



KOLMIVAIHEISEN TYRISTORISUUNTAAJAN TESTAUS JA OHJEISTUS OPETUSKÄYTTÖÖN

Inka Tienari

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2014
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIENARI, INKA:

Kolmivaiheisen tyristorisuuntaajan testaus ja ohjeistus opetuskäyttöön

Opinnäytetyö 84 sivua, joista liitteitä 40 sivua
Kesäkuu 2014

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon opetuskäyttöön tilattujen uusien suuntaajalaitteiden soveltuvuus korvaamaan vanhat suuntaajalaitteet. Tarkoitus oli selvittää, voidaanko vanhoille suuntaajille suunnitellut laboratoriotyöt toteuttaa uusilla suuntaajilla. Testauksen perusteella oli tarkoitus tehdä uusiin laitteisiin ja laboratoriotöihin tarvittavat muutokset, jotta uusia suuntaajia voitaisiin käyttää jatkossa laboratoriotöiden suorittamiseen. Lisäksi työn oli tarkoitus toimia ohjeena uusittujen laboratoriotöiden ohjaajalle.

Erilaiset suuntaajat voivat rakenteestaan riippuen toimia sekä tasa- että vaihtosuuntaajina. Suuntaajien sovelluskohteita on elektroniikassa, säädettävissä moottorikäytöissä ja sähkövoimansiirrossa. Kolmivaiheisilla tyristorisuuntaajilla voidaan tasasuuntauksessa muodostuvan tasajännitteen suurutta säätää viivästyttämällä tyristorien johtavuutta ohjauskulman avulla. Ohjauskulmaa kasvattamalla saadaan tasasuuntaaja muutettua vaihtosuuntaajaksi. Kahdella tyristorisuuntaajalla saadaan muodostettua tasasähkönsiirtolinkki kahden eri vaihtosähköverkon välille.

Uusien tyristorisuuntaajien soveltuvuutta vanhojen suuntaajien korvaajiksi tutkittiin suorittamalla vanhoille suuntaajille suunnitellut laboratoriotyöt uusilla suuntaajilla. Tätä varten piti uusiin suuntaajiin tehdä hieman rakenteellisia muutoksia. Myös laboratoriotöihin jouduttiin tekemään pieniä muutoksia, jotka dokumentoitiin uusiin työohjeisiin. Muutoksia tehtiin lähinnä jännitetasoihin, jotta töiden suorittaminen olisi opiskelijoiden kannalta turvallisempaa. Uusilla suuntaajilla suoritetuista töistä raportoitiin mittaustulokset ja niistä tehtävät päätelmät, joita verrattiin vanhoilla suuntaajilla tehtyihin mittauksiin.

Tehdyt tutkimukset osoittivat, että vanhat laboratoriotyöt voidaan pienillä muutoksilla suorittaa uusilla suuntaajilla, mikä olikin työn päätavoitteena. Kehitettävää jäi vielä ohjauskulman säätöratkaisuun ja suojauksen toteuttamiseen. Kuitenkin työtä voidaan siis pitää pääosin onnistuneena.

Asiasanat: suuntaajat, tyristorit, sähkönsiirto, opetuskäyttö

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

TIENARI, INKA:

Testing and Instructions of a Three-Phase Thyristor Rectifier for Educational Use

Bachelor's thesis 84 pages, appendices 40 pages

June 2014

The purpose of this thesis was to test the suitability of new rectifiers to replace the old ones in the electrical laboratory of Tampere University of Applied Sciences. The aim was to find out whether the old laboratory works designed for the old rectifiers could be performed with the new rectifiers. The necessary changes in the new devices and laboratory works were to be made on the basis of the testing so that the new rectifier could be used in performing the works in the future. In addition, the report of this study was intended to serve as a guide to the instructor of the upgraded laboratory works.

Different types of rectifiers can work as rectifiers or inverters depending on their structure. Rectifiers are used in electronics, adjustable motor drives and in electronic power transmission. With three-phase thyristor rectifiers the level of the formed DC voltage can be regulated by delaying the conductivity of the thyristors by adjusting the firing angle. By increasing the firing angle the rectifier can also be used as an inverter. By using two thyristor rectifiers it is possible to create a DC power transmission link between two different AC power grids.

The suitability of the new rectifiers as substitutes for the old rectifiers were examined by performing the laboratory works designed for the old rectifiers with the new rectifiers. For this purpose some structural changes had to be made to the new rectifiers. Some small changes had to be made in the laboratory works as well. The changes were documented in the new working instructions. The changes were mainly made in the voltage levels of the works so that they would be safer for students to perform. The measurements and conclusions of the works made with the new rectifiers were reported and compared to the measurements made with the old rectifiers.

The testing showed that the old laboratory works can be performed with the new rectifiers with a few adjustments, which was the main objective of this study. There was still room for improvement left in the control solution of the firing angle and in protection of the devices. However, this study can mostly be seen as successful.

Key words: rectifiers, thyristors, electric transmission, educational use

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SUUNTAAJISTA YLEISESTI.....	7
2.1	Kolmivaiheinen tyristorisilta	7
2.2	Tasasähkövoimansiirto	10
3	TUTKITTAVA LAITTEISTO.....	12
3.1	Vanhat suuntaajat.....	12
3.2	Uudet suuntaajat – SEMIKRON Thyristor Power Electronics Teaching System.....	13
3.2.1	Muutokset.....	15
3.2.2	Ohjaukulman säätö ja määrittäminen	17
3.2.3	Suojaus	19
4	LABORATORIOTYÖT.....	21
4.1	Ohjattu tasasuuntaaja	21
4.1.1	Vanhat työohjeet ja kytkennät.....	21
4.1.2	Muutokset ja uudet työohjeet.....	24
4.1.3	Mittaustulosten vertailu.....	27
4.2	Tasasähkövoimansiirto	36
4.2.1	Työohjeet.....	36
4.2.2	Mittaustulosten vertailu.....	40
5	POHDINTA.....	43
	LÄHTEET.....	44
	LIITTEET	45
	Liite 1. Ohje ohjaukulman säätöön	45
	Liite 2. Ohjattu tasasuuntaaja, vanha työohje.....	47
	Liite 3. Ohjattu tasasuuntaaja, uusi työohje	55
	Liite 4. Ohjattu tasasuuntaaja, mittaustulokset uusilla suuntaajilla.....	64
	Liite 5. Tasasähkövoimansiirto, vanha työohje.....	72
	Liite 6. Tasasähkövoimansiirto, uusi työohje.....	75
	Liite 7. Tasasähkövoimansiirto, mittaustulokset uusilla suuntaajilla.....	78

LYHENTEET JA TERMIT

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
AC	Alternating Current, vaihtosähkö
DC	Direct Current, tasasähkö
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
α	ohjauskulma, °
U	jännite, V
I	virta, A
P	pätöteho, W
S	näennäisteho, VA
Q	loisteho, VAR
η	hyötysuhde
R	resistanssi, Ω
L	induktanssi, H
C	kapasitanssi, F
t	aika, s

1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa on ollut käytössä 70-luvulla diplomityönä opetuskäyttöön suunnitellut suuntaajalaitteet. Suuntajien iän vuoksi niiden toimintakuntoon ei voi enää luottaa, joten suuntaajat päätettiin uusiksi. Alunperin tämän opinnäytetyön piti sisältää uusien suuntaajien suunnittelu, mutta aikataulujen venähtäessä päätettiin tilata valmiit ratkaisut. Uudet suuntaajat tilattiin Semikron Oy:ltä.

Opinnäytetyön aiheeksi muodostui lopulta uusien suuntaajien käyttöönotto, testaus ja uusien laboratoriotöiden suunnittelu ja ohjeistus. Työssä tuli selvittää ovatko valmiit laitteet sopivia sellaisenaan ja tehdä niihin tarvittavat muutokset. Laboratoriotöissä lähdettiin testaamaan, voidaanko vanhat työt toteuttaa uusilla laitteilla sellaisenaan vai joudutaanko niihin tekemään muutoksia.

Tässä työssä käydään läpi suuntaajien perusteoria, sekä hieman laboratoriotöihin liittyvää teoriaa. Työssä esitellään vanhat ja uudet suuntaajat ja uusiin suuntaajiin tehdyt muutokset. Laboratoriotöistä käydään läpi työohjeet sekä niihin tehdyt muutokset. Vanhoilla ja uusilla suuntaajilla tehtyjä mittauksia vertaillaan, jotta nähdään, voidaanko laboratoriotöissä opittavana olevat asiat havaita myös uusilla suuntaajilla. Laitteiden lisäksi laboratoriotöiden ohjaaja tulee vaihtumaan, joten mittaustuloksia ja niiden analysointia käydään läpi melko tarkkaan, jotta työ toimisi ohjeistuksena myös työn ohjaajalle.

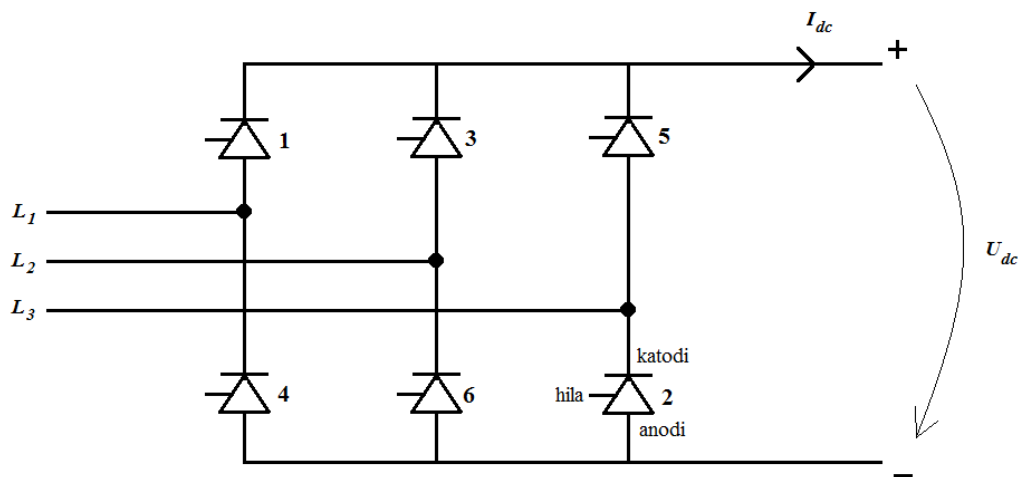
2 SUUNTAAJISTA YLEISESTI

Suuntaajat ovat tehoelektronikan peruskytkentöjä, jotka voivat rakeenteesta riippuen toimia sekä tasa- että vaihtosuuntaajina. Suuntaajat kootaan puolijohdekomponenteista, joista tärkeimpiä ovat diodit, transistorit, tyristorit sekä nykyisin IGBT-puolijohdeet (Insulated Gate Bipolar Transistor). (Hietalahti 2011, 29)

Suuntaajia käytetään paljon elektroniikassa, säädettävissä tasavirta- ja vaihtovirtamoottorikäytöissä ja sähkövoimansiirrossa. Tässä työssä tutkittavat laitteet ovat kolmivaiheisia tyristoriohjattuja suuntaajia. Tutkittavia käyttökohteita ovat ohjauskulmaan tutustumisen lisäksi tasavirtamoottorin ohjaus ja tasasähkövoimansiirto.

2.1 Kolmivaiheinen tyristorisilta

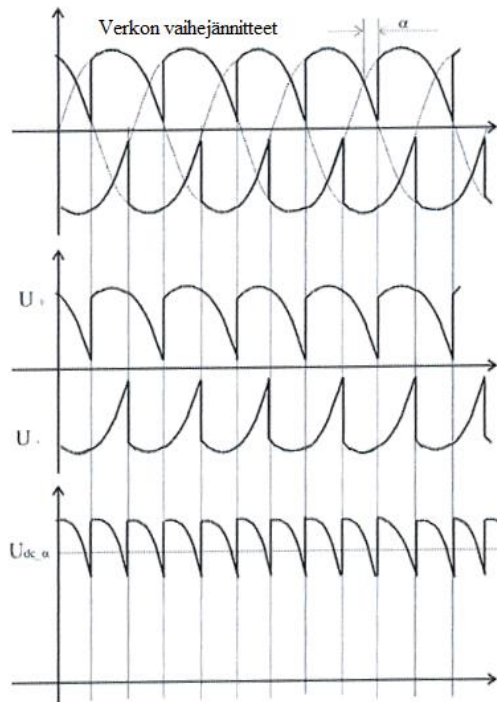
Tässä työssä tutkittavat laitteet ovat kolmivaiheisia tyristoriohjattuja suuntaajia. Kuviossa 1 on esitetty kolmivaiheisen tyristorisillan kytkentä.



KUVIO 1. Kolmivaiheinen tyristorisilta

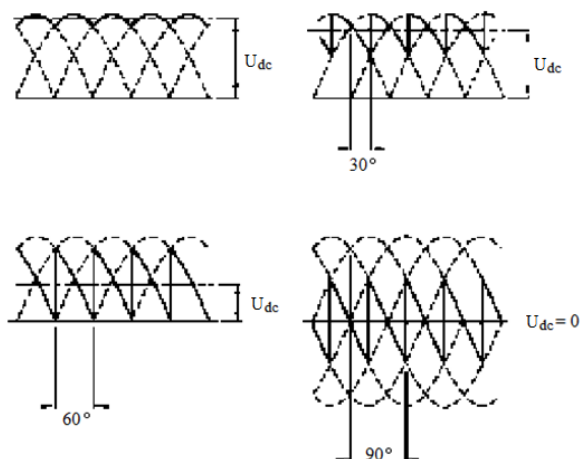
Tyristori on puolijohdekomponentti, jonka syttymistä voidaan viivästyttää. Tyristori saadaan johtavaan tilaan antamalla hilalle ohjauspulssi sen anodi-katodijännitteen ollessa positiivinen. Tasasuunnattu jännite syntyy tyristorien johtaessa vuorotellen. Johtamisvuorossa olevan tyristorin syttymishetkeä ohjataan ohjauskulmalla α .

Tasajännitteen muodostuminen on esitetty kuviossa 2 ja eri ohjauskulmien vaikutus kuviossa 3.



KUVIO 2. Tasajännitteen muodostuminen (Hietalahti 2011, 48, muokattu)

Kuviossa 2 näkyvä jännite U_+ on suuntaajan lähdön + navan ja verkon keskipisteen (nolla) välinen jännite. U_- on suuntaajan lähdön – navan ja verkon keskipisteen (nolla) välinen jännite. Kuormaan vaikuttava tasajännite U_{dc} on näiden osajännitteiden erotus.



KUVIO 3. Ohjauskulman vaikutus muodostuvaan jännitteeseen (The-Crankshaft Publishing, muokattu)

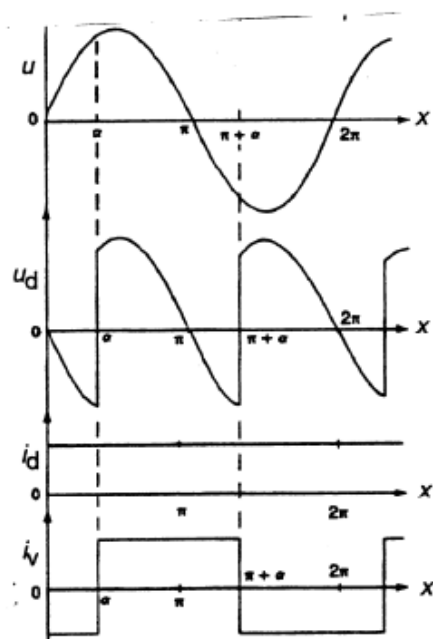
Ohjauskulmaa kasvattamalla saadaan jännitettä ikäänkuin leikattua, jolloin pienennetään muodostuvaa tasajännitettä. Ohjauskulman ollessa 90° on jännite tasasuuntauskiskostossa nolla. Ohjauskulman kasvattaminen tästä edelleen edellyttää, että tasajännitepiirissä on aktiivinen tasajännitelähte. Tällöin välipiirin jännite voidaan kääntää negatiiviseksi, joka tarkoittaa myös tehon suunnan muuttumista. Tällöin tasasuuntaaja muuttuu siis vaihtosuuntaajaksi. (Hietalahti 2011, 48)

Muodostuvan tasajännitteen (U_{dc}) keskiarvon suuruus on laskettavissa ohjauskulman (α) avulla seuraavasti. (Hietalahti 2011, 49)

$$U_{dc} = 1,35 \cdot U \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

Vaihtosuuntauskäyttöä vastaava suurin tasajännite saadaan ohjauskulman arvolla 180° . Jos ohjauskulma kasvaa yli 180° :n, se vastaa ohjauskulman arvoa nolla ja suuntaaja toimii taas tasasuuntaajana. Suuntaajan muuttuminen hetkellisesti tasasuuntaajaksi 180° :ta suuremmalla arvolla merkitsee oikosulkua piirissä. Tällainen oikosulku eli ”kipkaus” vältetään parhaiten rajoittamalla suurin ohjauskulma n. 160° :seen. (Aura & Tonteri 2009, 406)

Ohjaaminen aiheuttaa sen, että verkkovirran perusaalto jää verkkojännitteestä jälkeen ohjauskulman α verran (kuvio 4).



KUVIO 4. Ohjausloistehon synty, virta jää jännitteestä jälkeen (TTY)

Suuntaaja vaikuttaa siis verkkoon kuten induktiivinen kuorma, eli suuntaaja ottaa verkosta ohjausloistehoa (Q_α), joka voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä.

$$Q_\alpha = U_{dc} I_{dc} \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

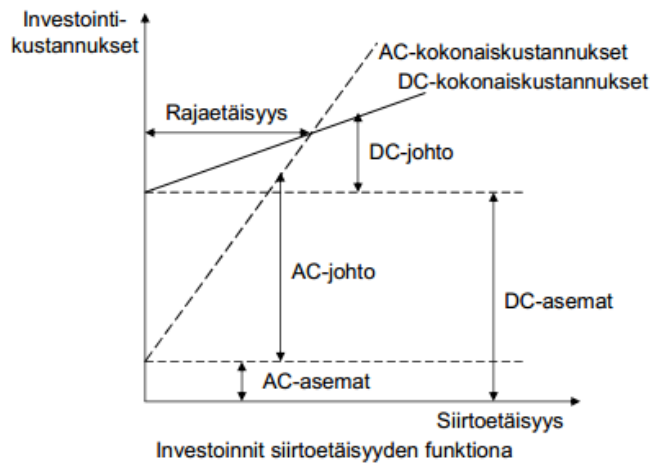
Ohjausloistehoa voidaan joutua kompensoimaan loistehonkompensointilaitteistoilla, mikäli laitteen verkosta ottama loisteho kasvaa merkittävästi. Näin tapahtuu käyttötilanteissa, joissa ohjauskulma ja suuntaajan ottama virta ovat suuria. (Hietalahti 2011, 49)

Suuntaajat aiheuttavat siis paljon kuormitusta verkkoon. Ohjausloistehon lisäksi verkkoa kuormittaa se, että suuntaajajärjestelmät ottavat verkosta epäsinimuotoista kuormitusvirtaa, jonka tuloksena verkon jännite on myös epäsinimuotoista. Tämä aiheuttaa mm. ylimääräisiä häviöitä verkon muissa laitteissa, suuria yliaaltovirtoja, mahdollisista resonanssitilanteista syntyviä ylijännitepiikkejä ja toiminnallisia häiriöitä muihin verkon laitteisiin, joiden toiminta vaatii stabiilit ja tarkat jännitteet. (Hietalahti 2011, 55)

2.2 Tasasähkövoimansiirto

Tämän työn kannalta oleellinen tasasuuntaajien käyttökohde on tasasähkövoimansiirto. Tasasähkönsiirrossa suuntaaja-asezilla perusyksikkönä toimii 6-pulssityristorisilta, joita on yleensä kytketty kaksi sarjaan, jolloin saadaan 12-pulssisilta. Tasasähkö tulee voimansiirrossa kysymykseen suurijännitteisillä pitkillä siirtoyhteyksillä (esimerkiksi merikaapelit) tai kun halutaan yhdistää kaksi vaihtosähköverkkoa, joilla on eri taajuus tai jännitetaso. Suomella on tasasähköllä toimivat merikaapeliyhteydet Ruotsiin ja Viroon, sekä suuntaaja-asema, jolla erotetaan pohjoismainen yhteiskäytössä oleva sähköverkko Venäjän vastaavasta. (Hietalahti 2013, 80; Partanen 2011)

Tasasähkönsiirron etuja ovat mm. vaihtosähköverkkojen välisen siirtotehon riippumattomuus verkkojen taajuudesta ja vaihesiirrosta, tehonsäädön nopeus, verkon heilahteluiden stabilointi ja pitkillä siirtoetäisyyksillä kustannukset. Kuviossa 5 on esitetty tasa- ja vaihtosähköyhteyksien kustannuserojen kuvaaja.



KUVIO 5. Tasasähkönsiirron ja vaihtosähkönsiirron kustannusvertailu (Partanen 2011)

Tasasähköyhteyksien rakentaminen on muuten huomattavasti edullisempaa, kuin vaihtosähköyhteyksien, mutta suuntaaja-asetat ovat kalliita investointeja. Siksi tasasähköyhteys on kannattavaa vasta todella pitkillä siirtoetäisyyksillä.

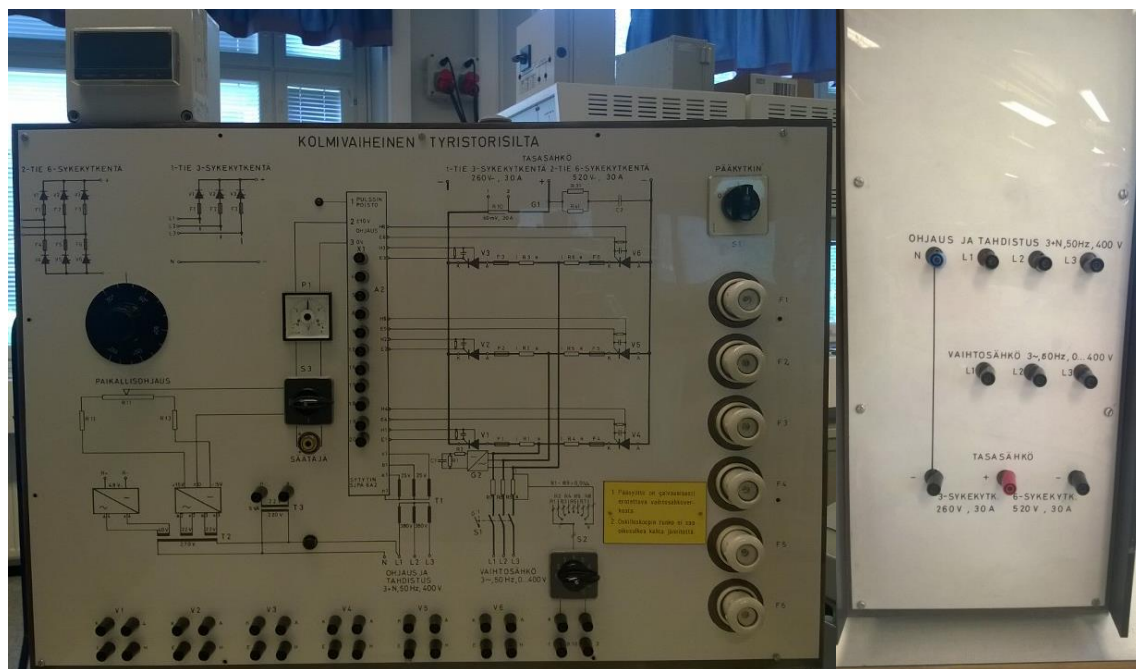
Tasasähköyhteyksissä on myös haittapuolia. Suuntaajat aiheuttavat paljon häiriötä verkkoon. Suuntaaja-asetalle tarvitaan yliaaltosuodattimia, kondensaattoriparistoita, tahtikoneita ja staattisia kompensattoreita, mikä kasvattaa suuntaaja-asettien kustannuksia. (Partanen 2011)

3 TUTKITTAVA LAITTEISTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan opetuslaboratorioon hankittuja tasasuuntaajia. Tasasuuntaajat hankittiin korvaamaan vanhat 70-luvulla rakennetut laitteet. Tässä työn osassa kerrotaan ensin vanhoista laitteista ja sitten uusista laitteista ja niihin tehdyistä muutoksista.

3.1 Vanhat suuntaajat

Vanhat suuntaajat ovat kolmivaiheisia tyristorisiltoja. Niitä voidaan käyttää sekä tasa-että vaihtosuuntaukseen. Vanha tasasuuntaaja on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Vanha suuntaaja

Suuntaajaa on mahdollisuus käyttää 2-tie 6-sykekytkentänä, sekä 1-tie 3-sykekytkentänä. Siltaan voidaan syöttää 0...400V kolmivaiheinen vaihtosähkö. Ohjaukselle ja tahdistukselle on oma 400 V:n kolmivaihesyöttö. Suuntaajan nimellisvirta on 30 A:ta tasasähköpuolella, mutta laboratorioissa siltaa käytetään aina alle 10 A:n virralla. Ylivirtasuojaus on toteutettu 25 A:n sulakkeilla. Ohjauksen ja tahdistuksen syötöstä yksi vaihe syöttää muuntajan kautta säätöpotentiometriä, jolla ohjauksulman säätö on toteutettu. Ohjauksulma on rajoitettu välille 18° ... 162° .

Rajoituksella estetään sillan kippaaminen, eli sisäinen oikosulku. Ohjauskulmaa on voitu myös säätää erillisellä ulkoisella säätäjällä.

Suuntaajassa on paljon mittapisteitä. Sillan tulovirtojen mittaus on toteutettu shunttivastuksilla. Tasasähköpuolen lähtövirran mittauksessa on erillinen shunttivastus. Itse tyristorisillassa on mittapisteet jokaisen tyristorin anodille ja katodille sekä hilaohjaukselle.

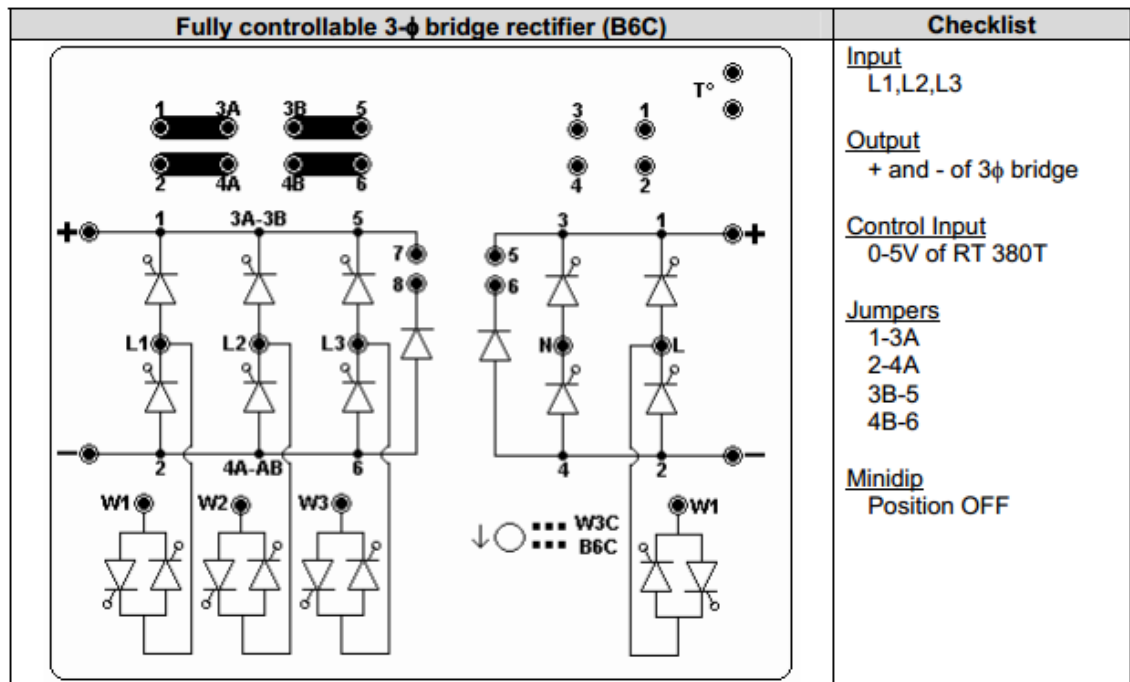
3.2 Uudet suuntaajat – SEMIKRON Thyristor Power Electronics Teaching System

Tavoitteena oli hankkia vanhoille laitteille korvaajat, joilla pystyttäisiin toteuttamaan nykyiset laboratoriotyöt. Lisätavoitteena oli, että suuntaajat vastaisivat muutenkin vanhoja suuntaajia mahdollisimman pitkälle. Tiedossa kuitenkin oli, että nykypäivän valmiilla ratkaisuilla ei saataisi esim. yhtä tarkkoja mittapisteitä, kuin alusta asti itse osista rakennetuilla vanhoilla suuntaajilla.

Vanhojen suuntaajien korvaajiksi tilattiin siis Semikronilta valmiit opetuskäyttöön tarkoitetut tasasuuntaajat. Uusi suuntaaja on esitetty kuvassa 2 ja suuntaajan liitännät, kun käytössä on kolmivaiheinen tyristorisilta, on esitetty kuviossa 6.



KUVA 2. Uusi suuntaaja



KUVIO 6. Uuden suuntaajan liitännät, kolmivaiheinen tasasuuntaussilta (Semikron, 2004)

Uusissa suuntajissa on kolmivaiheisen tasasuuntaajan (kuviokuva 6 vasemmalla) lisäksi yksivaiheinen tasasuuntaaja (kuviokuva 6 oikealla), sekä AC-säätimet (liitännät W1–W3), joilla voidaan säätää esimerkiksi moottorin pyörimisnopeutta. Tässä työssä perehdytään kuitenkin pelkästään kolmivaiheiseen tasasuuntaajan käyttöön.

Suuntaajan nimellisjännite on 380 Vac (+10% / -15%), joka kytetään liityntäpisteisiin L1–L3. Ohjaukselle ja tahdistukselle ei ole erillistä syöttöä, vaan se tulee suoraan sillan syötöstä. Tyristoreiden virrankesto on 55 A jatkuvaa virtaa, mutta laitteen muut komponentit ja johtimet rajoittavat virran 30 A:iin, joka on siis sama kuin vanhoilla silloilla.

Ylimääräisiä mittapisteitä ei juuri ole, eikä esimerkiksi yksittäisten tyristorien ominaisuuksia päästä mittaamaan, toisin kuin vanhoissa laitteissa. Tämä oli odotettavissa, sillä komponentit ovat kehittyneet kompaktimpaan suuntaan. Kyseessä ei ole vakava puute, sillä nykyisissä laboratoriotöissä ei ole vanhoillakaan suuntaajilla mittapisteitä hyödynnetty.

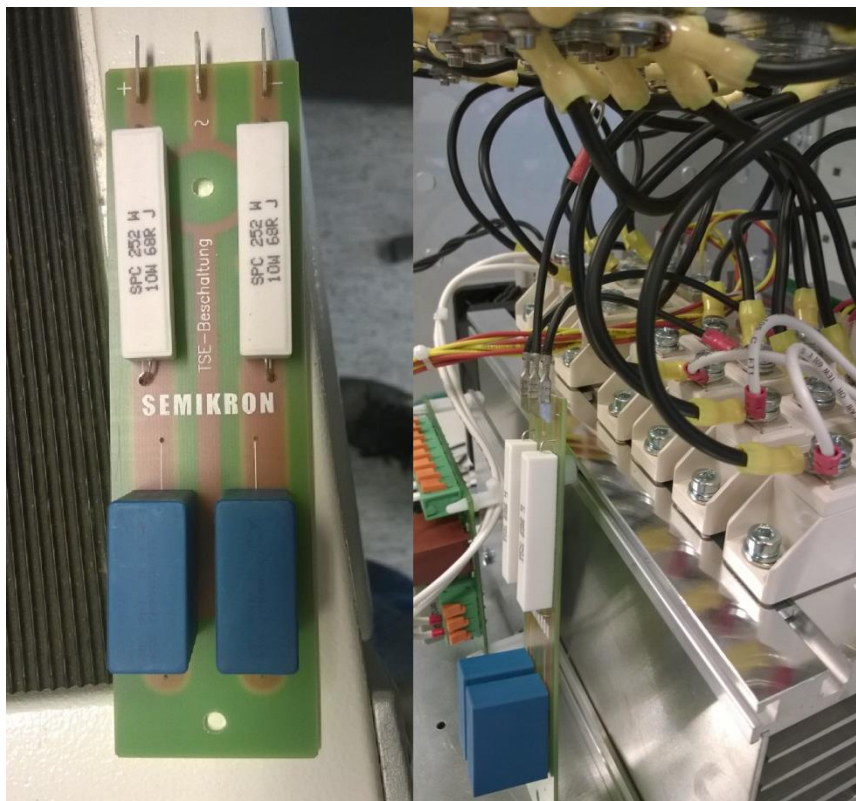
Ohjaukulman säätöä varten on suuntaajan etupaneelissa erillinen 0–5 V:n tasajännitesyöttö. Valmistajan mukaan ohjaukulmaa α voidaan säätää välillä 0...120°,

eikä suuntaajilla pysty toteuttamaan vaihtosuuntausta. Tämä on oleellinen puute, sillä laboratoriotöissä on tarkoitus tutustua myös vaihtosuuntaukseen. Valmistajan mukaan vaihtosuuntaukseen kykeneviä laitteita ei ole saatavilla, joten laitteet päädyttiin kuitenkin tilaamaan tasasuuntauksen tutkimista varten.

Kun laitteilla tehtiin mittauksia, havaittiin, että ohjauksen säätöalue onkin todellisuudessa n. $0...175^\circ$. Tämä on paljon laajempi kuin vanhoilla suuntaajilla. Ohjauksen määrittämisestä lisää kohdassa 3.2.2 Ohjauksen säätö ja määrittäminen.

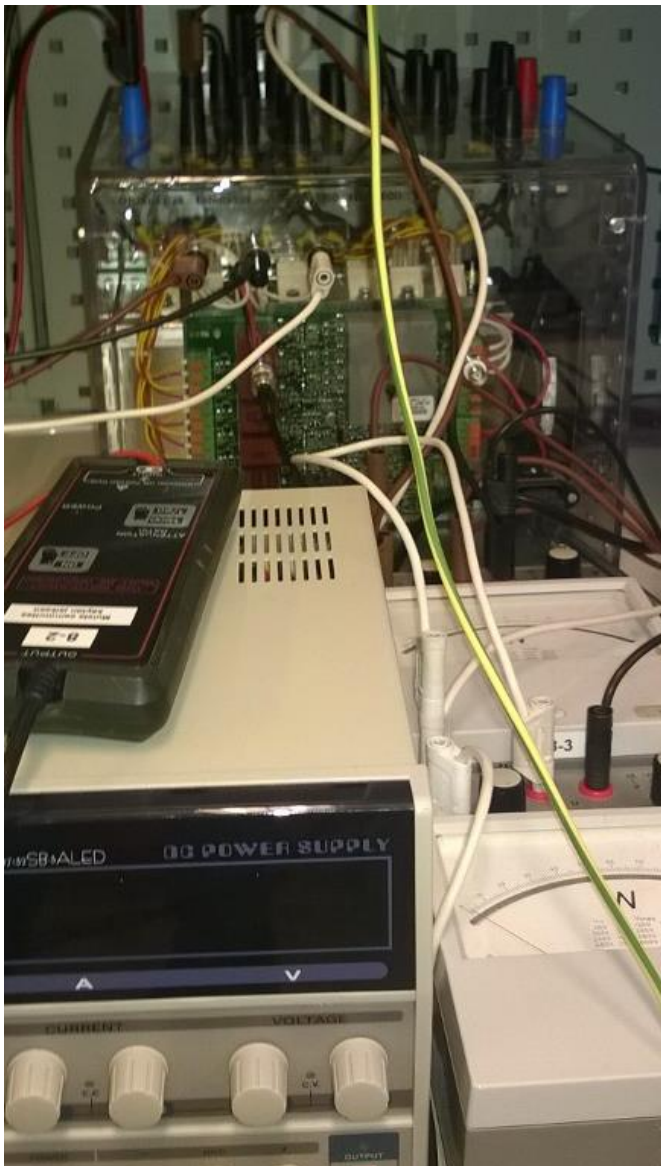
3.2.1 Muutokset

Vaikka Semikronin suuntaajat olivat valmiita ratkaisuja opetuskäyttöön, jouduttiin niihin tekemään joitakin muutoksia, jotta ne sopivat sähkölaboratorion tarkoituksiin. Tyristorikomponenttien rinnalle kytkettiin RC-suojat, jotka toimivat suojana sillan toiminnasta seuraavia ylijännitepiikkejä vastaan. RC-suojista on kerrottu lisää työn osassa 2.2.3 Suojaus. Kuvassa 3 näkyy RC-suojan lisäksi oikealla tyristorikomponentit.



KUVA 3. RC-suojien asennus

Alunperin suuntaajan ohjauksen ja tahdistuksen syöttö tuli samasta syötöstä tyristorisillan kanssa. Ohjauksen syötön tulee aina olla 400 V:a. Tästä syystä tyristorisillan jännitteenkin tulee olla aina 400 V:a. Opetuskäytössä sillan syötön jännitetasoa säättäminen on kuitenkin oleellinen ominaisuus, joten Semikronin ratkaisu ihmetyttää. Opetuskäytössä jännitteet on turvallisuuden takia hyvä pitää mahdollisimman alhaisina siten, että tutkittavat asiat voidaan kuitenkin todeta. Lisäksi TAMKin laboratoriotöissä sillalla syötettävien laitteiden jännitteenkestot eivät riitä kovin suurille jännitteille. Myös jännitetasoa vaikutuksen tutkiminen sillan toimintaan edellyttää, että jännitettä voidaan säätää. Niinpä ohjauksen ja tahdistuksen syötölle tehtiin TAMKin sähkötyöpajassa omat liittynät etupaneeliin. Samalla muutettiin laboratorion johtimille vääränlaiset PE-liittimet sopiviin. Ohjauksen uusi syöttö näkyy kuvassa 4. Samassa kuvassa näkyy ohjauksen säädön syöttö tasajännitelähteellä.



KUVA 4. Ohjauksen ja tahdistuksen liittynät ja ohjauksen säädön syöttö

3.2.2 Ohjauskulman säätö ja määrittäminen

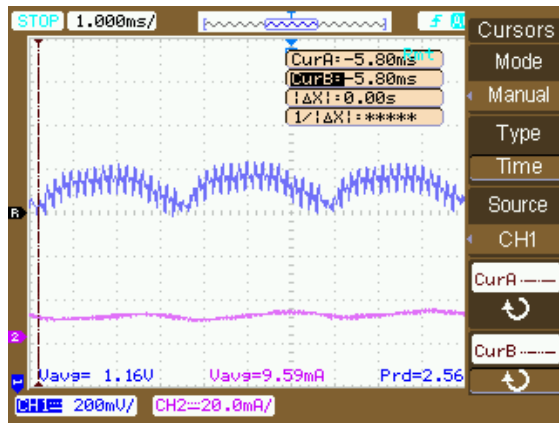
Ohjauskulman säätö tapahtuu erillisellä tasajännitelähteellä. Syöttöjännite on 0–5V. Ohjauskulma on jännitteeseen nähden käänteinen, eli ohjauskulma on suurimmillaan syötön ollessa 0V ja pienimmillään syötön ollessa 5V. Tämä on turvallisuuden kannalta hyvä, sillä jos ohjauksen syöttö jostain syystä katkeaa, niin silta menee johtamattomaan tilaan.

Vanhoissa suuntaajissa ohjauskulman säätö on toteutettu säätöpotentiometrillä. Myöhemmin laitteeseen on lisätty digitaalinen näyttö, josta ohjauskulmaa on helppo seurata. Uusissa laitteissa tämänhetkinen ratkaisu on melko epäselvä. Käänteinen syöttöjännite kulmaan nähden aiheuttaa välillä hieman hahmotusvaikeuksia. Varsinkin vasta ohjauskulmaan tutustuvalle oppilaalle kulman säätäminen ja ymmärtäminen voi olla hankalaa. Ohjauskulma pitäisi saada näkyville, jotta oppilas ymmärtää mitä hän säätää.

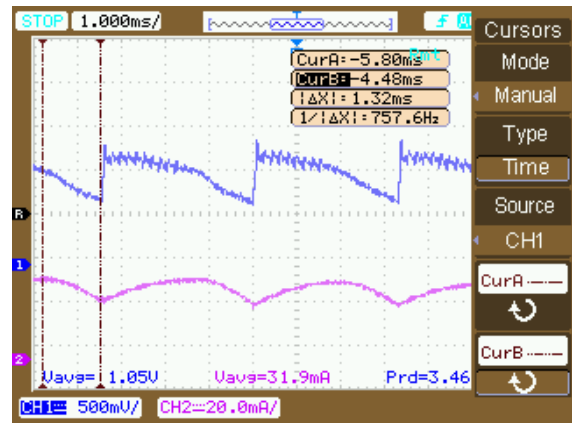
Lisäksi nykyisessä säätötavassa on riskinä, että ohjaukseen syötetään epähuomiossa liian suuri jännite. Syötön maksimiksi on ilmoitettu 15 V:a, jossa onneksi on siis varaa 5 V:n ylitykseen. Toinen ongelma on, että ohjauskulman voi säätää liian lähelle 180°:tta, jolloin on riski, että silta kippaa eli menee oikosulkuun. Vanhoissa suuntaajissa oli rajoitus tätä varten.

Tarkoitus olikin koittaa löytää tähän joku ratkaisu, mutta tiukan aikataulun takia on toistaiseksi tyydyttävä olemassaolevaan säätöratkaisuun. Säätöä tullaan muuttamaan opiskelijaystävällisemmäksi, mutta tähän työhön eivät muutokset ehtineet. Laboratoriotyöt kuitenkin pystytään toteuttamaan tälläkin säätöratkaisulla, vaikka se saattaa hieman hankalaa ollakin.

Kun havaittiin, että valmistajan ilmoittama ohjauskulman säätöalue ei pidä paikkaansa, piti todellinen alue määrittää. Määrittäminen tehtiin oskilloskoopin avulla. Esimerkkikuvat määrittämisestä on esitetty kuvioissa 7–9. Esimerkkikuvissa kuormana on tasavirtamoottori. Kuvissa ylempi käyrä (CH1) on muodostuva tasajännite ja alempi (CH2) tasavirta.



KUVIO 7. Ohjauksen syöttö 5,0V



KUVIO 8. Ohjauksen syöttö 4,2V



KUVIO 9. Ohjauksen syöttö 2,8 V

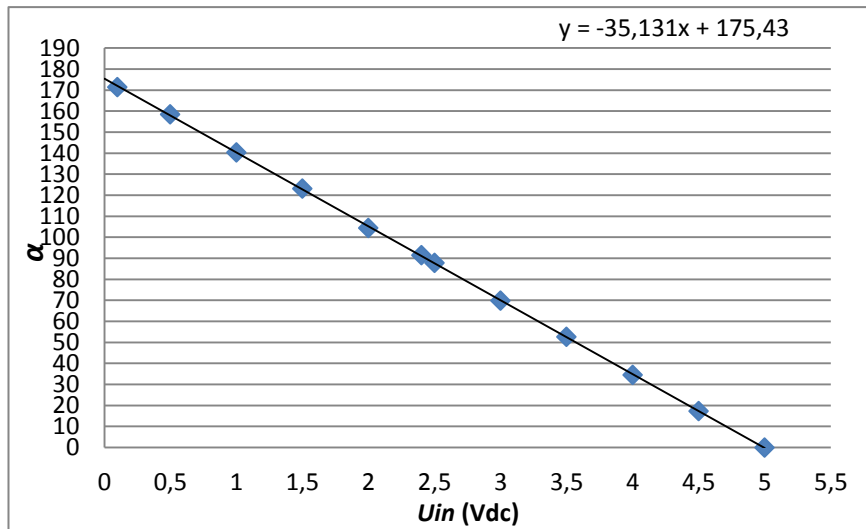
Ohjauksen asetettiin ensin 0° :seen, eli ohjauksen syöttöön asetettiin 5,0 V:a (kuviokuva 7). Tällöin jännitteen aaltomuoto on puhtaasta tasasuunnattua siniaaltoa. Ohjauksen alettiin kasvattaa ja samalla siirrettiin oskilloskoopin kursoria jännitteen leikkautumiskohtaa seuraten (kuviokuva 8). Noin 0,5 V:n välein otettiin oskilloskoopilta ylös Δt eli kursorin siirtymä, jolloin ohjauksen arvo kyseisellä syöttöjännitteen arvolla saatiin laskettua seuraavasti (esimerkkilasku kuviokuva 9).

$$\alpha = \frac{\Delta t}{T} \cdot 180^\circ \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{4,00\text{ms}}{10\text{ms}} \cdot 180^\circ$$

$$\alpha \approx 72^\circ$$

Mittausten perusteella piirrettiin ohjauskulman kuvaaja syöttöjännitteen funktiona (kuvio 10), jolloin saatiin yhtälö, josta voidaan laskea ohjauskulman arvo millä tahansa syöttöjännitteen arvolla.



KUVIO 10. Ohjauskulma α ohjauksen syöttöjännitteen funktiona

Ohjauskulman laskennalle saatiin seuraava yhtälö:

$$\alpha = -35,131 \cdot U_{in} + 175,43 \quad (4)$$

Täysin tarkka kulman määrittäminen ei ole, sillä oskilloskoopilta mitattaessa saattaa tulla hieman virhettä. Myöskään syöttöön käytetty tasajännitelähde ei ole kovin tarkka. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä vanhat suuntaajatkaan eivät olleet täysin tarkkoja ja tämä tarkkuus kuitenkin riittää hyvin töiden suorittamiseen.

Tarkempi ohje ohjauskulman säätämiseen on esitetty liitteessä 1.

3.2.3 Suojaus

Suuntaajakytkennöissä erilaiset kytkentäilmiöt voivat aiheuttaa suuria ylijännitepiikkejä. Tyristorit aiheuttavat virtapiiriin katkaistessaan ns. varausviipymästä johtuvan ylijännitteen. Tämä voidaan estää kytkemällä tyristorin rinnalle resistanssin ja kondensaattorin sarjakytkentä eli RC-suojaa. RC-suojaa vaimentaa myös ulkoisia ylijännitepiikkejä. (Aura & Tonteri 1996, 369)

Suuntaajissa ei ollut valmiiksi RC-suojia, joten ne lisättiin erikseen.

Puolijohdekomponentit, kuten tyristorit, ovat hyvin herkkiä tuhoutumaan ylivirrasta. Tällä hetkellä suuntaajissa ei ole minkäänlaista ylivirtasuojasta. Suojasta ei varsinaisesti välttämättä tarvita, sillä laboratoriotöissä suurin käytetty virta on 6 A:a, joka on huomattavasti pienempi, kuin suuntaajien kestävä 30 A:a. Tarvittaessa suojana toimii tällä hetkellä laboratoriotöissä syöttöön käytettävien jännitevaunujen D16 johdonsuojakatkaisijat.

Varsinkin tasasähkövoimansiirtotyössä virta saattaa kasvaa yllättäen melko suureksi, sillä kytkentä reagoi todella helposti ohjauskulmien ja syöttöjännitteiden säätöön. Tätä työtä tehtäessäkin saatiin jännitevaunun katkaisijat laukeamaan, kun säädön kanssa ei oltu tarkkana. Vaikka suuntaajia tuskin saa töissä kuormitettua liikaa, olisi jonkinlainen suojaus hyvä olla.

Valmistaja suosittelee, että suuntaajat suojattaisiin ylivirroilta. Suuntaajiin voitaisiin siis lisätä esimerkiksi nopeat B-käyrän 10 A:n johdonsuojakatkaisijat, jotka virran puolesta riittäisivät hyvin laboratoriotöiden suorittamiseen. Laboratoriossa on myös erillisiä sulakebokseja, joita voitaisiin käyttää kytkennässä.

Oleellista tehopuolijohdekomponenttien ylivirtasuojien valinnassa on rajakuormitusintegraali eli I^2t -arvo, jonka valmistaja ilmoittaa. Valitun suojan I^2t -arvo tulee olla pienempi kuin suojattavan komponentin. (Aura & Tonteri 1996, 368)

Tarkastellaan B-tyypin 10 A:n johdonsuojakatkaisijoiden soveltuvuutta I^2t -arvon osalta. Semikron ilmoittaa sillassa olevien tyristorimoduulien (SKKT 57/12) I^2t -arvoksi 125 °C:ssa 8000 A²s. B-tyypin johdonsuojakatkaisijat toimivat $5 \cdot I_N$ virralla alle 0,1 s:ssa, jolloin I^2t -arvo voidaan laskea seuraavasti.

$$I^2t = (5 \cdot I_N)^2 \cdot t \quad (5)$$

$$I^2t = (5 \cdot 10A)^2 \cdot 0,1s$$

$$I^2t = 250 A^2s$$

Arvo on pienempi, kuin valmistajan ilmoittama I^2t -arvo, joten B-tyypin 10 A:n johdonsuojakatkaisija olisi sopiva ylivirtasuojana.

4 LABORATORIOTYÖT

Laboratoriotöiden suunnittelussa uusille Semikronin suuntaajille lähdettiin liikkeelle siitä, että vanhat hyväksitodetut Eerik Mäkisen suunnittelemat työt (liitteet 2 ja 5) voitaisiin toteuttaa mahdollisimman pitkälle myös uusilla suuntaajilla. Vanhat työt yritettiin siis toteuttaa vanhoja työhajeita seuraamalla. Mittausten perusteella todettiin voidaanko työ ylipäättään toteuttaa uusilla suuntaajilla, sekä tehtiin töihin tarvittavat muutokset.

Kun vanhojen työhajeiden toteutus oli todettu mahdolliseksi, vertailtiin uusilla suuntaajilla tehtyjä mittauksia vanhoilla suuntaajilla tehtyihin mittauksiin, jotka on otettu opinnäytetyön tekijän aikanaan suorittamien laboratoriotöiden raporteista. Mittausten vertailussa tutkittiin, voidaanko samat opetettavat havainnot tehdä myös uusilla suuntaajilla.

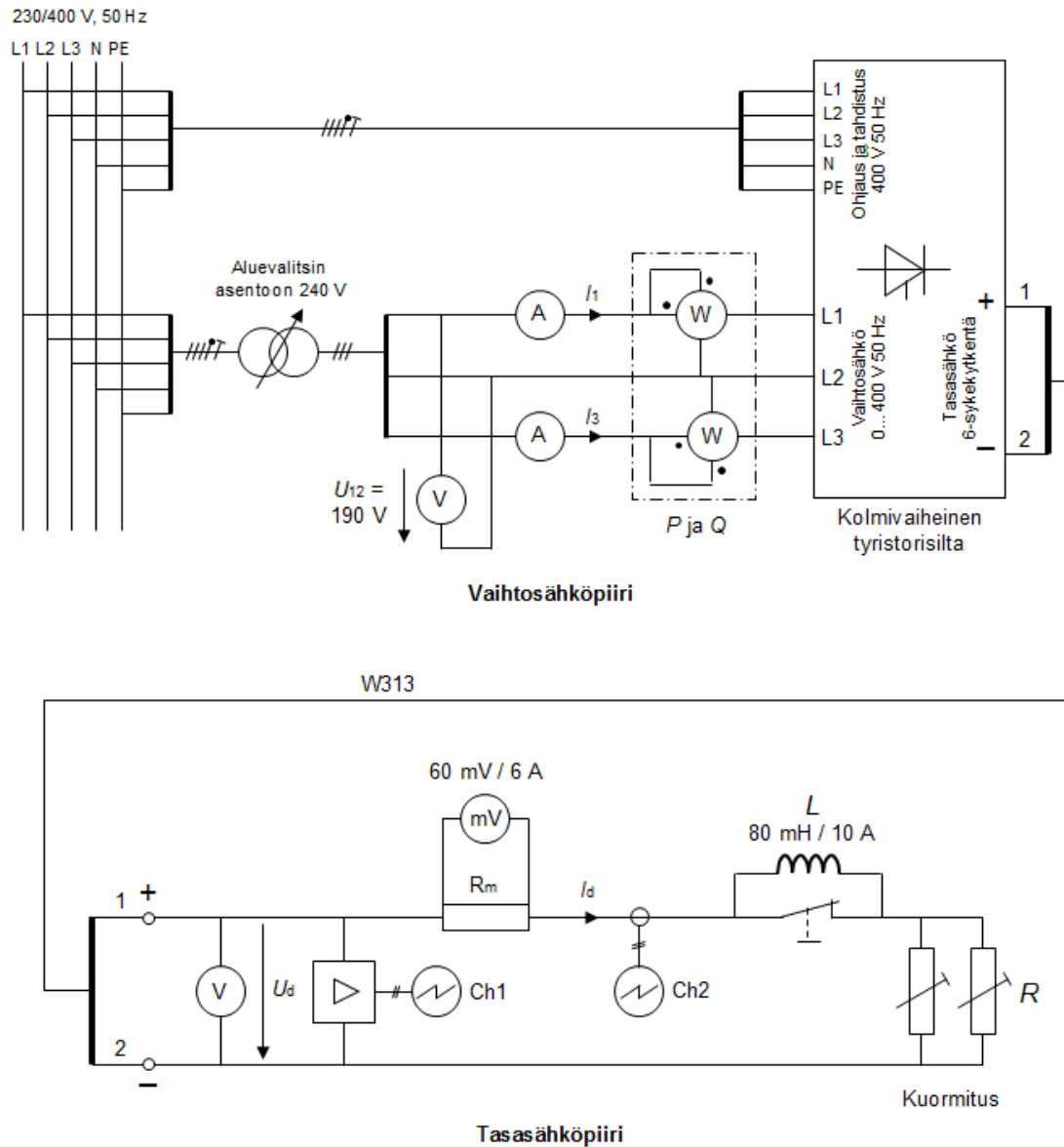
4.1 Ohjattu tasasuuntaaja

Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyössä on tarkoitus perehtyä kolmivaiheisen ohjatun tasasuuntaajan toimintaan ja perusominaisuuksiin. Tasasuuntaajaa tutkitaan ensin passiivisella kuormituksella, eli puhtaasti resistiivisellä (R) kuormalla, sekä induktiivisella (RL) kuormalla. Työn toisessa osassa tasasuuntaajaa tutkitaan aktiivisella kuormituksella, eli suuntaajalla ajetaan tasavirtamoottoria. Vanha työhaje alkuperäisessä muodossaan on esitetty liitteessä 2.

4.1.1 Vanhat työhajeet ja kytkennät

Vanhoissa työhajeissa tutkittavissa kytkennöissä (kuviot 11 ja 12) tasasuuntaussillan syötetään säätövaunulla 190 V:n vaihtojännite, joka pidetään vakiona. Molemmissa töissä tutkitaan eri ohjauskulmien vaikutusta sillan toimintaan kuormitusta muuttelemalla. Ohjattu tasasuuntaaja -työn kytkentä passiivisella kuormituksella on esitetty kuviossa 11.

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä. [Maadoita tasasuuntaaja ja kuormitusvastus!](#)



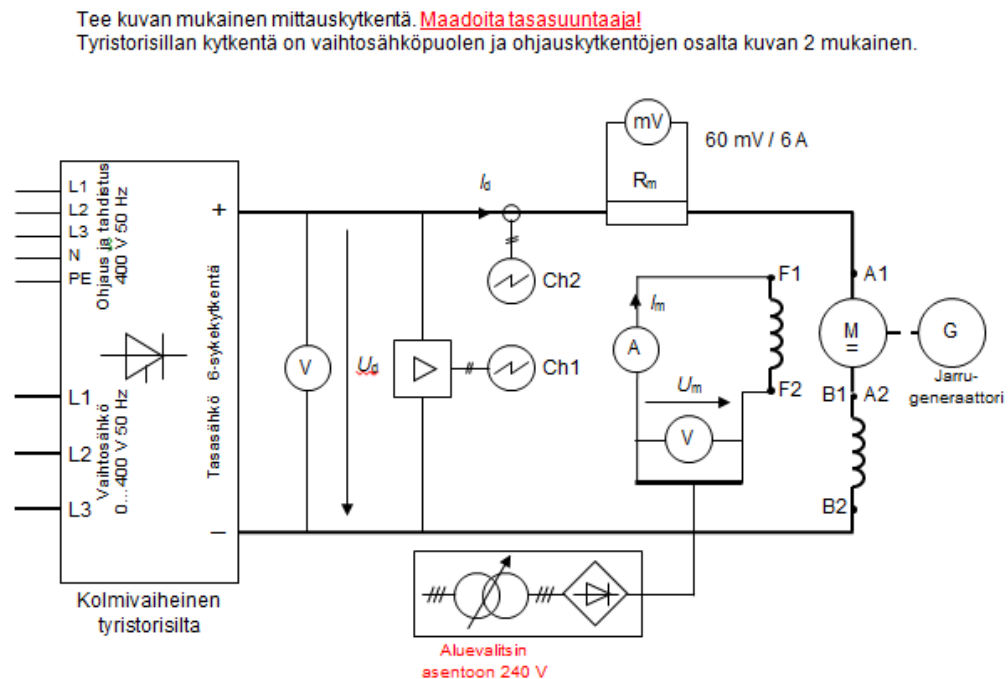
KUVIO 11. Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyön vanha mittauskytkentä passiivisella kuormituksella (Mäkinen 2013, liite 2)

Vaihtosähköpiiristä mitataan pääjännitteen tehollisarvo U_{12} , vaihtovirran tehollisarvo I_{13ka} (kahden vaiheen keskiarvo) ja vaihtosähkön pätöteho P (kaksimittarikeinolla $P = P_1 + P_3$). Lisäksi vaihtosähköpiirin vaihejännitteen ja -virran aaltomuotoja, harmonisia komponentteja ja kokonaissäröä (THD) tutkitaan Fluke 43 -tehoanalysaattorilla. Suuntaajan ohjaukselle ja tahdistukselle kytketään oma erillinen syöttönsä suoraan 400 V:n verkosta.

Tasasähköpuolelle kytketään resistiivinen kuormitus R sekä kytkimellä ohitettava kuristin eli induktiivinen kuorma L . Tasasähköpiiristä mitataan tasajännitteen

aritmeettinen keskiarvo U_d ja tasavirran aritmeettinen keskiarvo I_d . Tasavirran mittauksessa käytetään erillistä shunttivastusta ja analogista mV-kiertokelamittaria, jolla saadaan mitta-alue rajattua 6 A:iin. Ohjaukskulman muuttaminen vaikuttaa herkästi tasasähköpiiriin virtaan, jolloin nopeasti muutoksiin reagoivalla analogisella mittarilla on helpompi ja turvallisempi seurata tasapiiriin virtaa kuin digitaalisella mittarilla. Tasajännitteen ja -virran aritmeettisten keskiarvojen lisäksi tasasähköpiiristä mitataan jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajat oskilloskoopin avulla.

Työn toisessa osassa tutkitaan aktiivista kuormitusta eli tasavirtamoottorin pyörimisnopeuden säätöä tasasuuntaussillan avulla. Kytkentä ennen tasasuuntaajaa on sama kuin passiivisella kuormituksella (kuvio 11). Tasasähköpuolen kytkentä on kuvion 12 mukainen.



KUVIO 12. Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyön vanha mittauskytkentä aktiivisella kuormituksella (Mäkinen 2013, liite 2)

Työn toisessa osassa suuntaajan tasasähköpuolelle kytketään tasavirtamoottorin ankkuripiiri. Moottorin magnetointi syötetään käytettävän moottorin kilpiarvojen mukaisesti erillisestä säätövaunusta siinä olevaa kolmivaiheista tasasuuntaussiltaa käyttäen. Moottoria kuormitetaan jarrugeneraattorilla.

Vaihtosähköpiirille tehdään samat mittaukset kuin passiivisella kuormalla. Tasasähköpiirin kytkennästä mitataan moottorin ankkuripiirin tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo U_d ja tasavirran aritmeettinen keskiarvo I_d (shunttivastuksella), ohjaus- eli magnetointipiirin tasajännite U_m ja -virta I_m . Lisäksi jarrugeneraattorilta saadaan pyörimisnopeus n ja kuormitusmomentti T . Myös aktiivisella kuormituksella tutkitaan oskilloskoopilla jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajia.

Vanhassa työssä tasasuuntaajan syöttöjännitteeksi on valittu 190 V:a, jotta tasasähköpuolen jännitetaso ei nousisi missään tilanteessa liian suureksi. Rajoittavana tekijänä on passiivisella kuormituksella kuormitusvastusten nimellisjännite 230 V:a ja aktiivisella kuormituksella tasavirtamoottorin nimellisjännite, joka on myös 230 V:a. Tasajännitteen arvo on suurimmillaan silloin, kun ohjauskulman (α) arvo on pienimmillään. Vanhoilla suuntaajilla pienin mahdollinen ohjauskulman arvo on noin 18° . Tasajännitteen teoreettinen keskiarvo (U_d) saadaan laskettua vaihtosähkön pääjännitteestä (U_{12}) kaavan 1 mukaisesti.

$$\begin{aligned} U_d &= 1,35 \cdot U_{12} \cdot \cos \alpha & (1) \\ &= 1,35 \cdot 190\text{V} \cdot \cos 18^\circ \\ &= 243,945 \dots \text{V} \approx 244\text{V} \end{aligned}$$

Käytännössä tasajännitteen suuruuteen vaikuttaa tyristorien ja muun virtapiirin jännitehäviöt, jolloin tasajännite on työssä suurimmillaankin vain hieman yli 230 V:a, joka on siis kuormituksille sopiva. Jännitetaso on hyvä pitää riittävän alhaisena myös sähköturvallisuuden kannalta.

4.1.2 Muutokset ja uudet työohjeet

Kun vanhaa työohjetta toteutettiin uusilla suuntaajilla, havaittiin, että vaihtojännitteen tasoa tulee laskea. Uusilla suuntaajilla pienin mahdollinen ohjauskulman arvo on 0° , jolloin 190 V:n vaihtojännitteellä tasajännitteen teoreettiseksi arvoksi tulee kaavan 1 mukaisesti 257 V:a. Tämä olisi jo liian suuri jännite käytettäville kuormalaitteille.

Tämän vuoksi syöttöjännite päätettiin uudessa työohjeessa laskea 175 V:iin, jolloin tasajännitteen suurimmaksi mahdolliseksi teoreettiseksi arvoksi tulee kaavan 1 mukaan

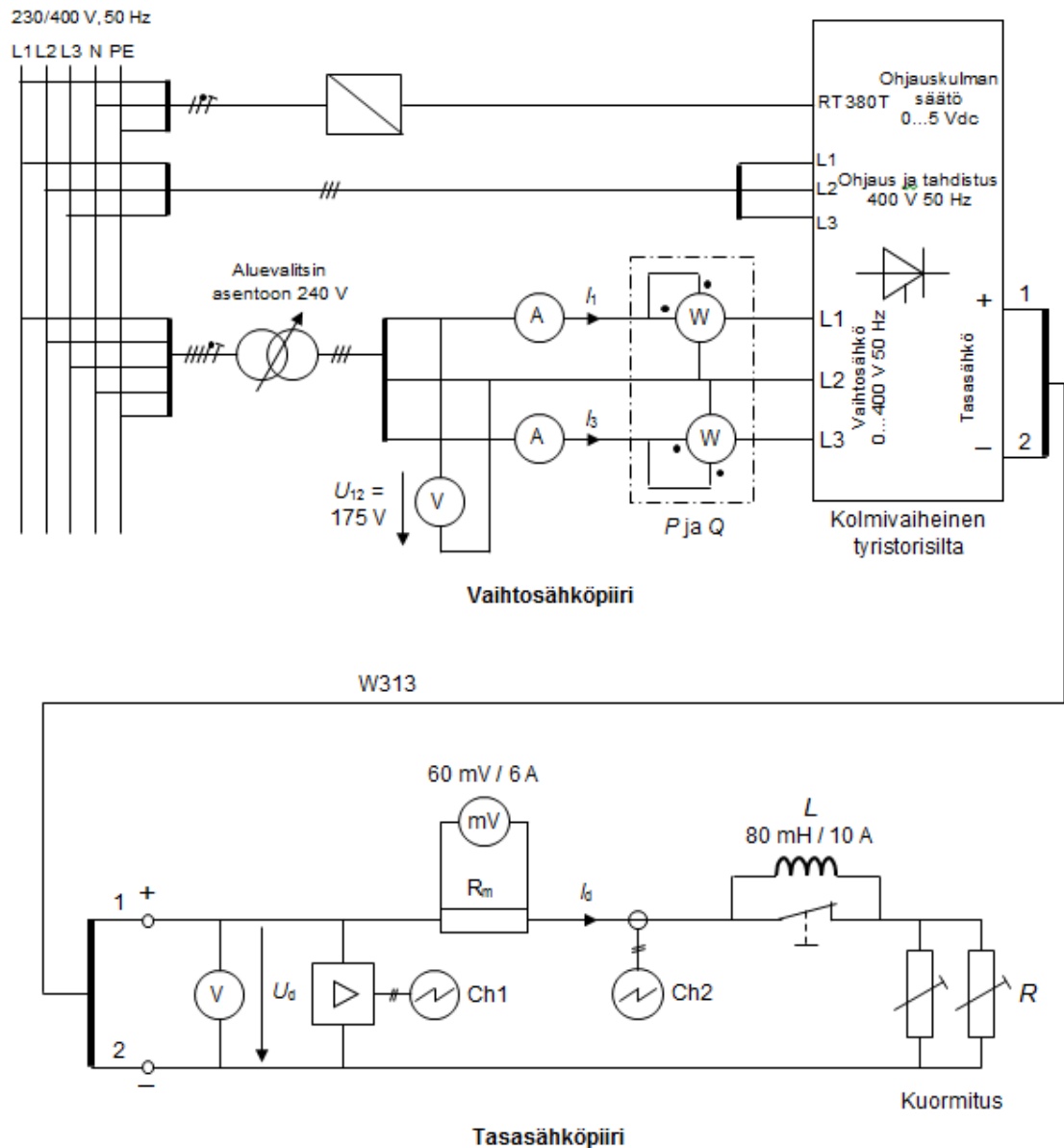
236 V:a. Käytännössä arvo on vielä hieman pienempi kytkennän jännitehäviöiden johdosta. Jännitehäviöt eivät ole kuitenkaan yhtä suuret kuin vanhalla kytkennällä, joten suurin tasajännitteen arvo on näin myös uudessa työssä hieman yli 230 V:a.

Valmistajan mukaan uusissa suuntaajissa ohjauskulmaa on mahdollista säätää välillä 0...120°, eikä suuntaajilla siis päästäisi kunnolla vaihtosuuntauksen puolelle, mikä ei tässä työssä ole tarpeellistakaan. Ensimmäisiä mittauksia tehdessä vaikutti kuitenkin siltä, että ohjauskulman todellinen säätömahdollisuus olisi noin 0...165°. Tämä kuitenkin epäilytti, koska valmistajalta oli useasti kysytty asiasta ennen laitteiden hankintaa.

Todellinen ohjauskulman säätöalue täytyi siis selvittää erillisillä mittauksilla. Tasasähkövoimansiirto -laboratoriotyön ohessa päästiin myös kokeilemaan myös vaihtosuuntausta. Ohjauskulman selvitys on käsitelty aiemmin tässä työssä kohdassa 3.2.2 Ohjauskulman säätö ja määrittäminen

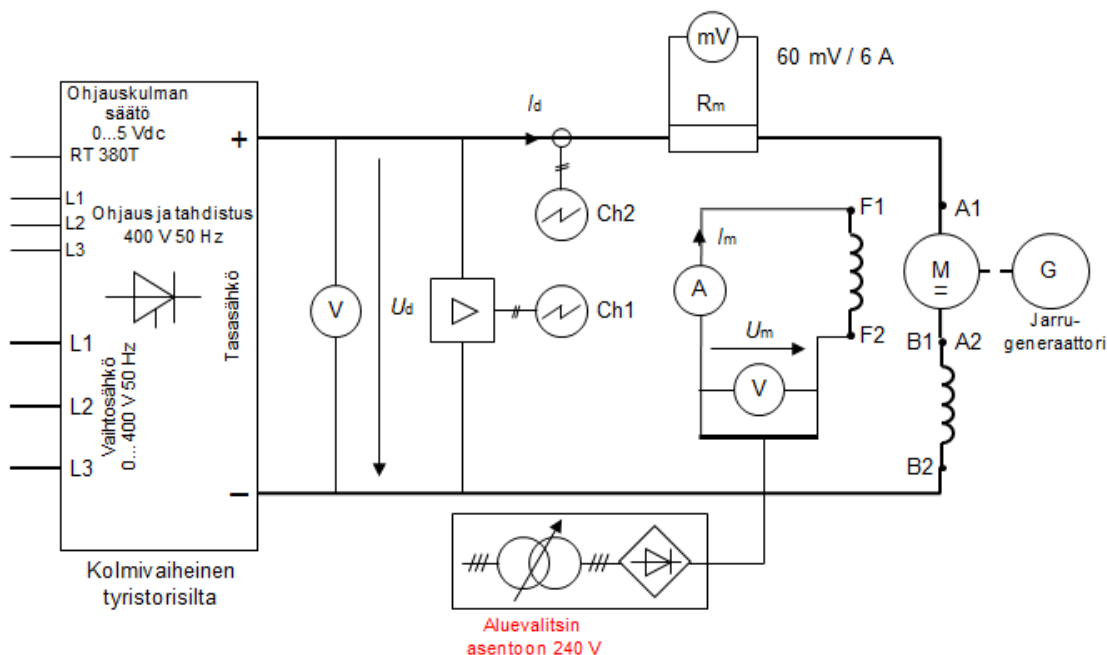
Jännitetason laskun lisäksi Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyöhön ei tehty oleellisia muutoksia, vaan se voitiin toteuttaa sellaisenaan. Kytkentäkuvat päivitettiin tietysti vastaamaan uusia tasasuuntaajia (kuviot 13 ja 14). Kuviin tuli muutoksia ohjauksen syöttöön, sekä ohjauskulman säätöön.

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä.
Muista myös suuntaajan tuulettimen virtajohto
ja maadoita tasasuuntaaja ja kuormitusvastus!



KUVIO 13. Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyön uusi mittauskytkentä passiivisella kuormituksella (Mäkinen 2013, liite 2, muokattu)

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä. Muista myös suuntaajan tuulettimen virtajohto ja [maadoita tasasuuntaaja!](#)
 Tyristorisillan kytkentä on vaihtosähköpuolen ja ohjauskytkentöjen osalta kuvan 2 mukainen.



KUVIO 14. Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyön uusi mittauskytkentä aktiivisella kuormituksella (Mäkinen 2013, liite 2, muokattu)

Kytkentäkuvien lisäksi ohjeiden alkutoimenpiteet muutettiin uusien suuntaajien mukaisiksi. Alkutoimenpiteisiin lisättiin tasasuuntaajassa olevien jumpperien kytkennät, sekä tasasuuntaajan tuulettimen virtajohdon kytkeminen. Uusittu Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyön ohje löytyy kokonaisuudessaan liitteestä 3.

4.1.3 Mittaustulosten vertailu

Työssä passiivista kuormitusta tutkitaan valitsemalla 4–5 ohjauskulman α arvoa väliltä 0...100°. Vanhoilla suuntaajilla pienin mahdollinen ohjauskulman arvo oli n. 18°. Kullakin ohjauskulman arvolla suoritetaan mittaussarja, jossa kuormitusta R muuttelemalla muutetaan piirissä kulkevan virran suuruutta. Ohjauskulma α on siis tutkimuksen parametrina.

Mittaukset kullakin ohjauskulman arvolla suoritetaan niin, että virta on lähellä suurinta mahdollista arvoa (max 6 A), lähellä 0 A:a, sekä näiden välistä valitaan 1–2 mittaussarjaa. Mitattavien suureiden lisäksi kirjataan ylös kussakin mittaussarjassa

käytetty ohjauskulma α . Oskilloskooppi- ja tehoanalysointorikuvat otetaan kustakin mittaussarjasta yhdellä tietyllä virran arvolla (esim. 3 A). Kuristimen L vaikutusta tutkittiin kytkemällä se eri ohjauskulman arvoilla mukaan kytkentään. Kuristimen vaikutus tuloksiin todettiin lähinnä oskilloskooppikuvista.

Mittaustulosten yhteyteen lasketaan tasajännitteen teoreettinen arvo (U_{dc}) kaavan 1 mukaisesti. Lisäksi mittausten perusteella laskettiin vaihtosähkön loisteho (Q) näennöistehon (S) ja pätötehon (P) avulla kaavan 6 mukaisesti, tasasähköpuolen teho ($P_{dc} = U_d I_d$) sekä tasasuuntaussillan hyötysuhteet ($\eta = P_{dc} / P$) tasavirran ollessa 2,5 A:a.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (6)$$

$$\rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot UI)^2 - P^2}$$

Kun työssä tehtävät mittaukset oli toteutettu uudella suuntaajalla ja todettu, että ne voidaan suorittaa, vertailtiin vanhalla ja uudella suuntaajalla tehtyjen mittausten tuloksia, jotta voitaisiin selvittää, voiko tuloksista tehdä samat havainnot. Vanhalla suuntaajalla saadut mittausten tulokset passiivisella kuormituksella on esitetty taulukossa 1 ja uudella suuntaajalla saadut tulokset taulukossa 2.

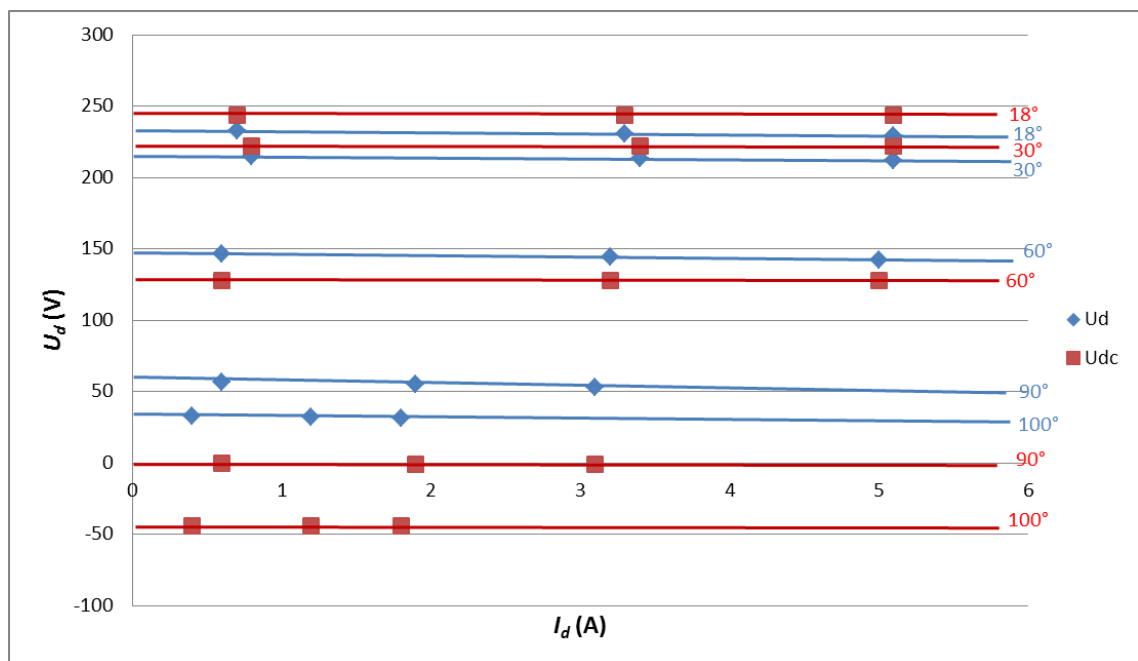
TAULUKKO 1. Mittaustulokset vanhalla suuntaajalla, passiivinen kuormitus

Mitatut	Vaihtosähköpiiri							Tasasähköpiiri		Lasketut		
	α	U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P (W)	U_d (V)	I_d (A)	U_{dc} (V)	P_{dc} (W)
18,30	190,00	0,60	0,60	0,60	70	110	180	232,60	0,70	243,53	162,82	81,17
18,20	190,00	2,75	2,80	2,78	310	490	800	230,50	3,30	243,67	760,65	440,43
18,20	190,00	4,20	4,25	4,23	460	760	1220	229,20	5,10	243,67	1168,92	666,95
30,00	190,00	0,73	0,75	0,74	70	130	200	214,70	0,80	222,14	171,76	137,50
30,00	190,00	2,85	2,90	2,88	270	510	780	213,30	3,40	222,14	725,22	535,51
30,00	190,00	4,25	4,30	4,28	390	760	1150	212,20	5,10	222,14	1082,22	810,40
60,10	190,00	0,55	0,58	0,56	20	90	110	146,60	0,60	127,86	87,96	148,89
60,20	190,00	2,80	2,90	2,85	100	460	560	144,30	3,20	127,47	461,76	752,37
60,20	190,00	4,45	4,55	4,50	160	720	880	142,30	5,00	127,47	711,50	1191,08
90,10	190,00	0,68	0,70	0,69	0	80	80	56,20	0,60	-0,45	33,72	211,63
90,20	190,00	2,25	3,00	2,63	-30	260	230	55,00	1,90	-0,90	104,50	832,68
90,20	190,00	3,50	3,65	3,58	-50	390	340	53,20	3,10	-0,90	164,92	1126,30
100,00	190,00	0,55	0,58	0,56	-10	50	40	32,90	0,40	-44,54	13,16	180,74
100,00	190,00	1,55	1,60	1,58	-30	150	120	32,00	1,20	-44,54	38,40	504,23
100,00	190,00	2,35	2,40	2,38	-60	220	160	31,00	1,80	-44,54	55,80	765,04

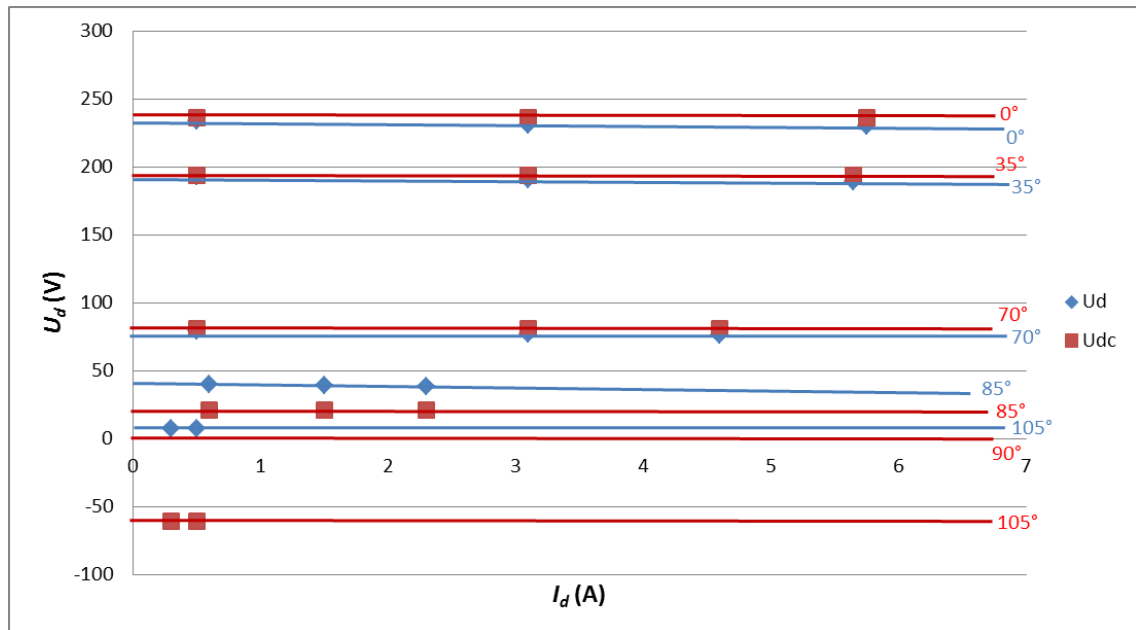
TAULUKKO 2. Mittaustulokset uudella suuntaajalla, passiivinen kuormitus

Mitatut	Vaihtosähköpiiri									Tasasähköpiiri		Lasketut		
	U_{in} (Vdc)	α	U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P (W)	U_d (V)	I_d (A)	U_{dc} (V)	P_{dc} (W)	Q (VAR)
5,00	0	175,00	0,48	0,48	0,48	70	60	130	233,90	0,50	236,25	116,95	65,33	
5,00	0	175,00	2,60	2,61	2,61	370	385	755	231,00	3,10	236,25	716,10	231,17	
5,00	0	175,00	4,75	4,75	4,75	660	710	1370	229,90	5,75	236,25	1321,93	442,75	
4,00	35	175,00	0,41	0,41	0,41	40	60	100	193,00	0,50	193,52	96,50	73,78	
4,00	35	175,00	2,58	2,60	2,59	210	425	635	191,00	3,10	193,52	592,10	461,61	
4,00	35	175,00	4,79	4,81	4,80	375	790	1165	189,00	5,65	193,52	1067,85	871,54	
3,00	70	175,00	0,48	0,480	0,48	10	60	70	79,00	0,50	80,80	39,50	127,55	
3,00	70	175,00	3,18	3,17	3,18	15	385	400	77,00	3,10	80,80	238,70	875,30	
3,00	70	175,00	4,78	4,75	4,77	0	575	575	76,00	4,60	80,80	349,60	1324,92	
2,50	85	175,00	0,76	0,76	0,76	-10	70	60	40,00	0,60	20,59	24,00	222,41	
2,50	85	175,00	1,75	1,74	1,75	-35	165	130	39,00	1,50	20,59	58,50	512,70	
2,50	85	175,00	2,85	2,83	2,84	-60	270	210	38,00	2,30	20,59	87,40	834,82	
2,00	105	175,00	0,51	0,51	0,51	-15	30	15	7,50	0,30	-61,15	2,25	153,86	
2,00	105	175,00	0,91	0,91	0,91	-30	50	20	7,50	0,50	-61,15	3,75	275,10	

Mittaustulosten perusteella piirretään kuvaajat $U_d = f(I_d)$ eli mitattu tasajännite tasavirran funktiona ja $U_{dc} = f(I_d)$ eli tasajännitteen teoreettinen laskettu arvo mitatun tasavirran funktiona. Parametrina on ohjauskulma α . Vanhojen mittausten kuvaajat on esitetty kuviossa 15 ja uusien kuviossa 16.



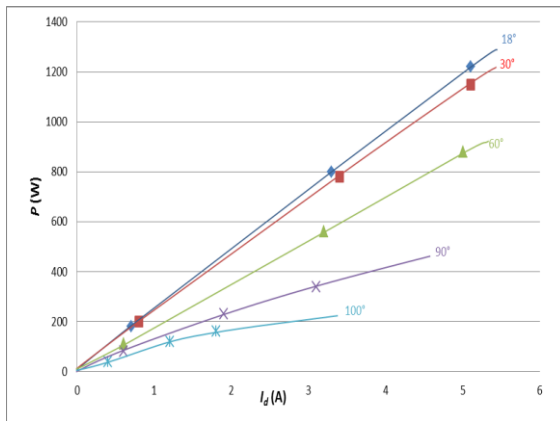
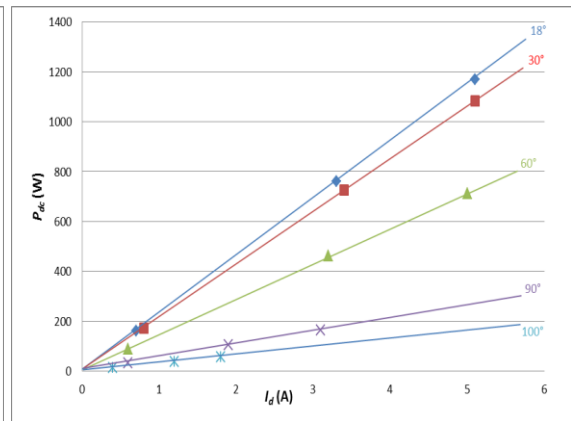
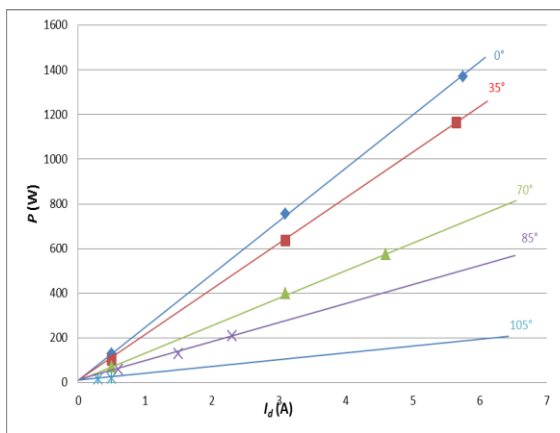
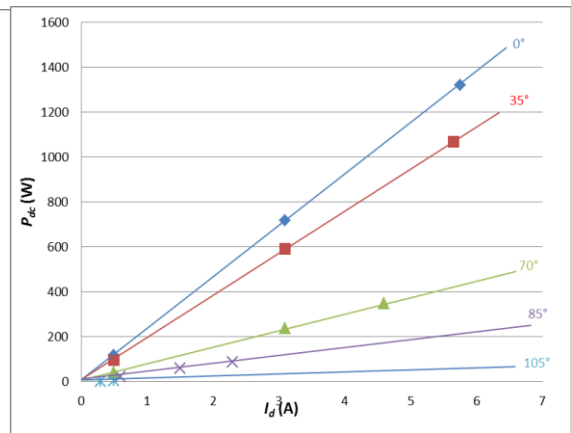
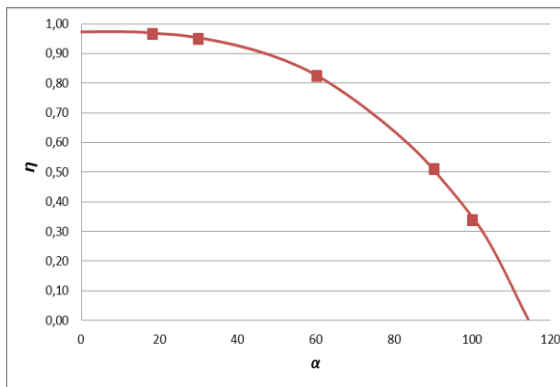
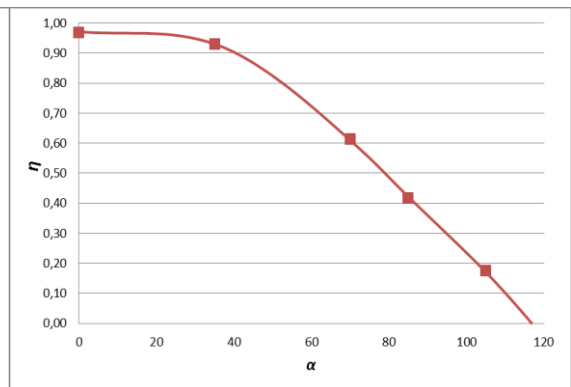
KUVIO 15. Tasajännitteet tasavirran funktiona, parametrina ohjauskulma, vanhat mittaukset



KUVIO 16. Tasajännitteet tasavirran funktiona, parametrina ohjauskulma, uudet mittaukset

Kuvaajat havainnollistavat sitä, että teoriassa ohjauskulman ollessa 90° tasasuuntaaja muuttuu vauhtosuuntaajaksi. Jännite on tällöin teoriassa 0 V:a ja tätä pienemmällä kulmalla jännite on siis positiivista ja suuremmalla se muuttuu negatiiviseksi. Tämän toteutuminen käytännössä vaatii tasasähköpuolelle aktiivisen tasajännitelähteen, jota ei tässä työssä ole. Lisäksi teoreettisia tasajännitteen arvoja laskiessa piirin induktanssi oletetaan äärettömäksi, jolloin virta ei ole aukottunutta ja silta avautuu teorian mukaisti ohjauskulman arvolla 90° . Tässä kytkennässä kuorma on täysin resistiivinen, minkä vuoksi todellisuudessa tasajännite vain lähestyy nollaa ohjauskulman kasvaessa. Nämä havainnot voidaan tehdä sekä vanhoilla, että uusilla suuntaajilla, joten mittaus on onnistunut.

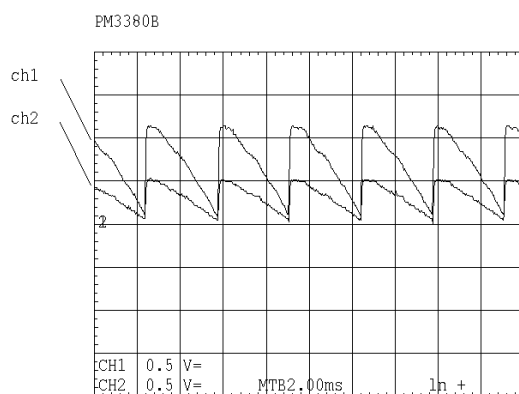
Mittaustuloksista piirretään myös pätötehojen kuvaajat $P = f(I_d)$ ja $P_{dc} = f(I_d)$ (kuviot 17–20), sekä tasasuuntaajan hyötysuhteen kuvaaja ohjauskulman funktiona $\eta = f(\alpha)$ (kuviot 21 ja 22), parametrina tasavirran arvo 2,5 A.

KUVIO 17. $P = f(I_d)$, vanha suuntaajaKUVIO 18. $P_{dc} = f(I_d)$, vanha suuntaajaKUVIO 19. $P = f(I_d)$, uusi suuntaajaKUVIO 20. $P_{dc} = f(I_d)$, uusi suuntaajaKUVIO 21. $\eta = f(\alpha)$, vanha suuntaajaKUVIO 22. $\eta = f(\alpha)$, uusi suuntaaja

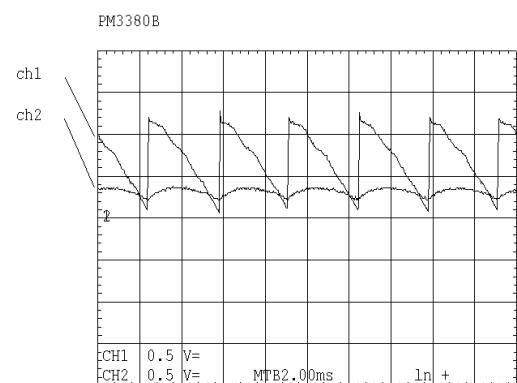
Kuvioista 17–22 nähdään, että vanhan ja uuden suuntaajan mittaustulokset vastaavat hyvin toisiaan. Molempien tehon kuvaajista voidaan havaita, että ohjauskulman noustessa siirtyvä pätöteho laskee. Tehon kuvaajista voidaan myös havaita molemmissa tapauksissa, että tasasähköpuolen tehon määrä laskee suhteessa vaihtosähköpuolen tehoon ohjauskulman kasvaessa, eli suuntaajan hyötysuhde laskee. Sama voidaan

havaita varsinaisista hyötysuhteen kuvaajista. Tämä johtuu ohjauskulman aiheuttamasta ohjausloistehosta, jota syntyy kun virta jää jännitteestä ohjauskulman verran jälkeen.

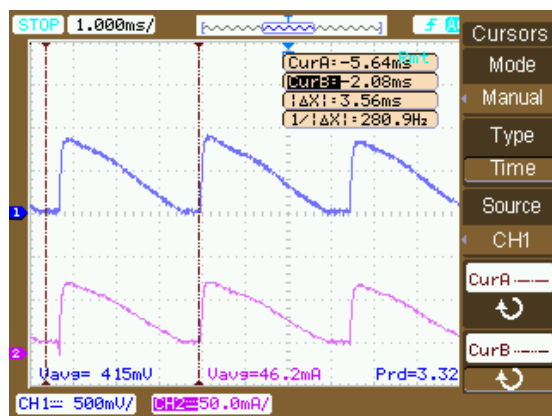
Kytkenästä otettiin myös kuvia oskilloskoopilla ja Fluke 43 -tehoanalysaattorilla. Kullakin ohjauskulman arvolla tehdystä mittaussarjasta otettiin yhdellä virran arvolla kuvat. Tilanteet on merkitty taulukoihin 1 ja 2 keltaisella. Tässä työssä käsitellään vain osa kuvista (kuviot 23–30), jotta saadaan vertailtua kuvaajia vanhojen ja uusien mittausten välillä. Kaikki uudella suuntaajalla otetut mittaukset ja kuvat on esitetty liitteessä 4.



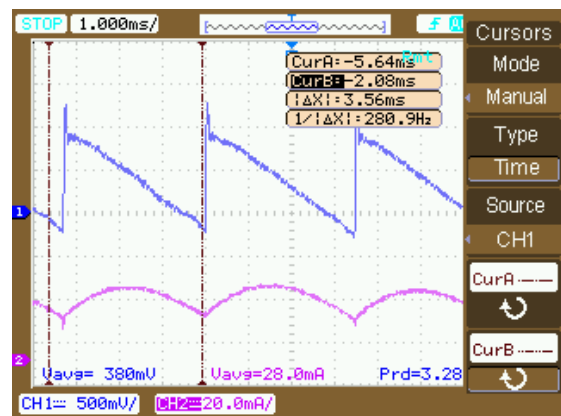
KUVIO 23. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha = 60^\circ$, kuorma R , vanha suuntaaja



KUVIO 24. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha = 60^\circ$, kuorma RL , vanha suuntaaja

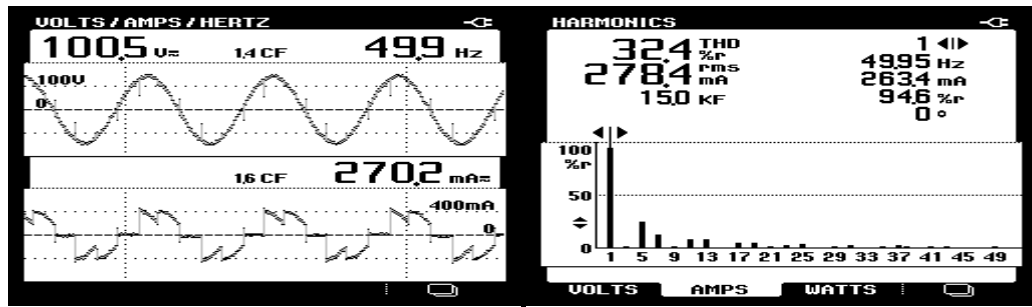


KUVIO 25. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma R , uusi suuntaaja

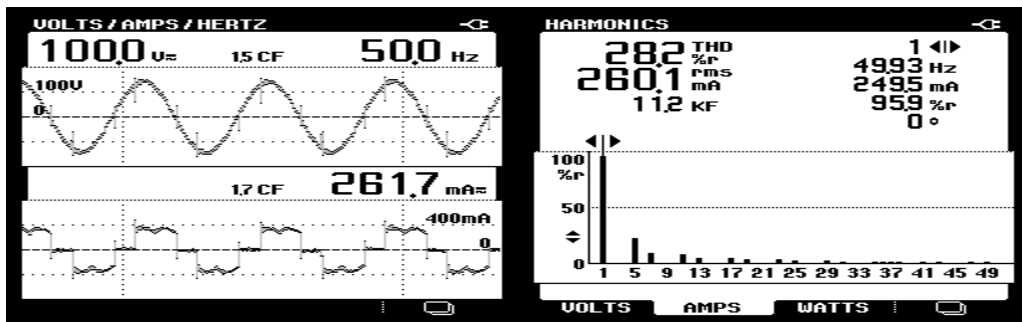


KUVIO 26. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma RL , uusi suuntaaja

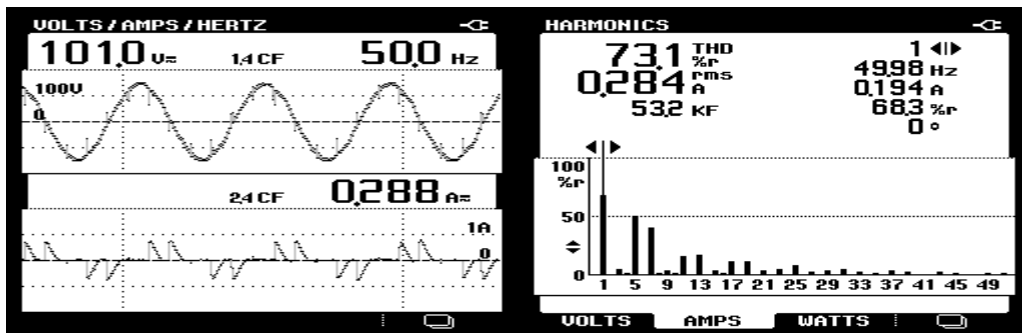
Oskilloskoopin kuvista (kuviot 23–26) on tarkoitus havaita, että kytkennässä oleva induktiivinen kuorma (kuristin L) tasoittaa tasasähköpuolen virtaa, eikä virta ole niin aukottunutta. Tämäkin voidaan havaita hyvin uusilla suuntaajilla.



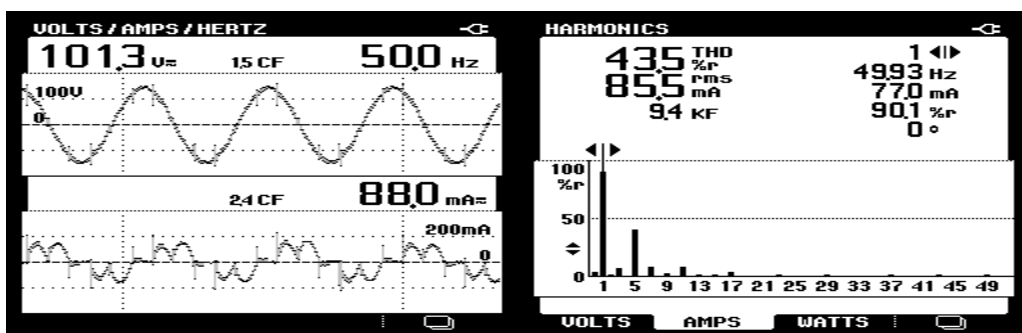
KUVIO 27. Fluke 43 kuvat, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot ja virran yliaaltoanalyysi, $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma R , uusi suuntaaja



KUVIO 28. Fluke 43 kuvat, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot ja virran yliaaltoanalyysi, $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma RL , uusi suuntaaja



KUVIO 29. Fluke 43 kuvat, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot ja virran yliaaltoanalyysi, $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma R , uusi suuntaaja



KUVIO 30. Fluke 43 kuvat, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot ja virran yliaaltoanalyysi, $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma RL , uusi suuntaaja

Tehoanalysaattorikuvia vanhasta suuntaajasta ei ollut saatavilla, mutta uuden suuntaajan kuvat on esitetty kuvioissa 27–30. Tehoanalysaattorilla analysoidaan vaihtosähköverkon vaihejännitteen- ja virran aaltomuotoja, yliaaltoja ja kokonaissäröä. Kuvista on tarkoitus havaita, että verkon yliaaltokomponentit ja kokonaissärö (THD%) lisääntyvät ohjauskulman kasvaessa. Kytkenässä oleva kuristin L tasaa virtaa myös verkon puolella sekä pienentää säröä.

Aktiivista kuormitusta eli tasavirtamoottoria tutkitaan hyvin samalla periaatteella kuin passiivista kuormitusta. Moottorin kuormitusta ja näin ollen piirin virtaa säädetään jarrugeneraattorin avulla. Mittaussarjat suoritetaan 4–5:llä eri ohjauskulman α arvolla. Mitattavien suureiden lisäksi kirjataan ylös kussakin mittaussarjassa käytetty ohjauskulma α , kuormitusmomentti T ja moottorin pyörimisnopeus n . Oskilloskooppikuvat otetaan kustakin mittaussarjasta yhdellä tietyllä virran arvolla (esim. 3 A). Tehoanalysaattoria ei työn tässä osassa käytetä. Vanhalla suuntaajalla saadut mittausten tulokset aktiivisella kuormituksella on esitetty taulukossa 3 ja uudella suuntaajalla saadut tulokset taulukossa 4.

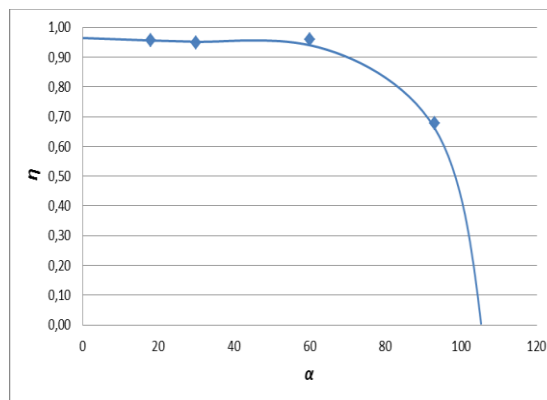
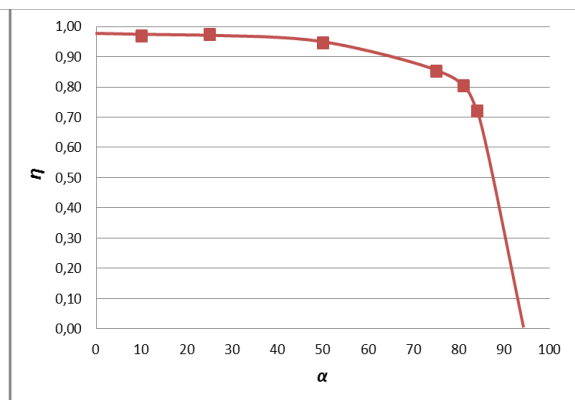
TAULUKKO 3. Mittaustulokset vanhalla suuntaajalla, aktiivinen kuormitus

α	T (Nm)	n (rpm)	Syöttö							Tasapiiri		Ohjauspiiri		η	
			U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P_{kok} (W)	Ankkuripiiri		Magnetointipiiri			
											U_{dcav} (V)	I_{dcav} (A)	U_{Mdcav} (V)	I_{Mdcav} (A)	
93,00	0,00	325	190,00	0,75	0,78	0,76	-30	90	60		53,20	0,80	219,00	0,43	0,71
93,00	3,50	110	190,00	2,45	2,50	2,48	-170	280	110		25,70	2,90	224,00	0,43	0,68
93,00	6,54	50	190,00	4,20	4,25	4,23	-310	450	140		21,80	5,10	221,30	0,43	0,79
60,00	0,00	930	190,00	1,05	1,05	1,05	20	170	190		148,00	1,10	229,00	0,43	0,86
60,00	2,90	870	190,00	2,45	2,50	2,48	40	410	450		144,00	3,00	229,00	0,43	0,96
60,00	5,70	820	190,00	4,20	4,20	4,20	60	680	740		141,00	5,00	229,00	0,43	0,95
30,00	0,00	1350	190,00	1,05	1,100	1,08	90	190	280		216,00	1,30	211,00	0,43	1,00
30,00	2,40	1330	190,00	2,45	2,50	2,48	220	460	680		215,00	3,00	217,00	0,43	0,95
30,00	5,40	1300	190,00	4,10	4,05	4,08	340	740	1080		212,00	5,00	214,00	0,43	0,98
18,00	0,00	1460	190,00	1,10	1,10	1,10	120	200	320		233,00	1,30	220,00	0,43	0,95
18,00	2,40	1430	190,00	2,40	2,45	2,43	260	440	700		231,00	2,90	222,00	0,43	0,96
18,00	5,40	1410	190,00	4,15	4,10	4,13	440	750	1190		230,00	5,00	222,00	0,43	0,97

TAULUKKO 4. Mittaustulokset uudella suuntaajalla, aktiivinen kuormitus

Ohjtaus	Kuormitus			Syöttö								Tasapiiri		Ohjauspiiri		η
	U_{in} (Vdc)	α	T (Nm)	n (rpm)	U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P (W)	U_d (V)	I_d (A)	U_m (V)	I_m (A)	
2,60	84	0,00	245	175,00	0,80	0,80	0,80	-35	80	45	40,00	0,80	224,50	0,43	0,71	
2,60	84	3,30	70	175,00	2,50	2,60	2,55	-185	260	75	18,00	3,00	223,00	0,43	0,72	
2,70	81	0,00	358	175,00	0,79	0,80	0,80	-25	85	60	57,70	0,75	210,50	0,43	0,72	
2,70	81	3,30	165	175,00	2,55	2,60	2,58	-160	285	125	33,50	3,00	215,00	0,43	0,80	
2,70	81	6,10	110	175,00	4,10	4,15	4,13	-270	450	180	29,90	5,00	218,00	0,43	0,83	
2,80	75	0,00	470	175,00	0,93	0,95	0,94	-20	115	95	76,50	0,90	215,00	0,43	0,72	
2,80	75	3,30	335	175,00	2,60	2,70	2,65	-110	330	220	60,50	3,10	224,00	0,43	0,85	
2,80	75	6,60	280	175,00	4,50	4,50	4,50	-200	555	355	57,00	5,50	220,00	0,43	0,88	
3,50	50	0,00	910	175,00	1,10	1,15	1,13	20	175	195	146,00	1,20	227,00	0,43	0,90	
3,50	50	2,80	860	175,00	2,55	2,60	2,58	40	410	450	142,00	3,00	227,00	0,43	0,95	
3,50	50	6,50	810	175,00	4,50	4,60	4,55	90	720	810	139,00	5,50	226,50	0,43	0,94	
4,20	25	0,00	1300	175,00	1,15	1,16	1,16	100	190	290	207,00	1,30	228,00	0,43	0,93	
4,20	25	2,60	1270	175,00	2,60	2,70	2,65	225	430	655	206,00	3,10	228,00	0,43	0,97	
4,20	25	6,10	1220	175,00	4,50	4,60	4,55	385	755	1140	201,50	5,50	228,00	0,43	0,97	
4,70	10	0,00	1450	175,00	1,16	1,17	1,17	150	180	330	230,00	1,35	228,00	0,43	0,94	
4,70	10	2,50	1410	175,00	2,50	2,50	2,50	320	390	710	229,00	3,00	228,00	0,43	0,97	
4,70	10	6,00	1390	175,00	4,60	4,60	4,60	580	710	1290	227,00	5,60	228,00	0,43	0,99	

Mittaustuloksista laskettiin tasasuuntaajan hyötysuhde ($\eta = P_{dc} / P$, $P_{dc} = U_d I_d$) ja piirrettiin sen kuvaaja ohjauskulman funktiona ($\eta = f(\alpha)$), parametrina tasavirran arvo 3 A (kuviot 31 ja 32),.

KUVIO 31. $\eta = f(\alpha)$, vanha suuntaajaKUVIO 32. $\eta = f(\alpha)$, uusi suuntaaja

Molemmista kuvaajista nähdään, että hyötysuhde pysyy ohjauskulman kasvaessa parempana kuin passiivisella kuormituksella. Lähellä ohjauskulman arvoa 90° hyötysuhteen kuvaaja kuitenkin laskee jyrkästi saavuttaen nollan pisteessä, jossa silta avautuu, eli tasavirta alkaa juuri ja juuri kulkea.

Työssä piti myös vertailla sillan avautumista passiivisilla resistiivisellä ja induktiivisella kuormituksilla sekä aktiivisella moottorikuormituksella. Ohjauskulman arvo, jolla silta avautuu eri kuormitustilanteissa, selvitettiin oskilloskoopin avulla katsomalla, milloin virta alkaa juuri ja juuri kulkea. Tässä oli sekä vanhoilla, että uusilla suuntaajilla hieman tulkinnanvaraa. Tarkoituksena oli kuitenkin todeta, että puhtaasti resistiivisellä kuormalla silta avautuu suuremmalla ohjauskulman arvolla, kuin induktiivisella

kuormalla. Näistä induktiivisimmalla moottorikuormituksella silta avautuu melko lähellä teoreettista ohjauskulman arvoa 90° . Teoriassa oletetaan, että induktanssi on ääretön.

Oskilloskooppikuvista ei juuri ole muuta analysoitavaa kuin virran tasoittuminen induktiivisella moottorikuormalla. Tämä todettiin jo passiivisen kuormituksen tuloksissa, joten oskilloskooppikuvia ei käydä tässä läpi. Kaikki mittaustulokset ja kuvat löytyvät liitteestä 4.

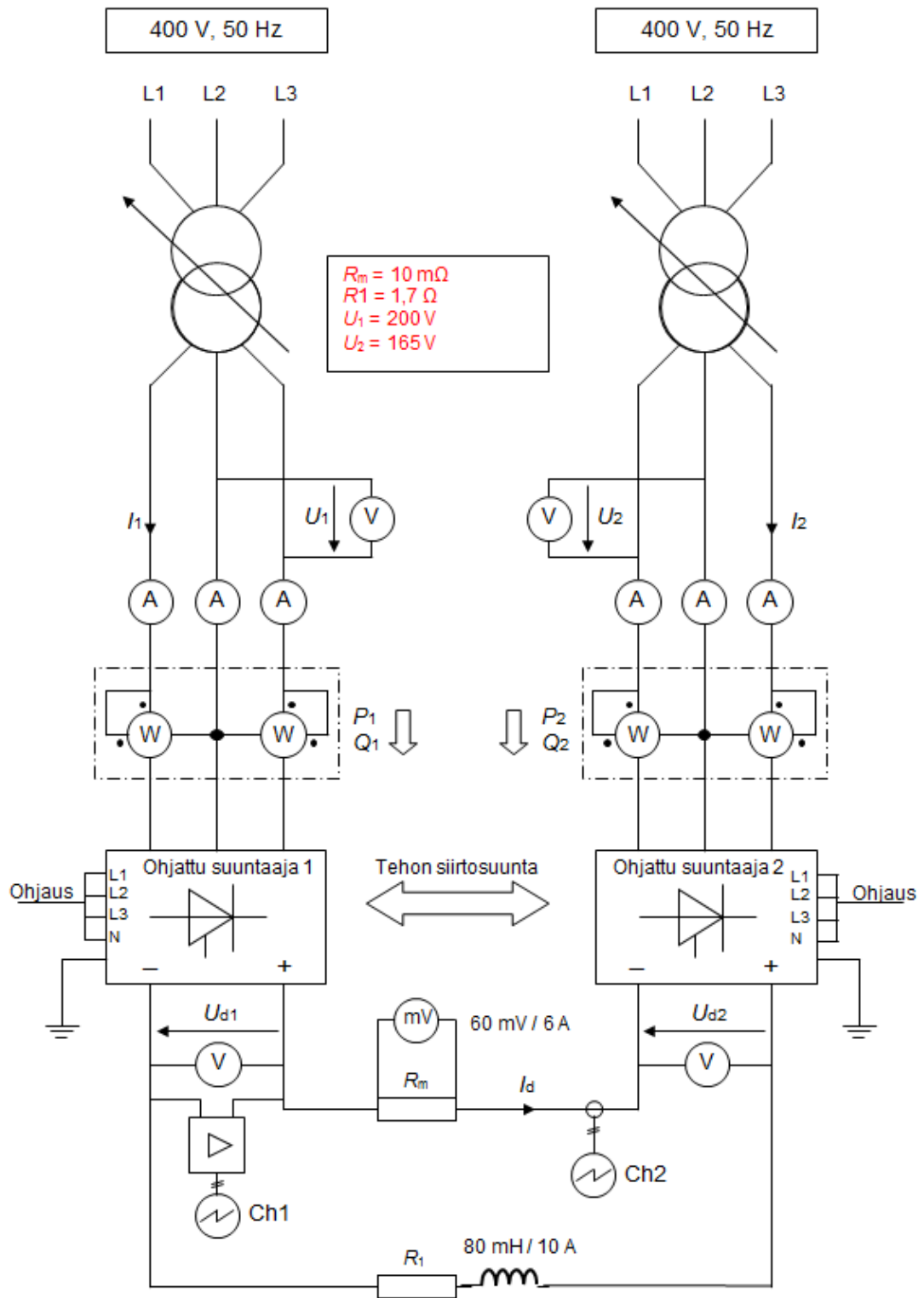
Tässä työssä tärkeimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että Ohjattu tasasuuntaaja -laboratoriotyö voidaan toteuttaa lähes sellaisenaan vanhojen työohjeiden mukaan.

4.2 Tasasähkövoimansiirto

Tasasähkövoimansiirto -laboratoriotyössä on tarkoitus muodostaa tasasähkövoimansiirtoyhteys kahden eri sähkölinkin välille kahden tasasuuntaajan avulla. Työn tarkoituksena on simuloida tasasähkölinkki ja perehtyä sen toimintaan ja ominaisuuksiin. Tasasähkönsiirtoa käytetään yleensä merikaapeloinnissa (esimerkkinä Suomen ja Viron välinen Estlink). Lisäksi tasasähkölinkillä voidaan yhdistää vaihtosähköverkot, joilla on eri jännitetasot tai taajuus.

4.2.1 Työohjeet

Tasasähkölinkkiä simuloidaan vanhoissa laboratoriotöissä kuvion 33 mukaisella kytkennällä. Kytkennässä tasasuuntajiin syötetään säätövaunulla säädettävä vaihtojännite. Suuntajien tasasähköpuolet kytketään toisiinsa ja väliin kytketään kuormitusvastus (R_1) ja kela (L), jotka kuvaavat siirtojohtoon impedanssia.



KUVIO 33. Tasasähkövoimansiirto -laboratoriotyön vanha mittauskytkentä (Mäkinen 2012, liite 5)

Molemmissa vaihtosähköverkkoissa on pääjännitteen mittaus (U_1 , U_2)
 Vaihtosähköverkkojen vaihevirtojen mittaukset toteutetaan analogisilla
 kiertorautamittareilla, sillä virta saattaa heilahdella kytkennässä paljonkin, jolloin

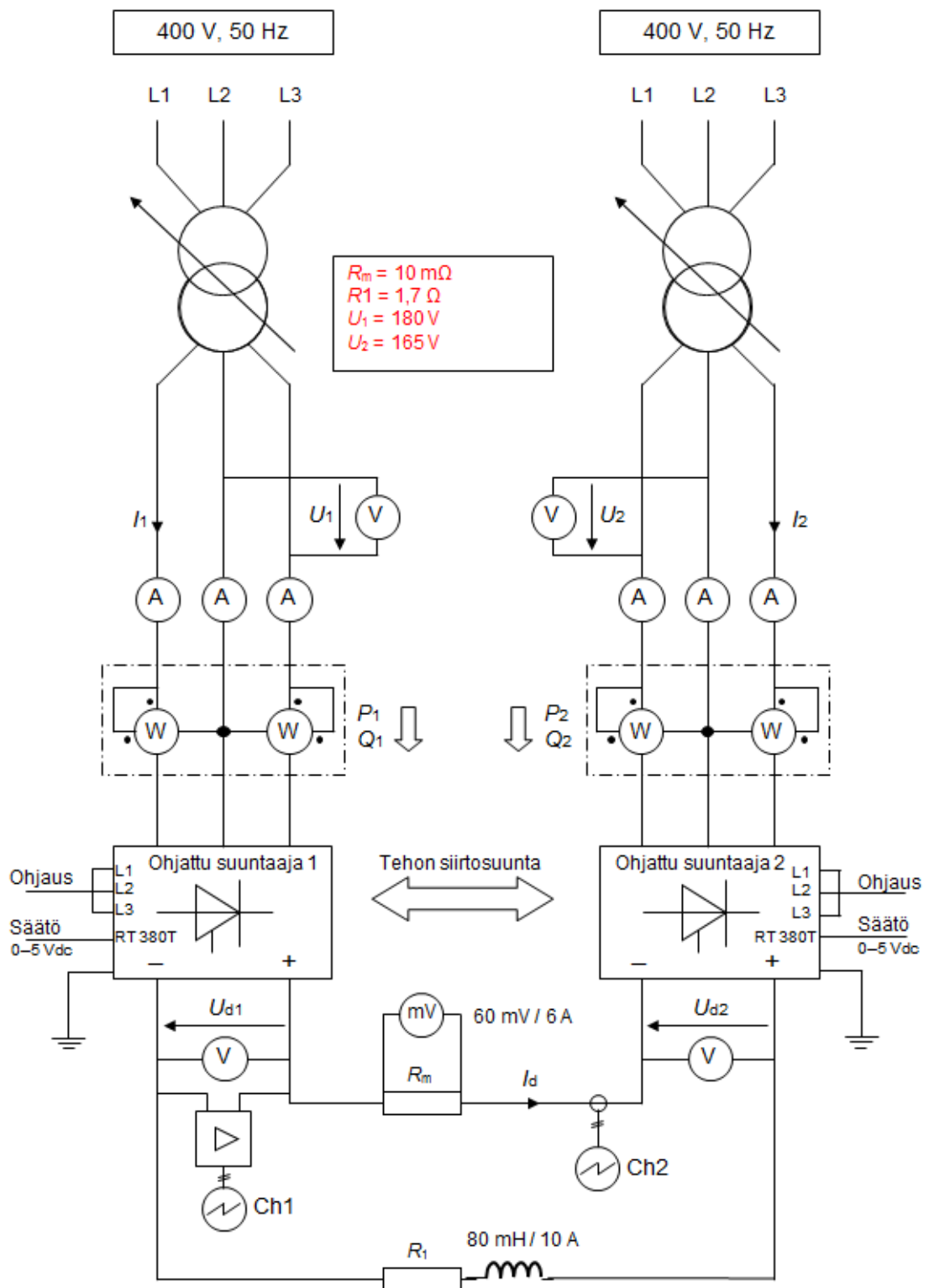
digitaaliset mittarit eivät välttämättä pysy mukana ja niitä voi olla vaikea lukea. Vaihtosähköverkkojen kokonaispätehon (P_1 , P_2) mittaauksessa käytetään kaksimittarikeinoa ($P = P_1 + P_3$). Tasasähkövälipiiristä mitataan tasajännitteet (U_{d1} , U_{d2}), sekä tasavirta (I_d), jonka mittausta on toteutettu Ohjattu tasasuuntaaja -työn tapaan shunttivastuksella. Tasapiirin virta ei siis saa nousta yli 6 A:n.

Oskilloskoopilla seurataan tasajännitteen ja -virran aaltomuotoja. Lisäksi käytetään Fluke 43 -tehoanalysointia, jolla tutkitaan virtojen ja jännitteiden aaltomuotoja, yliaaltoja ja kokonaissäröä molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä.

Työssä siis toinen suuntaajista toimii tasasuuntaajana ja toinen vaihtosuuntaajana. Valmistajan mukaan uudet tasasuuntaajat eivät olisi menneet tarpeeksi tasasuuntauksen puolelle. Ohjattu tasasuuntaaja -työtä tehtäessä vaikutti kuitenkin siltä, että vaihtosuuntaus ohjauksen säädön puolesta onnistuisi ja epäily vahvistui tätä työtä kokeiltaessa, eli työn toteuttaminen onnistuu hankituilla uusilla suuntaajilla.

Tässä työssä ei kytkennässä ole kuormia, joiden takia tasasähkövälipiirin jännite pitäisi rajata johonkin tiettyyn arvoon. Turvallisuuden takia opetusympäristössä jännitteet on kuitenkin hyvä pitää sopivan alhaisina. Siispä tässäkin työssä korkeampaa syöttöjännitteen tasoa laskettiin hieman 200 V:sta 180 V:iin ohjauksen laajemman skaalan takia. Tässä työssä jännitteen arvoilla ei kuitenkaan ole niin suurta merkitystä, sillä jännitetasoja muutellaan työssä niiden vaikutuksia tutkittaessa. Jännitetasot voitaisiin valita esimerkiksi johonkin todelliseen tasasähkölinkkiin (esim. Estlink) suhteutettuna.

Tässä opinnäytetyössä mittaukset on suoritettu syöttöjännitteiden arvoilla 180 V:a ja 165 V:a. Muita muutoksia ei tähänkään työhön tarvinnut tehdä. Työohje oli muutenkin valmiiksi melko epätarkka jättäen paljon varaa soveltamiselle ja itsenäiselle pohdinnalle. Kytkentäkuvaan muutettiin tasasuuntaussiltojen ohjauksen kytkennät ja lisättiin muistutus jumpperikytkennöistä ja tuulettimen virtajohdosta. Uusi kytkentäkuva on esitetty kuviossa 34. Vanhat ja uudet työohjeet löytyvät kokonaisuudessaan liitteistä 5 ja 6.



Tarkista suuntaajien juppereiden kytkennät
 ja muista kytkeä tuulettimien virtajohdot

KUVIO 34. Tasasähkövoimansiirto -laboratoriotyön uusi mittauskytkentä (Mäkinen 2012, liite 5, muokattu)

4.2.2 Mittaustulosten vertailu

Mittausten suorittamista ei ole määritelty työohjeessa kovinkaan tarkkaan. Kytkennän ensimmäinen käyttöönotto tehdään valvojan opastuksella. Lähtötilanteessa molempien sähköverkkojen ohjauskulman arvoksi säädetään noin 160° (kippaamisvara), jolloin kumpikaan silta ei ole johtavassa tilassa. Tämän jälkeen ensin verkon 1 jännite nostetaan haluttuun arvoon. Seuraavaksi nostetaan verkon 2 jännite haluttuun arvoon. Tämän jälkeen verkon 1 ohjauskulmaa pienennetään hitaasti mahdollisimman pieneksi kokoajan virtamittareita tarkkaillen. Jos silta toimii kuten pitääkin, voidaan itse tutkiminen aloittaa.

Aluksi kytkentää tutkitaan muuttamalla yhtä suuretta kerrallaan varovasti virtamittareita tarkkaillen ja havainnoimalla miten muutos vaikuttaa tasasähkölinkin käyttäytymiseen. Havaitaan, että verkon 1 jännitteen (U_1) nostaminen nostaa tasajännitettä (U_{d1}) ja -virtaa (I_d) ja näin ollen myös siirtyvää tehoa (P_1). Verkon 2 jännitteen (U_2) nostaminen taas pienentää tasajännitettä ja -virtaa. Verkon 1 ohjauskulman kasvattaminen ja verkon 2 ohjauskulman pienentäminen pienentävät tasajännitettä, -virtaa ja siirtyvää tehoa. Molempia yhtäaikaan säätämällä saadaan virta pysymään vakiona. Tehon suunnan voi havaita siitä, että verkon 1 teho (P_1) ja tasajännite (U_{d1}) ovat positiivisia ja verkon 2 (P_2 ja U_{d2}) negatiivisia. Teho siirtyy siis verkosta 1 verkkoon 2. Suuntaaja 1 toimii tasasuuntaajana ja suuntaaja 2 vaihtosuuntaajana.

Mittauksissa tehoa siirretään pääosin verkosta 1 verkkoon 2, mutta tehonsiirtoa kokeillaan myös toiseen suuntaan. Tehon suunnan muuttamista kokeillaan ilman katkosta. Tämä tapahtuu säätämällä molempia ohjauskulman arvoja yhtäaikaisesti, verkossa 1 ylöspäin kohti ohjauskulmaa 90° ja sen yli, ja vastaavasti verkossa 2 alaspäin kohti ohjauskulmaa 90° ja sen alle. Tasavirta pyritään pitämään kokoajan vakiona (esim 3A). Noin 90° asteen kohdalla tehon suunnan tulisi muuttua.

Uusien suuntaajien todettiin toimivan tasasiirtolinkissä kuten niiden kuuluukin.

Varsinaisia mittauksia varten valitaan vaihtosähköverkoille halutut jännitetasot. Vanhoissa mittauksissa ne olivat verkossa 1 200 V:a ja verkossa 2 165 V:a. Tässä työssä uusilla suuntaajilla tehdyissä mittauksissa käytettiin jännitteitä 180V ja 165V.

Mittaukset otettiin eri ohjauskulmien arvoilla niin, että virta pidettiin kaikissa mittauksissa vakiona. Vanhat mittaukset on esitetty taulukossa 5 ja uudet taulukossa 6.

TAULUKKO 5. Tasasähkölinkin mittaustulokset, vanhat suuntaajat

Taulukko 1. Verkko 1										
Mittaus	α_1	U_1 (V)	U_{d1} (V)	I_{Rm} (A)	I_{1L1} (A)	I_{1L2} (A)	I_{1L3} (A)	P_{1L1} (W)	P_{1L3} (W)	P_{1kok} (W)
1	60,75	195,80	146,20	4,00	3,35	3,35	3,40	40,00	570,00	610,00
2	85,00	198,90	57,20	3,90	3,20	3,20	3,25	-190,00	420,00	230,00
3	24,90	197,80	230,80	4,00	3,40	3,40	3,40	340,00	640,00	980,00
4	40,60	197,90	203,00	4,10	3,45	3,40	3,40	250,00	640,00	890,00

Taulukko 2. Verkko 2										
Mittaus	α_2	U_2 (V)	U_{d2} (V)	I_{2L1} (A)	I_{2L2} (A)	I_{2L3} (A)	P_{2L1} (W)	P_{2L3} (W)	P_{2kok} (W)	η (%)
1	133,30	164,40	-136,30	3,45	3,45	3,50	-490,00	-40,00	-530,00	0,87
2	110,30	165,40	-47,70	3,20	3,20	3,30	-330,00	170,00	-160,00	0,70
3	161,10	168,30	-221,30	3,50	3,50	3,50	-540,00	-380,00	-920,00	0,94
4	150,00	167,50	-194,20	3,30	3,35	3,35	-530,00	-250,00	-780,00	0,88

TAULUKKO 6. Tasasähkölinkin mittaustulokset, uudet suuntaajat

Verkko 1												
Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_1	U_1 (V)	U_{d1} (V)	I_{1L1} (A)	I_{1L2} (A)	I_{1L3} (A)	P_{1L1} (W)	P_{1L3} (W)	P_1 (W)		I_d (A)
1	4,5	15	180,50	227,40	3,50	3,45	3,50	395,00	600,00	995,00		4,25
2	3,8	40	180,00	185,70	3,20	3,15	3,25	200,00	550,00	750,00		3,90
3	3,0	70	180,10	87,70	3,25	3,25	3,40	-70,00	470,00	400,00		4,00
4	2,6	84	180,70	21,00	3,35	3,20	3,40	-250,00	350,00	100,00		3,90

Verkko 2											
Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_2	U_2 (V)	U_{d2} (V)	I_{2L1} (A)	I_{2L2} (A)	I_{2L3} (A)	P_{2L1} (W)	P_{2L3} (W)	P_2 (W)	η (%)
1	0,3	165	165,40	-219,20	3,45	3,40	3,50	-540,00	-375,00	-915,00	0,92
2	1,0	140	165,20	-177,10	3,15	3,10	3,20	-500,00	-185,00	-685,00	0,91
3	1,9	109	164,70	-78,90	3,25	3,10	3,25	-410,00	100,00	-310,00	0,78
4	2,3	95	165,90	-12,20	3,30	3,10	3,35	-280,00	270,00	-10,00	0,10

Mittaustuloksista voidaan molemmissa tapauksissa huomata, että mitä lähempänä ohjauskulmien arvot ovat 90° , sitä vähemmän pätötehoa siirtyy. Tällöin suuntaajat ottavat paljon loistehoa. Tehoa siirtyy siis eniten, kun verkon 1 ohjauskulma on mahdollisimman pieni ja verkon 2 mahdollisimman suuri. Tällöin myös hyötysuhde (η) on parhaimmillaan.

Tasasähkönsiirtoa tutkittaessa hyötysuhde onkin tärkeää, sillä oikeassa siirtoverkossa hyötysuhteiden tulee tietysti olla mahdollisimman suuria, jotta siirto on kannattavaa. Töissä lasketaan suuntaajien (η_1 ja η_2), tasasähkövälipiirin (η_{dc}) ja koko järjestelmän (η) hyötysuhteet. Laskennan tulokset vanhoilla ja uusilla tasasuuntaajilla on esitetty taulukoissa 7 ja 8.

TAULUKKO 7. Tasasähkölinkin lasketut hyötysuhteet, vanhat suuntaajat

Mittaus	α_1	η_1 (%)	η_2 (%)	η_3 (%)	η (%)
1	60,75	0,96	0,97	0,93	0,87
2	85,00	0,97	0,86	0,83	0,70
3	24,90	0,94	1,04	0,96	0,94
4	40,60	0,94	0,98	0,96	0,88

TAULUKKO 8. Tasasähkölinkin lasketut hyötysuhteet, uudet suuntaajat

Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_1	η_1 (%)	η_2 (%)	η_{dc} (%)	η (%)
1	4,5	15	0,97	0,98	0,96	0,92
2	3,5	40	0,97	0,99	0,95	0,91
3	3,0	70	0,88	0,98	0,90	0,78
4	2,5	84	0,82	0,21	0,58	0,10

Valitettavasti lasketuista hyötysuhteista ei voi kummassakaan tapauksessa tehdä kovinkaan luotettavia päätelmiä. Vanhassa työssä mittauksen 3 suuntaajan 2 hyötysuhteeksi on saatu jopa yli 1, mikä ei ole mahdollista. Vastaavasti uusilla suuntaajilla mittauksessa 4 hyötysuhteet ovat ihan mitä sattuu. Tämä johtuu käytettävien analogisten mittareiden epätarkkuudesta, minkä vuoksi varsinkaan pienillä tehoilla ei saada kovinkaan tarkkoja tuloksia. Tuloksista voidaan kuitenkin havaita, että ohjauskulman lähestyessä 90° häviöitä syntyy enemmän.

Fluke 43 -tehoanalysointilaitteen kuvia analysoidiin samaan tapaan kuin Ohjattu tasasuuntaaja -työssä (ks. sivu 34). Kaikki uusilla suuntaajilla otetut kuvat löytyvät liitteestä 7. Kuvista tutkittiin jännitteiden ja virtojen aaltomuotoja, yliaaltoja ja kokonaissäröä. Kuvista voidaan todeta, ohjauskulmien lähestyessä arvoa 90° virran aaltomuoto on epätasaisempaa, yliaaltoja on enemmän ja kokonaissärö on suurempi. Mittausten perusteella voidaan siis todeta, että verkon häiriöiden sekä siirtyvän tehon määrän ja hyötysuhteiden kannalta tasasähkönsiirrossa on kannattavinta käyttää syöttävän verkon puolella mahdollisimman pientä ohjauskulman arvoa ja vastaavasti vastaanottavan verkon puolella mahdollisimman suurta ohjauskulman arvoa.

Tässä opinnäytetyössä tärkeimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että myös Tasasähkövoimansiirto -laboratoriotyö voidaan toteuttaa lähes sellaisenaan vanhojen työohjeiden mukaan. Tämä on erityisen onnistunut tulos, sillä etukäteen luultiin, että tilatuilla suuntaajilla ei voitaisi työtä toteuttaa ollenkaan.

5 POHDINTA

Työn päätavoitteena oli saada vanhat suuntaajat ja niille suunnitellut työt korvattua uusilla suuntaajilla. Tehdyt tutkimukset osoittavat, että vanhat laboratoriotyöt voidaan pienillä muutoksilla suorittaa uusilla suuntaajilla. Työtä voidaan siis pitää onnistuneena. Raportti toimii myös tavoitteiden mukaisesti ohjeena tulevalle laboratoriotöiden ohjaajalle.

Työn haastavin osuus oli uusien suuntaajien ohjauksulman säätöratkaisu. Päänvaivaa tuotti valmistajan ilmoittaman säätöalueen virheellisyyden lisäksi säädön hahmottamisen hankaluus. Tähän olisikin työssä ollut hyvä löytää joku toimivampi ratkaisu, mutta sitä ei ajanpuutteessa ehditty lopulta toteuttaa. Ohjauksulman säätöratkaisussa on siis vielä kehitettävää. Myös suuntaajien suojaus ylivirroilta jäi valitettavasta toteuttamatta.

Laboriotoröiden osalta kehitettävää olisi ollut esitehtävissä Eerik Mäkisen antamien ideoiden pohjalta. Esimerkiksi tasasähkövoimansiirtotyössä esitehtävissä ja itse työssä käytettävät jännitetasot voisi valita jonkun todellisen tasasiirtolinkin perusteella. Esitehtävien kehittäminen rajattiin kuitenkin ajanpuutteessa työn ulkopuolelle.

Tehoelektroniikka ja suuntaajakytkennät ovat sähkövoimatekniikan alalla merkittävä osaamisalue. Työtä tehdessä tietoni tehoelektroniikan komponenteista, suuntauskytkennöistä ja niiden käytöstä sähkövoimatekniikassa syventyivät huomattavasti. Oli myös kiinnostavaa pohtia laitteiden opetuskäyttöön liittyviä ongelmia, kuten turvallisuutta ja selkeyttä oppimisen kannalta.

Lopuksi tahtoisin vielä kiittää ohjaajani Klaus Virtasta avusta ja kärsivällisyydestä. Kiitoksen ansaitsee myös Eerik Mäkinen, joka antoi luvan käyttää suunnittelemaani laboriotoröitä ja avusti niiden ymmärtämisessä. Kiitos myös muulle TAMKIn väelle, jotka avustivat työn toteuttamisessa.

LÄHTEET

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

TTY. Tasasuuntaajat – Tehosta. Kurssimateriaali. Tulostettu 2.6.2014.

http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/TEL_1040/2012/harjoitukset/Tehosta.pdf

The-Crankshaft Publishing. What-when-how – In Depth Tutorials and Information.

D.C. from A.C. – Controlled rectification. Figure 2.12. Luettu 2.6.2014.

<http://what-when-how.com/motors-and-drives/d-c-from-a-c-controlled-rectification-motors-and-drives/>

Aura L. Tonteri A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.–6. painos. Helsinki: WSOYpro Oy.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Partanen J. 2011. Tasasähkövoimansiirto. Luentomateriaali. Julkaistu 29.11.2011.

Luettu 30.5.2014.

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0600/luennot/tasasahkovoimansiirto.pdf>

Semikron Oy. 2004. Application Note – Thyristor Power Electronics Teaching System. Tulostettu 2.6.2014.

[http://www.sindopower.com/out/media/Datasheet\(1\).pdf](http://www.sindopower.com/out/media/Datasheet(1).pdf)

Aura L. Tonteri A. 1996. Sähkökoneet jatehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Porvoo: WSOY.

Liite 1. Ohje ohjaukulman säätöön

TAMK
Sähkölaboratorio

Ohjaukulman säätö
Liite tasasuuntaustöihin

1 (2)

Tasasuuntaajien ohjaukulman säätö

Tämä on ohje tasasuuntaajien 0–5 V ohjaujännitteen muuttamiseen ohjaukulmaksi.

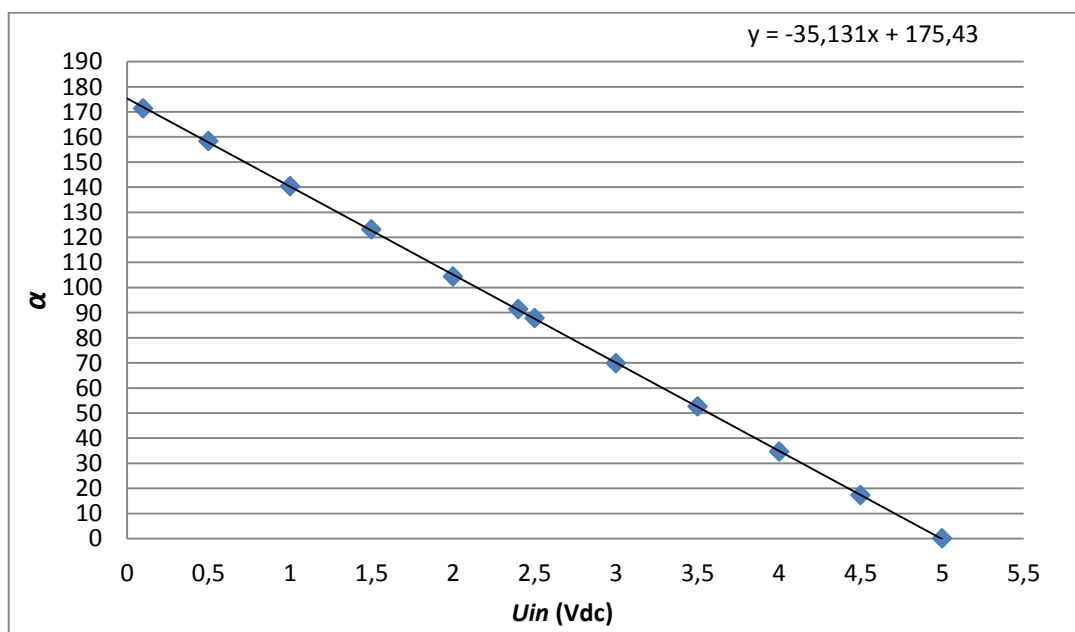
Älä ylitä ohjaukulmaa 161° (älä alita ohjaujännitettä 0,4V).

Taulukko 1. Ohjaujännitteen ja ohjaukulman suhde 0,5 V:n välein

U_{in} (Vdc)	α
5,0	0
4,5	17
4,0	35
3,5	52
3,0	70
2,5	88
2,4	91
2,0	105
1,5	123
1,0	140
0,5	158
0,0	175

Ohjaukulma millä tahansa ohjaujännitteen arvolla voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä:

$$\alpha = -35,131 \cdot U_{in} + 175,43$$



Kuva 1. Ohjaukulma suhteessa ohjaujännitteeseen

(jatkuu)

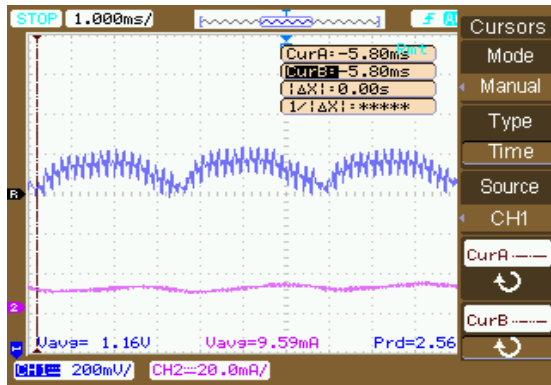
Taulukko 2. Ohjauksen jännitteen ja ohjauksen suhde 0,1 V:n välein

U_{in} (Vdc)	α	U_{in} (Vdc)	α	U_{in} (Vdc)	α	U_{in} (Vdc)	α	U_{in} (Vdc)	α
5,0	0	4,0	35	3,0	70	2,0	105	1,0	140
4,9	3	3,9	38	2,9	74	1,9	109	0,9	144
4,8	7	3,8	42	2,8	77	1,8	112	0,8	147
4,7	10	3,7	45	2,7	81	1,7	116	0,7	151
4,6	14	3,6	49	2,6	84	1,6	119	0,6	154
4,5	17	3,5	52	2,5	88	1,5	123	0,5	158
4,4	21	3,4	56	2,4	91	1,4	126	0,4	161
4,3	24	3,3	59	2,3	95	1,3	130	0,3	165
4,2	28	3,2	63	2,2	98	1,2	133	0,2	168
4,1	31	3,1	67	2,1	102	1,1	137	0,1	172

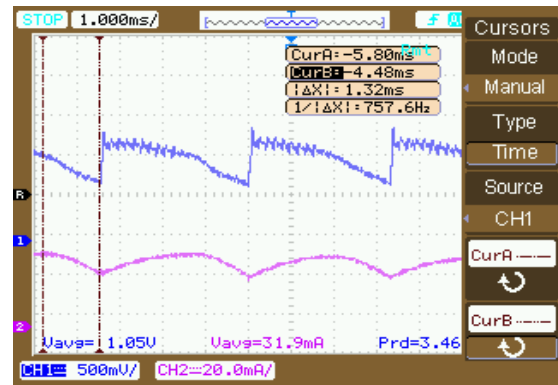
Ohjauksen voi mitata itse oskilloskoopilla:

1. Aseta ohjauksen kulma 0 °:seen (5,0 V)
2. Ota käyttöön oskilloskoopin kursoritoiminto
3. Aseta kursorit kuvan 2 mukaisesti puolijakson alkuun
4. Kasvattaessasi ohjauksen kulmaa pidä toinen kursori paikoillaan ja seuraa toisella kursorilla jännitteen leikkautumiskohtaa (kuvat 3 ja 4)
5. Voit laskea ohjauksen kulman kursorien välisestä Δt :n (eli ΔX) arvosta seuraavalla kaavalla (esim. kuva 4)

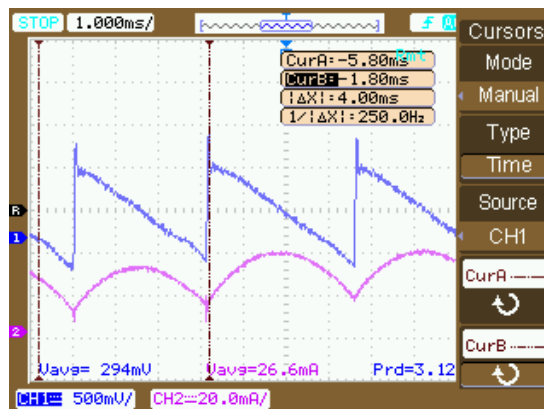
$$\alpha = \frac{\Delta t}{T} \cdot 180^\circ = \frac{4,00\text{ms}}{10\text{ms}} \cdot 180^\circ \approx 72^\circ$$



Kuva 2. Ohjauksen kulman määrittäminen, 0°



Kuva 3. Ohjauksen kulman määrittäminen, 24°



Kuva 4. Ohjauksen kulman määrittäminen, 72°

TAMK
Sähkölaboratorio
Eerik Mäkinen

Ohjattu tasasuuntaaja
12.3.2013/em

1 (8)

Ohjattu tasasuuntaaja

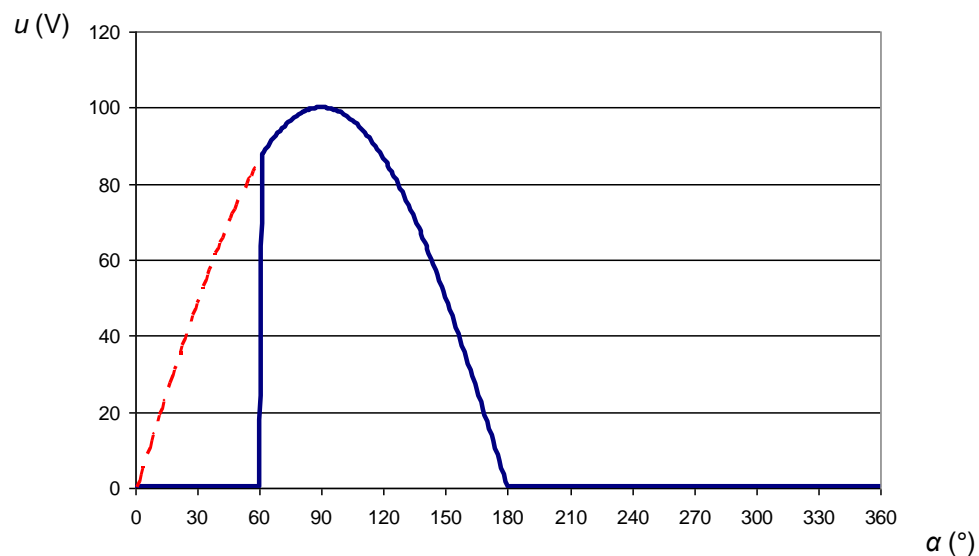
Tavoite Työn tavoitteena on perehtyä *kolmivaiheisen ohjatun tasasuuntaajan* toimintaan ja perusominaisuuksiin passiivisella (R ja RL -piiri) sekä aktiivisella kuormalla (tasavirtamoottori).

1 Esitehtävät

Esitehtävät tehdään annetun aikataulun mukaisesti ennen laboratoriossa suoritettavien mittausten ja muiden tutkimusten aloittamista. Esitehtävien tarkoituksena on, että työryhmä perehtyy kyseisen työn *vastuuhenkilön* johdolla annettuun aineistoon ja valmistautuu laboratoriossa suoritettavaan tutkimustyöhön. Aineistoon perehtyminen ja työsuorituksen valmistautuminen on erityisen tärkeitä turvallisuussyistä, mutta se on tärkeitä myös työn sujumisen kannalta.

Perehdy *ohjatun kolmivaiheisen tasasuuntaussillan* toimintaan kirjallisuuden avulla (esim. Aura & Tonteri tai Hietalahti).

- 1.1 Piirrä *ohjatun kolmivaiheisen tasasuuntaussillan* (2-tiekytkentä, jonka sykelukku on 6) periaatekytkentä (pääkaavio) ja selosta sen toiminta lyhyesti.
- 1.2 Miten määritellään *ohjattuun kolmivaiheiseen tasasuuntaussilltaan* liittyvä käsite *ohjauskulma*? Havainnollista asiaa piirroksella. [Ohje: Piirrä ensin kolmivaihejärjestelmän jännitteiden hetkellisarvojen kuvaajat. Esitä käsite ohjauskulma piirroksen avulla.]
- 1.3 Ohjatun kolmivaiheisen suuntaajan ohjauskulman arvoa voidaan säätää välillä $18^\circ \dots 162^\circ$. Laske, kuinka suuri saa vaihtosähköverkon *pääjännitteen tehollisarvo* enintään olla, jos *tasasuunnatun* jännitteen *aritmeettinen keskiarvo* saa olla korkeintaan 200 V.
- 1.4 Laske kuvan mukaisen sinimuotoisen jännitteen *aritmeettinen keskiarvo*.



Kuva 1. "Leikattu" sinimuotoinen jännite

(jatkuu)

2 Tutkimukset laboratoriossa

Sähkötekniset tutkimukset sekä niihin liittyvät kytkennät ja mittaukset tehdään sähkölaboratoriossa.

Sähkötyöturvallisuuden takia kytkentöjen rakentamiseen, muuttamiseen ja purkamiseen on aina saatava valvojan lupa. Ennen edellä mainittuihin toimenpiteisiin ryhtymistä kutsu paikalle valvoja, joka tarkastaa, että kytkentä ja työskentelyalue ovat jännitteettömiä.

Myös jännitteen kytkemiseen on aina saatava valvojan lupa. Kutsu valvoja tarkastamaan rakennettu tai muutettu kytkentä.

Kaikista laboratoriossa suoritettavista tutkimuksista laaditaan mittauspöytäkirja, johon tehdään myös tarpeelliset muistiinpanot. Mittauskytkentöjen piirikaavioissa esitetään kaikki tutkimuksen kannalta olennaiset asiat kuten tutkittavat laitteet sähköteknisine tietoineen, sähkölähteet, mittauslaitteet, kytkimet, komponentit, jne. Piirikaavioihin merkitään lisäksi kaikki mitattavat suureet referenssisuuntineen käyttämällä standardien mukaisia symboleita ja suuretunnuksia.

Tarkista aina ennen mittauksia mittareiden valintakytkimen asento (mitattava suure) ja virtalaji (AC/DC) sekä mittausalue.

Yleisohjeita



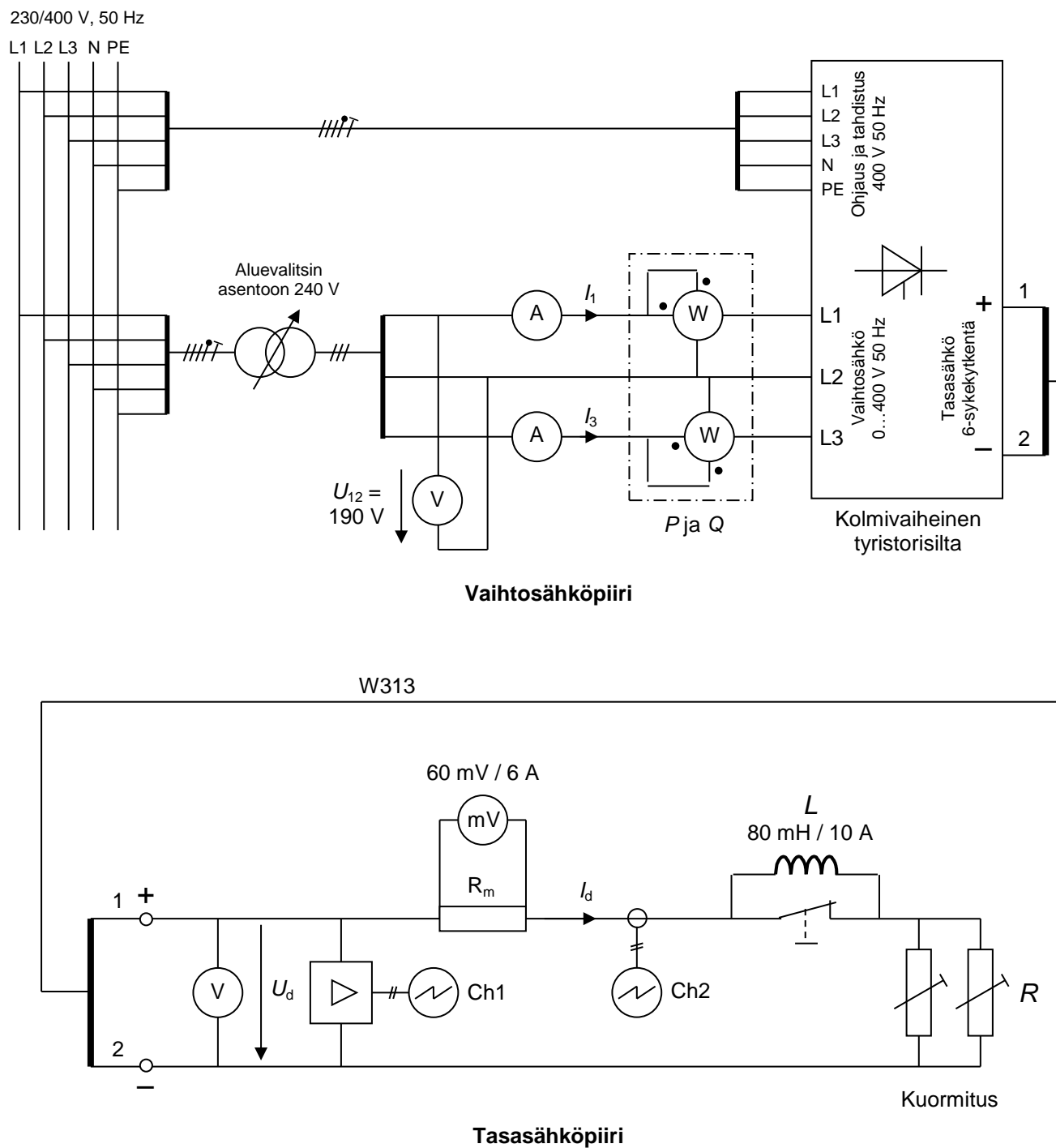
Koska kytkennässä ei käytetä virtamuuntaajia, on kytkennän suurin sallittu virta 5 A. Pidä huoli, ettei virta missään olosuhteissa nouse tämän rajan yli.

Tutkittavia mittaustilanteita on paljon ja aikaa on rajoitetusti käytettävissä, joten hyvään lopputulokseen pääsemiseksi mittaukset on syytä suunnitella huolellisesti etukäteen!

12.3.2013/em

2.1 Ohjattu tasasuuntaaja – passiivinen kuormitus (R ja RL)

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä. [Maadoita tasasuuntaaja ja kuormitusvastus!](#)



Kuva 2. Mittauskytkentä. Passiivinen kuorma (R ja RL).

Alkutoimenpiteet – passiivinen kuormitus (R ja RL)



Ennen alkutoimenpiteisiin ryhtymistä kutsu valvoja tarkastamaan kytkentä!

1. Tarkista, että sekä tasasuuntaaja että kuormitusvastus on maadoitettu.
2. Tarkista, että vaihejärjestys noudattaa kuvaan merkittyjä tunnuksia.
3. Tarkista, että **säätömuuntajan aluevalitsin on asennossa 240 V**, mutta älä kytke vielä jännitettä.
4. Aseta kuormitusvastuksen resistanssin arvoksi 240 Ω .
5. Kytke tasasuuntaussillan *ohjaus ja tahdistus* -jännite (230V/400V). **Kytke ohjaus ja tahdistus aina päälle ensimmäiseksi – pois viimeiseksi.**
6. Aseta tasasuuntaussillan *ohjauskulma* maksimiarvoonsa 162° ja sulje tyristorisillan pääkytkin.
7. Säädä *vaihtosähkön* jännitteen arvoksi 190 V. Nosta jännitettä aluksi hitaasti ja **tarkkaile virtamittareita** säädön aikana! Pidä jännite vakiona kaikkien mittausten ajan (säädä tarvittaessa).
8. Säädä ohjauskulmaa minimiarvoonsa 18°. **Tarkkaile virtamittareita!**
9. Arvioi mittaustulosten oikeellisuus työskentelyn alussa ja mittausten aikana!

Edellä esitettyssä tilanteessa *tasajännitteen teoreettinen keskiarvo* on $1,35 \cdot 190 \text{ V} \cdot \cos(18^\circ) = 244 \text{ V}$ ja *tasavirran teoreettinen keskiarvo* vastaavasti $244 \text{ V} / 240 \Omega \approx 1,0 \text{ A}$. Teoreettiset arvot edellyttävät, että virta on *aukotonta*.

Käytännössä johtavassa tilassa olevan tyristorin jännitehäviö (kynnysjännite) on noin 1,5 V. Kolmivaiheisen siltakytkennän johtavassa haarassa on aina kaksi tyristoria sarjassa, mistä aiheutuu noin 3 V:n jännitehäviö. Lisäksi mittaustuloksiin vaikuttavat virtapiirin muut jännitehäviöt.

Mittaukset

Kuormituksena resistanssi R



Mittaukset suoritetaan neljällä eri ohjauskulman arvolla: 20° , 30° , 60° ja 80° . Ohjauskulma pidetään vakiona kunkin *mittaussarjan ajan*. Ohjauskulma on siis tämän tutkimuksen *parametri*.

Merkitse mittauspöytäkirjaan eri kuormitustilanteissa

- ohjauskulman arvo (*parametri*, joka on vakio kunkin mittaussarjan ajan)
- vaihtosähkön pääjännitteen *tehollisarvo* (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
- vaihtovirran *tehollisarvo* (laske vaihevirtojen keskiarvo mittauspöytäkirjaan)
- vaihtosähkön *pätoiteho* (laske *loisteho* mittauspöytäkirjaan)
- tasajännitteen *aritmeettinen keskiarvo*
- tasavirran *aritmeettinen keskiarvo*.

Mittaa *oskilloskoopin* avulla tasavirran ja tasajännitteen *hetkellisarvojen* kuvaajat. Yksi kuva kullakin ohjauskulman arvolla riittää. Mittaa kuvaaja aina suunnilleen samalla tasavirran arvolla (esim. 3,0 A). Käytä oskilloskooppimittauksissa *virtapihtiä* ja *jänniteprobea* (galvaaninen erotus). Muista tallentaa kuvaajat esim. verkkolevyille omaan hakemistoosi. Merkitse muistiin kaikkien mittalaitteiden kertoimet sekä mittaustilanteet, jotta voit analysoida tuloksia myöhemmin.

Merkitse lisäksi muistiin se ohjauskulman arvo, jolla silta avautuu. Se on kohta, jossa tasavirta alkaa juuri ja juuri kulkea. Tilannetta on kätevä tarkastella oskilloskoopin avulla.

Suorita kuormitusresistanssin arvoa säätämällä neljä mittausta kullakin ohjauskulman (*parametrin*) arvolla. Tasavirran aritmeettinen keskiarvo (DC-alue) ei saa ylittää arvoa 6 A, eikä vaihtovirran tehollisarvo saa ylittää arvoa 5 A. **Seuraa virtamittareita!**

Mittaukset on järkevää suorittaa siten, että ensin säädetään kuormitusvirraksi suurin mahdollinen arvo ja suoritetaan mittaukset. Tämän jälkeen jaetaan mittaussväli virtojen perusteella suunnilleen tasaväleihin ja suoritetaan muut kolme mittausta, viimeinen lähes tyhjäkäynnissä (virta alle 0,5 A).

Havainnoi tasasuuntaajan verkkovaikutuksia Fluke 43 -tehoanalyysoitsijalla. Tallenna tulokset samasta mittaustilanteesta kuin oskilloskooppikuvatkin.

- verkon vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot (yhdestä vaiheesta)
- verkon vaihejännitteen harmoniset komponentit (viivaspektri) ja kokonaissärö THD_F
- verkon vaihevirran harmoniset komponentit (viivaspektri) ja kokonaissärö THD_F .

Kuormituksena RL -sarjakytkentä



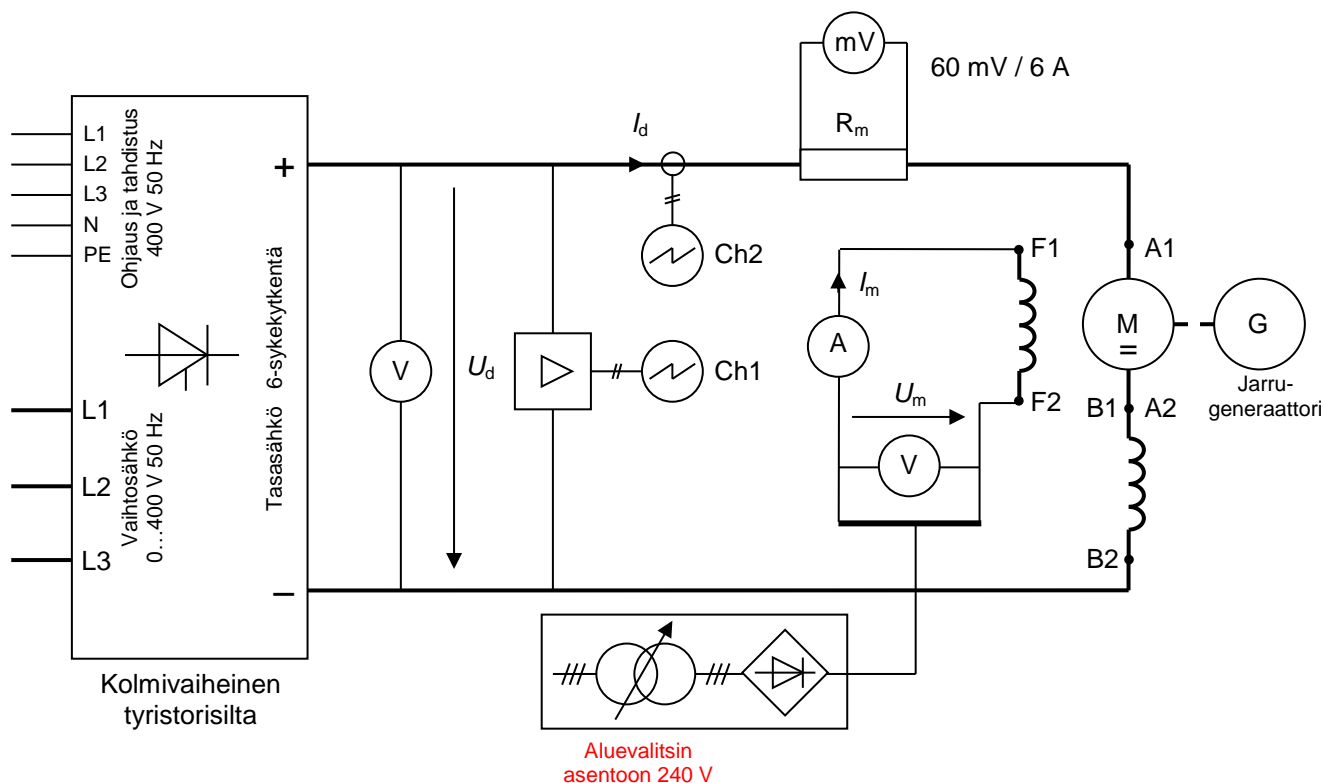
Toista mittaukset edellä kuvatulla tavalla, kun kuormituksena on passiivinen RL -sarjapiiri.

Jos tulee aikapula, niin vaihtoehtoisesti voidaan valita joitakin kuormitustilanteita ja kokeilla, miten induktanssi L vaikuttaa tuloksiin. Tämä tapahtuu vuoroin sulkemalla ja avaamalla kytkin S .

2.2 Ohjattu tasasuuntaaja – tasavirtamoottorin pyörimisnopeuden säätö

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä. **Maadoita tasasuuntaaja!**

Tyristorisillan kytkentä on vaihtosähköpuolen ja ohjauskytkentöjen osalta Kuva 2 mukainen.



Kuva 3. Mittauskytkentä. Aktiivinen kuorma, tasavirtamoottori.

Tasasähköpuolen passiivinen kuormitus vaihdetaan aktiiviseksi moottorikuormaksi. Tasavirtamoottorin *ankkuripiiri* kytketään sillan tasasähköpuolen liittimiin. Moottorin *magnetointi* voidaan toteuttaa säätövaunua ja siinä olevaa kolmivaiheista tasasuuntaussiltaa käyttäen.

Varoitus! Ennen ankkurijännitteen säätöä on varmistettava, että tasavirtamoottorin magnetoimisvirta on kilpiarvon mukaisessa nimellisarvossaan. Magnetointia ei saa katkaista moottorin käydessä.



Alkutoimenpiteet



Ennen alkutoimenpiteisiin ryhtymistä kutsu valvoja tarkastamaan kytkentä!

1. Tarkista, että tasasuuntaaja on maadoitettu.
2. Tarkista, että vaihejärjestys noudattaa kuvaan merkittyjä tunnuksia.
3. Tarkista, että säätömuuntajan aluevalitsin on asennossa 240 V, mutta älä kytke vielä jännitettä.
4. Kytke tasasuuntaussillan *ohjaus ja tahdistus* -jännite (230V/400V). Kytke ohjaus ja tahdistus aina päälle ensimmäiseksi – pois viimeiseksi.
5. Aseta tasasuuntaussillan *ohjauskulma* maksimiarvoonsa 162° ja sulje tyristorisillan pääkytkin.
6. Säädä *vaihtosähkön* jännitteen arvoksi 190 V. Nosta jännitettä aluksi hitaasti ja tarkkaile virtamittareita säädön aikana! Pidä jännite vakiona kaikkien mittausten ajan (säädä tarvittaessa).
7. Arvioi mittaustulosten oikeellisuus työskentelyn alussa ja mittausten aikana!

Mittaukset



Tarkista arvokilvestä tasavirtamoottorin nimellisvirran arvo äläkä ylitä sitä tutkimusten aikana missään olosuhteissa!

Säädä tasavirtamoottorin magnetoimisvirta nimellisarvoonsa ja pidä se vakiona kokeen ajan (säädä tarvittaessa). Pienennä tasasuuntaussillan ohjauskulmaa hitaasti ja merkitse muistiin se ohjauskulman arvo, jolla moottori käynnistyy (silta tulee johtavaan tilaan).

Säädä tämän jälkeen ohjauskulman arvoksi jokin sopiva arvo esimerkiksi siten, että moottori pyörii kuormittamattomana noin 1/3 nimellisa nopeudestaan. **Kuormita moottoria jarrugeneraattorin avulla tyhjäkäynnistä alkaen, kunnes vaihtovirran tehollisarvo on noin 4,5 A. Huolehdi lisäksi siitä, ettei tasasähköpuolen virta ylitä arvoa 6 A (eikä moottorin nimellisvirtaa).**

Huom! Moottori ei saa missään kuormitustilanteessa pysähtyä! Kommutaattori vaurioituu!

Suorita mittaukset eri kuormituspisteissä moottorin kuormitusmomenttia säätämällä. Säädä momenttia siten, että tasavirran arvo (moottorin virta) muuttuu noin 1 A välein (maksimiarvosta minimiin).

Tämän jälkeen suoritetaan vastaavat mittaukset muilla sopivilla ohjauskulman arvoilla, esimerkiksi 60°, 30° ja 20°. Ohjauskulma pidetään vakiona (*parametrina*) kunkin *mittaussarjan ajan*.

Merkitse mittauspöytäkirjaan eri kuormitustilanteissa

- ohjauskulman arvo (*parametri*, joka on vakio kunkin mittaussarjan ajan)
- vaihtosähköön pääjännitteen *tehollisarvo* (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
- vaihtovirran *tehollisarvo* (laske vaihevirtojen keskiarvo mittauspöytäkirjaan)
- vaihtosähköön *pätöteho* (laske *loisteho* mittauspöytäkirjaan)
- tasavirtamoottorin
 - magnetoimisvirta (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
 - ankkurijännitteen *aritmeettinen keskiarvo*
 - ankkurivirran *aritmeettinen keskiarvo*
 - vääntömomentti
 - akselin pyörimisnopeus.

Mittaa *oskilloskoopin* avulla tasavirran ja tasajännitteen *hetkellisarvojen* kuvaajat. Yksi kuva kullakin ohjauskulman arvolla riittää. Mittaa kuvaaja aina suunnilleen samalla ankkurivirran arvolla (esim. 3,0 A). Käytä oskilloskooppimittauksissa *virtapihtiä* ja *jänniteprobea* (galvaaninen erotus). Muista tallentaa kuvaajat esim. verkkolevyille omaan hakemistoosi. Merkitse muistiin kaikkien mittalaitteiden kertoimet sekä mittaustilanteet, jotta voit analysoida tuloksia myöhemmin.

3 Työselostus ja siihen liittyvät tehtävät

Työselostus laaditaan TAMKin kirjallisten töiden raportointiohjetta soveltaen. Asiat tulee käsitellä loogisessa järjestyksessä siten, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Selostusta laadittaessa kaikki olennaiset arvokilpitiedot, komponenttiarvot sekä mitatut ja mittaustulosten perusteella lasketut arvot esitetään selkeinä taulukoina. Lasketuista arvoista esitetään kutakin tutkittavaa asiaa hyvin edustava laskuesimerkki. Tulokset esitetään graafisesti aina, kun se on mahdollista (kiinnitä erityistä huomiota kuvaajien laatuun). Tulosten oikeellisuus pyritään osoittamaan vertaamalla omien tutkimusten perusteella saatuja tuloksia teoretietoihin.

Jokaisen laboratoriossa käytetyn mittausskytkennän piirikaavio esitetään sille sopivassa asiayhteydessä. Kytkeä, mittauseriaa, mittauksen tarkoitusta ja muita tutkimukseen liittyviä asioita on hyvä kommentoida lyhyesti. Samaan yhteyteen taulukoidaan tutkimuksessa mitatut arvot ja laajennetaan taulukoita lisäämällä niihin myös mittaustulosten perusteella lasketut arvot. Lisäksi on syytä tarkistaa, että taulukoissa esiintyvät suureet on referenssisuuntineen esitetty myös piirikaavioissa.

Tehtävät

Käsittele työselostuksessa kukin seuraavista tehtävistä sille sopivassa asiayhteydessä niin, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Muista verrata tuloksia teoretietoihin sekä kommentoida ja perustella kuvaajien luonnetta. Piste- eli x–y -kaavioissa kuvaajien *mittauspisteet* tulee jättää näkyviin. Kuvaajien *graafinen tasoitus* onnistuu usein *lisää trendiviiva* -komennolla.

- 3.1 Piirrä samaan koordinaatistoon mittauksiin 2.1 perustuvat kuvaajat $U_d = f(I_d)$, kun parametrina on ohjauskulma α . U_d = tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo, I_d = tasavirran aritmeettinen keskiarvo. Piirrä koordinaatistoon vertailun vuoksi myös kaavan $U_d = 1,35U\cos(\alpha)$ perusteella lasketut arvot. Poikkeavatko mittausten perusteella piirretyt kuvaajat teoreettisesti lasketuista kuvaajista? Jos poikkeavat, niin miksi?
- 3.2 Piirrä seuraavaksi mittausten 2.1 perusteella kuvaajat $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$, kun parametrina on ohjauskulma α . [Ohje: $P_{DC} = U_d I_d$ ja $P_{AC} = P_{L1} + P_{L3}$]
- 3.3 Piirrä mittausten 2.1 perusteella tasasuuntaussillan hyötysuhteen kuvaaja ohjauskulman α funktiona, eli $\eta = f(\alpha)$, missä $\eta = P_{DC} / P_{AC}$. Käytä *parametrina* tasavirran arvoa $I_d = 2,5 \text{ A}$ eli määritä kuvaajilta 2,5 A virtaa vastaavat tehojen arvot.
- 3.4 Miten on mahdollista, että mittauksissa 2.1 verkosta otetaan myös loistehoa, vaikka kuormituksen on puhdas resistanssi?
- 3.5 Piirrä samaan koordinaatistoon mittauksiin 2.2 perustuen jäljempänä kohdissa a) ... c) mainitut hyötysuhteiden kuvaajat. Käytä *parametrina* tasavirran arvoa $I_d = 2,5 \text{ A}$.
 - a) Tasavirtamoottorin hyötysuhteen kuvaaja $\eta_M = f(\alpha)$.
 - b) Tyristorisillan hyötysuhteen kuvaaja $\eta_{\text{silla}} = f(\alpha)$.
 - c) Kokonaishyötysuhteen kuvaaja (tyristorisilta + moottori) $\eta_{\text{kok}} = f(\alpha)$.

[Ohje: Piirrä ensin kuvaajat $U_d = f(I_d)$, $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$ parametrina ohjauskulma α . Määritä sitten kuvaajilta tasavirran arvoa 2,5 A ja eri ohjauskulmia vastaavat jännitteiden U_d sekä tehojen $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$ arvot.]

Lähteet

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo: WSOY.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektronikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.

Ohjattu tasasuuntaaja

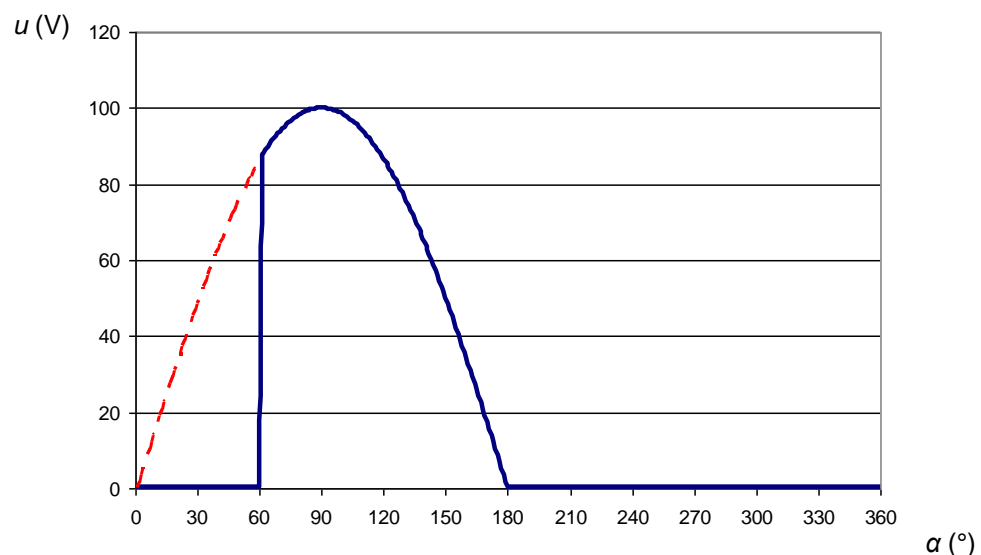
Tavoite Työn tavoitteena on perehtyä *kolmivaiheisen ohjatun tasasuuntaajan* toimintaan ja perusominaisuuksiin passiivisella (R ja RL -piiri) sekä aktiivisella kuormalla (tasavirtamoottori).

1 Esitehtävät

Esitehtävät tehdään annetun aikataulun mukaisesti ennen laboratoriossa suoritettavien mittausten ja muiden tutkimusten aloittamista. Esitehtävien tarkoituksena on, että työryhmä perehtyy kyseisen työn *vastuuhenkilön* johdolla annettuun aineistoon ja valmistautuu laboratoriossa suoritettavaan tutkimustyöhön. Aineistoon perehtyminen ja työsuoritukseen valmistautuminen on erityisen tärkeitä turvallisuussyistä, mutta se on tärkeitä myös työn sujumisen kannalta.

Perehdy *ohjatun kolmivaiheisen tasasuuntaussillan* toimintaan kirjallisuuden avulla (esim. Aura & Tonteri tai Hietalahti).

- 1.1 Piirrä *ohjatun kolmivaiheisen tasasuuntaussillan* (2-tiekytkentä, jonka sykkeluku on 6) periaatekytkentä (pääkaavio) ja selosta sen toiminta lyhyesti.
- 1.2 Miten määritellään *ohjattuun kolmivaiheiseen tasasuuntaussiltaan* liittyvä käsite *ohjauskulma*? Havainnollista asiaa piirroksella. [Ohje: Piirrä ensin kolmivaihejärjestelmän jännitteiden hetkellisarvojen kuvaajat. Esitä käsite ohjauskulma piirroksen avulla.]
- 1.3 Ohjatun kolmivaiheisen suuntaajan ohjauskulman arvoa voidaan säätää välillä $18^\circ \dots 162^\circ$. Laske, kuinka suuri saa vaihtosähköverkon *pääjännitteen tehollisarvo* enintään olla, jos *tasasuunnatun* jännitteen *aritmeettinen keskiarvo* saa olla korkeintaan 200 V.
- 1.4 Laske kuvan mukaisen sinimuotoisen jännitteen *aritmeettinen keskiarvo*.



Kuva 1. "Leikattu" sinimuotoinen jännite

2 Tutkimukset laboratoriossa

Sähkötekniset tutkimukset sekä niihin liittyvät kytkennät ja mittaukset tehdään sähkölaboratoriossa.

Sähkötyöturvallisuuden takia kytkentöjen rakentamiseen, muuttamiseen ja purkamiseen on aina saatava valvojan lupa. Ennen edellä mainittuihin toimenpiteisiin ryhtymistä kutsu paikalle valvoja, joka tarkastaa, että kytkentä ja työskentelyalue ovat jännitteettömiä.

Myös jännitteen kytkemiseen on aina saatava valvojan lupa. Kutsu valvoja tarkastamaan rakennettu tai muutettu kytkentä.

Kaikista laboratoriossa suoritettavista tutkimuksista laaditaan mittauspöytäkirja, johon tehdään myös tarpeelliset muistiinpanot. Mittauskytkentöjen piirikaavioissa esitetään kaikki tutkimuksen kannalta olennaiset asiat kuten tutkittavat laitteet sähköteknisine tietoineen, sähkölähteet, mittauslaitteet, kytkimet, komponentit, jne. Piirikaavioihin merkitään lisäksi kaikki mitattavat suureet referenssisuuntineen käyttämällä standardien mukaisia symboleita ja suuretunnuksia.

Tarkista aina ennen mittauksia mittareiden valintakytkimen asento (mitattava suure) ja virtalaji (AC/DC) sekä mittausalue.

Yleisohjeita

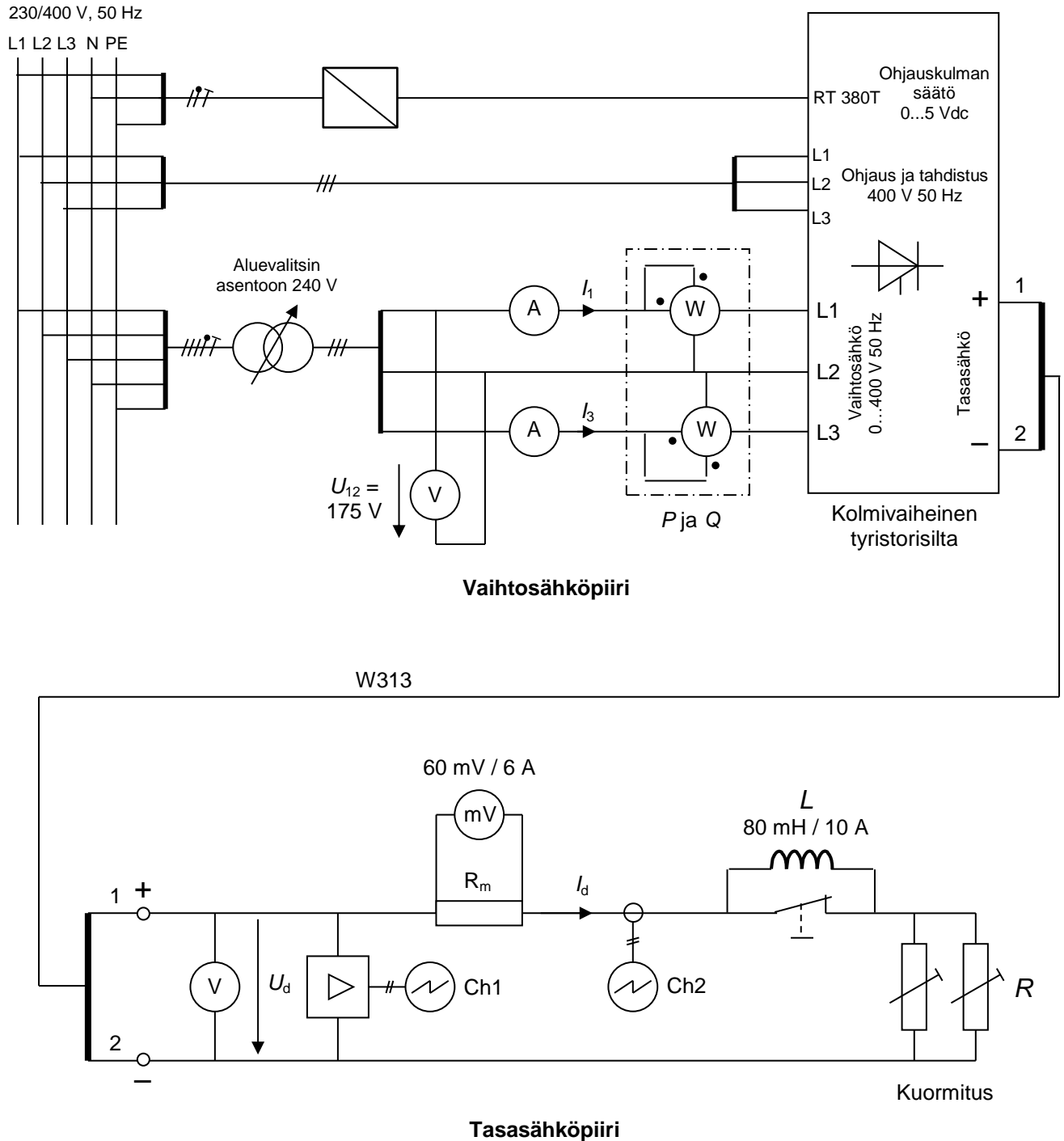


Koska kytkennässä ei käytetä virtamuuntajia, on kytkennän suurin sallittu virta 5 A. Pidä huoli, ettei virta missään olosuhteissa nouse tämän rajan yli.

Tutkittavia mittaustilanteita on paljon ja aikaa on rajoitetusti käytettävissä, joten hyvään lopputulokseen pääsemiseksi mittaukset on syytä suunnitella huolellisesti etukäteen!

2.1 Ohjattu tasasuuntaaja – passiivinen kuormitus (R ja RL)

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä.
Muista myös suuntaajan tuulettimen virtajohto
ja [maadoita tasasuuntaaja ja kuormitusvastus!](#)

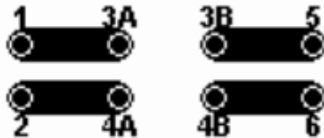


Kuva 2. Mittauskytkentä. Passiivinen kuorma (R ja RL).

Alkutoimenpiteet – passiivinen kuormitus (R ja RL)

Ennen alkutoimenpiteisiin ryhtymistä kutsu valvoja tarkastamaan kytkentä!

1. Tarkista, että suuntaajan jumpperit on kytketty kuvan mukaisesti



2. Tarkista, että sekä tasasuuntaaja että kuormitusvastus on maadoitettu.
3. Tarkista, että tasasuuntaajan tuulettimen virtajohto on kytketty.
4. Tarkista, että vaihejärjestys noudattaa kuvaan merkittyjä tunnuksia.
5. Tarkista, että **säätömuuntaajan aluevalitsin on asennossa 240 V**, mutta älä kytke vielä jännitettä.
6. Aseta kuormitusvastuksen resistanssin arvoksi 240 Ω .
7. Kytke tasasuuntaussillan *ohjaus ja tahdistus* -jännite (230V/400V). **Kytke ohjaus ja tahdistus aina päälle ensimmäiseksi – pois viimeiseksi.**
8. Aseta tasasuuntaussillan *ohjauskulman* arvoksi noin 160° (ohjauksen syöttö n. 0,4V). **Älä ylitä tätä ohjauskulman arvoa (älä alita 0,4V:n syöttöä)** missään vaiheessa, jotta vältetään sillan ns. kippaaminen.
9. Säädä *vaihtosähkön* jännitteen arvoksi 175 V. Nosta jännitettä aluksi hitaasti ja **tarkkaile virtamittareita** säädön aikana! Pidä jännite vakiona kaikkien mittausten ajan (säädä tarvittaessa).
10. Säädä ohjauskulmaa minimiarvoonsa 0° (ohjauksen syöttö 5,0V, **älä ylitä tätä**). **Tarkkaile virtamittareita!**
11. Arvioi mittaustulosten oikeellisuus työskentelyn alussa ja mittausten aikana!

Edellä esitettyssä tilanteessa *tasajännitteen teoreettinen keskiarvo* on $1,35 \cdot 175 \text{ V} \cdot \cos(0^\circ) = 236 \text{ V}$ ja *tasavirran teoreettinen keskiarvo* vastaavasti $236 \text{ V} / 240 \Omega \approx 1,0 \text{ A}$. Käytännössä muodustuvaan tasajännitteeseen vaikuttavat hieman piirissä olevat jännitehäviöt. Teoreettiset arvot edellyttävät, että virta on *aukotonta*.

Mittaukset**Kuormituksena resistanssi R** 

Mittaukset suoritetaan 4–5:llä eri ohjauskulman arvolla väliltä n. 0...100° (ohjauksen syöttö n. 5...2V). Ohjauskulma pidetään vakiona kunkin *mittaussarjan ajan*. Ohjauskulma on siis tämän tutkimuksen *parametri*.

Merkitse mittauspöytäkirjaan eri kuormitustilanteissa

- ohjauskulman arvo (*parametri*, joka on vakio kunkin mittaussarjan ajan)
- vaihtosähkön pääjännitteen *tehollisarvo* (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
- vaihtovirran *tehollisarvo* (laske vaihevirtojen keskiarvo mittauspöytäkirjaan)
- vaihtosähkön *pätoheho* (laske *loisteho* mittauspöytäkirjaan)
- tasajännitteen *aritmeettinen keskiarvo*
- tasavirran *aritmeettinen keskiarvo*.

Mittaa *oskilloskoopin* avulla tasavirran ja tasajännitteen *hetkellisarvojen* kuvaajat. Yksi kuva kullakin ohjauskulman arvolla riittää. Mittaa kuvaaja aina suunnilleen samalla tasavirran arvolla (esim. 3,0 A). Käytä oskilloskooppimittauksissa *virtapihtiä* ja *jänniteprobea* (galvaaninen erotus). Muista tallentaa kuvaajat esim. verkkolevylle omaan hakemistoosi. Merkitse muistiin kaikkien mittalaitteiden kertoimet sekä mittaustilanteet, jotta voit analysoida tuloksia myöhemmin.

Merkitse lisäksi muistiin se ohjauskulman arvo, jolla silta avautuu. Se on kohta, jossa tasavirta alkaa juuri ja juuri kulkea. Tilannetta on kätevä tarkastella oskilloskoopin avulla.

Suorita kuormitusresistanssin arvoa säätämällä 3–4 mittausta kullakin ohjauskulman (*parametrin*) arvolla. Tasavirran aritmeettinen keskiarvo (DC-alue) ei saa ylittää arvoa 6 A, eikä vaihtovirran tehollisarvo saa ylittää arvoa 5 A. **Seuraa virtamittareita!**

Mittaukset on järkevää suorittaa siten, että ensin säädetään kuormitusvirraksi suurin mahdollinen arvo ja suoritetaan mittaukset. Tämän jälkeen jaetaan mittausväli virtojen perusteella suunnilleen tasaväleihin ja suoritetaan muut mittaukset (2–3), viimeinen lähes tyhjäkäynnissä (virta alle 0,5 A).

Havainnoi tasasuuntaajan verkkovaikutuksia Fluke 43 -tehoanalysaattorilla. Tallenna tulokset samasta mittaustilanteesta kuin oskilloskooppikuvatkin.

- verkon vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot (yhdestä vaiheesta)
- verkon vaihejännitteen harmoniset komponentit (viivaspektri) ja kokonaissärö THD_F
- verkon vaihevirran harmoniset komponentit (viivaspektri) ja kokonaissärö THD_F .

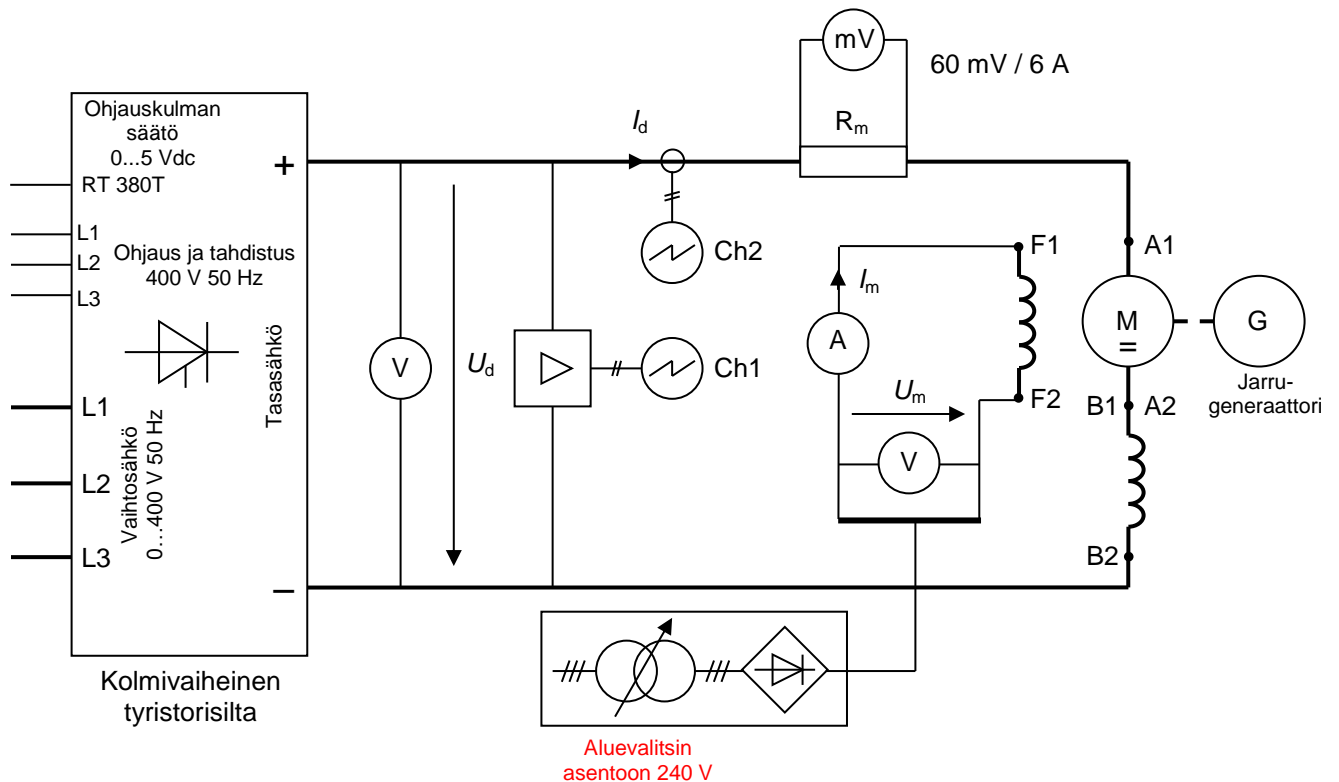
Kuormituksena RL -sarjakytkentä

Toista mittaukset edellä kuvatulla tavalla, kun kuormituksena on passiivinen RL -sarjapiiri.

Jos tulee aikapula, niin vaihtoehtoisesti voidaan valita joitakin kuormitustilanteita ja kokeilla, miten induktanssi L vaikuttaa tuloksiin. Tämä tapahtuu vuoroin sulkemalla ja avaamalla kytkin S .

2.2 Ohjattu tasasuuntaaja – tasavirtamoottorin pyörimisnopeuden säätö

Tee kuvan mukainen mittauskytkentä. Muista myös suuntaajan tuulettimen virtajohto ja [maadoita tasasuuntaaja!](#) Tyristorisillan kytkentä on vaihtosähköpuolen ja ohjauskytkentöjen osalta Kuva 2 mukainen.



Kuva 3. Mittauskytkentä. Aktiivinen kuorma, tasavirtamoottori.

Tasasähköpuolen passiivinen kuormitus vaihdetaan aktiiviseksi moottorikuormaksi. Tasavirtamoottorin *ankkuripiiri* kytketään sillan tasasähköpuolen liittimiin. Moottorin *magnetointi* voidaan toteuttaa säätövaunua ja siinä olevaa kolmivaiheista tasasuuntaussiltaa käyttäen.

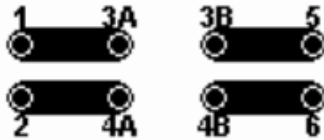
Varoitus! Ennen ankkurijännitteen säätöä on varmistettava, että [tasavirtamoottorin magnetoimisvirta on kilpiarvon mukaisessa nimellisarvossaan](#). Magnetointia ei saa katkaista moottorin käydessä.

Alkutoimenpiteet



Ennen alkutoimenpiteisiin ryhtymistä kutsu valvoja tarkastamaan kytkentä!

1. Tarkista, että suuntaajan jumpperit on kytketty kuvan mukaisesti



2. Tarkista, että tasasuuntaaja on maadoitettu.
3. Tarkista, että tasasuuntaajan tuulettimen virtajohto on kytketty.
4. Tarkista, että vaihejärjestys noudattaa kuvaan merkittyjä tunnuksia.
5. Tarkista, että **säätömuuntajan aluevalitsin on asennossa 240 V**, mutta älä kytke vielä jännitettä.
6. Kytke tasasuuntaussillan *ohjaus ja tahdistus* -jännite (230V/400V). **Kytke ohjaus ja tahdistus aina päälle ensimmäiseksi – pois viimeiseksi.**
7. Aseta tasasuuntaussillan *ohjauskulman* arvoksi noin 160° (ohjauksen syöttö n. 0,4V). **Älä ylitä tätä ohjauskulman arvoa (älä alita 0,4V:n syöttöä)** missään vaiheessa, jotta välitetään sillan ns. kippaaminen.
8. Säädä *vaihtosähkön* jännitteen arvoksi 175 V. Nosta jännitettä aluksi hitaasti ja **tarkkaile virtamittareita** säädön aikana! Pidä jännite vakiona kaikkien mittausten ajan (säädä tarvittaessa).
9. Arvioi mittaustulosten oikeellisuus työskentelyn alussa ja mittausten aikana!

Mittaukset



Tarkista arvokilvestä tasavirtamoottorin nimellisvirran arvo äläkä ylitä sitä tutkimusten aikana missään olosuhteissa!

Säädä tasavirtamoottorin magnetoimisvirta nimellisarvoonsa ja pidä se vakiona kokeen ajan (säädä tarvittaessa). Pienennä tasasuuntaussillan ohjauskulmaa hitaasti ja merkitse muistiin se ohjauskulman arvo, jolla moottori käynnistyy (silta tulee johtavaan tilaan).

Säädä tämän jälkeen ohjauskulman arvoksi jokin sopiva arvo esimerkiksi siten, että moottori pyörii kuormittamattomana noin 1/3 nimellinopeudestaan. **Kuormita moottoria jarrugeneraattorin avulla tyhjäkäynnistä alkaen, kunnes vaihtovirran tehollisarvo on noin 4,5 A. Huolehdi lisäksi siitä, ettei tasasähköpuolen virta ylitä arvoa 6 A (eikä moottorin nimellisvirtaa).**

Huom! Moottori ei saa missään kuormitustilanteessa pysähtyä! Kommutaattori vaurioituu!

Suorita mittaukset eri kuormituspisteissä moottorin kuormitusmomenttia säätämällä. Säädä momenttia siten, että tasavirran arvo (moottorin virta) muuttuu noin 1 A välein (maksimiarvosta minimiin).

Tämän jälkeen suoritetaan vastaavat mittaukset muilla sopivilla ohjauskulman arvoilla, esimerkiksi 60°, 30° ja 20°. Ohjauskulma pidetään vakiona (*parametrina*) kunkin *mittaussarjan ajan*.

Merkitse mittauspöytäkirjaan eri kuormitustilanteissa

- ohjauskulman arvo (*parametri*, joka on vakio kunkin mittaussarjan ajan)
- vaihtosähkön pääjännitteen *tehollisarvo* (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
- vaihtovirran *tehollisarvo* (laske vaihevirtojen keskiarvo mittauspöytäkirjaan)
- vaihtosähkön *pätöteho* (laske *loisteho* mittauspöytäkirjaan)
- tasavirtamoottorin
 - magnetoimisvirta (vakio – tarkista aina ennen mittauksia)
 - ankkurijännitteen *aritmeettinen keskiarvo*
 - ankkurivirran *aritmeettinen keskiarvo*
 - vääntömomentti
 - akselin pyörimisnopeus.

Mittaa *oskilloskoopin* avulla tasavirran ja tasajännitteen *hetkellisarvojen* kuvaajat. Yksi kuva kullakin ohjauskulman arvolla riittää. Mittaa kuvaaja aina suunnilleen samalla ankkurivirran arvolla (esim. 3,0 A). Käytä oskilloskooppimittauksissa *virtapihtiä* ja *jänniteprobea* (galvaaninen erotus). Muista tallentaa kuvaajat esim. verkkolevylle omaan hakemistoosi. Merkitse muistiin kaikkien mittalaitteiden kertoimet sekä mittaustilanteet, jotta voit analysoida tuloksia myöhemmin.

3 Työselostus ja siihen liittyvät tehtävät

Työselostus laaditaan TAMKin kirjallisten töiden raportointiohjetta soveltaen. Asiat tulee käsitellä loogisessa järjestyksessä siten, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Selostusta laadittaessa kaikki olennaiset arvokilpitiedot, komponenttiarvot sekä mitatut ja mittaustulosten perusteella lasketut arvot esitetään selkeinä taulukoina. Lasketuista arvoista esitetään kutakin tutkittavaa asiaa hyvin edustava laskuesimerkki. Tulokset esitetään graafisesti aina, kun se on mahdollista (kiinnitä erityistä huomiota kuvaajien laatuun). Tulosten oikeellisuus pyritään osoittamaan vertaamalla omien tutkimusten perusteella saatuja tuloksia teoretietoihin.

Jokaisen laboratoriossa käytetyn mittauskytkennän piirikaavio esitetään sille sopivassa asiayhteydessä. Kytkeä, mittausperiaatetta, mittauksen tarkoitusta ja muita tutkimukseen liittyviä asioita on hyvä kommentoida lyhyesti. Samaan yhteyteen taulukoidaan tutkimuksessa mitatut arvot ja laajennetaan taulukoita lisäämällä niihin myös mittaustulosten perusteella lasketut arvot. Lisäksi on syytä tarkistaa, että taulukoissa esiintyvät suureet on referenssisuuntineen esitetty myös piirikaavioissa.

Tehtävät

Käsittele työselostuksessa kukin seuraavista tehtävistä sille sopivassa asiayhteydessä niin, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Muista verrata tuloksia teoretietoihin sekä kommentoida ja perustella kuvaajien luonnetta. Piste- eli x–y -kaavioissa kuvaajien *mittauspisteet* tulee jättää näkyviin. Kuvaajien *graafinen tasoitus* onnistuu usein *lisää trendiviiva* -komennolla.

- 3.1 Piirrä samaan koordinaatistoon mittauksiin 2.1 perustuvat kuvaajat $U_d = f(I_d)$, kun parametrina on ohjauskulma α . U_d = tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo, I_d = tasavirran aritmeettinen keskiarvo. Piirrä koordinaatistoon vertailun vuoksi myös kaavan $U_d = 1,35U\cos(\alpha)$ perusteella lasketut arvot. Poikkeavatko mittausten perusteella piirretyt kuvaajat teoreettisesti lasketuista kuvaajista? Jos poikkeavat, niin miksi?
- 3.2 Piirrä seuraavaksi mittausten 2.1 perusteella kuvaajat $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$, kun parametrina on ohjauskulma α . [Ohje: $P_{DC} = U_d I_d$ ja $P_{AC} = P_{L1} + P_{L3}$]
- 3.3 Piirrä mittausten 2.1 perusteella tasasuuntaussillan hyötysuhteen kuvaaja ohjauskulman α funktiona, eli $\eta = f(\alpha)$, missä $\eta = P_{DC} / P_{AC}$. Käytä *parametrina* tasavirran arvoa $I_d = 2,5 \text{ A}$ eli määritä kuvaajilta 2,5 A virtaa vastaavat tehojen arvot.
- 3.4 Miten on mahdollista, että mittauksissa 2.1 verkosta otetaan myös loistehoa, vaikka kuormituksena on puhdas resistanssi?
- 3.5 Piirrä samaan koordinaatistoon mittauksiin 2.2 perustuen jäljempänä kohdissa a) ... c) mainitut hyötysuhteiden kuvaajat. Käytä *parametrina* tasavirran arvoa $I_d = 2,5 \text{ A}$.
 - a) Tasavirtamoottorin hyötysuhteen kuvaaja $\eta_M = f(\alpha)$.
 - b) Tyristorisillan hyötysuhteen kuvaaja $\eta_{\text{silla}} = f(\alpha)$.
 - c) Kokonaishyötysuhteen kuvaaja (tyristorisilta + moottori) $\eta_{\text{kok}} = f(\alpha)$.

[Ohje: Piirrä ensin kuvaajat $U_d = f(I_d)$, $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$ parametrina ohjauskulma α . Määritä sitten kuvaajilta tasavirran arvoa 2,5 A ja eri ohjauskulmia vastaavat jännitteiden U_d sekä tehojen $P_{DC} = f(I_d)$ ja $P_{AC} = f(I_d)$ arvot.]

Lähteet

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo: WSOY.

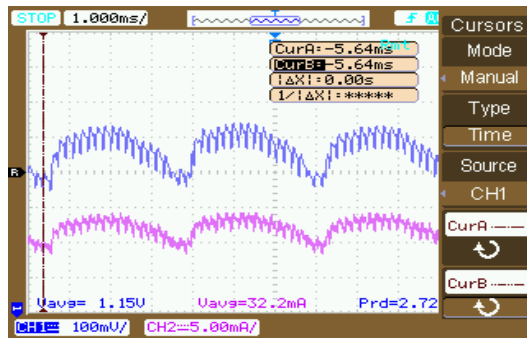
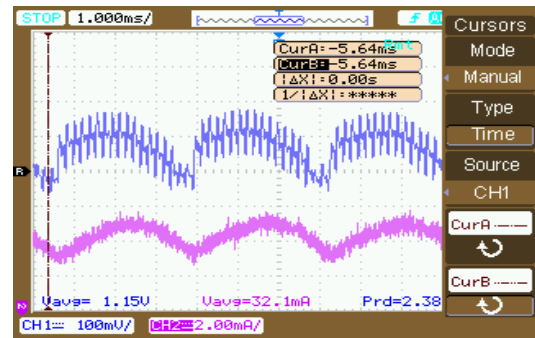
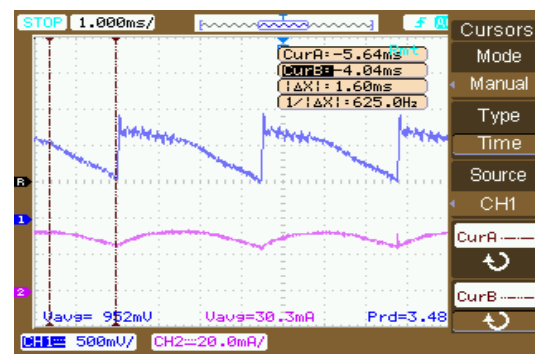
Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.

Liite 4. Ohjattu tasasuuntaaja, mittaustulokset uusilla suuntaajilla

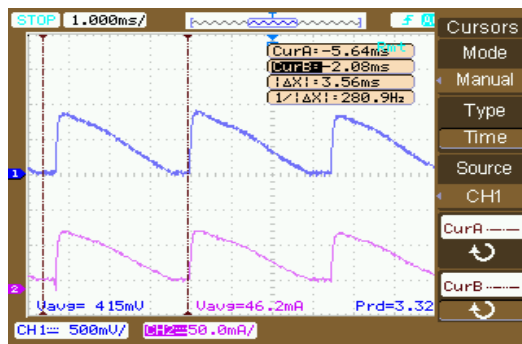
1 (8)

TAULUKKO 1. Mittaustulokset uudella suuntaajalla, passiivinen kuormitus

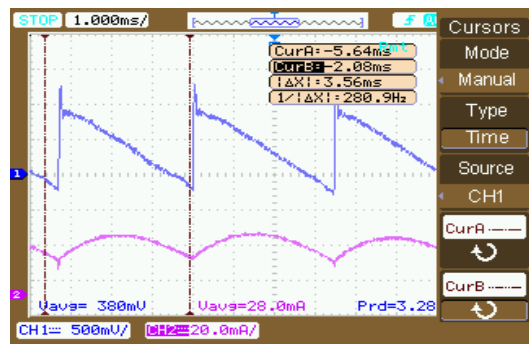
Mitatut		Vaihtosähköpiiri							Tasasähköpiiri		Lasketut		
U_{in} (Vdc)	α	U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P (W)	U_d (V)	I_d (A)	U_{dc} (V)	P_{dc} (W)	Q (Var)
5,00	0	175,00	0,48	0,48	0,48	70	60	130	233,90	0,50	236,25	116,95	65,33
5,00	0	175,00	2,60	2,61	2,61	370	385	755	231,00	3,10	236,25	716,10	231,17
5,00	0	175,00	4,75	4,75	4,75	660	710	1370	229,90	5,75	236,25	1321,93	442,75
4,00	35	175,00	0,41	0,41	0,41	40	60	100	193,00	0,50	193,52	96,50	73,78
4,00	35	175,00	2,58	2,60	2,59	210	425	635	191,00	3,10	193,52	592,10	461,61
4,00	35	175,00	4,79	4,81	4,80	375	790	1165	189,00	5,65	193,52	1067,85	871,54
3,00	70	175,00	0,48	0,480	0,48	10	60	70	79,00	0,50	80,80	39,50	127,55
3,00	70	175,00	3,18	3,17	3,18	15	385	400	77,00	3,10	80,80	238,70	875,30
3,00	70	175,00	4,78	4,75	4,77	0	575	575	76,00	4,60	80,80	349,60	1324,92
2,50	85	175,00	0,76	0,76	0,76	-10	70	60	40,00	0,60	20,59	24,00	222,41
2,50	85	175,00	1,75	1,74	1,75	-35	165	130	39,00	1,50	20,59	58,50	512,70
2,50	85	175,00	2,85	2,83	2,84	-60	270	210	38,00	2,30	20,59	87,40	834,82
2,00	105	175,00	0,51	0,51	0,51	-15	30	15	7,50	0,30	-61,15	2,25	153,86
2,00	105	175,00	0,91	0,91	0,91	-30	50	20	7,50	0,50	-61,15	3,75	275,10

KUVIO 1. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma R KUVIO 2. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma RL KUVIO 3. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma R KUVIO 4. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma RL

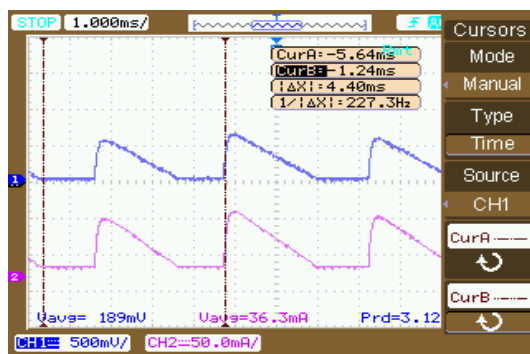
(jatkuu)



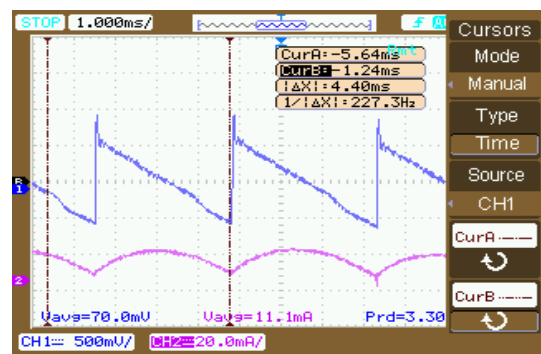
KUVIO 5. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma R



KUVIO 6. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma RL



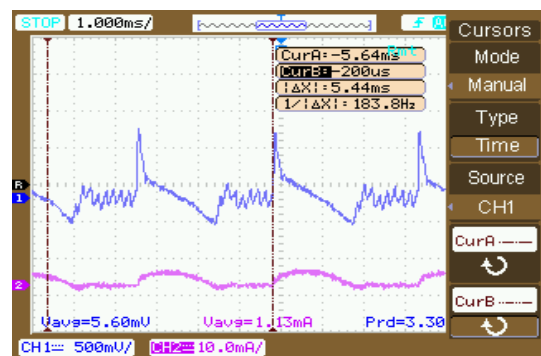
KUVIO 7. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma R



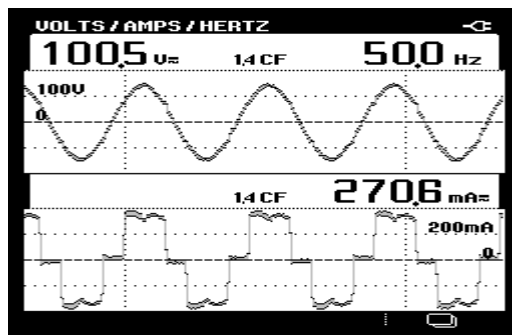
KUVIO 8. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma RL



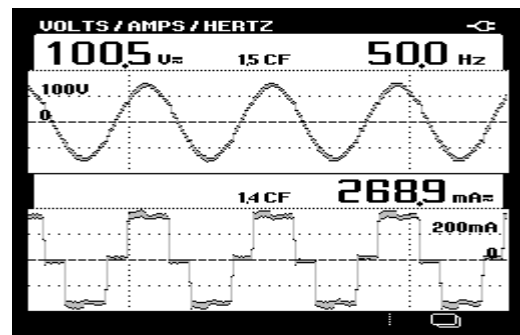
KUVIO 9. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma R



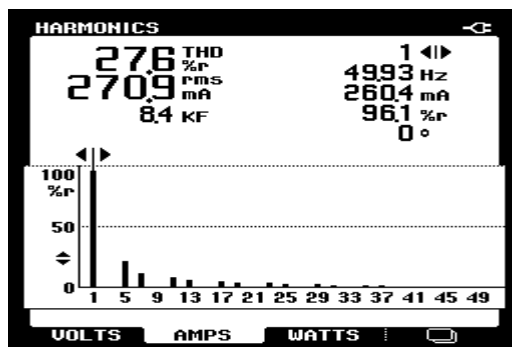
KUVIO 10. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma RL



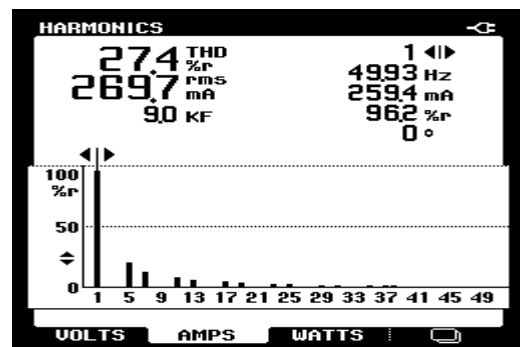
KUVIO 11. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma R



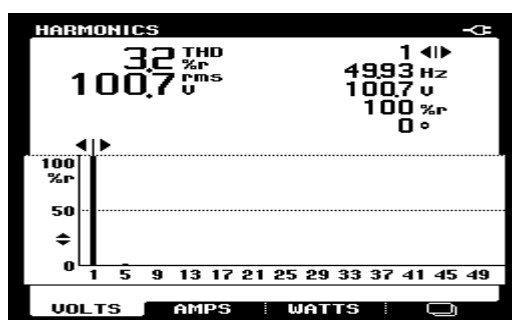
KUVIO 12. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma RL



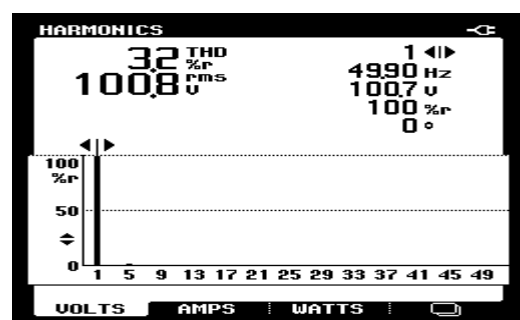
KUVIO 13. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma R



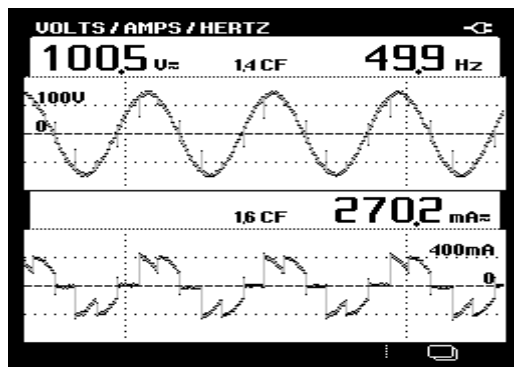
KUVIO 14. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma RL



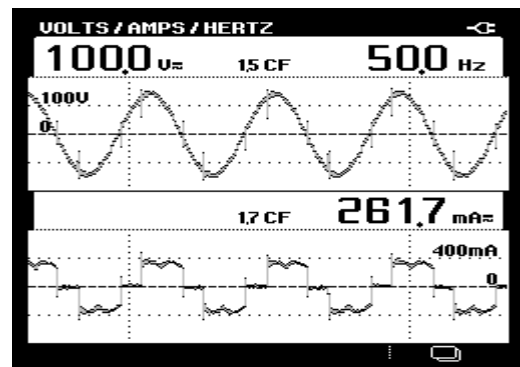
KUVIO 15. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma R



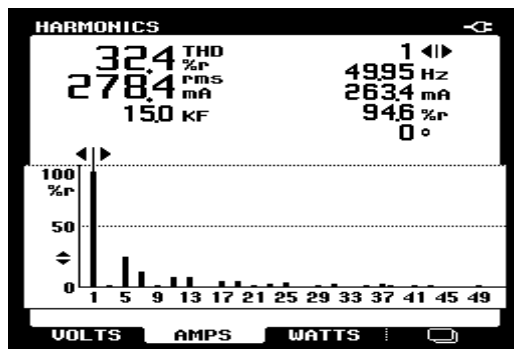
KUVIO 16. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 0^\circ$, kuorma RL



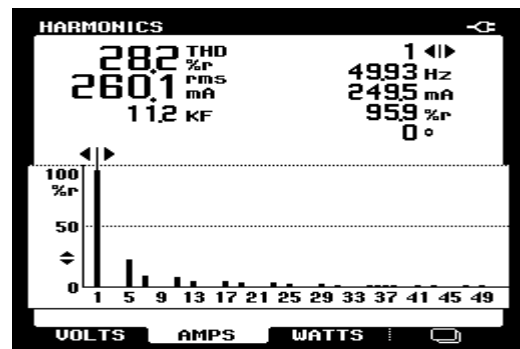
KUVIO 17. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma R



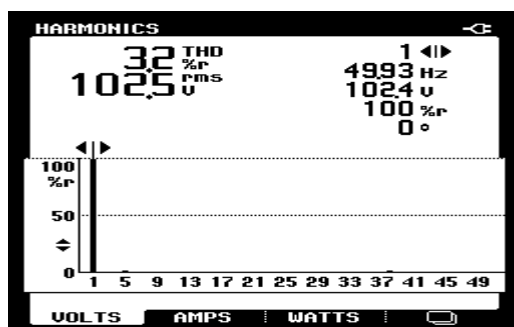
KUVIO 18. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma RL



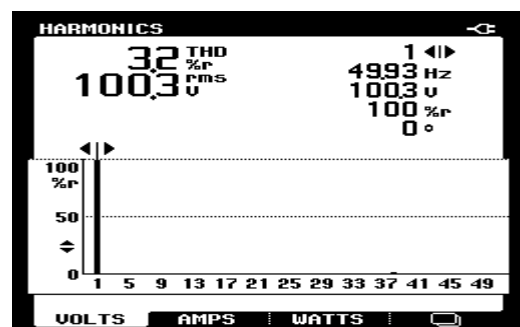
KUVIO 19. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma R



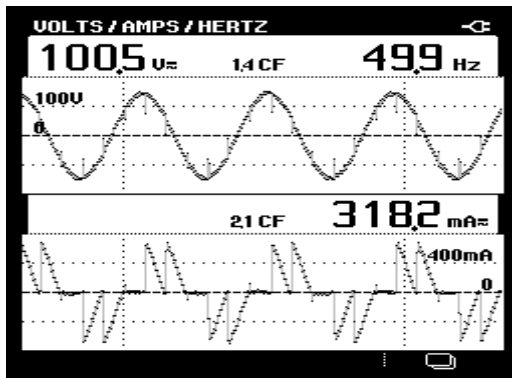
KUVIO 20. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma RL



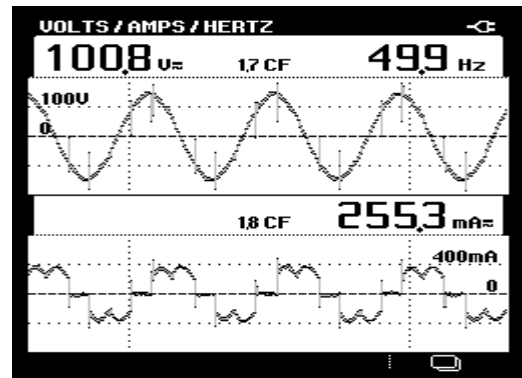
KUVIO 21. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma R



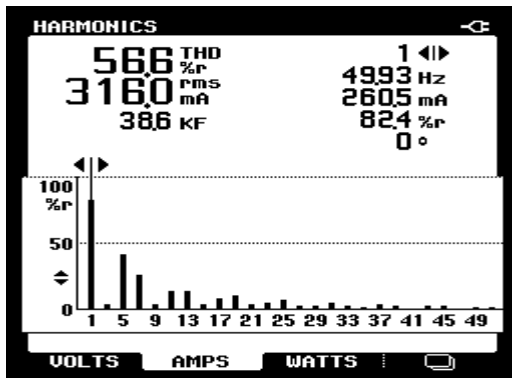
KUVIO 22. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 35^\circ$, kuorma RL



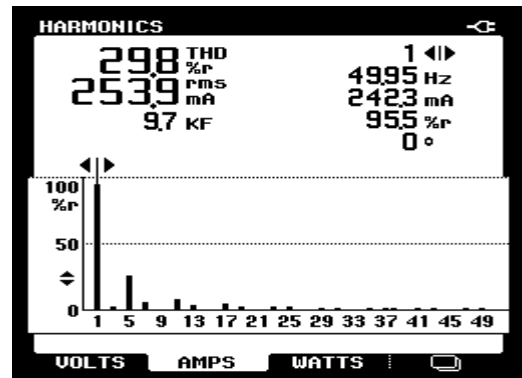
KUVIO 23. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *R*



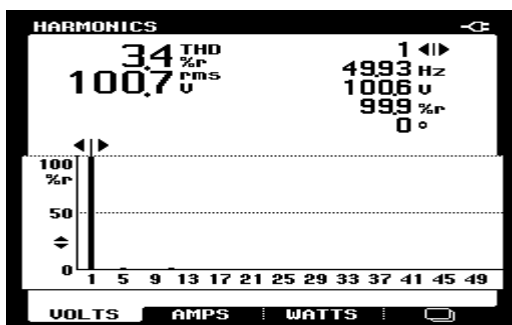
KUVIO 24. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *RL*



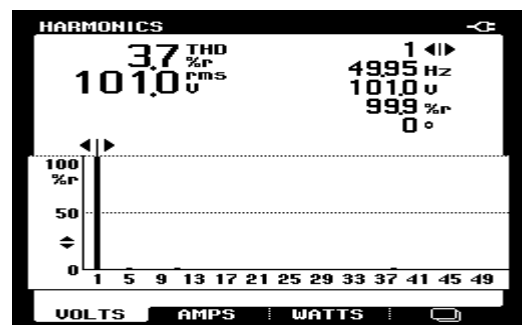
KUVIO 25. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *R*



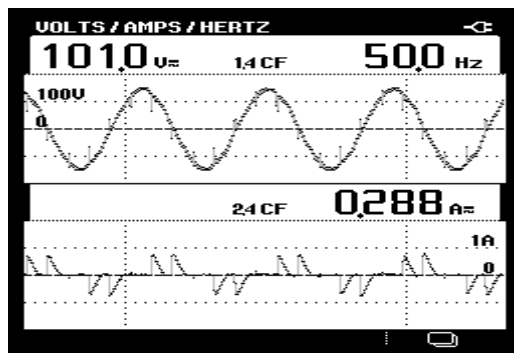
KUVIO 26. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *RL*



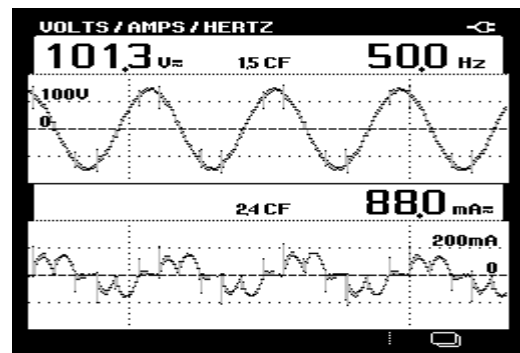
KUVIO 27. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *R*



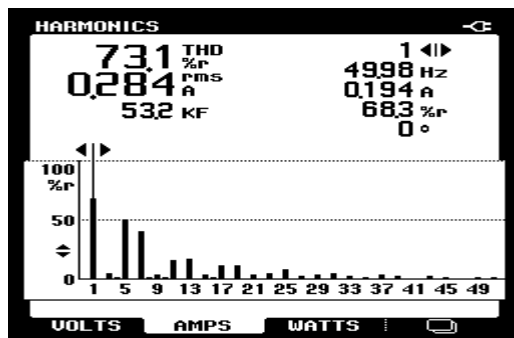
KUVIO 28. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 70^\circ$, kuorma *RL*



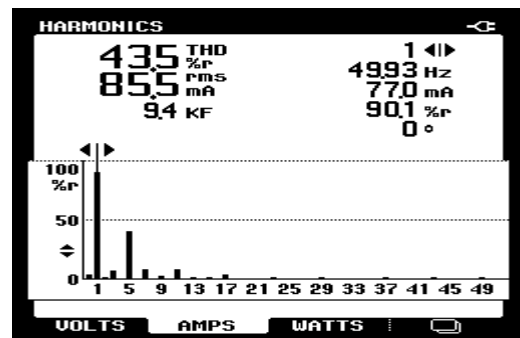
KUVIO 29. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *R*



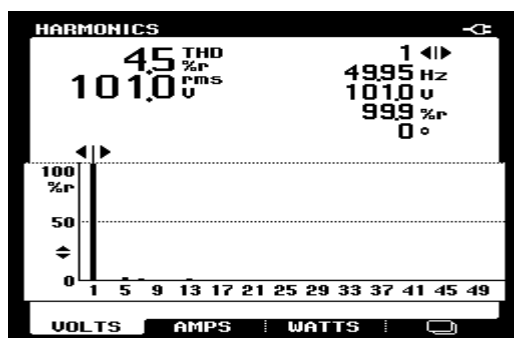
KUVIO 30. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *RL*



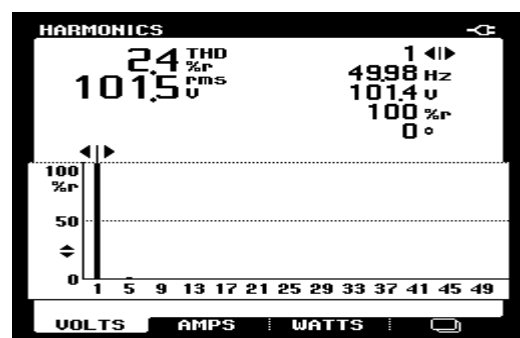
KUVIO 31. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *R*



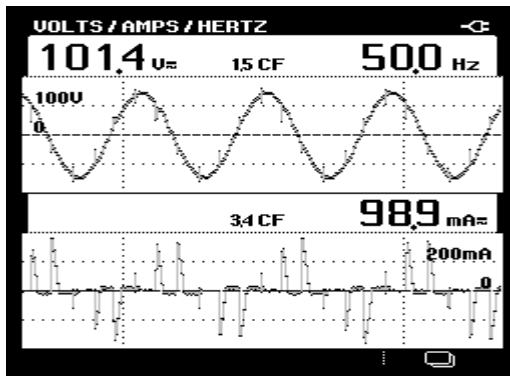
KUVIO 32. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *RL*



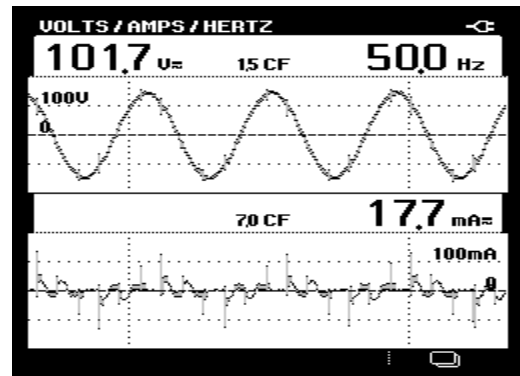
KUVIO 33. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *R*



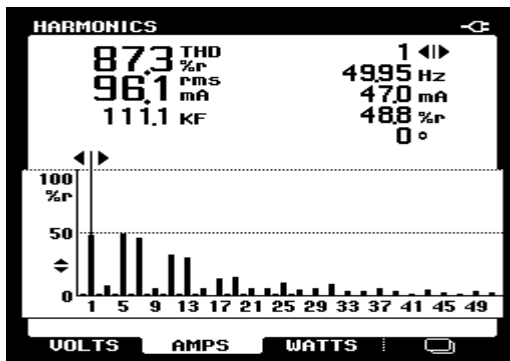
KUVIO 34. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 85^\circ$, kuorma *RL*



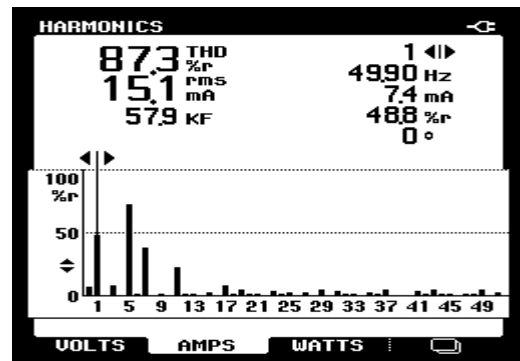
KUVIO 35. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *R*



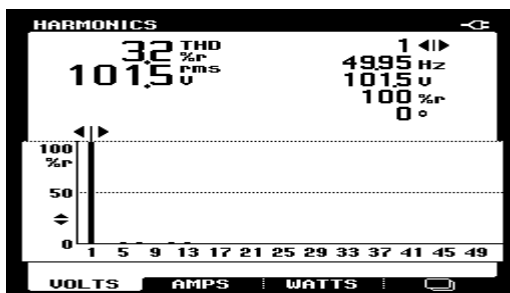
KUVIO 36. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *RL*



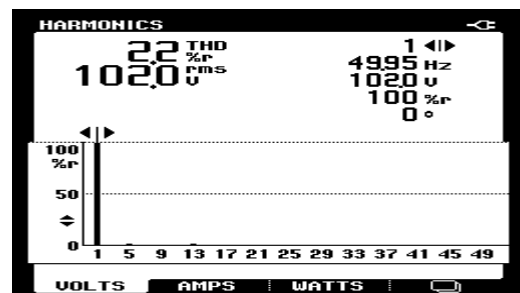
KUVIO 37. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *R*



KUVIO 38. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *RL*



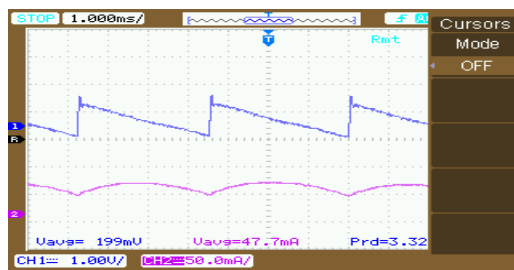
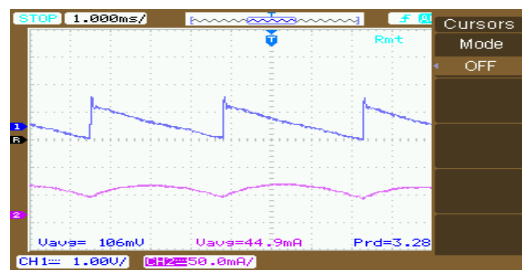
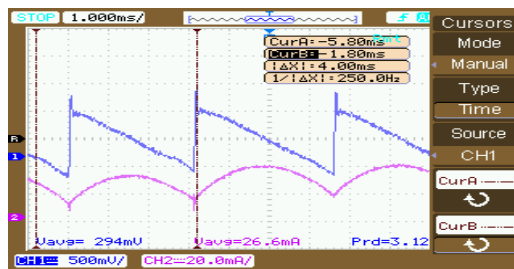
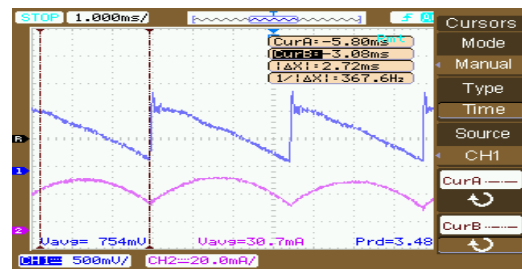
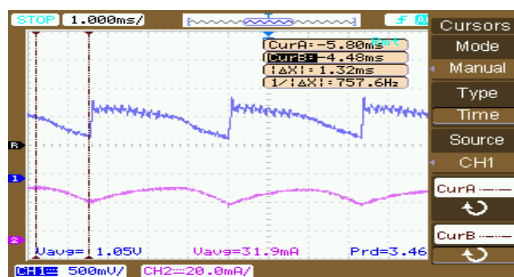
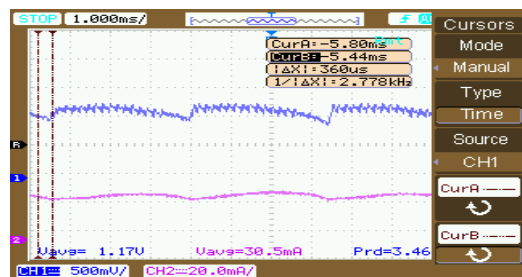
KUVIO 39. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *R*



KUVIO 40. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
 $\alpha \approx 105^\circ$, kuorma *RL*

TAULUKKO 2. Mittaustulokset uudella suuntaajalla, aktiivinen kuormitus (moottori)

Ohjaus		Kuormitus			Syöttö						Tasapiiri		Ohjauspiiri		
U_{in} (Vdc)	α	T (Nm)	n (rpm)	U_{12} (V)	I_1 (A)	I_3 (A)	I_{13ka} (A)	P_1 (W)	P_3 (W)	P (W)	U_d (V)	I_d (A)	U_m (V)	I_m (A)	η
2,60	84	0,00	245	175,00	0,80	0,80	0,80	-35	80	45	40,00	0,80	224,50	0,43	0,71
2,60	84	3,30	70	175,00	2,50	2,60	2,55	-185	260	75	18,00	3,00	223,00	0,43	0,72
2,70	81	0,00	358	175,00	0,79	0,80	0,80	-25	85	60	57,70	0,75	210,50	0,43	0,72
2,70	81	3,30	165	175,00	2,55	2,60	2,58	-160	285	125	33,50	3,00	215,00	0,43	0,80
2,70	81	6,10	110	175,00	4,10	4,15	4,13	-270	450	180	29,90	5,00	218,00	0,43	0,83
2,80	75	0,00	470	175,00	0,93	0,95	0,94	-20	115	95	76,50	0,90	215,00	0,43	0,72
2,80	75	3,30	335	175,00	2,60	2,70	2,65	-110	330	220	60,50	3,10	224,00	0,43	0,85
2,80	75	6,60	280	175,00	4,50	4,50	4,50	-200	555	355	57,00	5,50	220,00	0,43	0,88
3,50	50	0,00	910	175,00	1,10	1,15	1,13	20	175	195	146,00	1,20	227,00	0,43	0,90
3,50	50	2,80	860	175,00	2,55	2,60	2,58	40	410	450	142,00	3,00	227,00	0,43	0,95
3,50	50	6,50	810	175,00	4,50	4,60	4,55	90	720	810	139,00	5,50	226,50	0,43	0,94
4,20	25	0,00	1300	175,00	1,15	1,16	1,16	100	190	290	207,00	1,30	228,00	0,43	0,93
4,20	25	2,60	1270	175,00	2,60	2,70	2,65	225	430	655	206,00	3,10	228,00	0,43	0,97
4,20	25	6,10	1220	175,00	4,50	4,60	4,55	385	755	1140	201,50	5,50	228,00	0,43	0,97
4,70	10	0,00	1450	175,00	1,16	1,17	1,17	150	180	330	230,00	1,35	228,00	0,43	0,94
4,70	10	2,50	1410	175,00	2,50	2,50	2,50	320	390	710	229,00	3,00	228,00	0,43	0,97
4,70	10	6,00	1390	175,00	4,60	4,60	4,60	580	710	1290	227,00	5,60	228,00	0,43	0,99

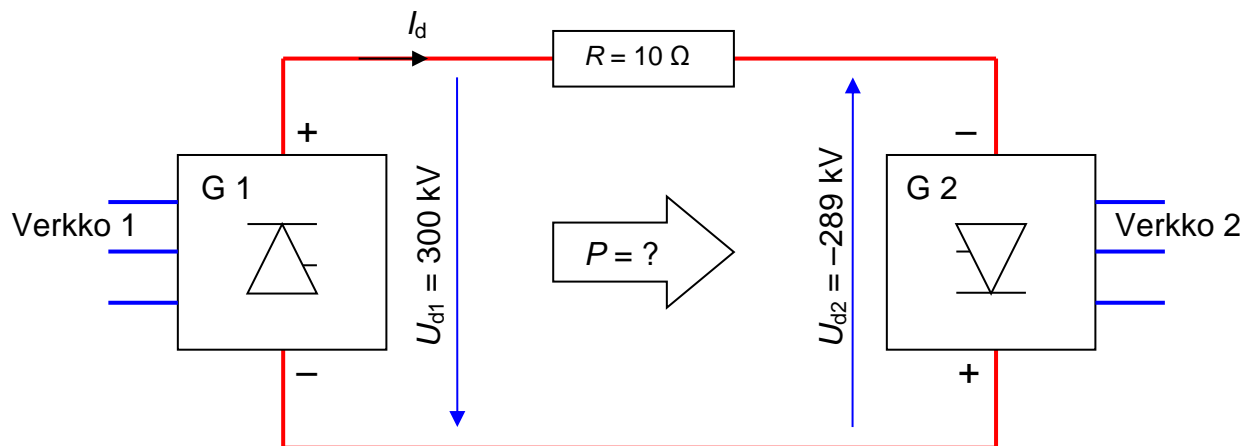
KUVIO 41. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 81^\circ$, moottorikuormaKUVIO 42. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 84^\circ$, moottorikuormaKUVIO 43. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 75^\circ$, moottorikuormaKUVIO 44. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 50^\circ$, moottorikuormaKUVIO 45. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 25^\circ$, moottorikuormaKUVIO 46. Oskilloskoopin kuva,
 $\alpha \approx 10^\circ$, moottorikuorma

Tasasähkövoimansiirto

Tavoite Työn tavoitteena on muodostaa tasasähkövoimansiirtoyhteys kahden eri sähköverkon välille. Tasasähkölinkillä yhdistetyillä sähköverkoilla voi olla eri jännitetasot ja eri taajuuudet. Tarkoituksena on tutkia tasasähkölinkin toimintaa ja ominaisuuksia.

1 Esitehtävät

- 1.1 Perehdy tasasähkövoimansiirtoon Moodleen linkitetyn aineiston avulla. Poimikaa aineistosta joitakin ryhmäänne kiinnostavia asioita ja kommentoikaa niitä lyhyesti.
- 1.2 Laske seuraavat tehtävät (kuva 1):
 - a) Kuinka suuri on kuvan mukaisessa tilanteessa välipiirissä kulkeva virta I_d ?
 - b) Kuinka suuri on vaihtosähköverkosta 1 otettu pätöteho ja kuinka suuri on vaihtosähköverkkoon 2 siirtyvä pätöteho, jos suuntaajan G1 hyötysuhde on 95 % ja suuntaajan G2 hyötysuhde on 90 %?
 - c) Kuinka suuret ovat siirtohäviöt?
 - d) Kuinka suureksi suuntaajan G1 jännite U_{d1} on säädettävä, jos vaihtosähköverkkoon 2 siirtyvä teho halutaan kaksinkertaistaa? U_{d2} oletetaan pysyvän vakiona.



Kuva 1. Tasasähkövoimansiirto.

2 Tutkimukset laboratoriossa



Kytentöjen tekeminen tai niiden muuttaminen on suoritettava jännitteettömänä!!!

Tasasähkövoimansiirtoyhteyden mittauskytkentä on esitetty liitteessä 1/1.

Mittalaitteet

Verkon puoli:

- V-mittarit digitaalisia yleismittareita (alue AC)
- A-mittarit analogisia kiertorautamittareita
- W-mittarit analogisia sähködynaamisia W-mittareita

Tasavirtavälipiiri:

- V-mittarit digitaalisia yleismittareita (alue DC)
- virran mittaus ns. shunttivastusta ja analogista mV-kiertokelamittaria käyttäen
- jännitteen ja virran mittaus lisäksi oskilloskooppia ja erottavia vaimentimia käyttäen (alue DC)



Kun kytkentä on valmis, tehdään tasasähkövoimansiirtoyhteiden ensimmäinen käyttöönotto valvojan opastuksella.

Mitä tutkitaan?



Kun tasasähkövoimansiirtoyhteys on saatu toimimaan, tutkitaan tasasähkölinkin käyttäytymistä muuttamalla vuoron perään yhtä suuretta kerrallaan (verkkojännitteet, ohjauskulmat). Tee muutoksia harkiten ja varovasti! Havainnoi ja kirjaa muistiin, mitä kunkin suureen muuttaminen vaikuttaa tehon siirtoon.



Kun tasasähköyhteiden toimintaperiaate on selvitetty, tutkitaan alla mainittujen suureiden käyttäytymistä eri toimintapisteissä. Myöhemmin tapahtuvan tulosten analysoinnin vuoksi voi olla järkevää pitää jomman kumman vaihtosähköverkon jännite koko tutkimuksen ajan vakiona.

Tutkimuksessa keskitytään havainnoimaan seuraavien suureiden käyttäytymistä eri toimintapisteissä:

- kokeile tehon siirtoa molempiin suuntiin
- tehonsiirron suunnan muuttaminen ilman katkosta
- miten suuntaajien ohjauskulmien arvot määräytyvät ja miten niitä tulee säätää
- suuntaajien hyötysuhteet eri toimintapisteissä
- tehonsiirron kokonaishyötysuhde eri toimintapisteissä
- mistä seikoista tasavirtavälipiirin häviötehon määrä riippuu eri toimintapisteissä
- virtojen ja jännitteiden aaltomuodot molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä
- yliaallot molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä
- jännite- ja virtasarö molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä

Pyri pohtimaan jo tässä vaiheessa, miksi eri suureet käyttäytyvät havainnoimallasi tavalla!

3 Työselostus ja siihen liittyvät tehtävät

Tehtävät Käsittele työselostuksessa kukin seuraavista tehtävistä sille sopivassa asiayhteydessä niin, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Muista verrata tuloksia teorian tietoihin sekä kommentoida ja perustella kuvaajien luonnetta. Piste- eli x - y -kaavioissa kuvaajien *mittauspisteet* tulee jättää *näkyviin*. Kuvaajien *graafinen tasoitus* onnistuu usein *lisää trendiviiva* -komennolla.

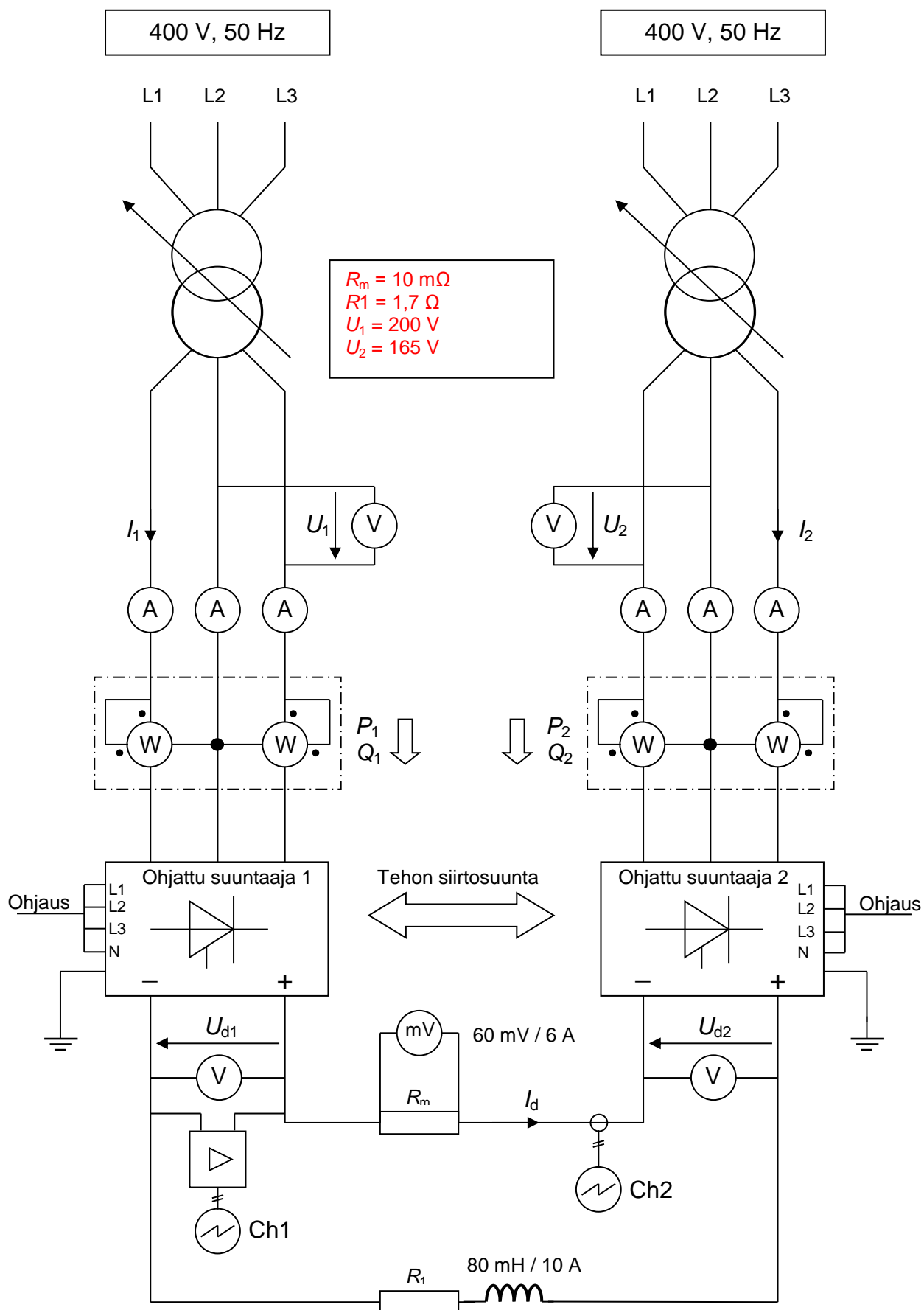
3.1 Analysoi ja raportoi laboratoriossa tekemiesi tutkimusten tulokset.

Lähdeluettelo

- /1/ ABB:n TTT-käsikirja 2000–07
- /2/ www.fingrid.fi

Tasasähkövoimansiirtoyhteys

Mittauskytkentä

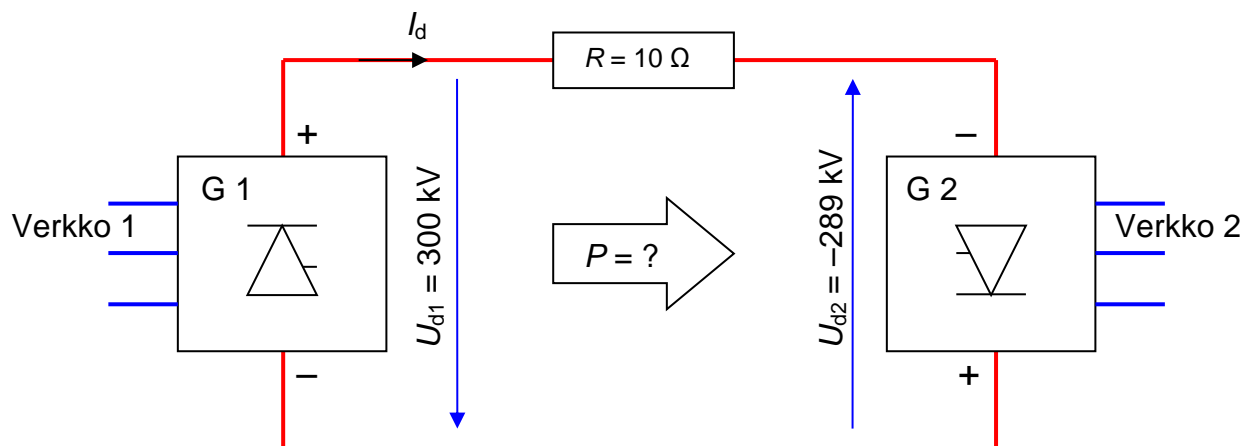


Tasasähkövoimansiirto

Tavoite Työn tavoitteena on muodostaa tasasähkövoimansiirtoyhteys kahden eri sähköverkon välille. Tasasähkölinkillä yhdistetyillä sähköverkoilla voi olla eri jännitetasot ja eri taajuuDET. Tarkoituksena on tutkia tasasähkölinkin toimintaa ja ominaisuuksia.

1 Esitehtävät

- 1.1 Perehdy tasasähkövoimansiirtoon Moodleen linkitetyn aineiston avulla. Poimikaa aineistosta joitakin ryhmäänne kiinnostavia asioita ja kommentoikaa niitä lyhyesti.
- 1.2 Laske seuraavat tehtävät (kuva 1):
- Kuinka suuri on kuvan mukaisessa tilanteessa välipiirissä kulkeva virta I_d ?
 - Kuinka suuri on vaihtosähköverkosta 1 otettu pätöteho ja kuinka suuri on vaihtosähköverkkoon 2 siirtyvä pätöteho, jos suuntaajan G1 hyötysuhde on 95 % ja suuntaajan G2 hyötysuhde on 90 %?
 - Kuinka suuret ovat siirtohäviöt?
 - Kuinka suureksi suuntaajan G1 jännite U_{d1} on säädettävä, jos vaihtosähköverkkoon 2 siirtyvä teho halutaan kaksinkertaistaa? U_{d2} oletetaan pysyvän vakiona.



Kuva 1. Tasasähkövoimansiirto.

2 Tutkimukset laboratoriossa



Kytcentöjen tekeminen tai niiden muuttaminen on suoritettava jännitteettömänä!!!

Tasasähkövoimansiirtoyhteyden mittauskytkentä on esitetty liitteessä 1/1.

Mittalaitteet

Verkon puoli:

- V-mittarit digitaalisia yleismittareita (alue AC)
- A-mittarit analogisia kiertorautamittareita
- W-mittarit analogisia sähködynaamisia W-mittareita

Tasavirtavälipiiri:

- V-mittarit digitaalisia yleismittareita (alue DC)
- virran mittaus ns. shunttivastusta ja analogista mV-kierokelamittaria käyttäen
- jännitteen ja virran mittaus lisäksi oskilloskooppia ja erottavia vaimentimia käyttäen (alue DC)

(jatkuu)



Kun kytkentä on valmis, tehdään tasasähkövoimansiirtoyhteyden ensimmäinen käyttöönotto valvojan opastuksella.

Mitä tutkitaan?



Kun tasasähkövoimansiirtoyhteys on saatu toimimaan, tutkitaan tasasähkölinkin käyttäytymistä muuttamalla vuoron perään yhtä suuretta kerrallaan (verkkojännitteet, ohjauskulmat). Tee muutoksia harkiten ja varovasti! Havainnoi ja kirjaa muistiin, mitä kunkin suureen muuttaminen vaikuttaa tehon siirtoon.



Kun tasasähköyhteyden toimintaperiaate on selvitetty, tutkitaan alla mainittujen suureiden käyttäytymistä eri toimintapisteissä. Myöhemmin tapahtuvan tulosten analysoinnin vuoksi voi olla järkevää pitää jomman kumman vaihtosähköverkon jännite koko tutkimuksen ajan vakiona.

Tutkimuksessa keskitytään havainnoimaan seuraavien suureiden käyttäytymistä eri toimintapisteissä:

- kokeile tehon siirtoa molempiin suuntiin
- tehonsiirron suunnan muuttaminen ilman katkosta
- miten suuntaajien ohjauskulmien arvot määräytyvät ja miten niitä tulee säätää
- suuntaajien hyötysuhteet eri toimintapisteissä
- tehonsiirron kokonaishyötysuhde eri toimintapisteissä
- mistä seikoista tasavirtavälipiirin häviötehon määrä riippuu eri toimintapisteissä
- virtojen ja jännitteiden aaltomuodot molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä
- yliaallot molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä
- jännite- ja virtasäro molemmissa vaihtosähköverkoissa ja tasavirtavälipiirissä

Pyri pohtimaan jo tässä vaiheessa, miksi eri suureet käyttäytyvät havainnoimallasi tavalla!

3 Työselostus ja siihen liittyvät tehtävät

Tehtävät Käsittele työselostuksessa kukin seuraavista tehtävistä sille sopivassa asiayhteydessä niin, että esityksestä tulee yhtenäinen kokonaisuus. Muista verrata tuloksia teoriatietoihin sekä kommentoida ja perustella kuvaajien luonnetta. Piste- eli x - y -kaavioissa kuvaajien *mittauspisteet* tulee jättää *näkyviin*. Kuvaajien *graafinen tasoitus* onnistuu usein *lisää trendiviiva* -komennolla.

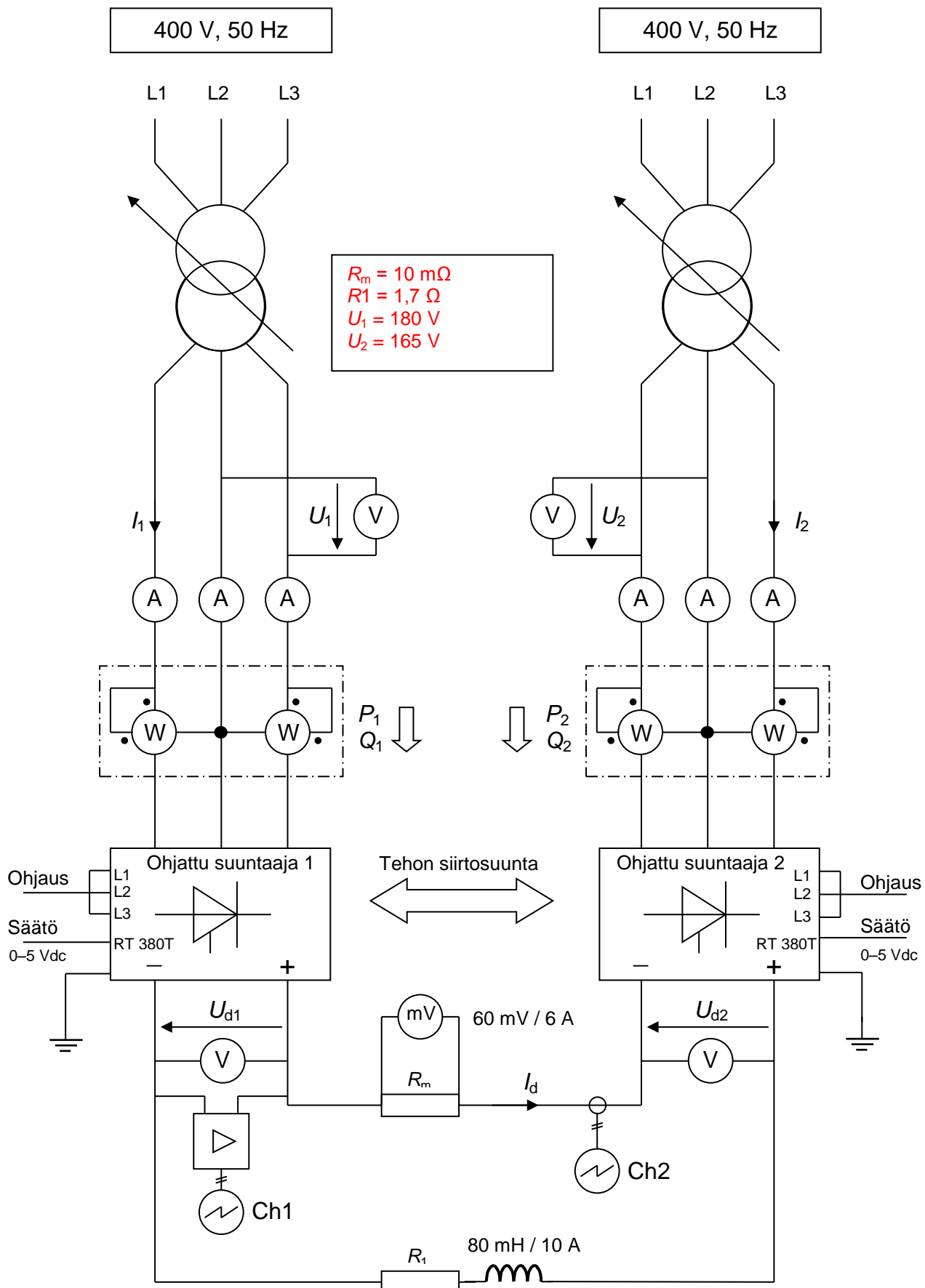
3.1 Analysoi ja raportoi laboratoriossa tekemiesi tutkimusten tulokset.

Lähdeluettelo

- /1/ ABB:n TTT-käsikirja 2000–07
- /2/ www.fingrid.fi

Tasasähkövoimansiirtoyhteys Mittauskytkentä

Tarkista suuntaajien jumbereiden kytkennät
ja muista kytkeä tuulettimien virtajohdot



Liite 7. Tasasähkövoimansiirto, mittaustulokset uusilla suuntaajilla

1 (7)

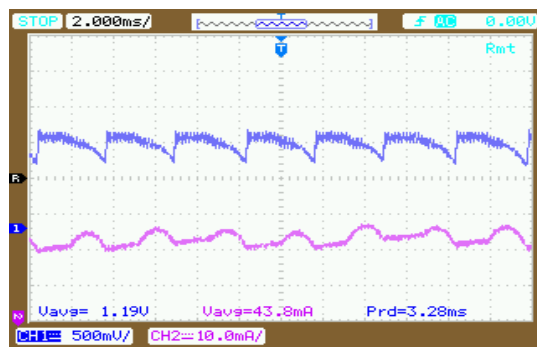
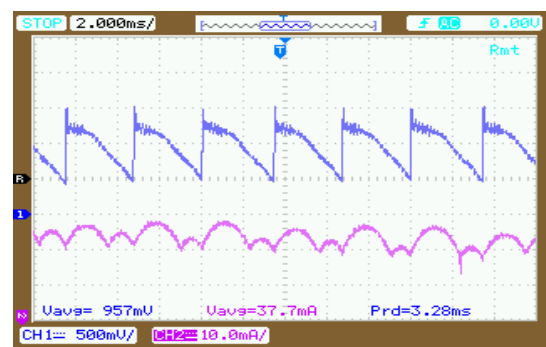
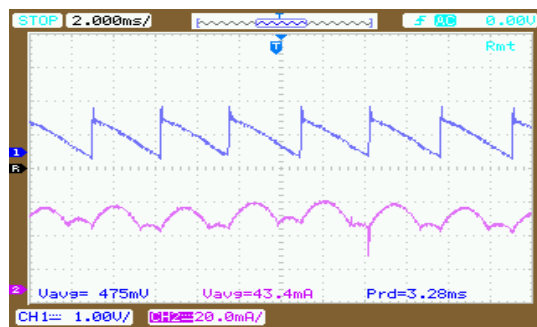
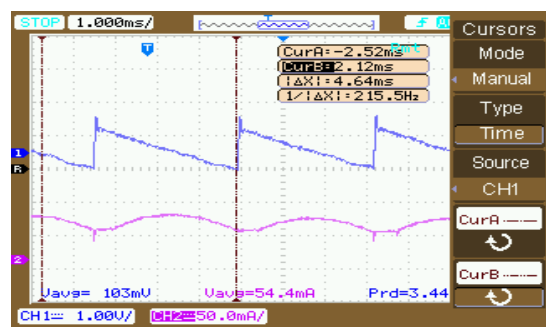
TAULUKKO 1. Mittaustulokset uusilla suuntaajilla

Verkko 1												
Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_1	U_1 (V)	U_{d1} (V)	I_{1L1} (A)	I_{1L2} (A)	I_{1L3} (A)	P_{1L1} (W)	P_{1L3} (W)	P_1 (W)		I_d (A)
1	4,5	15	180,50	227,40	3,50	3,45	3,50	395,00	600,00	995,00		4,25
2	3,8	40	180,00	185,70	3,20	3,15	3,25	200,00	550,00	750,00		3,90
3	3,0	70	180,10	87,70	3,25	3,25	3,40	-70,00	470,00	400,00		4,00
4	2,6	84	180,70	21,00	3,35	3,20	3,40	-250,00	350,00	100,00		3,90

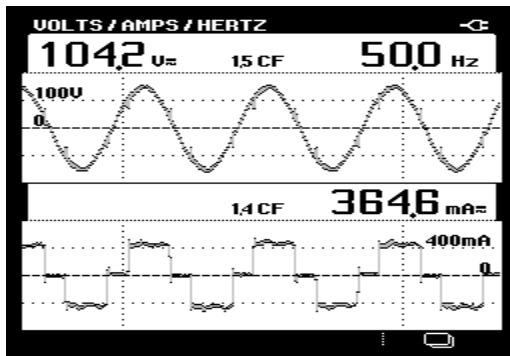
Verkko 2												
Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_2	U_2 (V)	U_{d2} (V)	I_{2L1} (A)	I_{2L2} (A)	I_{2L3} (A)	P_{2L1} (W)	P_{2L3} (W)	P_2 (W)		η (%)
1	0,3	165	165,40	-219,20	3,45	3,40	3,50	-540,00	-375,00	-915,00		0,92
2	1,0	140	165,20	-177,10	3,15	3,10	3,20	-500,00	-185,00	-685,00		0,91
3	1,9	109	164,70	-78,90	3,25	3,10	3,25	-410,00	100,00	-310,00		0,78
4	2,3	95	165,90	-12,20	3,30	3,10	3,35	-280,00	270,00	-10,00		0,10

TAULUKKO 2. Lasketut hyötysuhteet

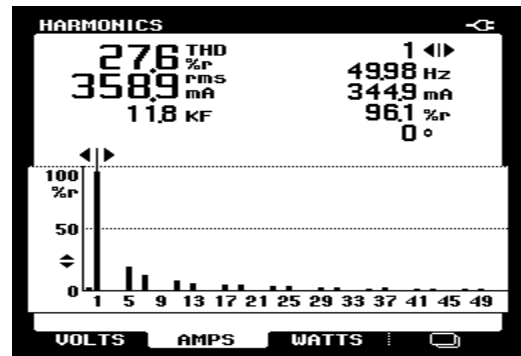
Mittaus	U_{in} (Vdc)	α_1	η_1 (%)	η_2 (%)	η_{dc} (%)	η (%)
1	4,5	15	0,97	0,98	0,96	0,92
2	3,5	40	0,97	0,99	0,95	0,91
3	3,0	70	0,88	0,98	0,90	0,78
4	2,5	84	0,82	0,21	0,58	0,10

KUVIO 1. Oskilloskoopin kuva, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 15^\circ$ KUVIO 2. Oskilloskoopin kuva, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 40^\circ$ KUVIO 3. Oskilloskoopin kuva, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 70^\circ$ KUVIO 4. Oskilloskoopin kuva, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 84^\circ$

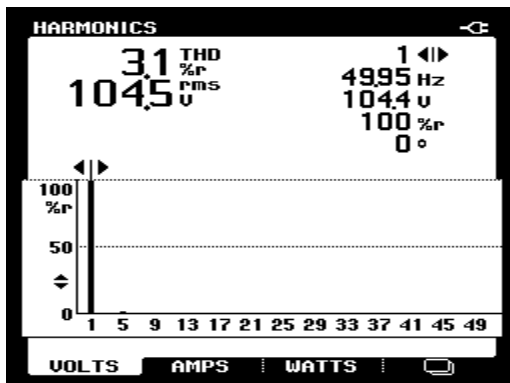
(jatkuu)



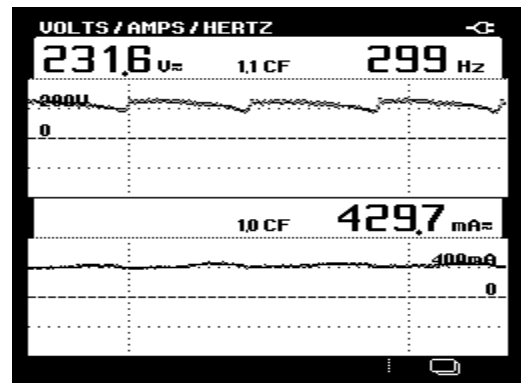
KUVIO 5. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



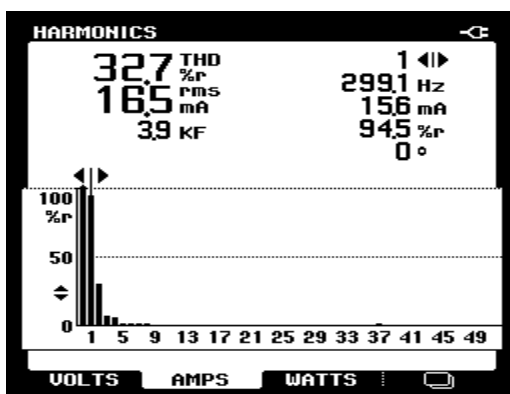
KUVIO 6. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



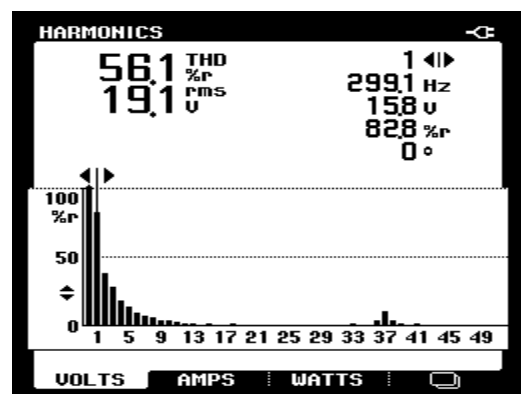
KUVIO 7. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



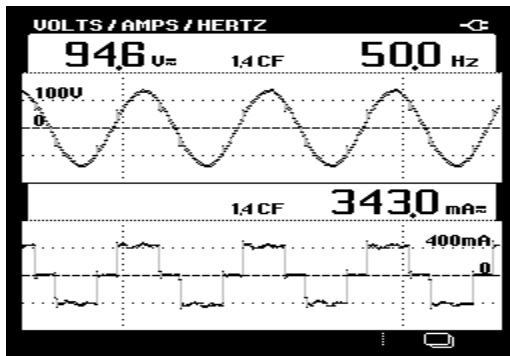
KUVIO 8. Fluke 43 kuva, jännitteen ja -virran aaltomuodot, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



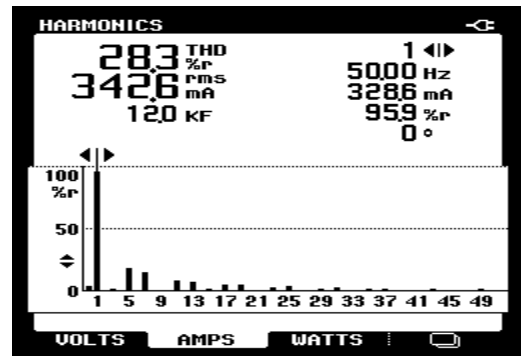
KUVIO 9. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



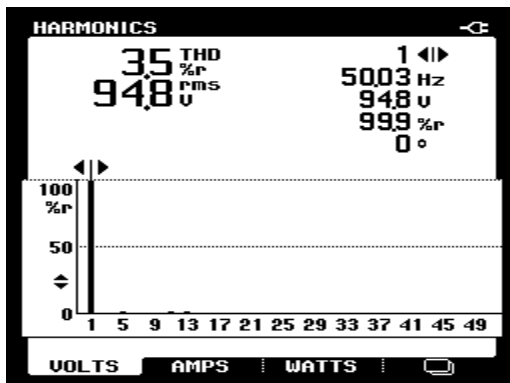
KUVIO 10. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



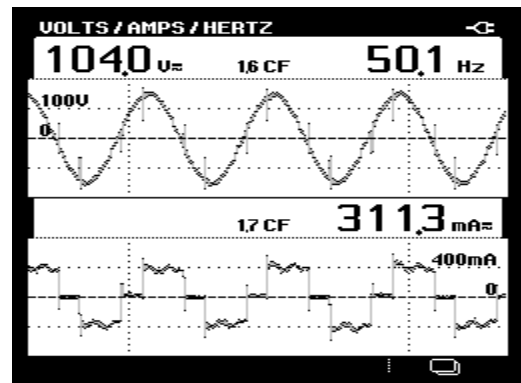
KUVIO 11. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



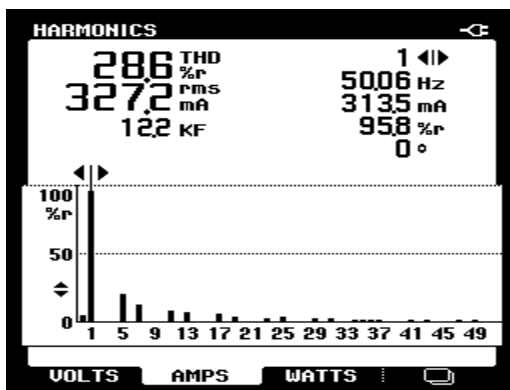
KUVIO 12. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



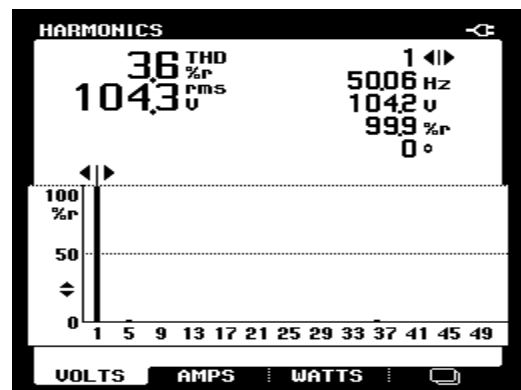
KUVIO 13. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 15^\circ$



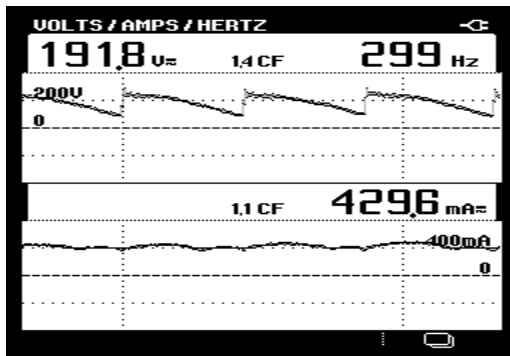
KUVIO 14. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



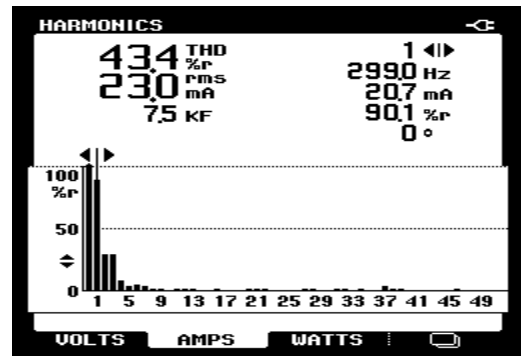
KUVIO 15. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



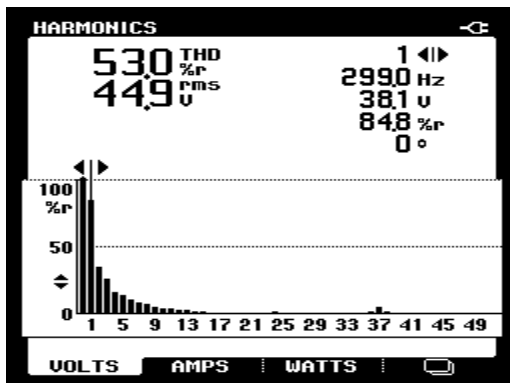
KUVIO 16. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



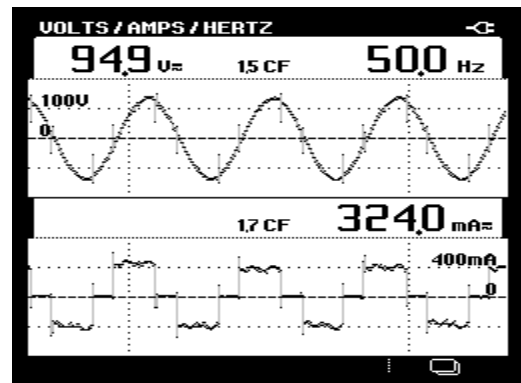
KUVIO 17. Fluke 43 kuva,
jännitteen ja -virran aaltomuodot,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



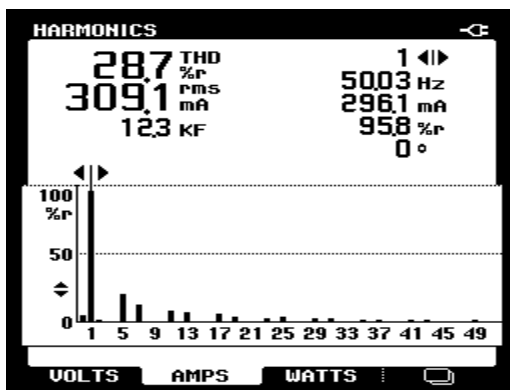
KUVIO 18. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



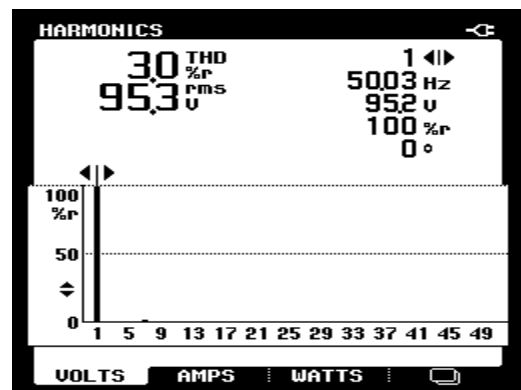
KUVIO 19. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



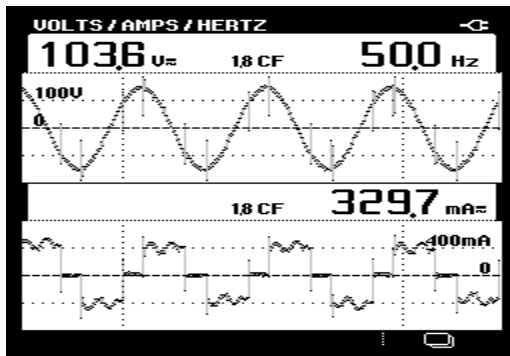
KUVIO 20. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



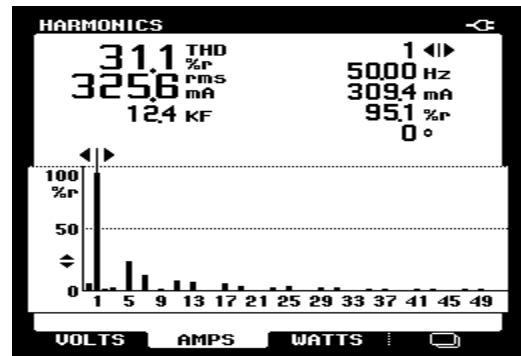
KUVIO 21. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



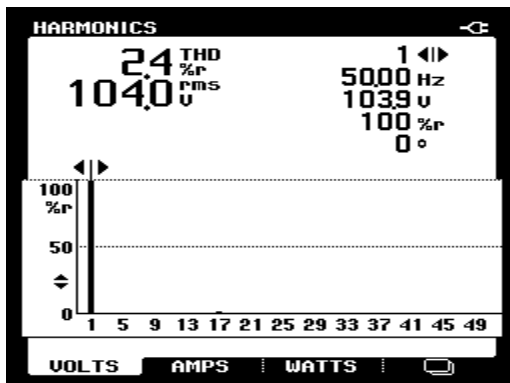
KUVIO 22. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 40^\circ$



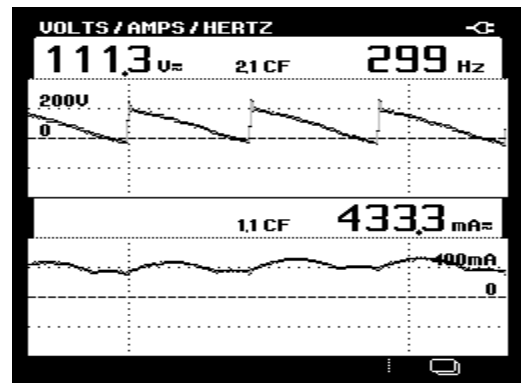
KUVIO 23. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



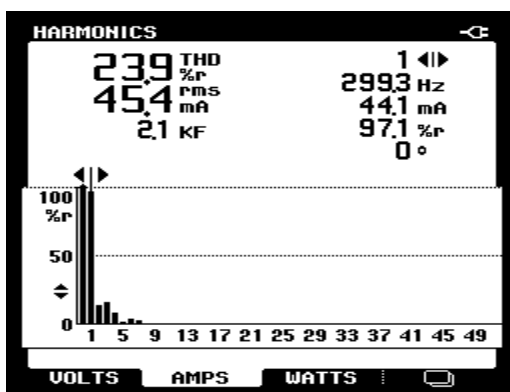
KUVIO 24. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



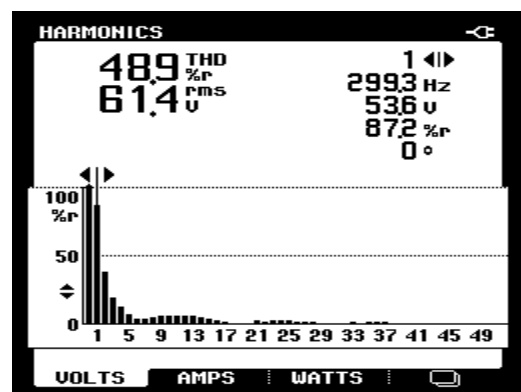
KUVIO 25. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



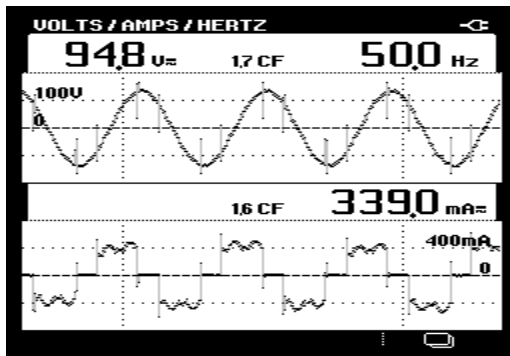
KUVIO 26. Fluke 43 kuva, jännitteen ja -virran aaltomuodot, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



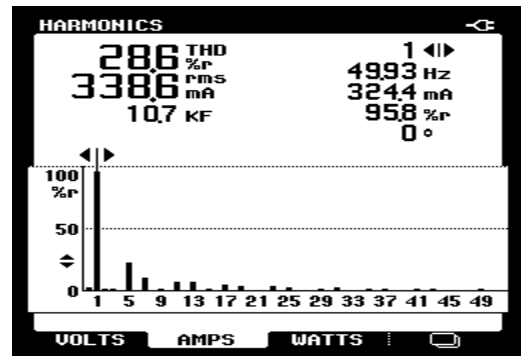
KUVIO 27. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



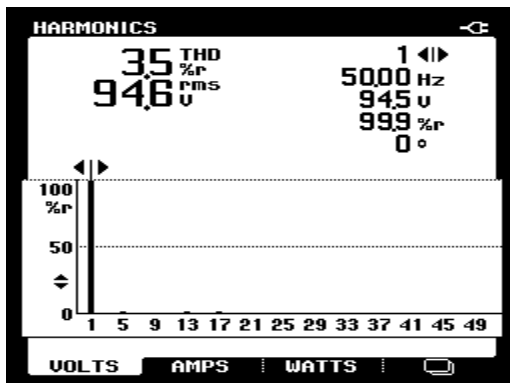
KUVIO 28. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



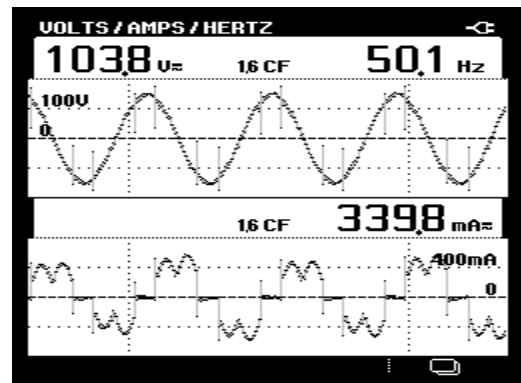
KUVIO 29. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



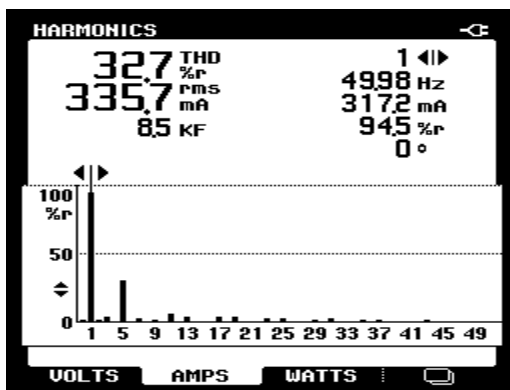
KUVIO 30. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



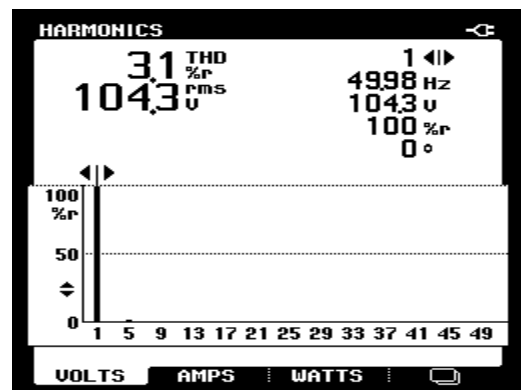
KUVIO 31. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 70^\circ$



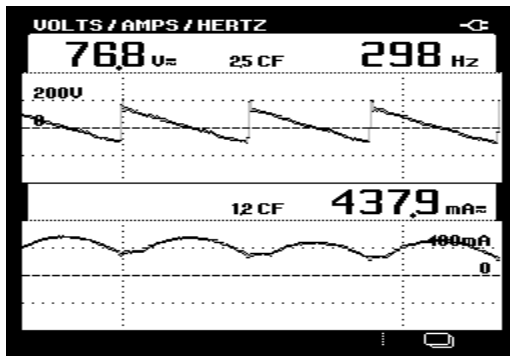
KUVIO 32. Fluke 43 kuva, vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



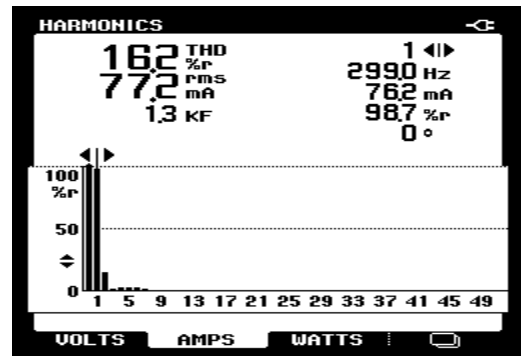
KUVIO 33. Fluke 43 kuva, virran yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



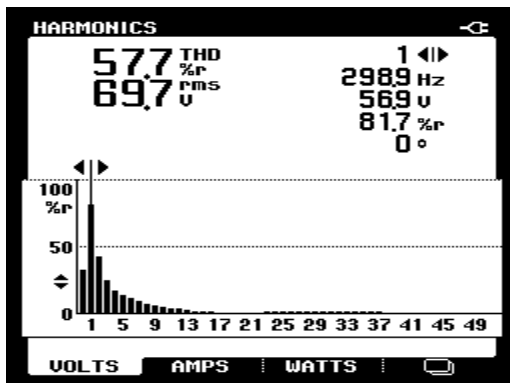
KUVIO 34. Fluke 43 kuva, jännitteen yliaaltoanalyysi, vaihtosähköverkko 1, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



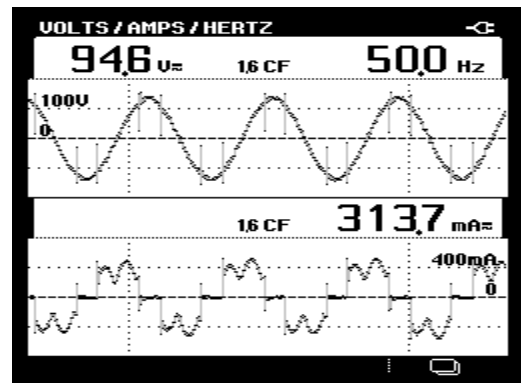
KUVIO 35. Fluke 43 kuva,
jännitteen ja -virran aaltomuodot,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



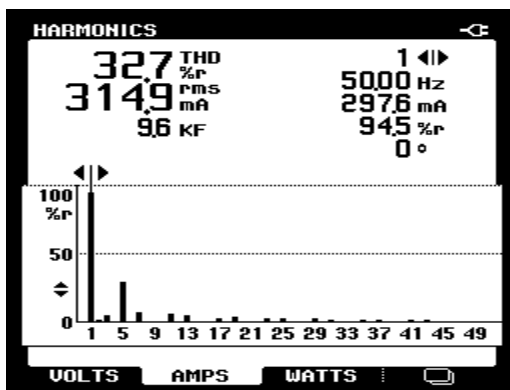
KUVIO 36. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



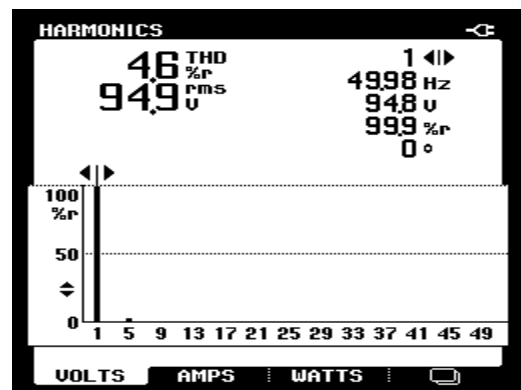
KUVIO 37. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
tasasähkövälipiiri, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



KUVIO 38. Fluke 43 kuva,
vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



KUVIO 39. Fluke 43 kuva,
virran yliaaltoanalyysi,
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 84^\circ$



KUVIO 40. Fluke 43 kuva,
jännitteen yliaaltoanalyysi,
vaihtosähköverkko 2, $\alpha_1 \approx 84^\circ$