, D.; Ahmed, K. 2015. High Voltage Direct Current Transmission Converters, Systems and DC Grids. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 23-34.
8. Khatir, M., et al. (2010). Dynamic Performance of A Back-to-Back HVDC Station Based on Voltage Source Converters, *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 61, NO. 1*: 29-36.
9. Kuntautas, A. 2013. Aukštos įtampos nuolatinės srovės technologijos ir jų taikymo galimybės Lietuvos elektros energetikoje, *Profesinės studijos: teorija ir praktika, mokslinių straipsnių žurnalas* 2013 / 12: 159-166.
10. *Linijos reaktorius*. [interaktyvus]. IE\_Automatika [žiūrėta 2017 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ieautomatika.lt/variklio-paleidejai/daznio-keitikliu/linijos-reaktorius>>.
11. Lisauskas S. 2012. Šiuolaikinės elektros pavaros: mokomoji knyga. Kaunas: UAB TEV, 10-18, 22-28.
12. Petrauskas G.; Adomavičius V. 2012. Vėjo energijos naudojimas elektrai gaminti: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 102-135.
13. Platakis, A; Bleizgys, V; Lipinskis, T. 2011. Išėjimo filtro tyrimas vienfazio inverterio sinusinei įtampai formuoti, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2011 3(1): 68-72.

14. Starkus, B. 2003. Galios elektronika. Kaunas: Technologija, 19-21.
15. Udris, D. 2008. Elektroniniai galios keitikliai: mokomoji knyga. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 8-26.
16. *VSC-Based HVDC Link*. [interaktyvus]. The MathWorks, Inc [žiūrėta 2017 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: <[https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/vsc-based-hvdc-link.html?s\\_tid=gn\\_loc\\_drop](https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/vsc-based-hvdc-link.html?s_tid=gn_loc_drop)>.