



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

ALUTAGUSE ALAJAAMA KONDENSAATORSEADMED REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSEERIMISEKS

**Alutaguse substation capacitor equipment for reactive power
compensation**

MASINAEHITUS- JA ENERGIATEHNOLOOGIA PROTSESSIDE JUHTIMISE
ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Jevgeni Pistrailov

Üliõpilaskood: 193248EDJR

Juhendaja: Tatjana Baraškova,
vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"...." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

"...." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"...." 20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS

Mina Jevgeni Pistrailov (sünnikuupäev: 14.01.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Alutaguse alajaama kondensaatorseadmed reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks“, mille juhendaja on Tatjana Baraškova,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jevgeni Pistrailov, 193248EDJR

Õppekava, peeriala: EDJR16/17 - Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine, energiatehnika

Juhendaja(d): vanemlektor, Tatjana Baraškova, tatjana.baraskova@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Alutaguse alajaama kondensaatorseadmed reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks

(inglise keeles) Alutaguse substation capacitor equipment for reactive power compensation

Lõputöö põhieesmärgid:

- Alajaama kondensaatorseadmete tehniliste ja eksploatatsiooniliste aspektide analüüs.
- Analüüsida seadme komponente ja kondensaatoreid.
- Hinnata reaktiivvõimsuse näitajaid enne ja pärast seadme kasutuselevõttu.
- Hinnata seadme efektiivsust ja selle mõju alajaama üldtoole.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tutvumine kondensaatorseadmega ja selle uurimine.	10.03.24
2.	Andmete kogumine ja nende põhjalik analüüs.	31.03.24
3.	Andmete töötlemine. Kompenseerimisseade modelleerimine.	14.04.24
4.	Lõputöö vormistamine.	31.04.24

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "20" mai 2024a

Üliõpilane: Jevgeni Pistrailov

/allkiri/

“20” mai 2024a

Juhendaja: Tatjana Baraškova

/allkiri/

“20” mai 2024a

Programmijuht: Veroonika Širokova

/allkiri

“20” mai 2024a

SISUKORD

SISSEJUHATUS	8
2 REAKTIIVVÕIMSUS. SÕLTUVUS PINGEST. MEETODID MÕÕTMISEKS JA KOMPENSEERIMISEKS.	9
2.1 Reaktiivvõimsus	9
2.2 Reaktiivvõimsuse sõltuvus pingest	9
2.3 Reaktiivvõimsuse mõõtmise meetodid ja lähenemisviisid	10
2.3.1 Simulatsioonimudelid	10
2.3.2 Regressioonimudelid	10
2.3.3 Tehisintellekt	10
2.3.4 Tõenäosuslik-statistiline meetod	11
2.4 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise meetodid	11
2.4.1 Staatiline kompenseerimine	11
2.4.2 Dünaamiline kompenseerimine	11
2.4.3 Pooljuhtseadmete kasutamine (FACTS)	12
3 TEHNILISED ANDMED JA SEADME KIRJELDUS	13
3.1 Reaktiivvõimsuse kompensaator ACB-6,3	13
3.1.1 Tehnilised karakteristikud	13
3.1.2 Koostis ja struktuur	14
3.1.3 Sektsioonide juhtimis- ja indikaatorsüsteemi skeem	15
4 KOMPENSEERIMISSEADE ANDMETE ANALÜÜS	16
4.1 Sektsiooni andmete analüüs	16
4.2 Reaktiivvõimsuse tarbimine ja võrku andmine	17
4.3 Aasta tarbimise võrdlus	20
4.4 Kondensaatori mahtuvuse arvutamine	21
4.5 Kompenseerimisseade modelleerimine	21
4.6 Võimsusteguri ($\cos \varphi$) arvutamine	23

KOKKUVÕTE	25
SUMMARY	26
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	28
LISA 1 KONDENSAATORISEKTSIOONID	29
LISA 2 KONDENSAATORPATAREI JUHTIMISKILP	30
LISA 3 KONDENSAATORPATAREI JUHTIMISEKRAAN	31
LISA 4 KONDENSAATORISEADE KAMBER	32
LISA 5 SEKTSIOONIDE JUHTIMIS- JA INDIKAATORSÜSTEEMI SKEEM	33

SISSEJUHATUS

Kaasaegses tööstuses on elektrienergia aktiivne kasutamine lahutamatult seotud selle kvaliteetse ja tõhusa jaotamise vajadusega. Üks peamisi aspekte selles protsessis on reaktiivvõimsuse kompenseerimine, mis mõjutab oluliselt elektrivarustuse efektiivsust ja energiasüsteemide stabiilsust. Reaktiivvõimsus, mis ei tee kasulikku tööd, koormab siiski elektrivõrke, põhjustades elektrienergia kadusid ja vähendades energiasüsteemide kasutegurit.

Alutaguse alajaam, mis asub kaevanduse "Estonia" territooriumil, on varustatud kondensaatorseadmetega, mis on olnud kasutusel juba üle aasta ja tagavad vajaliku elektrivarustuse kõigile kaevanduse osadele. Selles alajaamas on aktuaalseks ülesandeks elektrienergia kasutamise protsesside optimeerimine, eriti läbi reaktiivvõimsuse kompenseerimissüsteemide rakendamise.

Käesolev töö keskendub Alutaguse alajaamas paigaldatud kondensaatorseadmele, mis on ette nähtud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Uuringu peamine eesmärk on analüüsida seadme komponente ja kasutatavaid kondensaatoreid ning hinnata reaktiivvõimsuse näitajaid enne ja pärast seadme kasutuselevõttu.

Töö pöörab tähelepanu kondensaatorseadmete tehnilistele ja ekspluatatsioonilistele aspektidele tööstusalajaama tingimustes, mis võimaldab mitte ainult tuvastada selliste süsteemide praktilist efektiivsust, vaid ka hinnata nende mõju alajaama üldisele tööle. Uuringu tulemused võivad aidata suurendada energiatõhusust ja elektrivarustuse usaldusväärsust, mis on oluline panus kaevanduse energiataristu stabiilsuse tagamisse.

Uuring põhineb alajaamas kogutud andmetel ning kondensaatorseadmete toimimise teoreetilistel alustel, mis võimaldab läbi viia põhjaliku analüüsi paigaldatud süsteemide mõju kohta reaktiivvõimsuse parameetritele.

Märksõnad: Alutaguse alajaam, reaktiivvõimsus, reaktiivvõimsuse kompenseerimine, kondensaatorseadmed, diplomitöö.

1 REAKTIIVVÕIMSUS. SÕLTUVUS PINGEST. MEETODID MÕÕTMISEKS JA KOMPENSEERIMISEKS.

See osa sisaldab nii reaktiivvõimsuse teoreetilist alust kui ka selle kompenseerimise erinevate meetodite põhjalikku analüüsi.

1.1 Reaktiivvõimsus

Reaktiivvõimsus vahelduvvoolu süsteemides on täisvõimsuse komponent, mis ei tee tegelikku tööd, kuid on vajalik elektromagnetväljade säilitamiseks induktiivsetes ja mahtvuslikes elementides elektrivõrgus. Reaktiivvõimsuse genereerimine on vajalik kaode kompenseerimiseks, mida põhjustavad induktiivsed koormused, mis esinevad enamikus elektrivõrkudes. Need koormused hõlmavad elemente nagu transformaatorid ja elektrimootorid, mis tarbivad reaktiivvõimsust, põhjustades pingekvaliteedi langust ja süsteemi kahjude suurenemist. Reaktiivvõimsuse genereerimine aitab tasakaalustada neid kaosi ja hoida pinget normatiivsete nõuete piires.[1:9-10] Reaktiivvõimsuse liig või puudus võib viia süsteemi ebaefektiivse tööni ja isegi avariideni. Liig põhjustab ülekandeliinide otstes pingetõusu, mis võib esile kutsuda ülepingeid ja seadmete kahjustusi. Puudus toob kaasa pingelanguse, mis võib muuta elektriseadmete normaalse töö võimatuks.[2:628]

Kompenseerimine on vajalik süsteemi toimivuse optimeerimiseks ja energiakadude minimeerimiseks. See saavutatakse kondensaatorite ja reaktorite kasutamise kaudu, mis aitavad faasinihkeid voolu ja pinget vahel tasakaalustada, parandades seeläbi süsteemi võimsustegurit. Võimsustegur ($\cos \varphi$) on elektrienergia kasutamise efektiivsuse mõõt, ja selle parandamine viib elektrivõrgu kaotuste vähenemiseni ja vähendab elektrienergia kulusid lõppkasutajatele.[3:38]

1.2 Reaktiivvõimsuse sõltuvus pingest

Eksperimentaalne uurimus aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimise sõltuvusest pinget tasemest näitas, et pingetõusuga üle nimiväärtuse suureneb märkimisväärselt mõlema tüüpi võimsuse tarbimine. See efekt on eriti väljendunud reaktiivvõimsuse puhul, mis on seotud elektriseadmete, nagu mootorite ja transformaatorite, mittelineaarsete magnetiliste omadustega. See näitab, et materjalide mittelineaarsed omadused süvendavad pingetõusu reaktiivsele tarbimisele, mis võib viia täiendavate rahaliste ja energiakulude suurenemiseni tööstusrajatistes.[4:35-37]

Analüüs kinnitab, et pingetaset tuleb hoida optimaalses vahemikus, et minimeerida võimsuskadusid ja parandada üldist energiatarbimise efektiivsust. Sellega seoses võib pingeregulatsiooni ja elektri kvaliteedi kontrollsüsteemide kasutuselevõtt olla oluline

samm energiasüsteemide tootlikkuse optimeerimise ja elektriseadmete kasutusaja pikendamise suunas.[4:35-37]

Lisaks viitavad uurimistulemused võimalusele vähendada energiakulusid ja vähendada avariide tõenäosust täpse pinge reguleerimise kaudu, mis omakorda mõjutab positiivselt tootmisprotsesside majanduslikku efektiivsust.[4:35-37]

Seega mitte ainult ei aita pinge taseme juhtimine suurendada elektrivõrkude töökindlust ja stabiilsust, vaid on ka oluline tegur tööstusettevõtete energiatõhususe tõstmisel.[4:35-37]

1.3 Reaktiivvõimsuse mõõtmise meetodid ja lähenemisviisid

Elektrienergeetikasüsteemides võimsuskadude analüüsimisel tuleks erilist tähelepanu pöörata reaktiivvõimsuse mõõtmisele, mis on võtmetähtsusega alajaamade töö optimeerimiseks ja energiaedastuse efektiivsuse parandamiseks. Vastavalt uurimusele [5] saab autor kirjeldada 4 prognoosimismeetodit.

1.3.1 Simulatsioonimudelid

Simulatsioonimudelid esindavad protsessi, kus luuakse arvutimudel süsteemist või protsessist, mis võimaldab läbi viia katseid virtuaalses keskkonnas ja hinnata erinevate tegevusstsenaariumide võimalikke tulemusi. Reaktiivvõimsuse mõõtmise kontekstis aitab simulatsioonimudel analüüsida, kuidas erinevad muutused võrgus, nagu koormuste kõikumised või võrgu konfiguratsiooni muutused, mõjutavad reaktiivvõimsust. See meetod võimaldab uurijatel ennustada erinevate insenerilahenduste tagajärgi, optimeerida süsteemide tööd ja minimeerida kaotusi.[5:19-20]

1.3.2 Regressioonimudelid

Regressioonianalüüs on statistiline meetod sõltuva muutuja ja ühe või mitme sõltumatu muutuja vaheliste seoste uurimiseks. Reaktiivvõimsuse kontekstis võivad regressioonimudelid olla kasutusel selleks, et määrata, kuidas sellised tegurid nagu aktiivvõimsuse tarbimine või võrgu parameetrid korreleeruvad reaktiivvõimsuse muutustega. Need mudelid aitavad kindlaks teha põhjuslikke seoseid ja ennustada tulevikus reaktiivvõimsuse muutusi praeguste andmete põhjal.[5:19-22]

1.3.3 Tehisintellekt

Tehisintellekt on informatsiooni töötlemise süsteemid. Reaktiivvõimsuse mõõtmise kontekstis võib tehisintellekt analüüsida suuri andmemahatusid energia tarbimise kohta, et tuvastada keerukaid mustreid ja trende. Tehisintellekti kasutamine võimaldab teha

täpseid ennustusi reaktiivvõimsuse kohta reaalajas, mis on kriitilise tähtsusega kaasaegsete elektrienergia süsteemide juhtimisel, millel on kõrge muutlikkus.[5:25-29]

1.3.4 Tõenäosuslik-statistiline meetod

Tõenäosuslik-statistilist meetodit kasutatakse andmete analüüsimiseks ja töötlemiseks, kus esineb ebakindluse või juhuslikkuse element. Reaktiivvõimsuse mõõtmise kontekstis võib see meetod olla kasutusel reaktiivvõimsuse teatud tasemete esinemise tõenäosuse hindamiseks erinevate võrgu kasutustingimuste mõjul. Selline lähenemine võimaldab mitte ainult mõõta reaktiivvõimsust, vaid ka hinnata sellega seotud riske, mis aitab kaasa põhjendatud juhtimisotsuste tegemisele.[5:20-22]

1.4 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise meetodid

1.4.1 Staatiline kompenseerimine

Reaktiivvõimsuse staatiline kompenseerimine on üks peamisi meetodeid võimsusteguri parandamiseks elektrivõrkudes. See tagab tõhusa reaktiivvõimsuse osa vähendamise tarbitavas võimsuses, mis viib kaotuste vähenemiseni liinides, pinge kvaliteedi paranemiseni ja energiatranspordi kulude vähendamiseni. [6:679-717]

Staatilise kompenseerimise rakendamisel kasutatakse peamiselt kahte tüüpi seadmeid: kondensaatoripatareisid ja sünkroonseid kondensaatoreid. [6:679-717]

Kondensaatoripatareisid paigaldatakse koormusega paralleelselt ning nende peamine ülesanne on genereerida juhtivat voolu, mis kompenseerib võrgu induktiivsete komponentide, nagu mootorid ja transformaatorid, poolt tekitatud hilinenud reaktiivvoolu. Selline tasakaalustamine aitab vähendada süsteemi üldist reaktiivvõimsust ja tõsta võimsustegurit, mis on oluline elektrisüsteemide efektiivsuse ja stabiilsuse tagamiseks. [6:679-717]

Teisalt sünkroonsed kondensaatorid, mis on spetsialiseeritud sünkroonmasinad töötavad besstokoormuse režiimis, pakuvad täiendavaid võimalusi reaktiivvõimsuse juhtimiseks. Need seadmed suudavad mitte ainult genereerida või absorbeerida reaktiivvõimsust sõltuvalt süsteemi vajadustest, vaid on ka võimelised osalema võrgu pinge reguleerimises, tagades sellega suurema kontrolli ja paindlikkuse võrgu haldamisel. [6:679-717]

1.4.2 Dünaamiline kompenseerimine

Dünaamiline kompenseerimine hõlmab kõrgtehnoloogiliste lahenduste kasutamist reaktiivvõimsuse adaptiivseks reguleerimiseks ja juhtimiseks reaalajas. Need meetodid on eriti olulised elektrivõrkudes, kus on kõrge koormuste varieeruvus või oluline panus taastuvatest energiaallikatest. Raamatus [7] käsitletakse üksikasjalikult erinevaid seadmeid ja süsteeme, mida kasutatakse dünaamiliseks kompensatsiooniks

Üheks peamiseks seadmeks, mida kasutatakse dünaamiliseks kompensatsiooniks, on STATCOM (Static Synchronous Compensator). STATCOM kasutab jõuelektroonikat reaktiivvõimsuse genereerimiseks või tarbimiseks, mis võimaldab kiiresti korrigeerida võrgu parameetreid ja säilitada pinget stabiilsust. STATCOMi eristavaks omaduseks on selle võime hoida võrgus pidevat pinget isegi koormuse muutudes, mis on süsteemi stabiilsuse jaoks kriitilise tähtsusega. STATCOM on efektiivne olukordades, kus on vajalik kiire reageerimine elektrivõrgu muutustele, näiteks järskude koormuse kõikumiste korral taastuenergia tootmisest. Selliste dünaamiliste seadmete kasutamine on oluline samm võrgu stabiilsuse tagamiseks, eriti kui arvestada võrgu kompleksust ja muutuvaid nõudmisi.[7:420-428]

Dünaamiline kompenseerimine hõlmab ka tehnoloogiaid reaajas pinget reguleerimiseks, nagu dünaamilised pinget regulaatorid ja kiire pinget reguleerimise seadmed (Fast Voltage Regulation). Need süsteemid suudavad koheselt reageerida võrgumuutustele, tagades stabiilsuse ja ennetades võimalikke katkestusi energiavarustuses.[7:447-448]

1.4.3 Pooljuhtseadmete kasutamine (FACTS)

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) hõlmavad mitmesuguseid pooljuhtseadmeid, mis on mõeldud suurendama kontrollitavust ja edastusvõimsust vahelduvvoolusüsteemides. Peamised tehnoloogiad sisaldavad:

- SVC (Static Var Compensators) ja STATCOM (Static Synchronous Compensators) pinget ja reaktiivvõimsuse juhtimiseks.
- Türistoriga juhitavad seadmed, nagu TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitors), mis reguleerivad liini impedantsi, parandades seeläbi selle läbilaskevõimet.
- Integreeritud juhtimisseadmed, nagu UPFC (Unified Power Flow Controller) ja IPFC (Interline Power Flow Controller), mis võimaldavad samaaegselt kontrollida pinget, faasinurki ja võimsust.

FACTS mängivad olulist rolli elektrienergia ülekande usaldusväärsuse ja tõhususe parandamisel. Nad võimaldavad:

- Parandada pinget kvaliteeti kogu võrgus, vältides pinget langusi ja parandades süsteemi stabiilsust.
- Optimeerida võimsusvooge, mis aitab vähendada kadusid ja parandada üldist ülekandesüsteemi tõhusust.
- Suurendada elektrienergeetiliste süsteemide juhtimise paindlikkust, mis on kriitilise tähtsusega taastuenergiaallikate integreerimisel ja stabiilse töö tagamisel kõrge koormuste varieeruvuse tingimustes.[8:16-25]

2 TEHNILISED ANDMED JA SEADME KIRJELDUS

2.1 Reaktiivvõimsuse kompensator ACB-6,3

ACB-6,3 on mõeldud tööstusobjektide ja teiste 6,3 kV ning 10 kV pingega ja 50 Hz sagedusega elektrivõrkude võimsusteguri ($\cos \varphi$) suurendamiseks reaktiivvõimsuse kompenseerimise teel.

ACB-6,3 tagab:

- kondensaatori seadme sisselülitamine/väljalülitamine välise kõrgepinge lüliti abil;
- kaitse nimivoolu ületamise eest;
- kaitse kondensaatorite nimisurve ületamise eest;
- kaitse juurdepääsu eest pingestatud voolujuhtivatele osadele;
- kaitsete käivitamisel avarii signaali.

2.1.1 Tehnilised karakteristikud

Põhilised tehnilised näitajad on toodud tabelis.

No	Parameetrite nimetus	Suurus
1.	Tähistus	ACB-6,3-x-x
2.	Automaatika aste	Reguleeritav
3.	Sisendi tüüp	Kaabelsisestus
4.	Voolu tüüp	Vahelduvvool, kolmefaasiline
5.	Nominaalpinge, kV	6,3
6.	Sagedus, Hz	50
7.	Nominaalvõimsus, kVAr	1200kVAr
8.	Abiahelate toitepinge, V	220 50Hz
9.	Kaitseaste vastavalt IEC 60529 (ГОСТ 14254)	IP55
10.	Elektrodünaamilise taluvusvool, kA	31,5
11.	Termiline taluvusvool 1s vältuses, kA	12,5

2.1.2 Koostis ja struktuur

Konstruktiivselt ACB-6,3 koosneb neljast kondensaatorikambrist või -seksioonist (vaata Lisa 1). Kambrid kujutlevad korpus metallkappidega, mille sees asuvad põhi- ja abiahelate seadmed. Kambritele pääseb ligi fassaadi poolsete uste kaudu. Sisendkambrile on paigutatud võimsuse kontrollid, ohulambid, mis annavad märku kaitseühenduste läbipõlemisest ja kondensaatori rõhu ületamisest ning töörežiimist, ning kappi sees asub juhtimisese. Põhilattid on isoleerimata, kõik ülejäänud isoleeritud vahekuga.

Sisseehitatud seadmed kappides:

- C1 - C2, C3, C4 - kondensaatorid CPEFS-23-6,6(250;500;750;1000);
- FU1-FU3 - BPS-01 koos kaitseautomaatidega 40A, 80A, 100A, 160A;\
- Vaakumkontaktor LVC-6Z-44.
- Reaktor 3TLV100;
- Signaaliseadmete komponendid:
 - VL6 – signalisatsiooni kontrollid;
 - H4-H6 – valgussignalisatsiooni indikaatorid AD22-22DS;
 - S8 – lähtestusnupp;
 - X1-11 – klemmplokk.

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise seade juhitakse automaatrežiimis. Seejuures juhitakse kondensaatorpatareisid kontrolleri A1 abil (vaata Lisa 2 ja 3), mis valib koormusest sõltuvalt optimaalse töörežiimi. Nendel ustel asuvad ka signaallambid, mis teavitavad kondensaatorite avariirežiimidest. Üks lamp aktiveerub kui kaitse läbipõleb, teine kui kondensaatori rõhk tõuseb. Alarmi korral lülitub defektne aste välja (vaakumkontaktori väljalülitamine). Kontaktori sisselülitamine on võimalik pärast rikke põhjuse kõrvaldamist.

Sisendkambris on all ette nähtud kaablite sisseviik kuni 120 mm² ristlõikega kaasa arvatud, ja kõikides kambrites on kondensaatorite ühendamiseks latt.

Sisseehitatud seadmed kondensaatoriseade kambris (vaata Lisa 4):

- C1 - kondensaator CPEFS-23-6,6(200;300);
- FU1-FU3 - BPS-01 koos CEF kaitseautomaatidega 50A;
- Vaakumkontaktor LVC-6Z-44;
- Reaktor 3TLV100.

Kondensaatori kambris on paigaldatud kolmefaasiline kondensaator. Kondensaatorite elektrodid on valmistatud alumiiniumfooliumist ja dielektrikuks on erilise vedelikuga immutatud polüpropüleenkile.

Igal kondensaatoril on sisseehitatud tühjendustakisti $U(10\text{min}) \leq 75\text{V}$ tühjendamiseks 10 min jooksul. ACB-6,3 kambrides on paigaldatud võrgud, mis takistavad juurdepääsu voolujuhivatele ahelatele.

Juhtimis-, mõõtmis- ja signalisatsiooni ahelad on teostatud vähemalt $1,5\text{mm}^2$ ristlõikega juhtmega. Juhtmete otsad on varustatud selgelt märgistatud lipikuga.

Paigaldus on jaotatud neljaks sektsiooniks, millest igaüks on ühendatud trafo lõhestatud sekundaarmähisega. See tähendab, et igal sektsioonide paaril (1 ja 3, 2 ja 4) on oma trafo, mis tagab nende toite.

2.1.3 Sektsioonide juhtimis- ja indikaatorsüsteemi skeem

Skeem (vaata Lisa 5) kujutab endast reaktiivvõimsuse kompenseerimise sektsioonide juhtimis- ja indikaatorsüsteemi. Toiteallikateks on kolmefaasiline vahelduvvoolusüsteem (400 V AC) ja ühefaasiline vahelduvvoolusüsteem (230 V AC). Kaitset vooluahelate ülekoormuse ja lühiste eest tagavad automaatkaitseülilitid (kaitseautomaadid) F1, F2, F3 ja F4. Juhtimine toimub kontaktorite KM1, KM2, KM3 ja KM4 abil, mille abikontaktid (KM1.1, KM2.1, KM3.1, KM4.1) juhivad valgusindikaatoreid HL1, HL2, HL3 ja HL4. Need indikaatorid näitavad vooluahelate olekut.

Diodid, mis on ühendatud kontaktorite mähistega paralleelselt, kaitsevad vastupingete eest. Toite sisselülitamine skeemile toimub automaatkaitseülilitite F1-F4 kaudu, mis on ühendatud kontaktorite mähistega. Automaatkaitseülilitite sulgemisel läbib vool kontaktori mähist, sulgedes selle peamised kontaktid (D01-D04). Kui kontaktor on sisse lülitatud, süttib vastav valgusindikaator, näidates, et vooluahel on aktiivne.

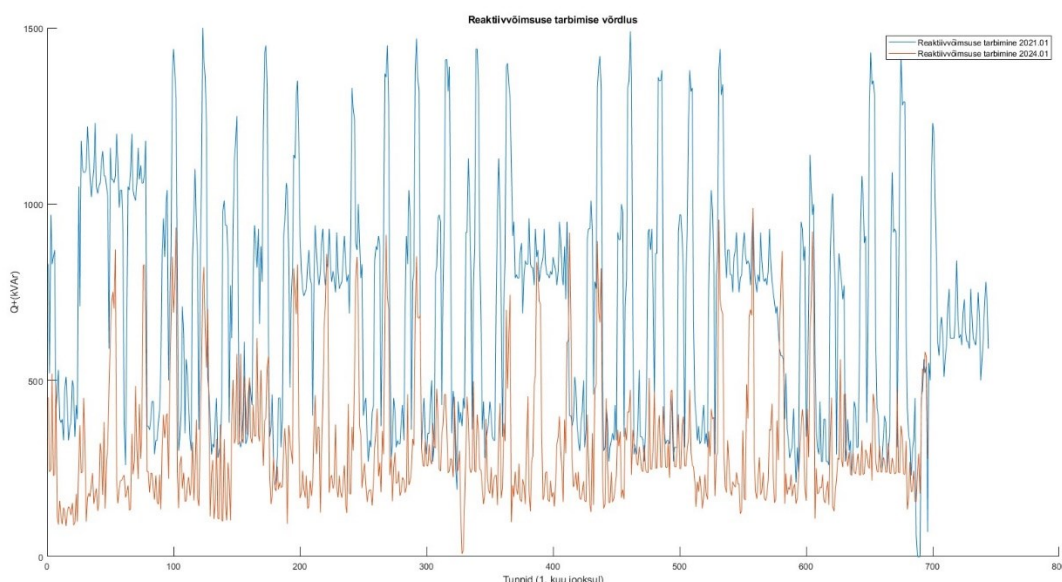
Kontaktorite peamised kontaktid (D01-D04) sulguvad, ühendades kompenseerivad kondensaatorid (CC) koormusega (R1), tagades seega reaktiivvõimsuse kompenseerimise. Aja viited (VZb) võivad olla kasutusel kontaktorite sisselülitamise või väljalülitamise viivitamiseks, aidates vältida voolu- ja pingekõikumisi. Nii võimaldab skeem tõhusalt koormust hallata ja parandada süsteemi elektrienergia kvaliteeti.

3 KOMPENSEERIMISSEADE ANDMETE ANALÜÜS

Selles peatükis autor võrdleb andmeid 2021. aastast (enne kompenseerimiseseadme paigaldamist) ja 2024. aastast (pärast seadme paigaldamist ja kasutuselevõttu). Analüüs keskendub reaktiivvõimsuse tarbimisele, et hinnata kompenseerimiseseadme mõju süsteemi jõudlusele ja energia kvaliteedile. Samuti on esitatud kompenseerimiseseadme mudel, mis aitab visualiseerida seadme toimimist.

3.1 Sektsiooni andmete analüüs

Graafikul 3.1 on toodud reaktiivvõimsuse (Q) tarbimise võrdlus teise sektsiooni jaoks aastatel 2021 ja 2024. Y-telg näitab reaktiivvõimsust kVAR-ides ja X-telg näitab tunde aasta esimese kuu jooksul.



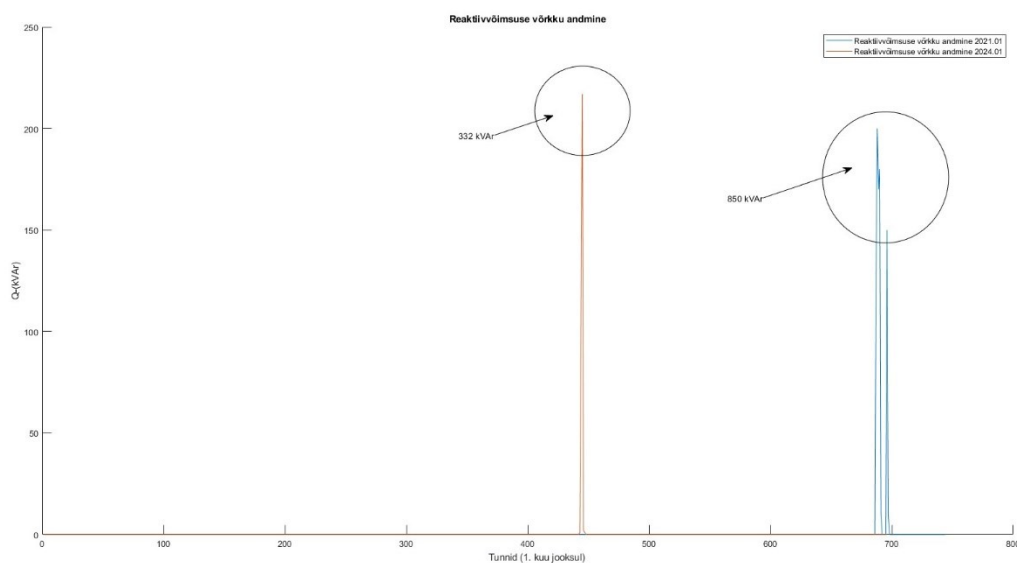
Graafik 3.1. Teise sektsiooni reaktiivvõimsuse tarbimise võrdlus 2021 ja 2024 aastatel

Graafik võimaldab visuaalselt võrrelda reaktiivvõimsuse tarbimise muutusi enne ja pärast seadmete paigaldamist.

- Sinine joon näitab reaktiivvõimsuse tarbimist 2021. aastal (enne kompenseerivate seadmete paigaldamist).
- Oranž joon näitab reaktiivvõimsuse tarbimist 2024. aastal (pärast kompenseerivate seadmete paigaldamist).

On näha, et 2024. aastal on reaktiivvõimsuse tarbimine oluliselt vähenenud, mis viitab kompenseerivate seadmete tõhususele.

Graafikul 3.2 on näidatud reaktiivvõimsuse võrku andmise võrdlus sama sektsioonis aastatel 2021 ja 2024 jaanuaris.



Graafik 3.2 Teise sektsiooni reaktiivvõimsuse võrku andmise võrdlus 2021 ja 2024 aastatel

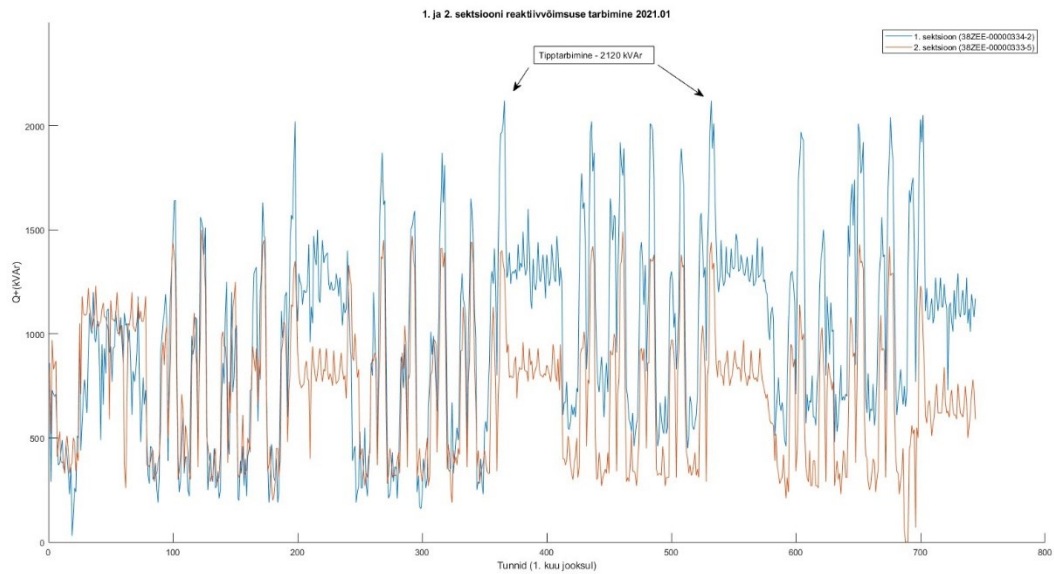
Saab järeldada, et:

- 2021. aastal täheldatakse reaktiivvõimsuse edastamise tippväärtusi, mis ulatuvad kuni 850 kVAr, samas kui 2024. aastal on tippväärtused oluliselt madalamad, umbes 332 kVAr.
- 2021. aastal on reaktiivvõimsuse üldine võrku andmine suurem, mis näitab suuremat koormust võrgule, samas kui 2024. aastal on see oluliselt madalam.
- Võimsuse edastamise tippude sagedus ja suurus 2024. aastal vähenevad.
- Keskmise reaktiivvõimsuse edastamine on 2021. aastal kõrgem võrreldes 2024. aastaga.

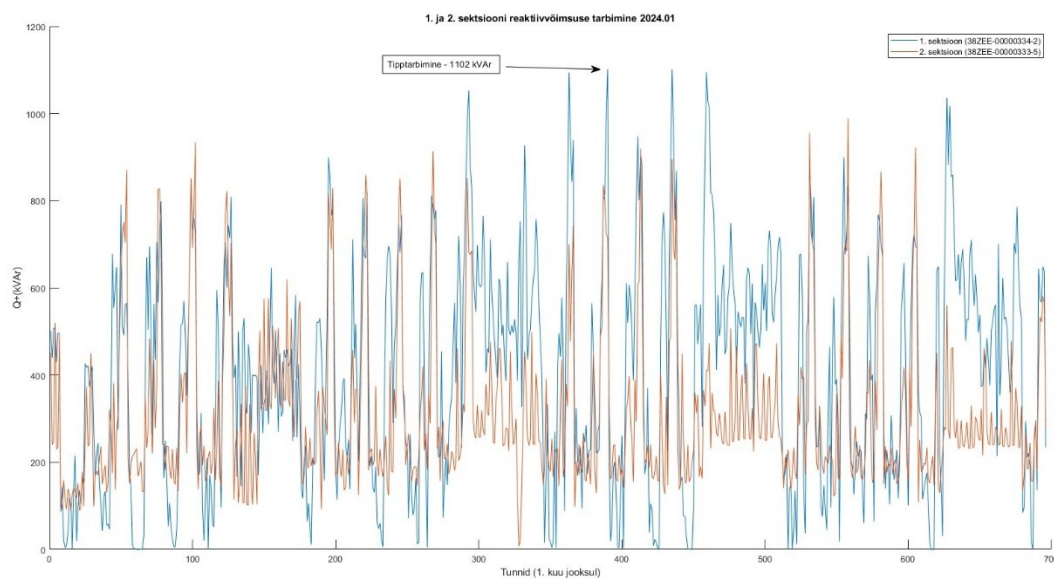
Järelikult, graafik näitab reaktiivvõimsuse edastamise vähenemist võrku pärast kompenseerivate seadmete paigaldamist. Vähenenud reaktiivvõimsuse edastamine 2024. aastal viitab energiatõhususe optimeerimisele, mis võib kaasa tuua elektrienergia kulude vähenemise ja reaktiivvõimsuse eest energiatarnijalt saadavate trahvide vähenemise.

3.2 Reaktiivvõimsuse tarbimine ja võrku andmine

Vaatleme kahte graafikut, mis näitavad reaktiivvõimsuse tarbimist 1. ja 2. sektsioonis ühe kuu jooksul - jaanuaris, kuid erinevatel aastatel: 2021 ja 2024.



Graafik 3.3 1. ja 2. sektiooni reaktiivvõimsuse tarbimine (jaanur 2021)



Graafik 3.4 1. ja 2. Sektsiooni reaktiivvõimsuse tarbimine (jaanuar 2024)

Jaauarikuu tarbimine 2021. aastal:

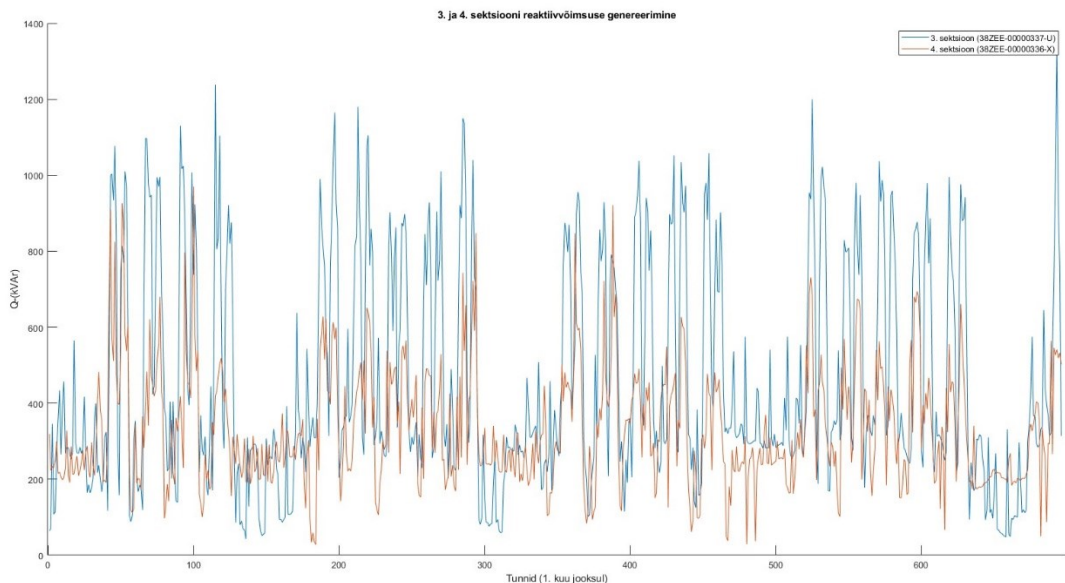
- Tipprbimine: 2021. aastal ulatus reaktiivvõimsuse püsitarbimine mõlemas sektioonis kuni 2120 kVAr.
- Keskmine tarbimine: Kuu jooksul varieerus keskmine tarbimine vahemikus 500 kuni 1500 kVAr.
- Muutlikkus: Graafikud näitavad suurt muutlikkust sagedaste järskude tõusude ja langustega, mis viitab ebastabiilsele reaktiivvõimsuse tarbimisele.

Jaauarikuu tarbimine 2024. aastal:

- Tipptarbimine: 2024. aastal langes reaktiivvõimsuse püsitarbimine mõlemas sektsioonis kuni 1102 kVAr.
- Keskmine tarbimine: kuu jooksul vähenes keskmine tarbimine ja varieerus vahemikus 200 kuni 800 kVAr.
- Muutlikkus: Graafikud näitavad võrreldes 2021. aastaga väiksemat muutlikkust, mis viitab stabiilsemale ja paremini juhitavale reaktiivvõimsuse tarbimisele.

Reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmetiku paigaldamine märkimisväärselt parandab reaktiivvõimsuse tarbimise näitajaid 1. ja 2. sektsioonis. Tipptarbimine ja keskmine tarbimine oluliselt läksid alla ning tarbimise muutlikkus vähenes. Need muutused osutavad reaktiivvõimsuse tõhusale juhtimisele, mis suurendab energiatõhusust ja elektrivõrgu stabiilsust.

Vaatleme 3. ja 4. sektsiooni jaanuarikuus 2024. aastal. Graafik 3.5 näitab, et nii 3. kui ka 4. sektsioon annavad reaktiivvõimsust võrku. See tähendab, et nende sektsioonide kompenseerimisseadmed genereerivad ülemäära reaktiivvõimsust, mis ületab kohalike koormuste vajadused.



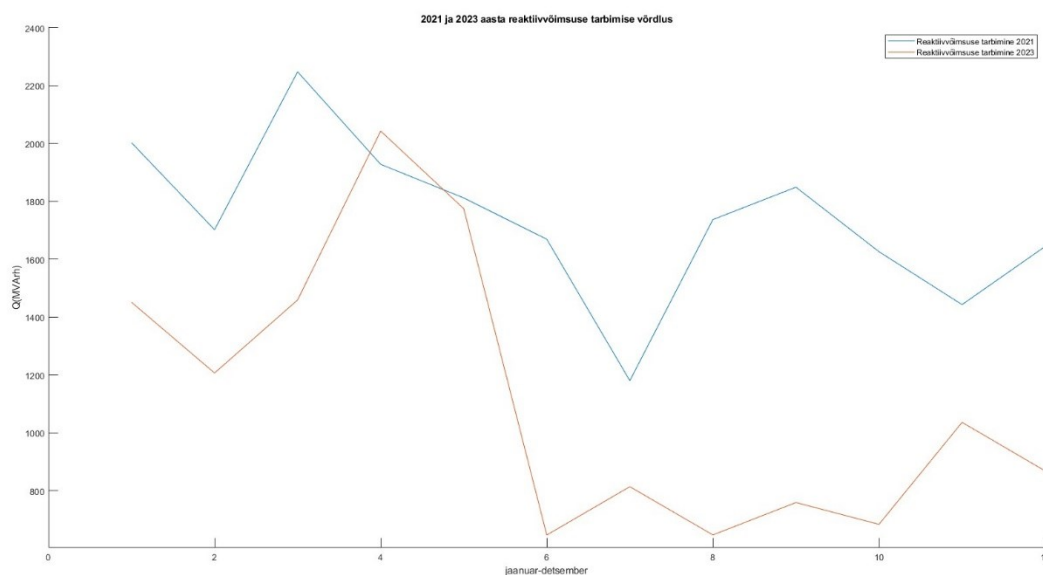
Graafik 3.5 Reaktiivvõimsuse võrku andmine 3. ja 4. sektsioon (jaanuar 2024)

Graafik kinnitab, et 3. ja 4. sektsioon kompenseerivad reaktiivvõimsust. See aitab säilitada süsteemis reaktiivvõimsuse üldist tasakaalu. Reaktiivvõimsuse võrku andmine aitab stabiliseerida pinget ja vähendada transformatorite ja elektriliinide koormust, mis parandab elektrivarustuse kvaliteeti. Tõhus reaktiivvõimsuse kompenseerimine vähendab elektriarveid ning kapitali- ja tegevuskulusid seadmete puhul.

Erinevalt 3. ja 4. sektsioonist ei anna 1. ja 2. sektsioon peaaegu üldse reaktiivvõimsust võrku, vaid tarbivad seda induktiivkoormuste tööks. See näitab, et nende sektsioonide ülesanded ja koormuste tüübid on erinevad

3.3 Aasta tarbimise võrdlus

Graafik näitab reaktiivvõimsuse kogutarbimise võrdlust 2021. ja 2023. aastaks, esitatuna kuude lõikes jaanuarist detsembrini.



Graafik 3.6 Reaktiivvõimsuse aasta tarbimise võrdlus (2021/2023 aastad)

On näha, et 2021. aastal oli reaktiivvõimsuse tarbimine märkimisväärselt kõrgem võrreldes 2023. aastaga. 2021. aasta alguses ulatus reaktiivvõimsuse tarbimine tippväärtusteni umbes 2200-2400 MVARh. Aasta jooksul esines märkimisväärsed kõikumisi, kuid üldine tase jäi kõrgeks, eriti jaanuaris ja kevadel, seejärel langes suvel ja tõusis taas sügisel.

2023. aastal oli reaktiivvõimsuse tarbimine oluliselt madalam. Aasta alguses oli tarbimine umbes 1400 MVARh ja see jätkas langust. Aasta keskel, suvekuudel, langes reaktiivvõimsuse tarbimine minimaalse väärtuseni umbes 800-900 MVARh, mis on oluliselt madalam kui 2021. aastal. Mõnel kuul langes tarbimine isegi alla 600 MVARh. Sellist reaktiivvõimsuse tarbimise märkimisväärselt vähenemist 2023. aastal saab seletada kompenseerimisseadmete paigaldamisega, mis tõhusalt vähendavad reaktiivvõimsuse tarbimist. Selle tulemusena olid 2023. aastal tarbimisväärtused madalamad ja stabiilsemad võrreldes 2021. aastaga.

Seega näitab graafik, et kompenseerimisseadmete paigaldamine 2023. aastal parandas märkimisväärselt reaktiivvõimsuse tarbimise näitajaid. Reaktiivvõimsuse tarbimine oli

võrreldes 2021. aastaga oluliselt madalam ja stabiilsem, mis viitab süsteemi energiatõhususe suurenemisele.

3.4 Kondensaatori mahtuvuse arvutamine

Kondensaatori mahtuvuse arvutamiseks kasutasin kahte valemit,

$$\frac{C \times U^2}{2} = E, \quad (3.1)$$

kus

C - kondensaatori mahtuvus, F;

U - pinge kondensaatoril, V;

E - kondensaatoris salvestatud energia, J;

$$E = Q \times t, \quad (3.2)$$

kus

Q - kondensaatoripatareide kogureaktiivvõimsus, VAR;

t - aeg, mõõdetakse sekundites (s);

Antud andmed:

$$Q = 10000 \text{ (kVAR)} = 10000 \times 10^3 \text{ (VAR)}$$

$$t = 12 \text{ (h)} = 43200 \text{ (s)};$$

$$U = 6,6 \text{ (kV)} = 6,6 \times 10^3 \text{ (V)};$$

Mahtuvuse arvutamine:

$$\frac{C \times (6,6 \times 10^3)^2}{2} = 10000 \times 10^3 \times 43200;$$

$$C = \frac{10000 \times 10^3 \times 43200}{(6,6 \times 10^3)^2};$$

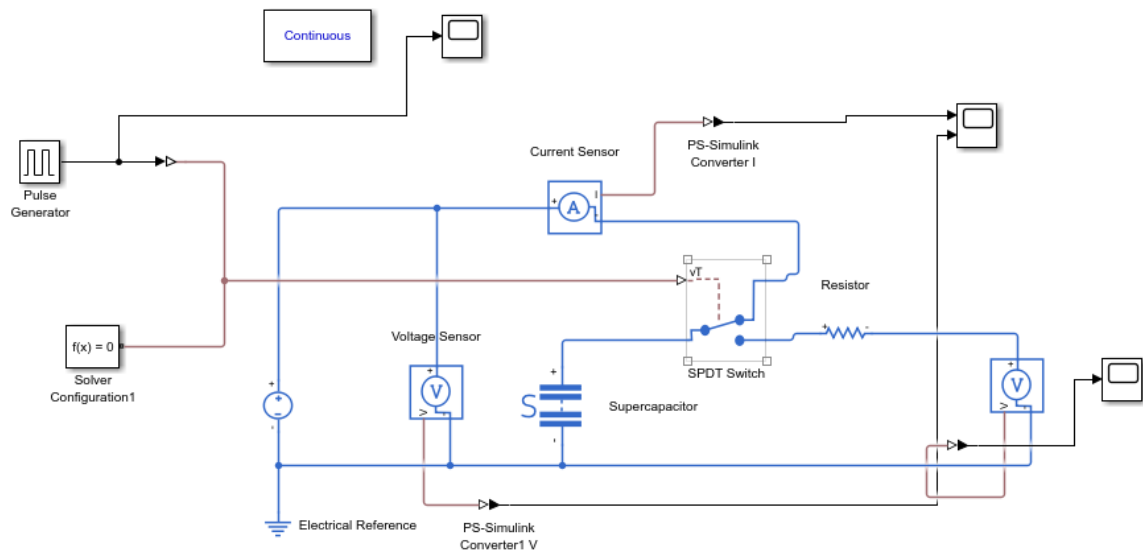
$$C = 99,174 \text{ (F)};$$

$$C = \frac{99,174}{4} = 24,79 \text{ (F)}; \text{ - Iga kondensaatori mahtuvus.}$$

3.5 Kompenseerimiseseade modelleerimine

See projekt kirjeldab superkondensaatori mudelit, mida kasutatakse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks võrgus. Simulink skeem näitab süsteemi seadistusi, mis sisaldavad impulsgeneraatorit, mis tekitab pulseerivat pinget, pinget ja voolu jälgivaid sensoreid, mis monitoorivad superkondensaatori pinget ja voolu, 10,000 kVAR mahutavusega superkondensaatorit, SPDT-lülitit, mis juhib superkondensaatori ühendamist laadimis- ja tühjendusvooluahelatega, laadimisvoolu reguleerivat takistit ning PS-Simulink konverteereid, mis tagavad füüsiliste signaalide ühendamise Simulinkiga

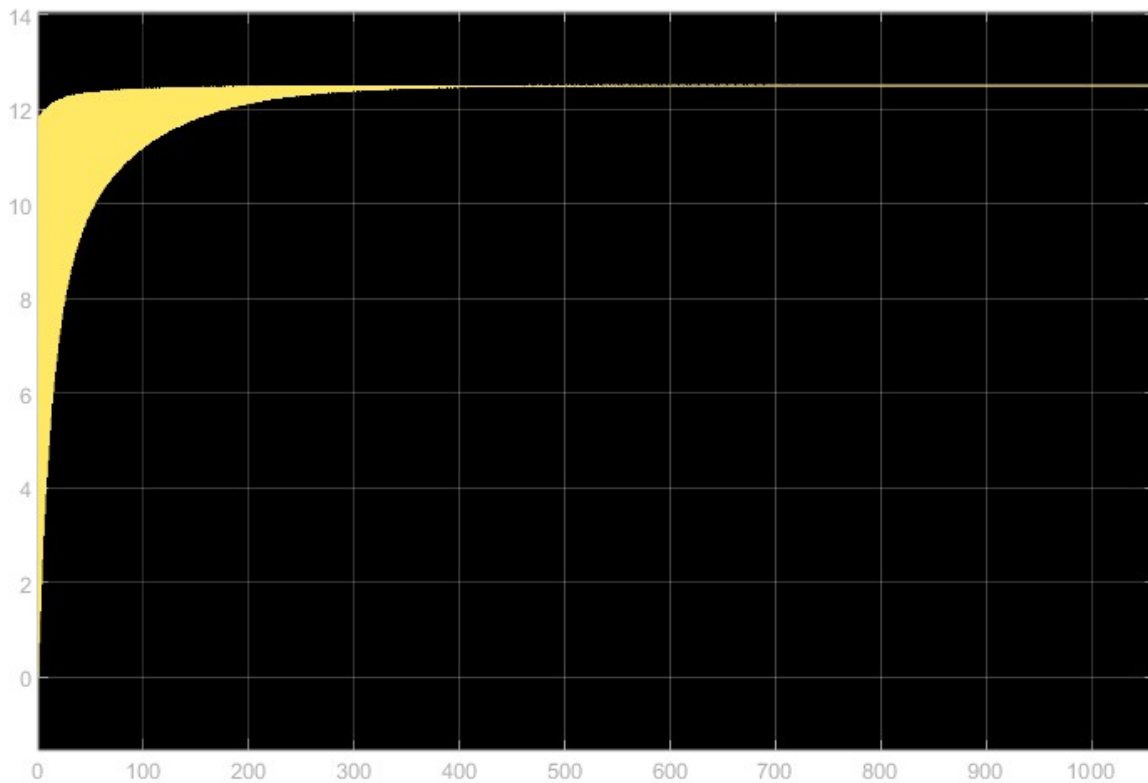
modelleerimiseks. Jätkuv lahendikonfiguratsioon tagab ahela käitumise täpse modelleerimise reaajas.



Pilt 3.1 Kompenseerimisseade mudel (Simullink skeem)

Superkondensaatori võime kiireks laadimiseks ja tühjendamiseks muudab selle tõhusaks tippkoormuste vähendamiseks ja reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks elektrivõrkudes. Superkondensaatori mudel näitab selle tõhusust kiireks laadimiseks ja stabiilseks pikaajaliseks energia salvestamiseks, mis muudab selle oluliseks tööriistaks superkondensaatorite kasutamise mõistmiseks ja optimeerimiseks reaktiivvõimsuse kompenseerimise praktilistes rakendustes.

Graafik 3.8 näitab superkondensaatori laadimiskõverat. Algaasis tõuseb pingeline superkondensaatoril kiiresti, mis viitab suurele laadimiskiirusele tänu suurele mahtuvusele ja madalale sisetakistusele. Umbes 200 sekundi pärast pingeline stabiliseerub ja saavutab nimiväärtuse. See tähendab, et superkondensaator on täielikult laetud ja pingeline jääb stabiilseks, mis näitab tõhusat energiasalvestust minimaalsete kadudega. Pikaajaline stabiilsus on näidatud kõvera tasase osaga pärast 200 sekundit, mis näitab superkondensaatori võimet laengut pikalt säilitada. Seega sobib superkondensaator pikaajaliseks energiasalvestuseks ning seda saab kasutada tippkoormuste tasandamiseks ja reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks võrgus.



Graafik 3.7 Superkondensaatori laadimiskõver

3.6 Võimsusteguri ($\cos \varphi$) arvutamine

Võimsusteguri arvutamiseks võtsin 2. seksiooni jaanuarikuu 2021 ja 2024 aasta andmed.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (3.3)$$

kus

P – aktiivvõimsus, W;

S – näivvõimsus, VA;

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3.4)$$

kus

Q – reaktiivvõimsus, VAR;

2021. aasta andmed (jaanuar):

P = 974060 (kW);

Q = 537170 (kVAr);

Võimsusteguri arvutamine:

$$S = \sqrt{974060^2 + 537170^2} = 1112360 \text{ (kVA)}$$

$$\cos \varphi = \frac{974060}{1112360} = 0,876$$

2024. aasta andmed (jaanur):

$$P = 892507 \text{ (kW)};$$

$$Q = 209851 \text{ (kVAr)};$$

Võimsusteguri arvutamine:

$$S = \sqrt{892507^2 + 209851^2} = 916845 \text{ (kVA)};$$

$$\cos\varphi = \frac{892507}{916845} = 0,973;$$

Reaktiivvõimsuse tarbimise andmete võrdlus näitab, et kompenseerimisseadmete paigaldamine on parandanud võimsustegurit. Jaanuaris 2021 iseloomustas süsteemi kõrge reaktiivvõimsuse tarbimine, mille tippväärtused ulatusid umbes 2120 kVAr-ni, mis viitasid madalamale võimsustegurile, ligikaudu 0,87.

Jaanuaris 2024 reaktiivvõimsuse tarbimine vähenes, tippväärtustega umbes 1102 kVAr. See reaktiivvõimsuse vähenemine aitas kaasa võimsusteguri suurenemisele ligikaudu 0,97-ni, mis näitab ratsionaalsemat elektrienergia kasutamist.

Seega kompenseerimisseadmete paigaldamine oluliselt parandas võimsustegurit, viies selle lähemale ühele. See muutus kajastab süsteemi energiatõhususe suurenemist ja elektrienergia kasutamise optimeerimist, mis viib kadude vähenemiseni ja elektrivõrgu töö stabiilsuse suurenemiseni.

KOKKUVÕTE

Uuringu käigus tein põhjaliku hindamise ja analüüsi Alutaguse alajaama reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kasutatavate kondensaatorite tõhususe kohta. Töö põhieesmärk oli analüüsida komponente ja kasutatavaid kondensaatoreid ning hinnata reaktiivvõimsuse näitajaid enne ja pärast seadmete kasutuselevõttu. Lisaks pöörati tähelepanu kondensaatorite tehnilistele ja kasutusaspektidele tööstusalajaama tingimustes.

Tulemused näitasid, et kondensaatorite paigaldamine tõi kaasa reaktiivvõimsuse tarbimise vähenemise. Andmed enne ja pärast kasutuselevõttu näitavad kondensaatorite tõhusust reaktiivvõimsuse vähendamisel, mis aitab kaasa süsteemi üldise energiatõhususe suurendamisele.

Erilist tähelepanu pöörati superkondensaatorite kasutamise modelleerimisele reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Modelleerimine kinnitas nende efektiivsust kiireks laadimiseks ja stabiilseks pikaajaliseks energiasalvestuseks, mis on oluline tippkoormuste vähendamiseks ja süsteemi stabiilsuse tagamiseks.

Erinevate alajaama sektsioonide analüüs näitas, et mõned sektsioonid kompenseerisid reaktiivvõimsust, samas kui teised seda tarbisid. See nõuab täpset strateegiat võimsuse jaotamiseks ja juhtimiseks. Võimsusteguri ($\cos \varphi$) oluline paranemine pärast kompenseerimisseadmete paigaldamist, 0,876-lt 0,973-ni, viitab elektrienergia ratsionaalsemale kasutamisele ja süsteemi kadude vähenemisele.

Seega täideti kõik seatud eesmärgid, sealhulgas kondensaatorite komponentide analüüs, reaktiivvõimsuse hindamine enne ja pärast nende kasutuselevõttu ning tehniliste ja kasutuslike aspektide kaalumine tööstusalajaama tingimustes, edukalt. Uuringu tulemusena jõudsin järeldusele, et reaktiivvõimsuse kompenseerimine Alutaguse alajaamas oli edukas ja efektiivne. See parandas energiatõhusust, vähendas kulusid ning suurendas elektrivõrgu töökindlust ja stabiilsust.

SUMMARY

The active use of electrical energy in modern industry necessitates its high-quality and efficient distribution. Reactive power compensation, as addressed in the thesis titled "Alutaguse substation capacitor equipment for reactive power compensation" by Jevgeni Pistrailov, significantly affects the efficiency of power supply and the stability of energy systems. Reactive power, while not performing useful work, burdens electrical networks, causing energy losses and reducing the efficiency of energy systems. The Alutaguse substation, located in the territory of the "Estonia" mine, is equipped with capacitor devices that have been in use for over a year, ensuring the necessary power supply to all parts of the mine. Optimizing energy usage processes, particularly through the implementation of reactive power compensation systems, is a relevant task for this substation.

The main objective of this thesis is to analyze the effectiveness of the capacitor equipment installed at the Alutaguse substation for reactive power compensation. Specific tasks include analyzing the components and capacitors used in the equipment, evaluating reactive power indicators before and after the installation of the equipment, assessing the technical and operational aspects of the capacitor devices in an industrial substation environment, determining the impact of the capacitor systems on the overall operation of the substation, and providing recommendations for improving energy efficiency and reliability of the power supply.

The study showed that the installation of capacitors resulted in a significant reduction in reactive power consumption. Data collected before and after the implementation of the equipment indicate the efficiency of the capacitors in reducing reactive power, which contributes to the overall increase in energy efficiency of the system. Special attention was given to modeling the use of supercapacitors for reactive power compensation. The modeling confirmed their effectiveness for fast charging and stable long-term energy storage, which is essential for reducing peak loads and ensuring system stability. The analysis of various substation sections revealed that some sections compensated for reactive power while others consumed it, requiring a precise strategy for power distribution and management. The significant improvement in the power factor ($\cos \varphi$) from 0.876 to 0.973 after the installation of the compensation equipment indicates more rational use of electrical energy and reduced system losses.

The research concluded that the reactive power compensation at the Alutaguse substation was successful and effective. All set goals were achieved, including the analysis of capacitor components, evaluation of reactive power before and after implementation, and consideration of technical and operational aspects in an industrial substation environment. The study confirmed that the installation of capacitors improved energy efficiency, reduced costs, and increased the reliability and stability of the power network.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Ivo Palu, Madis Leinakse, Ülo Treufeldt, Mati Meldorf, Tanel Sarnet, Jelena Šuvalova, Karl Kull, Uku Salumäe, Annemai Avingu, Tarmo Trummal. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis. 2017. (https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220_reaktiivvõimsuse_aruanne_v2_Limited.pdf)
2. P. Kundur, Power System Stability and Control. 1994. (https://www.academia.edu/38566721/_prabha_kundur_power_system_stability_and_control)
3. РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. Пак В.Е., Султанов Р.А., Якубова Е.Е., Тимохин Р.В., Лавренчук О.Э. Журнал Проблемы науки. 2019. (<https://cyberleninka.ru/article/n/reaktivnaya-moschnost-i-ee-vliyanie-na-napryazhenie-v-elektricheskoy-seti/viewer>)
4. Tõnu Lehtla, Toomas Vinnal. Elektrivarustuse Tulevikuvisionid. 2016. (https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/a/af/Toitepinge_kvaliteet_Tomas_Vinnal.pdf)
5. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Методы прогнозирования потерь мощности в электроэнергетических системах. Электричество. №7.2013 (<https://old-etr1880.mpei.ru/index.php/electricity/article/download/323/316>)
6. C. L. Wadhwa, Electrical Power Systems. 1983. (https://www.academia.edu/89368344/C_L_Wadhwa_Electrical_Power_Systems)
7. Leonard L. Grigsby, Electric Power Engineering Handbook. 2007. (https://www.academia.edu/45155457/Power_Systems_by_Leonard_L_Grigsby?sm=b)
8. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. 1999. (https://www.academia.edu/32323906/Understanding_Facts_Narain_G_hingorani_pdf)

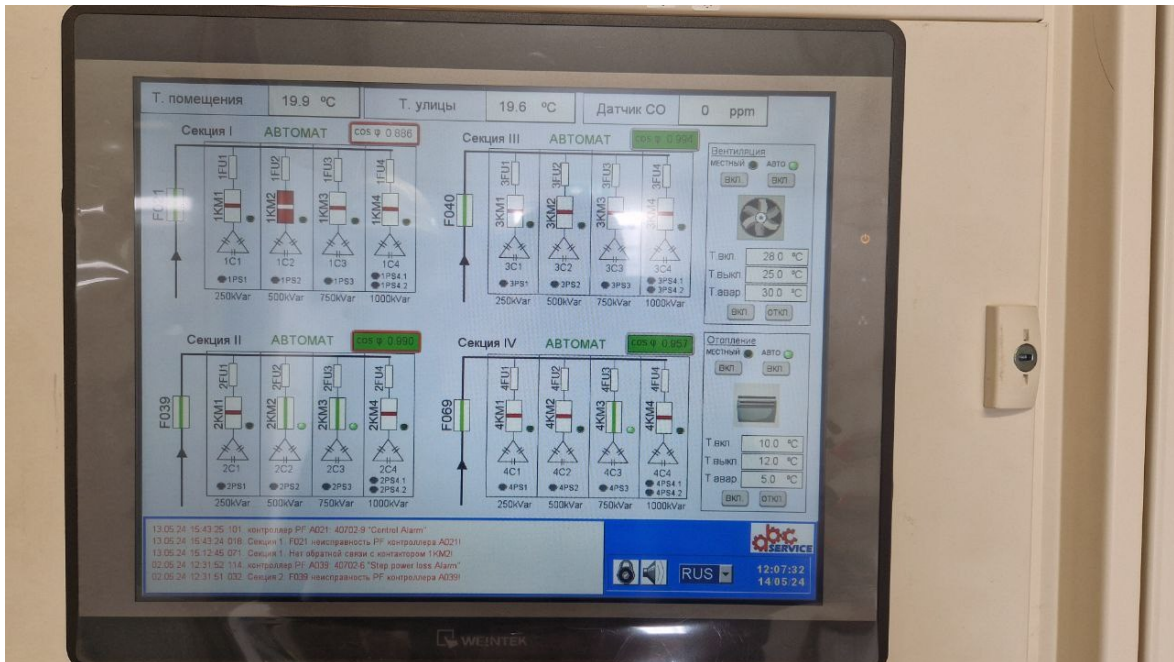
LISA 1 KONDENSAATORISEKTSIOONID



LISA 2 KONDENSAATORPATAREI JUHTIMISKILP



LISA 3 KONDENSAATORPATAREI JUHTIMISEKRAAN



LISA 4 KONDENSAATORISEADE KAMBER



LISA 5 SEKTSIOONIDE JUHTIMIS- JA INDIKAATORSÜSTEEMI SKEEM

