



SÄHKÖVERKON TEHOKERTOIMEN ANALYSOINTI JA PARANTAMINEN TEOLLISUUSYMPÄRISTÖSSÄ

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK)
Kevät, 2024
Marwan Kareem Al-Muttwaki

Sähkö- ja Automaatiotekniikka

Tekijä Marwan Kareem Al-Muttwaki

Työn nimi Sähköverkon Tehokertoimen Analysointi ja Parantaminen
Teollisuusympäristössä

Ohjaaja Tommi Keikko

Tiivistelmä

Vuosi 2024

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tehokertoimen vaikutusta sähkötehon laatuun teollisuusympäristössä sekä esitellä erilaisia menetelmiä, jotka auttavat parantamaan tehokertoimen. Tämä parantaminen puolestaan johtaa sähköenergian kulutuksen vähentämiseen ja metallitehtaan sähkölaadun parantamiseen. Raportin teoreettisessa osassa perehdyttiin tehokertoimen peruseriaatteeseen, siihen liittyviin lakeihin sekä kuormien vaikutukseen tehokertoimeen. Lisäksi käsiteltiin tehokertoimen parantamiseen käytettyjä tärkeimpiä menetelmiä.

Tutkimuksessa keskityttiin esimerkiksi metallitehtaaseen teollisuusympäristössä. Sähkötehon laadun ja mahdollisten muutosten havaitsemiseksi selvitettiin tehtaan keskimääräinen näennäisteho ja pätöteho koko vuoden ajalta. Alustavien analyysien ja laskelmien perusteella havaittiin, että tehtaalla oli haasteita sekä sähkötehon laadussa että tehokertoimessa. Sähkötehon häviö todettiin olevan noin 23 prosenttia, mikä tarkoittaa, että tehdas hyödynsi vain 77 prosenttia sähkötehostaan. Analyysin tulokset paljastivat myös korkean virrankulutuksen, mikä johti ostetun energian kustannusten nousuun.

Analyysin ja laskelmien perusteella päätettiin asentaa metallitehtaalle tehokertoimen parannusjärjestelmä. Tarvittavat laskelmat suoritettiin 700 kVAr parannusjärjestelmän valitsemiseksi, joka auttaisi parantamaan tehtaan sähkön laatua ja tehokertoimetta samalla kun vähennettäisiin sähkövirrankulutusta ja ostetun energian kustannuksia. Tehokertoimen parannusjärjestelmäksi valittiin Schneiderin tarjoama ratkaisu, joka toimii 400 voltin jännitteellä ja 50 Hz taajuudella.

Tehtaan sähkötehon laatuun liittyvistä ongelmista suurin osa saatiin ratkaistua. Alhaisen tehokertoimen, korkeiden ostetun sähköenergian kustannusten ja korkean virrankulutuksen ongelmat onnistuttiin käsittelemään. Metallitehtaan tehokertoimen parannusjärjestelmä tuotti kuukausittaista säästöä, jonka arvioidaan olevan noin 35 prosenttia tehtaan sähkölaskun kokonaishinnasta.

Avainsanat Näennäisteho, pätöteho, loisteho, tehokertoimen

Sivut 54 sivua ja liitteitä 2 sivua

Electrical and Automation Engineering

Author Marwan Kareem Al-Muttwaki

Subject Analyzing and Improving the Power Factor of the Power Grid in an Industrial Environment.

Supervisor Tommi Keikko

Abstract

Year 2024

The purpose of this thesis has been to examine the impact of power factor on electrical power quality in an industrial setting and present various methods for improving the power factor. This improvement, in turn, leads to reduced electrical energy consumption and enhanced electricity quality at the metal factory. The theoretical section of this thesis delves into the fundamental principles of power factor, relevant regulations, and the influence of loads on power factor. Additionally, the most significant methods employed to enhance power factor are discussed.

This investigation focused on a metal factory situated in an industrial environment. To assess the power quality and identify any potential fluctuations, the average apparent power and effective power of the factory were determined over the course of a year. Preliminary analysis and calculations revealed challenges in both electric power quality and power factor at the factory. The electrical power loss was approximately 23 percent, indicating that the factory only utilized 77 percent of its available power. The analysis results also indicated high power consumption, resulting in increased costs for purchased energy.

Based on the analysis and calculations, the decision was made to install a power factor improvement system at the metal factory. Calculations were conducted to select a 700 kVAr improvement system that would enhance power quality, power factor, and reduce electrical power consumption and energy costs. The solution provided by Schneider was chosen as the power factor improvement system, operating at a voltage of 400 volts and a frequency of 50 Hz.

Most of the issues related to the metal factory's electrical power quality were successfully resolved through these measures. The problems of low power factor, high costs of purchased electrical energy, and excessive power consumption were effectively addressed. The power factor improvement system implemented at the metal factory resulted in monthly savings estimated to be around 35 percent of the total electricity bill.

Keywords Apparent power, active power, reactive power, power factor

Pages 54 pages and appendices 2 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sähköverkot teollisuusympäristössä	2
2.1	Sähkökuormien ominaisuudet teollisuusympäristössä	2
2.2	Sähköverkon rooli teollisuudessa	4
2.3	Tehokertoimen merkitys teollisuuden sähköverkoissa	6
3	Tehokerroin ja sen merkitys	7
3.1	Näennäisteho, pätöteho ja loisteho	8
3.2	Tehokertoimen käsite ja laskentamenetelmät	11
3.3	Resistiiviset, induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat	14
3.4	Loistehon kompensointi	18
3.5	Tehokertoimen vaikutukset energiatehokkuuteen	21
3.6	Taloudelliset ja ympäristölliset hyödyt tehokertoimen parantamisessa	22
4	Sähköverkon tehokertoimen analysointi	24
4.1	Mittaukset ja datankeruu teollisuusympäristössä	25
4.2	Analyysimenetelmät tehokertoimen arvioimiseksi	27
4.3	Tietojenkäsittely ja tulosten tulkinta	30
5	Sähköverkon tehokertoimen parantaminen	32
5.1	Tehokertoimen parantamiseen käytetyt menetelmät	33
5.2	Kuormanhallinta ja optimointi	37
5.3	Sähköverkon suunnittelu tehokkuuden maksimoimiseksi	38
6	Tapaustutkimus teollisuusympäristöstä	40
6.1	Tapaustutkimuksen esittely ja tavoitteet	40
6.2	Mittauksetulosten analysointi ja tehokertoimen arviointi	40
6.3	Parannustoimenpiteiden suunnittelu ja toteutus	44
6.4	Tulosten arviointi ja vaikutusten analysointi	46
7	Yhteenveto tutkimustuloksista	49
7.1	Tärkeimmät havainnot ja johtopäätökset	49
7.2	Suositukset tehokkuuden edistämiseksi teollisuuden sähköverkoissa	50
	Lähteet	52

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Globaali sähkönkulutus eri sektoreilla (Stanford University, 2023).	4
Kuva 2. Teollisuuden energiankäyttö Suomessa 2021 (Motiva, 2023).	5
Kuva 3. Tehokerroin ja sen suhde pätötehoon ja näennäistehoon (Beeman, 1955, s. 442).	7
Kuva 4. Tehokolmio.	10
Kuva 5. Sinimuotoinen jännite ja vääristynyt virta, joka ei ole sinimuotoinen (ETAP, n.d.).	12
Kuva 6. 3-ulotteinen monitahoinen tehokolmio (Industry Support Siemens, 2013).	13
Kuva 7. Resistiivinen kuorma sähköpiirissä.	14
Kuva 8. Resistiivisen kuorman jännite- ja virta signaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).	14
Kuva 9. Induktiivinen kuorma sähköpiirissä.	15
Kuva 10. Induktiivisen kuorman jännite- ja virta signaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).	15
Kuva 11. Kapasitiivinen kuorma sähköpiirissä.	16
Kuva 12. Kapasitiivisen kuorman jännite- ja virtasignaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).	16
Kuva 13. Jäljellä oleva tehokerroin (Fleckenstein, 2016, s. 10).	17
Kuva 14. Johtava tehokerroin (Fleckenstein, 2016, s. 9).	18
Kuva 15. Kaaviokuva, joka näyttää kuinka kondensaattorit vähentävät sähköjärjestelmän kokonaisvirtaa (Beeman, 1955, s. 447).	19
Kuva 16. Sähkön laadun arvioinnin perusvaiheet (Dugan ym., 2004, s. 8).	24
Kuva 17. Fluke 434-II sähkönlaatu ja energia-analysaattori (Fluke, 2024).	26

Kuva 18. Fluken liitäntä 3-vaiheiseen sähköjakelujärjestelmään (Fluke, 2012, s. 36)...	26
Kuva 19. Vektorikaavio oikein kytketylle Fluke-laitteelle (Fluke, 2012, s. 37).	27
Kuva 20. Dewesoft R8DB tehoanalysaattori (Grant Maloy, 2023).	28
Kuva 21. Dewesoftin tehoanalysaattorimoduuli ja FFT-analysaattori (Grant Maloy, 2023).	29
Kuva 22. Dewesoftin tehoanalysaattorin kytkentäkaavio sähkömoottoreiden testaamiseen (Grant Maloy, 2023).	30
Kuva 23. Pätötehon ja loistehon tilanne ennen tehokertoimen parantamista.	32
Kuva 24. Pätötehon ja loistehon tilanne tehokertoimen parantamisen jälkeen.	33
Kuva 25. Kondensaattorien sijainti teollisuuden sähköjärjestelmissä (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 364).	33
Kuva 26. Kondensaattorin sisäosaa (Orman, 2012, s. 12).	34
Kuva 27. Kondensaattorien sijainnit (Fleckenstein, 2016, s. 304).	35
Kuva 28. Synkroniset moottorit (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 367).	36
Kuva 29. TSC:n ja TCR:n toiminta (ABB, 2010, s. 8).	36
Kuva 30. Kuormahuippujen siirto (DEMOUSELLE ym., 2009, s. 6).	37
Kuva 31. Tehtaan minimi- ja maksimipätötehon kaaviokuva.	41
Kuva 32. Tehtaan minimi- ja maksimitehokerroin kaaviokuva.	42
Kuva 33. Tehtaan minimi- ja maksimiloistehon kaaviokuva.	43
Kuva 34. Tehtaan minimi- ja maksimi virrankulutus kaaviokuva.	44
Kuva 35. Tehtaan minimi- ja maksimi kondensaattorin loisteho kaaviokuva.	45

Kuva 36. Schneiderin 700kVAr VarSet-kondensaattoripankki (Schneider Electric, 2024c).	46
Kuva 37. Virrankulutuksen tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.....	47
Kuva 38. Loistehon tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.....	47
Kuva 39. Sähkölaskun tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.....	48
Taulukko 1. Tehokerroin ja prosentuaalinen kasvu virrankulutuksessa (Fleckenstein, 2016, s. 302).	21
Taulukko 2. Metallitehtaan sähkömittaustiedot.....	41
Kaava 1. Näennäistehon ensimmäinen laskentakaava.	8
Kaava 2. Näennäistehon toinen laskentakaava.....	8
Kaava 3. Näennäistehon kolmas laskentakaava.	8
Kaava 4. Pätötehon ensimmäinen laskentakaava.....	9
Kaava 5. Pätötehon toinen laskentakaava.	9
Kaava 6. Pätötehon kolmas laskentakaava.....	9
Kaava 7. Loistehon ensimmäinen laskentakaava.....	10
Kaava 8. Loistehon toinen laskentakaava.	10
Kaava 9. Loistehon kolmas laskentakaava.	10
Kaava 10. Tehokerroin laskentakaava.	11
Kaava 11. Pätötehon laskentakaava harmoniselle jännitteelle ja virralle.	11

Kaava 12. Näennäistehon laskentakaava 3-ulotteiselle monitahoiselle tehokolmiojärjestelmälle.....	13
Kaava 13. Kokonaisloistehon laskentakaava.	13
Kaava 14. Loistehon laskentakaava.....	19
Kaava 15. Loistehon laskentakaava ennen tehokertoimen parantamista.	19
Kaava 16. Loistehon laskentakaava tehokertoimen parantamisen jälkeen,.....	20
Kaava 17. ckVAR:n laskentakaava.....	20
Kaava 18. ckVAR:n toinen laskentakaava.	20
Kaava 19. Sähköjärjestelmän kulutetun virran laskentakaava.....	20
Kaava 20. Loistehon hinnan laskentakaava.	22
Kaava 21. Sähköverkon tehokkuuden laskentakaava.	38
Kaava 22. Jännitteen säädön laskentakaava.	39

Liitteet

- Liite 1. Kilowattikertoimen useille tehokertoimen optimointiprosesseille
- Liite 2. Kilowattikertoimen useille tehokertoimen optimointiprosesseille

1 Johdanto

Viime aikoina on havaittu kasvava kiinnostus teollisuusympäristöjen tehokertoimen analysointiin ja parantamiseen. Samalla on noussut esiin lisääntynyt kiinnostus loistehon kompensointiin ja sen vaikutuksiin sähkön laatuun. Lisäksi sähkön hinnan nousu on pakottanut monet tehtaot vähentämään sähköenergian kulutusta.

Sähköverkon tehokertoimen analysointi ja parantaminen teollisuusympäristössä ovat keskeisiä toimenpiteitä, joiden avulla voidaan optimoida energiankäyttöä, vähentää kustannuksia ja parantaa sähköjärjestelmän luotettavuutta. Tehokertoimen analysointi auttaa tunnistamaan tehokkuusongelmia ja tarjoaa tietoa reaktiivisen tehon tarpeesta. Parantamistoimenpiteet, kuten reaktiivisen tehon kompensointi kondensaattoreilla tai aktiivisen tehon kompensointi elektronisilla komponenteilla, voivat nostaa tehokerrointa ja optimoida sähköverkon toimintaa.

Raportti keskittyy sähköverkon tehokertoimien analysointiin ja parantamiseen teollisuusympäristössä. Tehokkuuden parantaminen on erittäin tärkeää, kun tavoitteena on energiansäästö ja kestävä kehitys. Raportissa tutkitaan, miten teollisuusympäristössä voidaan optimoida sähköverkon tehokkuutta ja vähentää energiahäviöitä. Tarkoituksena on löytää keinoja, joiden avulla teollisuusyritykset voivat hyödyntää sähköä mahdollisimman tehokkaasti ja samalla vähentää energianhukkaa. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarkastelen erilaisia tekniikoita, strategioita ja käytäntöjä, jotka voivat auttaa parantamaan sähköverkon tehokkuutta teollisuusympäristössä.

Tässä raportissa tarkastellaan energiatehokkuuden määrittelyä ja mittaamista teollisuusympäristössä. Tutkitaan yleisimpiä energiahäviön syitä teollisuusympäristössä sekä menetelmiä ja tekniikoita, joilla energiatehokkuutta voidaan parantaa. Raportissa arvioidaan myös, vaikuttaako tehokertoimen parantaminen merkittävästi ostetun energian kustannuksiin.

Raportin tavoitteena on tutkia sähköverkon tehokertoimen analysointia ja parantamista teollisuusympäristössä sekä esittää suosituksia ja toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseksi. Tavoitteena on auttaa teollisuusyrityksiä parantamaan sähköverkon suorituskykyä, vähentämään energiakustannuksia ja edistämään kestävästä kehitystä.

2 Sähköverkot teollisuusympäristössä

Teollisuusympäristöissä sähköverkot ovat elintärkeitä infrastruktuurin osia, jotka mahdollistavat sähkötoimituksen ja tehonjakelun teollisuuslaitoksille. Sähköverkot tarjoavat energian tehokkaaseen toimintaan ja tukemiseen monenlaisille sähkölaitteille ja -järjestelmille, joita käytetään teollisessa tuotannossa. Teollisuusympäristöjen sähköverkot ovat usein monimutkaisia ja vaativia, koska niiden on kyettävä vastaamaan suuriin tehontarpeisiin ja erilaisiin kuormituksiin.

Teollisuuden sähköverkoilla on useita etuja, jotka erottavat ne muista sähköverkoista. Teollisuuden sähköverkkokohteiden maantieteellinen koko voi olla kymmeniä hehtaareja, mikä vaatii laajan sähköverkon kattavuuden ja tehokkaan energian jakelun. Teollisuuden sähköverkoissa sähköjohtojen ja -kaapeleiden pituus voi olla useita kilometrejä, ja ne voivat ulottua eri jännitetasoille. Teollisuuden sähköverkot voivat vaihdella tehon suhteen laajalla skaalalla, tyypillisesti 250 kVA:sta 100 MVA:aan tai enemmän. Tämä mahdollistaa suuren tehontarpeen täyttämisen teollisissa prosesseissa. Teollisuuden sähköverkoissa kuormat koostuvat pääasiassa asynkronimoottoreista, mutta voivat sisältää myös erikoiskuormia, jotka liittyvät prosesseihin, kuten elektrolyysiin ja uuneihin. Tämä edellyttää sähköverkon joustavuutta ja tehokasta kuormituksen hallintaa. (De Metz-Noblat & Jeanjean, 1997, s. 6)

2.1 Sähkökuormien ominaisuudet teollisuusympäristössä

Teollisuusympäristössä on tärkeää ymmärtää sähkön laadun käsite, jotta voidaan ymmärtää kuormien ominaisuuksia kyseisessä ympäristössä. Tehonlaadulla tarkoitetaan sähkölaitteille syötetyn sähkön vastaavuutta vaadittuihin käyttöominaisuuksiin. Kaikki jännitteen, virran ja taajuuden poikkeamat, jotka ilmenevät teho-ongelmina, voivat johtaa teollisuuslaitteiden vaurioitumiseen tai toimintahäiriöihin. (Dugan ym., 2004, s. 3)

Loppukäyttäjä vaikuttaa merkittävästi sähkön laatuun. Sähkön laatuun vaikuttavat olennaisesti viat sähköjärjestelmässä, sähköasemien sähköverkossa sekä suuritehoisten kuormien päälle- ja poiskytkentä. Lisäksi suuret määrät epälineaarisia kuormia, kuten valaistus- ja elektroniikkalaitteet, ovat keskeisessä roolissa sähkön laadun kannalta. Epälineaariset kuormat voivat aiheuttaa ongelmia ja heikentää sähkön laatua. Erityisesti teollisuusympäristössä suuritehoisten laitteiden käytöllä voi olla haitallisia vaikutuksia. Sähköjärjestelmässä voidaan tunnistaa kolme pääryhmää harmonisten häiriöiden lähteitä: kaarilaitteet, kuten kaariunit ja hitsauskoneet, sähkömagneettiset laitteet, kuten muuntajat,

sähkömoottorit tai generaattorit, sekä elektroniset laitteet. Nämä laitteet voivat aiheuttaa harmonisia häiriöitä sähköverkkoon, mikä puolestaan voi heikentää sähkön laatua. (Tsegaye, n.d.)

Teollisuusympäristössä sähkökuormien ominaisuudet voivat vaihdella suuresti riippuen käytetyistä laitteista ja prosesseista. Teollisuusympäristöissä käytetään usein suuritehoisia laitteita, kuten suuria sähkömoottoreita, kompressoreja, pumppuja UPS-laitteet, ja generaattoreita. Nämä kuormat voivat aiheuttaa merkittäviä virta- ja jännitehäviöitä sähköverkossa. Teollisuusympäristöissä on usein laitteita, jotka aiheuttavat epälineaarisia kuormituksia sähköverkkoon. Näitä laitteita ovat esimerkiksi taajuusmuuttajat, invertterit, hitsauskoneet ja valaistusjärjestelmät. Epälineaariset kuormat voivat aiheuttaa suuria harmonisia vääristymiä sähköverkossa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 2000, s. 1)

Teollisuuslaitosten tiheä sähkölaitteisto ja sen monimutkaisuus tekevät niistä alttiita sähkön laatuongelmille. Erilaiset laitteet, kuten sähkömoottorit, muuntajat ja keskeytymättömät virtalähteet UPS, voivat aiheuttaa sähkövirran laatuongelmia. Sähkömoottorit muodostavat jopa 80 prosenttia teollisuuslaitosten sähkökuormasta ja voivat aiheuttaa sähköjännitteen alenemista sekä tehokertoimen pienenemistä. Muuntajilla on samankaltainen vaikutus, koska ne ovat keskeisessä roolissa suurten sähkömäärien siirrossa teollisuusympäristössä. Ne voivat heikentää tehokertoimia ja sähkölaatua. (Schneider Electric, 2016)

Teolliset prosessit voivat altistua voimakkaille ja vaihteleville kuormituksille. Esimerkiksi laitteen päälle tai pois päältä kytkeminen voi aiheuttaa lyhytaikaisia tehohippuja sähköverkossa. Teolliset prosessit voivat sisältää myös loiskuormia, jotka aiheuttavat loistehoa ja vaikuttavat sähköverkon jännitetasapainoon. Teollisuusympäristössä voi esiintyä erilaisia häiriöitä, kuten sähkömoottoreiden aiheuttamia häiriöitä, harmonisia säröjä tai sähkömagneettisia häiriöitä. Nämä häiriöt voivat vaikuttaa sähkön laatuun ja sähköverkon vakauden ylläpitämiseen. (Dash Control Systems, 2017)

2.2 Sähköverkon rooli teollisuudessa

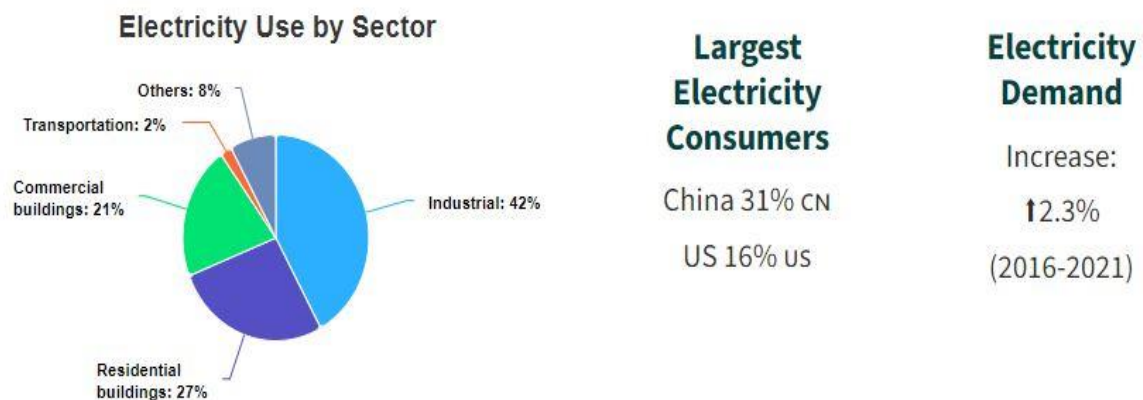
Teollisuussektorilla sähköllä on ratkaiseva rooli monien prosessien ja laitteiden käyttövoimana. Teollisuusympäristöissä sähköä käytetään suuritehoisiin moottoreihin, kompressoreihin, pumppuihin ja muihin laitteisiin, jotka tarvitsevat luotettavaa ja tehokasta energiansyöttöä. Lisäksi sähköä käytetään elektronisten ohjausjärjestelmien, taajuusmuuttajien ja inverttereiden avulla, mikä mahdollistaa tarkan ja joustavan prosessien hallinnan.

Sähköverkot ja niiden infrastruktuuri, kuten voimalaitokset, siirtoverkot ja jakeluverkot, ovat välttämättömiä sähköenergian toimittamisessa teollisuusalueille. Tämä edellyttää jatkuvaa sähköverkkojen kehittämistä ja investointeja, jotta ne pystyvät vastaamaan kasvavaan sähkön kysyntään ja tarjoamaan luotettavaa ja tehokasta sähköntuotantoa erilaisiin tarpeisiin.

Sähkö on nykyaikaisen yhteiskunnan keskeinen energiamuoto, ja sen käyttö laajenee jatkuvasti eri toimialoilla ja sektoreilla. Sähköverkot mahdollistavat sähköenergian tehokkaan ja luotettavan tuottamisen sekä toimittamisen eri kohteisiin vastaamaan kasvavaan kysyntään. (Iderus ym., 2022)

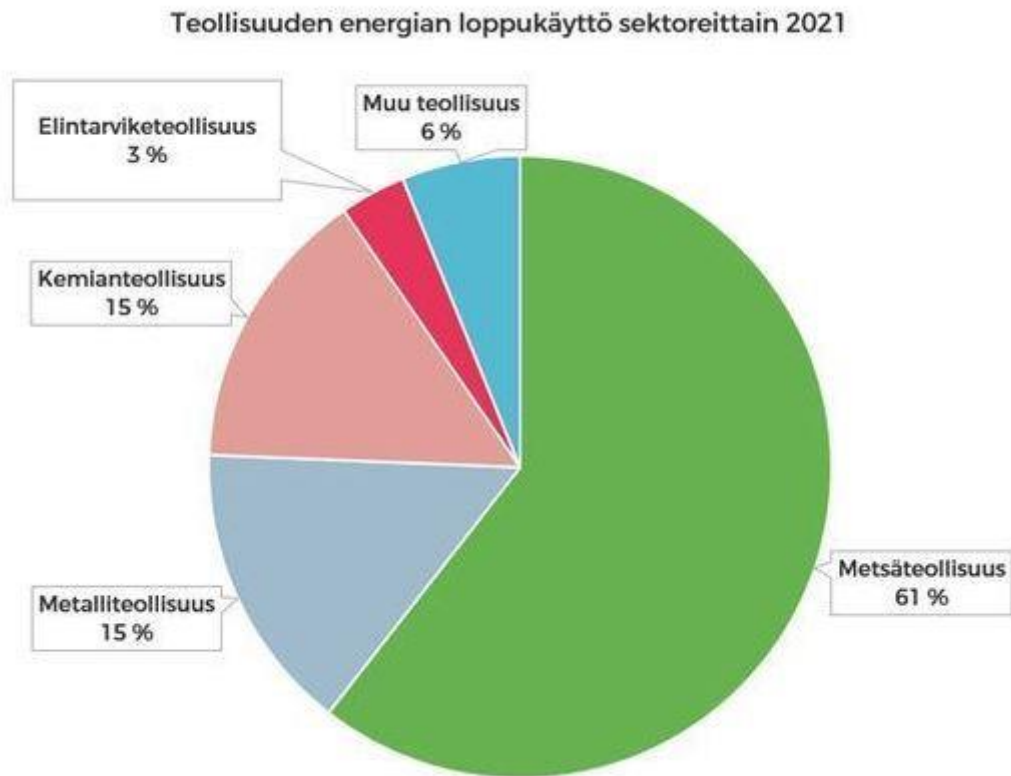
Kuten kuvassa 1 näkyy, globaali teollisuus kuluttaa suurimman osan maailmanlaajuisesta sähköntuotannosta 42 prosenttia. Suurimmat sähkönkuluttajat ovat Yhdysvallat, joiden osuus on 16 prosenttia, ja Kiina, jonka osuus on 31 prosenttia. Sähkön kysyntä kasvoi 2.3 prosenttia vuosina 2016–2021. (Stanford University, 2023)

Kuva 1. Globaali sähkönkulutus eri sektoreilla (Stanford University, 2023).



Suomessa teollisuuden sähköenergian käyttö oli 139 TWh, mikä vastaa 45 prosenttia Suomen kokonaistuotannosta. Teollisuuden sähkönkulutus oli 39 TWh, josta metsäteollisuuden osuus, kuten kuvasta 2, oli suurin sähköenergian käytössä 61 prosenttia, ja kemianteollisuuden ja metallinjalostuksen osuus oli noin 15 prosenttia kullekin. Suomessa teollisuuden sähköenergian käyttö väheni 9 prosenttia vuosina 2000–2021. (Motiva, 2023)

Kuva 2. Teollisuuden energiankäyttö Suomessa 2021 (Motiva, 2023).



2.3 Tehokertoimen merkitys teollisuuden sähköverkoissa

Tehokertoimen merkitys teollisuuden sähköverkoissa on erittäin suuri.

Teollisuusympäristöissä käytetään usein suuria sähkönkulutusta vaativia laitteita ja koneita, joilla on suuri teho. Tällaiset laitteet voivat aiheuttaa alhaisen tehokertoimen, mikä aiheuttaa useita haasteita sähköverkolle ja teollisuusprosesseille.

Alhainen tehokerroin tarkoittaa, että teollisuuden sähkönkuluttajien on hankittava suurempi määrä sähköä tuottaakseen tarvittavan tehon. Tämä johtaa korkeampiin energiakustannuksiin, koska sähkönhankinta perustuu kulutetun energian määrään.

Tehokkaampi tehokerroin voi auttaa teollisuusyrityksiä säästämään merkittävästi energiakuluissaan. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 2000, s. 1)

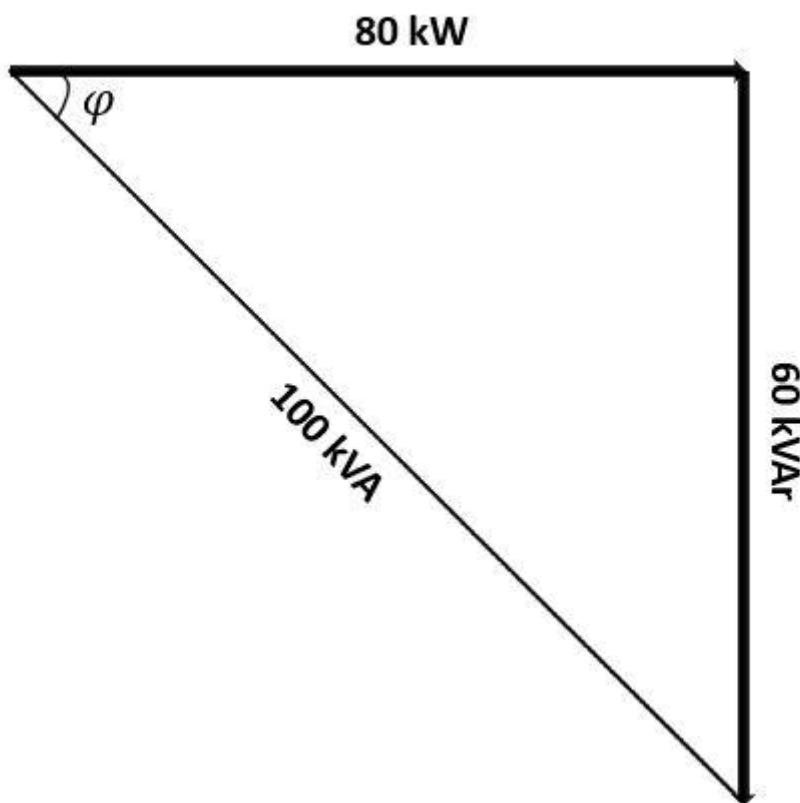
Teollisuuslaitoksissa, joissa on suuri määrä moottoreita tai muita induktiivisia kuormia, esiintyy yleensä alhainen tehokerroin. Tämä alhainen tehokerroin johtaa korkeampiin ostetun energian kustannuksiin. Alhainen tehokerroin lisää sähköverkon kuormitusta. Suurempi sähkövirta on tarpeen tuottaa sama teho, mikä voi aiheuttaa ylikuormitusta ja jännitehäviöitä sähköverkossa. Tämä puolestaan voi johtaa sähkön laadun heikkenemiseen ja häiriöiden riskiin teollisuuden prosesseissa. (Maheshwari, 2023, ss. 6–7)

Tehokertoimen korjaus on keskeisessä roolissa energiatehokkuuden parantamisessa ja sähköjärjestelmien optimoinnissa teollisissa sovelluksissa. Optimoimalla alhaisen tehokertoimen tehtaat voivat vähentää energiankulutusta, alentaa sähkölaskuja ja parantaa yleistä toiminnan tehokkuutta. On tärkeää arvioida tehtaan erityistarpeet ja valita sopiva ratkaisu erilaisten tehokertoimen korjausmenetelmien joukosta. Tehokerroinkorjauksen käyttöönotto hyödyttää paitsi organisaatiota myös edistää kestävämpää ja ympäristöystävällisempää toimintaa. (CLOU GLOBAL, 2023)

3 Tehokerroin ja sen merkitys

Tehokerroin on luku, joka ilmaisee sähkölaitteen tai järjestelmän tehokkuuden suhteen sen tuottamaan tai kuluttamaan sähköön. Se mittaa hyötykäyttöön saatavan tehon suhdetta kokonaistehoon. Toisessa määritelmässä tehokerroin tarkoittaa sähköjärjestelmän pätötehon suhdetta sähköjärjestelmän näennäistehoon. Kuvassa 3 voidaan havaita, että tehokerroin on 80 prosenttia. Tehokerroinkulma on kulma KW ja KVA välillä, ja tehokerroinkulman kosini edustaa tehokerrointa. (Beeman, 1955, s. 442)

Kuva 3. Tehokerroin ja sen suhde pätötehoon ja näennäistehoon (Beeman, 1955, s. 442).



Korkea tehokerroin tarkoittaa, että laite tai järjestelmä hyödyntää sähköä tehokkaasti ja tuottaa enemmän hyödyllistä tehoa suhteessa kokonaistehoon. Alhainen tehokerroin puolestaan viittaa sähkön tehottomaan käyttöön ja suurempaan häviöön.

Tehokerroin on erityisen tärkeä teollisissa sovelluksissa, joissa suuria määriä sähköä käytetään. Alhaisella tehokertoimella toimivat laitteet voivat aiheuttaa suuria energiahäviöitä ja lisätä energiakustannuksia. Tehokerroin korjausmenetelmien avulla voidaan optimoida järjestelmän tehokkuutta ja vähentää energiankulutusta.

3.1 Näennäisteho, pätöteho ja loisteho

Jotta voidaan ymmärtää sähköjärjestelmän tehokertoimen, meidän on tutustuttava sähköjärjestelmän teho komponentteihin ja niihin liittyviin laskentamenetelmiin.

Sähköteho on jaettu kolmeen peruskomponenttiin näennäisteho, pätöteho ja loisteho. Näennäisteho S on sähköjärjestelmän kokonaisvaikutus tai kokonaisteho. Se koostuu sekä aktiivisesta tehosta P että reaktiivisesta tehosta Q . Näennäisteho ilmaisee sähköjärjestelmän kuormituksen tai energiankulutuksen kokonaisuudessaan, mutta se ei osoita todellista suoritettua työtä. Näennäisteho mitataan voltiampeereina VA. Näennäisteho voidaan laskea seuraavien kaavain mukaan. (Silvonen, 2017, s. 6)

Kaava 1. Näennäistehon ensimmäinen laskentakaava.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Missä S on näennäisteho, P on pätöteho ja Q on loisteho. (Beeman, 1955, s. 441)

Kaava 2. Näennäistehon toinen laskentakaava.

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

Missä $\cos \varphi$ on tehokerroin. (Beeman, 1955, s. 442)

Kaava 3. Näennäistehon kolmas laskentakaava.

$$S = P + jQ$$

Missä j on imaginaariyksikkö. (Silvonen, 2017, s. 6)

Näennäistehoa voidaan kutsua myös kompleksiseksi tehoksi, koska se koostuu kahdesta osasta: reaali-osasta, joka edustaa todellista tehoa, ja imaginaarista osasta, joka edustaa loistehoa. Nämä kaksi osaa yhdistyvät muodostaen kompleksiluvun, joka lopulta edustaa näennäistehoa. (Silvonen, 2017, s. 6)

Jos jännite ja virta ovat samassa vaiheessa, näennäisteho S on yhtä suuri kuin pätöteho P . Tämä tapahtuu, kun kuorma on resistiivinen eikä sisällä reaktiivisia komponentteja, kuten käämejä tai kondensaattoreita. Kun jännite ja virta ovat samassa vaiheessa, loisteho Q on nolla, näennäisteho S ja pätöteho P ovat samat. Tämä tarkoittaa, että koko näennäisteho muunnetaan hyödylliseksi tehoksi, joka suorittaa todellista työtä. (Silvonen, 2017, s. 8)

Pätöteho P on sähkötehon osa, joka suorittaa todellista hyödyllistä työtä sähköjärjestelmässä. Se edustaa tehon osuutta, joka muunnetaan hyödylliseksi energiaksi. Pätöteho P mitataan watteina W ja se riippuu sekä jännitteestä että virrasta. Pätöteho voidaan laskea seuraavien kaavaien mukaan. (Silvonen, 2017, s. 7)

Kaava 4. Pätötehon ensimmäinen laskentakaava.

$$P = |UI| \cos \varphi$$

Missä U on jännite ja I on virta. (Silvonen, 2017, s. 7)

Kaava 5. Pätötehon toinen laskentakaava.

$$P = |S| \cos \varphi$$

Kaava 6. Pätötehon kolmas laskentakaava.

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

Loisteho Q on yksi sähköjärjestelmän tehotyypeistä. Sitä mitataan voltiampeereina reaktiivisena tehona VAR , ja se ei tuota hyödyllistä tehoa. Sen sijaan loisteho liittyy sähköjärjestelmän toimintaan, kuten magneettikentän muodostamiseen induktiivisissa kuormissa tai sähkökentän varastointiin kapasitiivisissa kuormissa. Loisteho syntyy, kun sähköenergia vaihtelee edestakaisin piirissä, kuten vaihtovirrassa tai vaihtosähköverkossa. Tämä johtuu reaktiivisista elementeistä, kuten induktansseista L ja kapasitansseista C , jotka varastoivat ja vapauttavat energiaa syklin aikana. Kun vaihtovirta kulkee induktiivisen tai kapasitiivisen kuorman läpi, osa energiasta varastoituu magneettikenttiin tai sähkökenttiin ja palautuu takaisin piiriin. Tämä energian heiluminen edestakaisin piirissä aiheuttaa loistehoa, joka ei suoraan suorita hyödyllistä työtä, vaan kuormittaa sähköverkkoa ja voi aiheuttaa tehon menetystä. Loistehoa ei voida hyödyntää käyttökelpoiseksi energiaksi. Jos loisteho voitaisiin hyödyntää, se olisi pätötehoa. Päinvastoin loisteho on usein haitallista. Jos jännite

ja pätöteho pidetään vakiona, loistehon suurentaminen johtaa piirissä kulkevan virran suurentumiseen, mikä puolestaan kasvattaa energian siirtohäviöitä. Loisteho voidaan laskea seuraavien kaavain mukaan. (Silvonen, 2017, s. 8)

Kaava 7. Loistehon ensimmäinen laskentakaava.

$$Q = |UI| \sin \varphi$$

Kaava 8. Loistehon toinen laskentakaava.

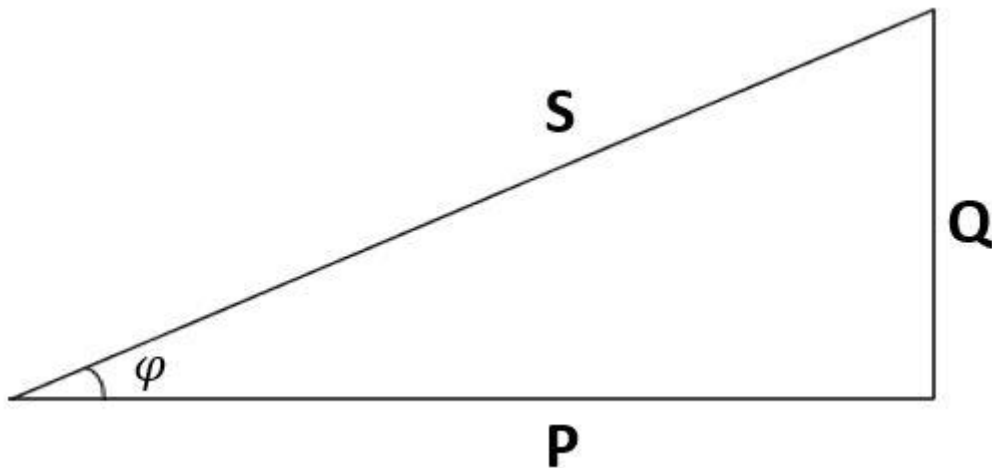
$$Q = |S| \sin \varphi$$

Kaava 9. Loistehon kolmas laskentakaava.

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

Tehokolmio, kuten kuvassa 4, esittää suorakulmaista kolmiota, joka havainnollistaa pätötehon, loistehon ja näennäistehon välisen suhteen. Pätöteho P sijoitetaan tehokolmion vaakasuoralle sivulle, loisteho Q pystysuoralle sivulle ja näennäisteho S muodostaa tehokolmion hypotenuusan. (José, 2013, s. 7)

Kuva 4. Tehokolmio.



Tehokolmio on hyödyllinen työkalu sähkövoiman elementtien analysoinnissa ja suunnittelussa. Sen avulla voidaan saada kattava käsitys tehon eri komponenttien välisistä suhteista ja siten optimoida sähköjärjestelmän tehokkuutta ja energiankulutusta. Tehokolmion avulla voidaan ymmärtää pätötehon, loistehon ja näennäistehon keskinäisiä riippuvuuksia, mikä puolestaan mahdollistaa tehokkaiden ratkaisujen löytämisen sähköjärjestelmän suunnittelussa ja toiminnan arvioinnissa.

3.2 Tehokertoimen käsite ja laskentamenetelmät

Sähköjärjestelmän tehokerroin on suhdeluku, joka kuvaa kuorman ottaman tehon suhdetta virtapiirissä kulkevaan näennäistehoon. Tehokerroin mitataan välillä 0–1, ja se luokitellaan yleensä joko johtavaksi (leading) tai viivästyneeksi (lagging) riippuen virran aaltomuodon sijainnista jännitteeseen nähden. Tehokerroin, joka on pienempi kuin yksi, osoittaa, että jännite ja virta eivät ole samassa vaiheessa. Kuorma, jolla on alhainen tehokerroin, vaatii enemmän virtaa verrattuna kuormaan, jolla on korkea tehokerroin. Suuremmat virrat lisäävät jakelujärjestelmän energiahäviöitä, mikä johtaa korkeampiin kustannuksiin. (Schneider Electric, 2023)

Tehokerroin lasketaan seuraavan kaavan mukaan

Kaava 10. Tehokerroin laskentakaava.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

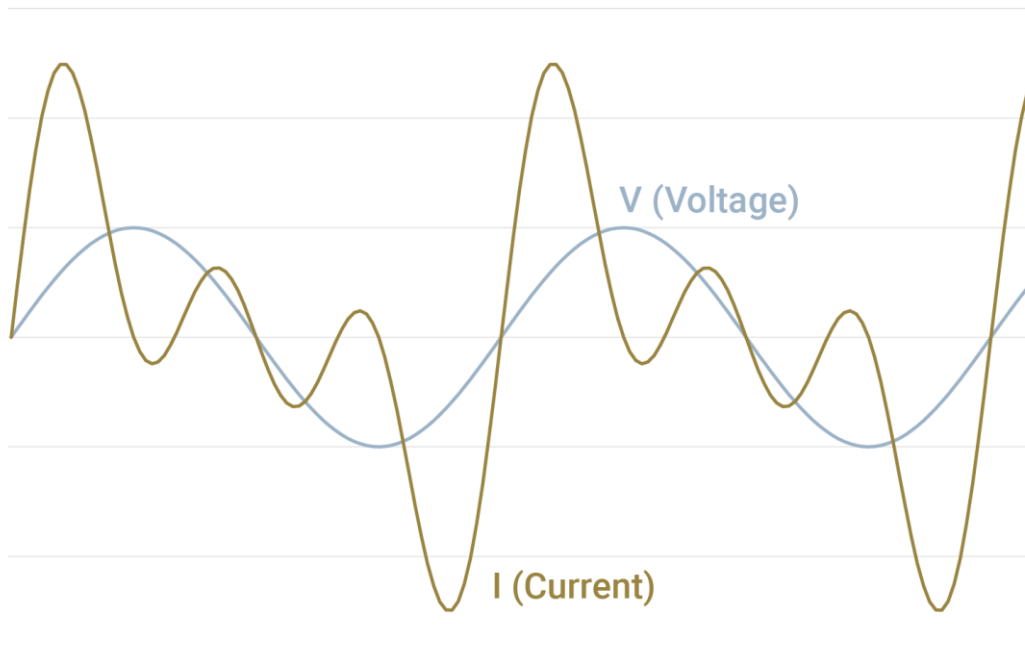
On tärkeää ymmärtää tehokertoimen PF ja $\cos \varphi$ välinen suhde sekä selvittää, ovatko ne yhtä suuret. Tämä kysymys perustuu kaavaan 10. On huomattava, että tämä kaava pätee vain siniaaltojärjestelmille, ja useissa tapauksissa virta ei ole sinimuotoinen. Kuten tiedetään kulma φ edustaa vaihesiirtoa virta-aallon ja jänniteaallon välillä, jos olettaen että molemmat aallot ovat sinimuotoisia. Kuvasta 5 voidaan havaita, että jännite seuraa sinimuotoista kaavaa, kun taas virta ei ole sinimuotoinen. Kaavan 11 perusteella havaitaan, että koska jännite on sinimuotoinen, U_v arvo on nolla. Tämä ei kuitenkaan päde virralle, koska virta ei noudata sinimuotoista kaavaa. (Industry Support Siemens, 2013)

Kaava 11. Pätötehon laskentakaava harmoniselle jännitteelle ja virralle.

$$P = \sum U_v I_v \cos \varphi_v$$

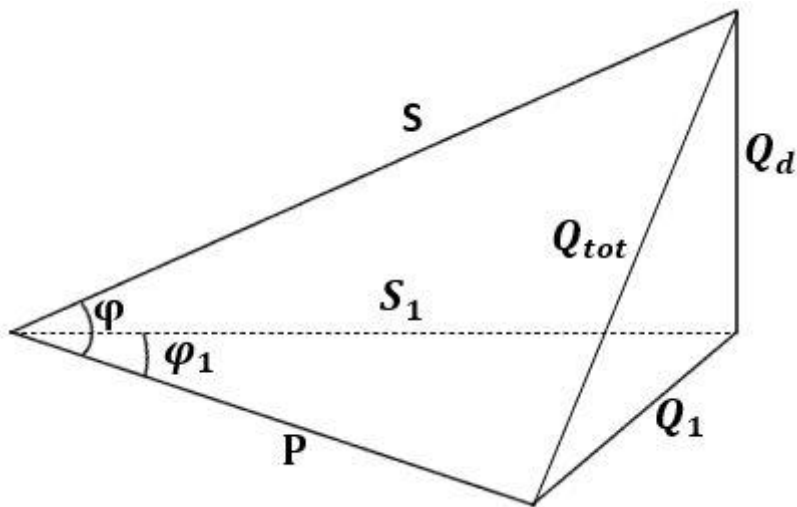
Missä v on harmoniset, U_v on U RMS arvo v .th harmoniselle ja I_v I RMS arvo v .th harmoniselle

Kuva 5. Sinimuotoinen jännite ja vääristynyt virta, joka ei ole sinimuotoinen (ETAP, n.d.).



Tästä voidaan päätellä, että pätöteho ei ole yhtä suuri kuin näennäisteho. Loisteho Q_1 on yhtä suuri kuin nolla, koska jännitteen ja virran välillä ei ole vaihe-eroa. Tehokerroin ei myöskään ole yhtä suuri kuin kosini. Tehokolmio koostuu yleensä vain kolmesta komponentista, mutta virran aallon vääristymisen takia havaitsetaan, että voimakolmio laajenee kolmiulotteiseen muotoon kuvan 6 mukaisesti. (Industry Support Siemens, 2013)

Kuva 6.3-3-ulotteinen monitahoinen tehokolmio (Industry Support Siemens, 2013).



Kuvasta 6 saadaan uuden kaavan, joka poikkeaa kaavasta 1.

Kaava 12. Näennäistehon laskentakaava 3-ulotteiselle monitahoiselle tehokolmiojärjestelmälle.

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + Q_d^2$$

Missä Q_1 on perussiirtymä loisteho ja Q_d on Säröjen loisteho. (Industry Support Siemens, 2013)

Kokonaisloisteho voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

Kaava 13. Kokonaisloistehon laskentakaava.

$$Q_{tot}^2 = Q_1^2 + Q_d^2$$

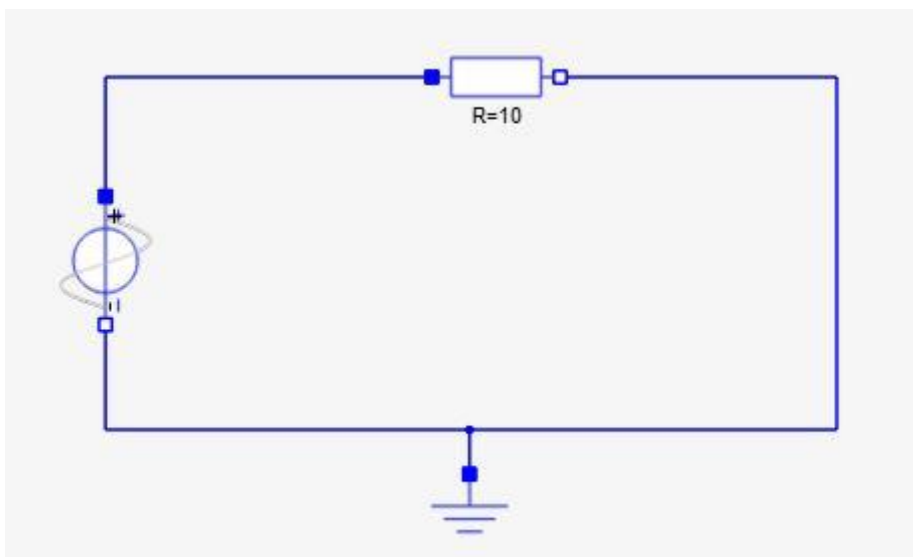
Kuvasta 6 voidaan havaita, että $\cos \varphi$ johtuu pätötehon P suhteesta perusnäennäistehoon S_1 . Tehokerroin $PF = \cos \varphi$ saadaan jakamalla pätöteho P kokonaisnäennäisteholla S .

3.3 Resisttiiviset, induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat

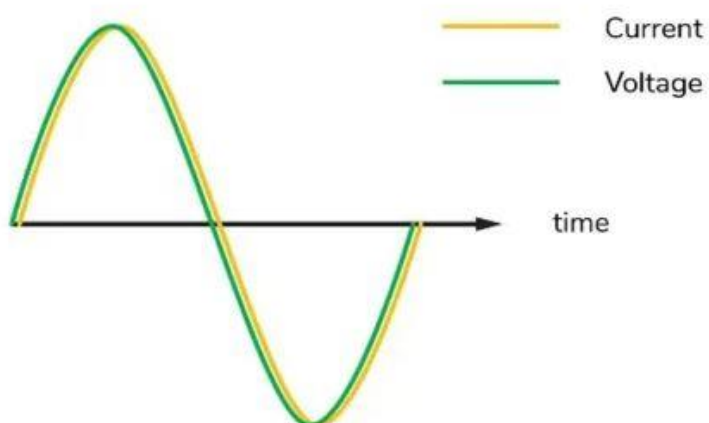
Kuormat teollisuusympäristöissä voivat vaihdella toimialoitain ja niiden luonteesta riippuen. Yleisiä kuormitustyyppjeä ovat resistiiviset, induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat.

Aluksi käsitellään resistanssikuormia, jotka perustuvat pääasiassa resistiiviseen elementtiin kuten kuvassa 7 näkyy. Näihin kuormiin kuuluvat esimerkiksi sähkölämmittimet, lämpöuunit ja vastukset. Resistanssikuormat, kuten kuvassa 8 näkyy, eivät aiheuta vaihekulmaa jännitteen ja virran välillä. Resistanssikuormassa pätöteho P on yhtä suuri kuin näennäisteho S ja loisteho on nolla, mikä tarkoittaa, että tehokerroin on 1. (Schneider Electric, 2024a)

Kuva 7. Resisttiivinen kuorma sähköpiirissä.

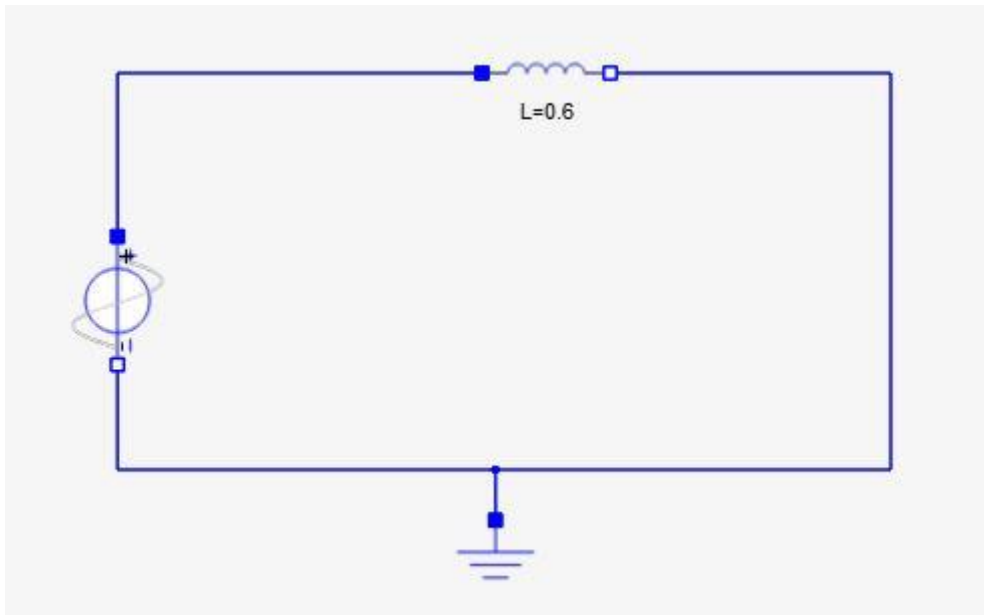


Kuva 8. Resisttiivisen kuorman jännite- ja virta signaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).

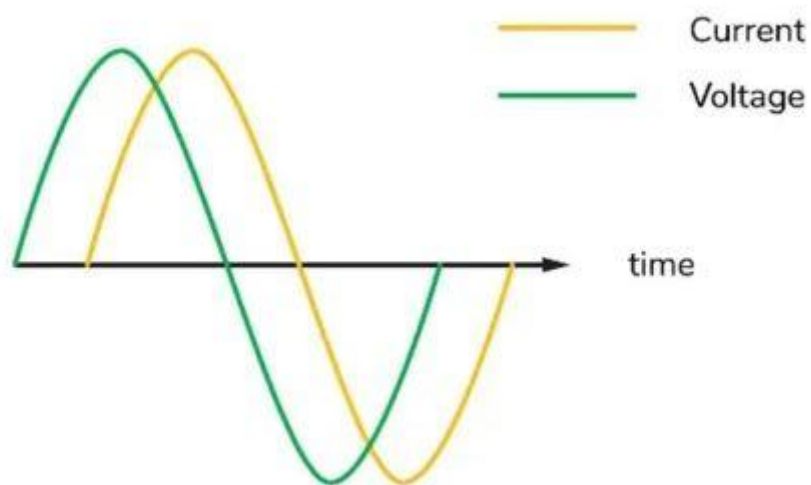


Toiseksi käsitellään induktiivisia kuormia, jotka perustuvat induktoriin, kuten sähkömoottorit tai käämit kuten kuvassa 9 näkyy. Induktiiviset kuormat, kuten kuvassa 10 näkyy, aiheuttavat vaihekulman, jossa virta jää jälkeen jännitteestä. Tämä johtaa loistehon Q muodostumiseen, joka varastoidaan ja vapautetaan magneettikentän muodossa. Induktiivisessa kuormassa päteho P ei ole yhtä suuri kuin näennäisteho S , ja loisteho ei ole nolla, mikä tarkoittaa, että tehokerroin on alle 1. (Schneider Electric, 2024a)

Kuva 9. Induktiivinen kuorma sähköpiirissä.

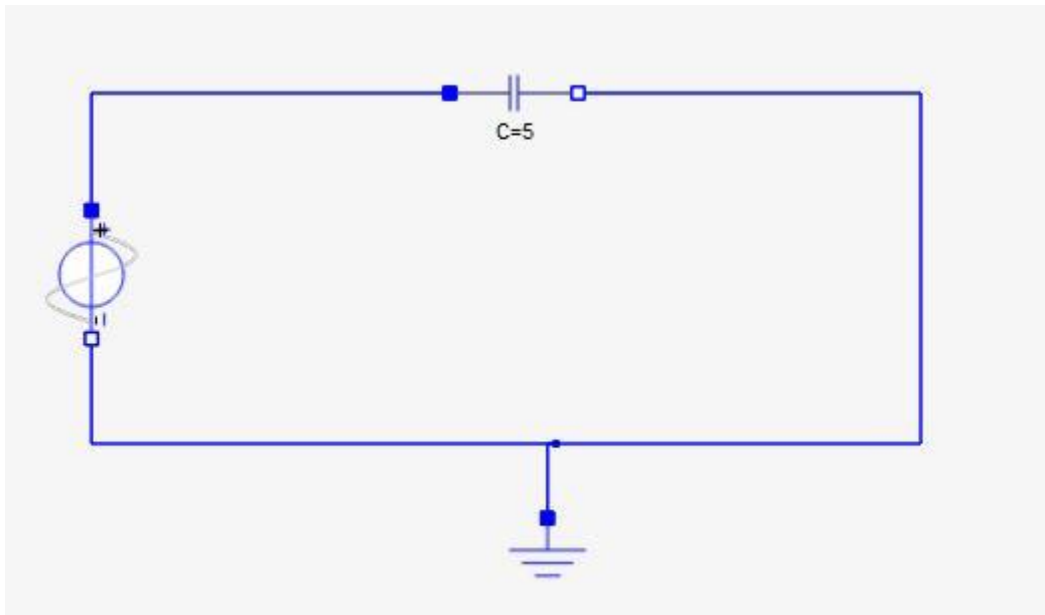


Kuva 10. Induktiivisen kuorman jännite- ja virta signaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).

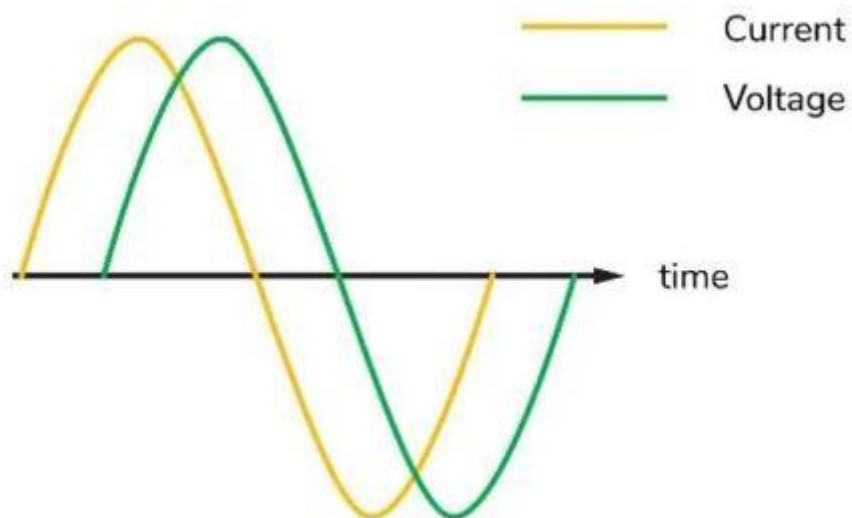


Kolmanneksi käsitellään kapasitiivisia kuormia, kuten kondensaattorit kuvassa 11 näkyy, jotka varastoivat ja vapauttavat energiaa sähkökentän muodossa. Ne aiheuttavat myös vaihekulman, mutta vastakkaiseen suuntaan kuin induktiiviset kuormat. Kuten kuvassa 12 näkyy, kapasitiiviset kuormat aiheuttavat vaihekulman, jossa virta etenee jännitteen edellä. Kapasitiiviset kuormat tuottavat negatiivista loistehoa Q , joka kompensoi osan induktiivisen kuorman aiheuttamasta loistehosta. (Schneider Electric, 2024a)

Kuva 11. Kapasitiivinen kuorma sähköpiirissä.



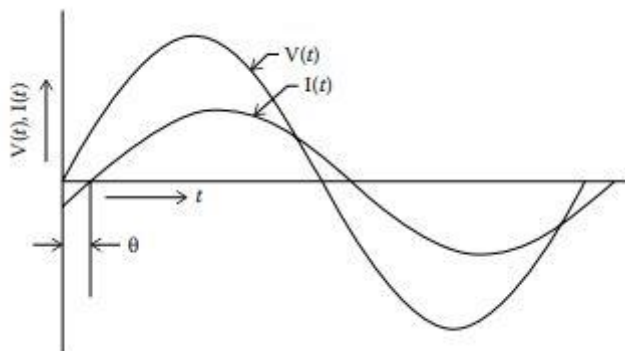
Kuva 12. Kapasitiivisen kuorman jännite- ja virtasignaalit (Avtron Power Solutions, n.d.).



Teollisuusympäristöissä voi esiintyä myös kuormia, jotka sisältävät sekä induktiivisia että kapasitiivisia elementtejä. Tällaiset yhdistetyt kuormat voivat aiheuttaa monimutkaisempia vaihekulmia ja vaikuttaa tehokertoimeen.

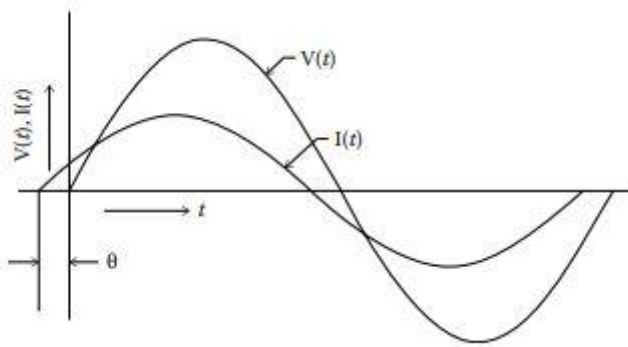
Jos tarkastellaan kuvia 10 ja 12, voidaan huomata, että kuormituksen tyyppi vaikuttaa virran ja jännitteen väliseen vaihe-erokulmaan muodostumiseen, ja se vaikuttaa myös tehokertoimeen. Vaihtovirtajärjestelmässä, kun kuormitusvirta jää jäljessä jännitteestä, sanotaan, että kuormalla on jäljessä oleva tehokerroin, eli tehokerroin on jäljessä, kun virta-aalto seuraa jänniteaaltoa kuten kuvassa 13 näkyy. Jäljessä oleva tehokerroin ilmaisee induktiivista kuormaa, kun taas edellä mainittu tehokerroin kuvaa, että järjestelmävirta saavuttaa maksimiarvonsa jopa 90 astetta jännitteen jälkeen. Kapasitiivisia kuormia käytetään korjaamaan viivästynyttä tehokerrointa. Esimerkkejä kuormista, jotka aiheuttavat viivästynyttä tehokerrointa, ovat induktiomootorit ja muuntajat. (Fleckenstein, 2016, ss. 9–11)

Kuva 13. Jäljessä oleva tehokerroin (Fleckenstein, 2016, s. 10).



Kun sähköjärjestelmän virta on jännitettä edellä kuten kuvassa 14 näkyy, kuormalla sanotaan olevan edistynyt tehokerroin. Edistynyt tehokerroin osoittaa, että kuorma on kapasitiivinen, jolloin järjestelmän virta saavuttaa maksimiarvonsa jopa 90 astetta ennen jännitettä. Edistyneen tehokertoimen korjaamiseksi käytetään induktiivisia kuormia. Yleisiä esimerkkejä, jotka aiheuttavat edistynyttä tehokertoimen, ovat kondensaattorit ja radiopiirit. (Fleckenstein, 2016, ss. 9–11)

Kuva 14. Johtava tehokerroin (Fleckenstein, 2016, s. 9).

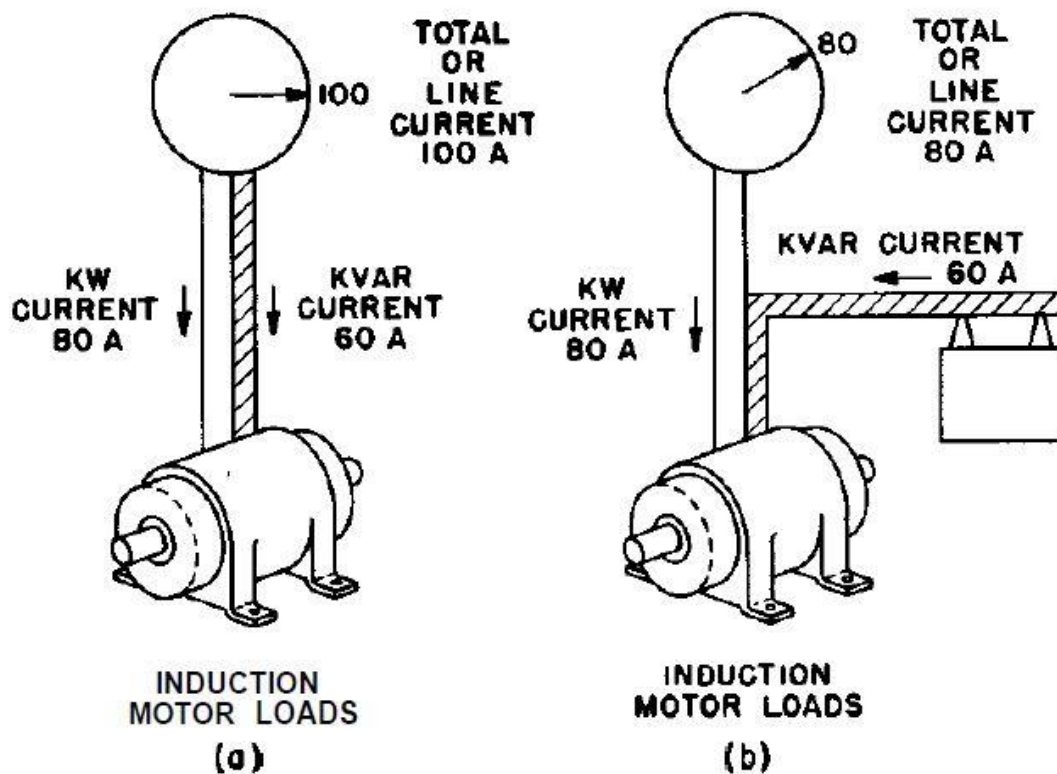


3.4 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensointi on menetelmä, jolla pyritään vähentämään tai poistamaan sähköjärjestelmän loistehoa. Loisteho aiheuttaa tehon menetystä ja heikentää järjestelmän tehokkuutta. Kompensoinnin avulla voidaan parantaa sähköjärjestelmän tehokerrointa ja vähentää energianhukkaa.

Kun loistehovirta pienenee, sähköjärjestelmän kokonaisvirta vähenee, mikä puolestaan parantaa tehokerrointa. Kun loistehovirta on nolla, tämä tarkoittaa, että koko sähköjärjestelmän virta koostuu pelkästä pätötehovirrasta, ja tehokerroin on yhtä suuri kuin 1. Kun tarkastellaan kuvaa 15, havaitsetaan, että kuorma ilman loistehon kompensointilaitetta kuluttaa 100 ampeeria, mutta kun loistehon kompensointilaitte on kytketty, virrankulutus vähenee 80 ampeeriin. Yksi tapa kompensoida loistehoa on liittää kondensaattoreita sähköpiiriin. Tämä parantaa sähkötehon laatua ja nostaa sähköjärjestelmän tehokerrointa. (Beeman, 1955, ss. 446–447)

Kuva 15. Kaaviokuva, joka näyttää kuinka kondensaattorit vähentävät sähköjärjestelmän kokonaisvirtaa (Beeman, 1955, s. 447).



Sähköjärjestelmän loisteho voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

Kaava 14. Loistehon laskentakaava.

$$Q = P \tan \varphi$$

Missä φ on tehokerroin kulma. (Beeman, 1955, s. 449)

Oletetaan, että meillä on sähköjärjestelmä, jossa on alhainen tehokerroin 1, ja halutaan optimoida se uuteen tehokerroinlukuun, jota kutsutaan tehokertoimeksi 2. Voimme laskea tarvittavan kondensaattorin tehokerroinoptimointiin seuraavien kaavojen avulla.

Kaava 15. Loistehon laskentakaava ennen tehokertoimen parantamista.

$$Q_{PF1} = P \tan \varphi_1$$

Missä $PF1$ on alkuperäinen tehokerroin. (Beeman, 1955, s. 449)

Kaava 16. Loistehon laskentakaava tehokertoimen parantamisen jälkeen,

$$Q_{PF2} = P \tan \varphi_2$$

Missä $PF2$ on parannettu tehokerroin. (Beeman, 1955, s. 449)

Voidaan ilmaista molemmat edelliset kaavat seuraavassa muodossa.

Kaava 17. $ckVAr$:n laskentakaava.

$$ckVAr = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Missä $ckvr$ on tehokertoimen parantamiseen tarvittava kondensaattorin arvo. (Beeman, 1955, s. 449)

Laskelmien helpottamiseksi on luotu taulukko, joka sisältää kilowattikertoimen useille tehokertoimen optimointiprosesseille kuten liitteessä 1 ja 2 on esitetty. Voidaan ilmaista kaavan seuraavasti. (Beeman, 1955, s. 449)

Kaava 18. $ckVAr$:n toinen laskentakaava.

$$ckVAr = P kw_{kerroin}$$

Sähköjärjestelmän kulutetun virran arvo voidaan laskea käyttämällä kaavaa 19. Tämän kaavan avulla voidaan seurata loistehokompensoinnin vaikutusta sähköjärjestelmän kulutetun virran arvoon. (ABB, 2010, s. 4)

Kaava 19. Sähköjärjestelmän kulutetun virran laskentakaava.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

3.5 Tehokertoimen vaikutukset energiatehokkuuteen

Tehokertoimen vaikutus energiatehokkuuteen on merkittävä, koska se kuvaa sähkölaitteen tai sähköjärjestelmän tehokkuutta siirtää sähköä kuormaan. Toisin sanoen, tehokerroin ilmaisee pätötehon suhteen näennäistehoon tai kokonaistehoon.

Hyötysuhde on käyttämättömän tai hukkaan menevän energian mittari, joka ilmaistaan prosentteina. Sen arvo lasketaan jakamalla antoteho ottoteholla. Tehokerrointa voidaan pitää sähköjärjestelmän energiatehokkuuden mittarina, mutta erityyppisenä, koska se mittaa sähköjärjestelmän käytetyn energian prosenttiosuutta ja siten heijastaa energiatehokkuutta. (Stull, 2023)

Jos keskitytään taulukkoon 1, huomataan, että kun tehokerroin on yhtä suuri kuin yksi, virran arvon prosentuaalinen kasvu on nolla. Tämä tarkoittaa, että energiatehokkuus on 100 prosenttia, eli kuormituksessa kulkeva virta koostuu pelkästään pätötehovirrasta. Toisaalta, kun tehokerroin on pienempi kuin yksi, havaitaan, että kulutetun virran prosentuaalinen kasvu on havaittavissa. Tämä viittaa siihen, että sähköjärjestelmän energiatehokkuus on heikko, ja kuormituksessa kulkeva virta koostuu loistehovirrasta ja pätötehovirrasta. (Fleckenstein, 2016, s. 301)

Taulukko 1. Tehokerroin ja prosentuaalinen kasvu virrankulutuksessa (Fleckenstein, 2016, s. 302).

Virta VS tehokerroin 1000 kW, 4160 VAC kuormalla		
Tehokerroin	Virta(A)	Virran kasvu(%)
1	138	0
0.95	146	6
0.9	254	11
0.85	163	18
0.8	173	25
0.75	185	34
0.7	198	34
0.65	213	54
0.6	231	67

Kun tehokerroin on lähellä yhtä eli lähellä optimaalista tilannetta, jossa aktiivinen teho vastaa kokonaistehoa, energiatehokkuus on korkea. Tällöin sähköä ei hukkaudu loistehoon tai reaktiiviseen tehoon, vaan se hyödynnetään tehokkaasti kuorman käyttöön.

Toisaalta, jos tehokerroin on alhainen eli lähellä nollaa, se tarkoittaa, että suuri osa syötetystä sähkötehosta käytetään loistehon tuottamiseen eikä hyödynnetä varsinaisessa työssä. Tämä johtaa energian hukkaan ja heikentää järjestelmän energiatehokkuutta. Alhainen tehokerroin voi myös aiheuttaa ylikuormitusta sähköverkossa ja vaikuttaa muiden laitteiden toimintaan.

3.6 Taloudelliset ja ympäristölliset hyödyt tehokertoimen parantamisessa

Tehokertoimen parantaminen tarjoaa sekä taloudellisia että ympäristöllisiä hyötyjä. Tehokkaampi energian siirto ja käyttö johtavat alentuneisiin energiakustannuksiin, mikä hyödyttää taloudellisesti sekä yksittäisiä kuluttajia että yrityksiä. Tehokkaampi energiankäyttö voi myös vähentää tarvetta uusien energialähteiden rakentamiseen ja lisätä energiatoimitusten luotettavuutta.

Sähkönjakeluyritykset perivät lisäkustannuksia energian ottamisesta, kun keskimääräinen kuukausittainen tehokerroin on alle 0.9. Tämä käytäntö voi vaihdella maittain. Teollisuusyritykset joutuvat maksamaan lisäkustannuksia, jos niiden tehokerroin on välillä 0.7–0.9. Sen sijaan, jos teollisuusyrityksen tehokerroin ylittää 0.9, muita kustannuksia ei peritä, koska loistehonkulutus on alhainen verrattuna tilanteeseen, jossa tehokerroin on alle 0.9. Sähkönjakeluyritykset voivat vaatia yrityksiltä, joiden tehokerroin on alhainen, tehokertoimen korjausta. On tärkeää huomata, että kun sähköjärjestelmän tehokerroin on suurempi tai yhtä suuri kuin 0.9, tämä tarkoittaa, että loistehon tarve on pienempi tai yhtä suuri kuin 50 prosenttia sähköjärjestelmän pätötehosta. Kaavan 20 perusteella voidaan havaita, että aina kun sähköjärjestelmän tehokerroin on yhtä suuri kuin yksi, tämä johtaa ostetun energian kustannusten alenemiseen. Tästä voidaan päätellä, että tehokertoimen ja kustannusten välillä on käänteinen suhde, jossa mitä suurempi tehokerroin, sitä pienemmät kustannukset ja päinvastoin. (ABB, 2010, s. 7)

Kaava 20. Loistehon hinnan laskentakaava.

$$Q_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot C$$

Missä Q_{EQ} on loistehon hinta vuodessa euroina, E_Q on vuodessa kulutettu loisteho kvarh, E_P on vuodessa kulutettu pätöteho kWh ja c on loistehon yksikköhinta €/kvarh. (ABB, 2010, s. 7)

Tehokertoimella on merkittävä vaikutus ympäristöön, erityisesti energian ympäristötehokkaampaan käyttöön ja hiilidioksidi- sekä muiden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Tämä auttaa vähentämään ilmastonmuutosta ja parantamaan ilmanlaatua. Energian tehokkaampi siirto ja käyttö voivat myös vähentää tarvetta käyttää luonnonvaroja, kuten fossiilisia polttoaineita, mikä auttaa säilyttämään ekosysteemejä ja luonnon monimuotoisuutta. (Schneider Electric, 2024b)

Tehokerroin tarjoaa monia etuja. Taloudellisesti se johtaa merkittäviin säästöihin energiankulutuksessa ja pienentää sähkölaskuja. Ympäristön kannalta se auttaa vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä, ilmastonmuutosta sekä parantamaan ilmanlaatua ja ympäristön tilaa.

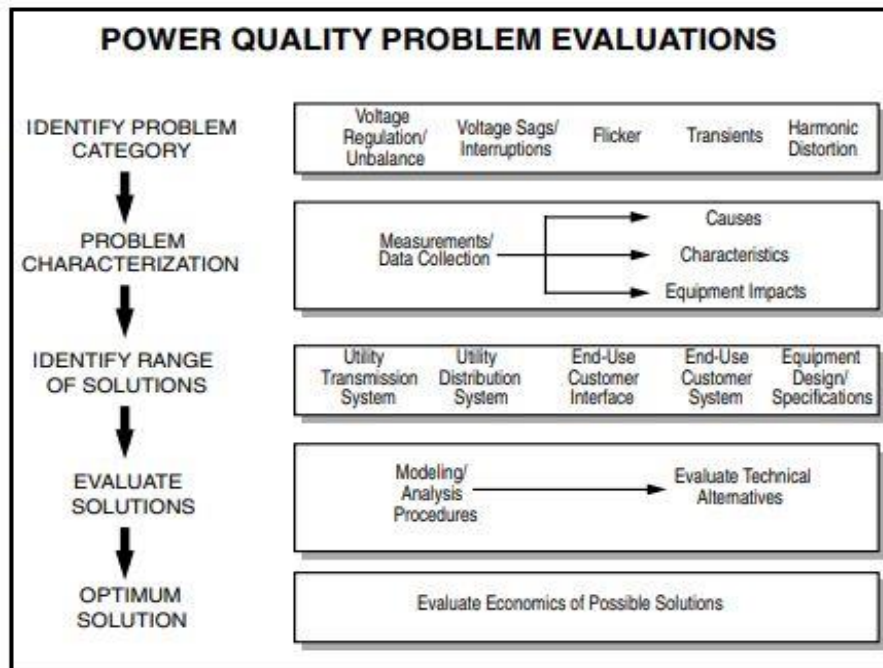
4 Sähköverkon tehokertoimen analysointi

Sähköverkon tehokertoimen analysointi on tärkeä prosessi, jolla pyritään arvioimaan ja parantamaan sähköverkon toiminnallista tehokkuutta. Tehokerroin kuvaa sähkön käytön tehokkuutta ja ilmaisee suhteen aktiivisen (käytetyn) tehon ja kokonaisen (sähköverkkoon syötetyn) tehon välillä.

Tehokertoimen analysointi auttaa tunnistamaan tehottomuuden lähteitä ja mahdollisia parannuskohteita sähköverkossa. Tällaisia kohteita voivat olla esimerkiksi häviöt siirrossa ja jakelussa, tehon laatuun liittyvät ongelmat, ja energiankulutuksen optimointi. Analyysin avulla voidaan selvittää, kuinka hyvin sähköverkko hyödyntää syötetyn sähkön tehon ja miten tehon häviöt voitaisiin minimoida. Tämä voi sisältää esimerkiksi investoinnit uusiin ja tehokkaampiin siirtojärjestelmiin, parannukset jakeluverkon komponentteihin tai energianhallintaratkaisuihin.

Sähkön laatuongelmiin liittyy monenlaisia ilmiöitä, ja niiden ratkaisemiseksi on olemassa erilaisia syitä ja keinoja. Analyysillä on näin ollen suuri merkitys näiden ongelmien tunnistamisessa ja sopivien ratkaisujen valinnassa. Kuvassa 16 esitetään yleisimpiä vaiheita, joita usein tarvitaan sähkönlaatuanalyysissä, sekä keskeiset näkökohdat, jotka on otettava huomioon kussakin vaiheessa. (Dugan ym., 2004, s. 8)

Kuva 16. Sähkön laadun arvioinnin perusvaiheet (Dugan ym., 2004, s. 8).



Kuvan 16 perusteella analyysin tai arvioinnin ensimmäinen vaihe on ongelman luokan tunnistaminen. Tämä vaihe keskittyy pääasiallisen syytekijän tunnistamiseen, kuten virta-aaltojen vääristymiin tai jännitteen epätasapainoon sähköjärjestelmässä. Toisessa vaiheessa ongelmaa luonnehditaan keräämällä tietoa sähköjärjestelmästä ja tunnistamalla teho ongelman vaikutukset laitteistoon sekä arvailemalla mahdollisia syitä. Kolmannessa vaiheessa määritetään ratkaisuvaihtoehdot, jossa tutkitaan erilaisia ratkaisuja sähköjärjestelmän eri osiin. Sitten viidennessä ja kuudennessa vaiheessa nämä ratkaisut arvioidaan ja valitaan optimaalinen ratkaisu ongelmaan.

Sähkötehon analyysiprosessit auttavat havaitsemaan mahdolliset puutteet sähköjärjestelmässä ennen sen käyttöönottoa tai sen jälkeen. Analyysiprosessit auttavat myös tunnistamaan viallisten sähkölaitteiden tai sähkön laadun heikkenemisen syyn sekä määrittämään oikeat toimenpiteet sähköjärjestelmän suorituskyvyn parantamiseksi. On kuitenkin huomioitava, että nykyaikaisten teollisten järjestelmien monimutkaisuus vaikeuttaa analysointi- ja tutkimusprosesseja ja edellyttää aikaa vieviä matemaattisia laskelmia. Teollisten järjestelmien analysointi- ja tutkimusprosesseja on kuitenkin helpotettu käyttämällä TNA-verkkoanalysointia (Transient Network Analyzer), joka tarjoaa tehojärjestelmän pienoismallin ja samalla vähentää tutkimuksen ja analysoinnin haasteita. (IEEE Standards, 1997, s. 7)

4.1 Mittaukset ja datankeruu teollisuusympäristössä

Mittaus- ja tiedonkeruuvaihetta pidetään yhtenä keskeisimmistä vaiheista energian laadun parantamisessa, sillä mittaustiedot mahdollistavat teollisuuden kuormien sähkönkulutuksen kuvaamisen eri ajanjaksoina.

Teollisuusympäristössä tarkkojen ja luotettavien mittausten suorittamiseksi sekä tarvittavan tiedon keräämiseksi on välttämätöntä käyttää luotettavia mittauslaitteita. Fluke 434 on yksi tällainen laite, joka on suunniteltu kolmivaiheisen sähkölaadun mittaamiseen ja analysointiin teollisuusjärjestelmissä.

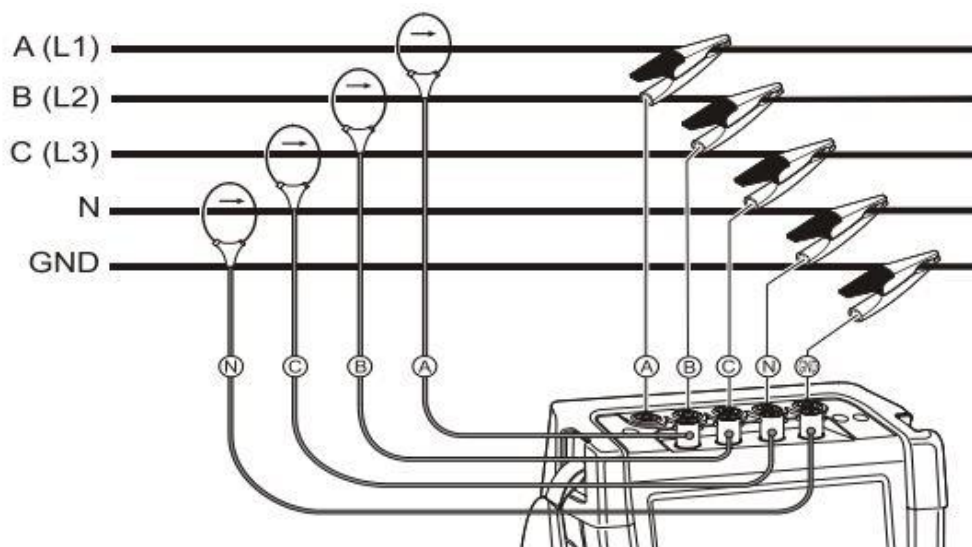
Fluke 434-II sarja kuten näkyy kuvassa 17 tarjoaa monipuolisia mittauksia ja analyysiä, kuten jännitteen, virran, näennäisteho, pätöteho, loisteho, tehokertoimen, taajuuden, harmoniset häiriöt ja muut tärkeät parametrit. Näitä mittauksia voidaan tehdä sekä yksittäisissä vaiheissa että kokonaisuutena kolmivaiheisessa sähköjärjestelmässä. (Fluke, 2012, s. 20)

Kuva 17. Fluke 434-II sähkölaatu ja energia-analysaattori (Fluke, 2024).



Fluke 434-II/435-II/437-II laitteissa kuten näkyy kuvassa 18 on neljä mittauspäättää virran mittaamiseen. Näitä mittapäitä käytetään virran mittaamiseen sähköjärjestelmän kolmessa vaiheessa, lisäksi N-vaiheen kanssa. Lisäksi laitteessa on viisi mittapäätä jännitteiden mittaamiseen. Näitä mittapäitä käytetään jännitteen mittaamiseen kolmessa vaiheessa, N- ja GND-vaiheiden lisäksi. (Fluke, 2012, s. 36)

Kuva 18. Fluken liitäntä 3-vaiheiseen sähköjakelujärjestelmään (Fluke, 2012, s. 36).



Scope- ja Phasor-näytöt ovat hyödyllisiä jänniteliittimien ja virtaliittimien oikean kytkennän tarkistamisessa. Vektorikaaviossa vaihejännitteiden ja -virtojen A (L1), B (L2) ja C (L3) tulisi ilmestyä peräkkäin myötäpäivään suunnattuna, kuten on esitetty Kuvassa 19. Tämä osoittaa, että Fluke-laitte on kytketty oikein sähköjakelujärjestelmään ja mittausprosessi voidaan aloittaa. (Fluke, 2012, s. 37)

Kuva 19. Vektorikaavio oikein kytketylle Fluke-laitteelle (Fluke, 2012, s. 37).



4.2 Analyysimenetelmät tehokertoimen arvioimiseksi

Energian laadun parantamisprosessissa tehokertoimen analysointi on yksi keskeisimpiä vaiheita, ja sen toteuttaminen riippuu valitusta analyysimenetelmästä. Tehon ja tehokertoimen analysointiin on useita tapoja, kuten kuormavirtausanalyysi, harmoninen analyysi, sähkötehoanalyysi erikoistuneilla analyttisillä laitteilla sekä matemaattinen analyysi.

Yksi IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) suosittelemista analyyseistä teollisuuden tehoyrjestelmien analysointiin on kuormavirtaus-analyysi. Kuormavirtaus-analyysillä pyritään määrittämään sähköjärjestelmän jännite, virta, pätöteho, loisteho ja tehokerroin. Tällaiset analyysit ovat erinomainen työkalu sähköjärjestelmän suunnittelussa, niiden avulla voidaan analysoida sähkölaitteiden toimintaa hätätilanteissa, kuten kuormitushäiriöissä tai heikossa jännitteessä. Tämän tyyppinen analyysi on hyödyllinen myös kondensaattorien koon ja sijainnin määrittämisessä tehokertoimen parantamiseksi. Kuormavirtaus-analyysillä voidaan luotettavasti määrittää sähköjärjestelmän jännite olosuhteissa, joissa kuormat liitetään tai irrotetaan äkillisesti sähköverkosta. Tällaisessa analyysissä käytetään erityisiä tietokoneohjelmia, sillä analyysin matemaattiset laskelmat ovat vaikeita ja monimutkaisia. (IEEE Standards, 1997, ss. 7–8)

Harmoninen analyysi keskittyy sähköverkon harmonisten vääristymien tutkimiseen, jotka voivat aiheuttaa jännitevääristymiä ja vaikuttaa tehokertoimeen. Analyysin avulla voidaan tunnistaa ja arvioida harmonisten häiriöiden vaikutusta sähköjärjestelmään, mikä auttaa havaitsemaan mahdolliset ongelmat teollisuusympäristössä. Tämä analyysi mahdollisesti paljastaa esiintyvät harmoniset jännitteet ja virrat. Yliaallot voidaan havaita erilaisten ilmiöiden perusteella. Teollisuusympäristössä esiintyviä ensisijaisia ilmiöitä voivat olla esimerkiksi ohjaus- tai tietokonejärjestelmien toimintahäiriöt, pyörievien koneiden ylikuumeneminen sekä kondensaattoreiden ylikuumeneminen tai vika. Yliaallot aiheuttavat usein virheen tehomittarissa. Mittari voi rekisteröidä korkeita lukemia harmonisilla taajuuksilla riippuen läsnä olevista harmonisista komponenteista ja mittarin vasteesta näihin harmonisiin ilmiöihin. (IEEE Standards, 1997, ss. 9–10)

Laiteanalyysissä teho ja tehokerroin analysoidaan suoraan tehoanalyysilaitteilla, kuten Dewesoftin mittarilla. Dewesoftin tehoanalyysiaattorit tarjoavat kattavia ominaisuuksia tehoanalyysiin, kuten jännitteen, virran, tehon, tehokertoimen, pätötehon, loistehon ja muiden parametrien mittauksen ja seurannan. Kuvassa 20 näkyy Dewesoftin tehoanalyysiaattorit. Ne tukevat erilaisia sähköverkkojen muotoja, kuten yksivaiheisia, kolmivaiheisia tai monivaiheisia järjestelmiä. (Grant Maloy, 2023)

Kuva 20. Dewesoft R8DB tehoanalyysiaattori (Grant Maloy, 2023).



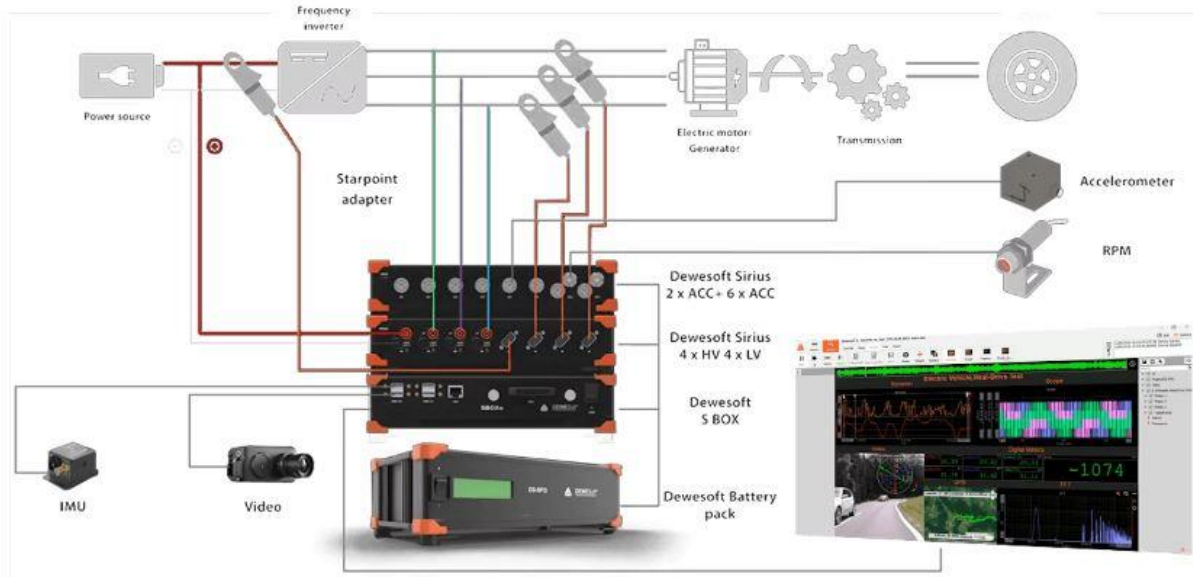
Dewesoft käyttää FFT (Fast Fourier Transform) -algoritmia jaksollisen ajan (taajuuden) määrittämiseen. Tämän ennalta määrätyn ajanjakson perusteella voidaan suorittaa jännitteen ja virran FFT-analyysi määritetylle määrälle jaksoja (yleensä 10, jos järjestelmän perustaajuus on 50 Hz) ja valittavalla näytteenottotaajuudella. FFT-analyysi, kuten kuvassa 21 näkyy, tarjoaa amplitudin jännitteelle, virralle ja cos phi -arvolle jokaiselle harmoniselle komponentille. (Grant Maloy, 2023)

Kuva 21. Dewesoftin tehoanalyysointimoduuli ja FFT-analysointtori (Grant Maloy, 2023).



Kuvassa 22 esitetään, miten Dewesoft-mittalaitteet kytketään mittausten ja analyysien suorittamiseen teollisuusympäristössä. Dewesoft-mittalaitteet voivat vastaanottaa lukemia useilta antureilta, kuten nopeus- ja vääntömomentiantureilta ja muilta vastaavilta antureilta. (Grant Maloy, 2023)

Kuva 22. Dewesoftin tehoanalysaattorin kytkentäkaavio sähkömoottoreiden testaamiseen (Grant Maloy, 2023).



Tehokerroinanalyyssissä matemaattinen analyysi perustuu pätötehon, loistehon, näennäistehon ja virran arvojen laskemiseen tehokertoimen määrittämiseksi. Tämä analyysi on samankaltainen kuin kuormavirtaus-analyysi, mutta eroaa siinä, että kuormavirtaus-analyysissä laskelmien suorittamiseen käytetään erikoistietokoneita. Tässä raportissa sen sijaan käytetään Exceliä laskelmien tekemiseen. matemaattinen analyysin avulla voidaan arvioida sähköjärjestelmän tehokkuutta ja energiankäyttöä. Se mahdollistaa tehokertoimen optimoinnin ja havaitsee mahdolliset energiahäviöt. matemaattiset analyysin tulokset voivat auttaa parantamaan sähköverkon tehokkuutta ja suorituskykyä.

4.3 Tietojenkäsittely ja tulosten tulkinta

Tehokerroin tietojenkäsittelyssä ja tulosten tulkinassa viittaa sähköjärjestelmän tehokkuuden arviointiin ja sen tulosten analysointiin. Tehokerroin ilmaisee suhteen pätötehon ja näennäistehon välillä ja kuvaa sähkön käytön tehokkuutta. Tulosten tulkinassa tehokerroin tarjoaa tietoa sähkötehonkulutuksesta, tehohäviöistä ja tehokkuudesta sähköjärjestelmässä. Korkea tehokerroin osoittaa, että sähkölaitteet toimivat tehokkaasti ja hyödyntävät sähköä optimaalisesti. Alhainen tehokerroin puolestaan voi viitata tehohäviöihin, heikkoon energiankäyttöön tai tehottoimaan laitteiden käyttöön. Tehokerroinanalyyssin avulla voidaan tunnistaa tehonkulutuksen ongelmia, optimoida energiankäyttöä ja suunnitella sähköjärjestelmää tehokkaammaksi. Tulosten tulkinta perustuu tehokerroinarvojen vertailuun

standardien, esimerkiksi IEEE Std 1459, tai suositusten kanssa, ja tarvittaessa ryhdytään toimenpiteisiin tehokkuuden ja tehokertoimen parantamiseksi.

IEEE-standardi 1459 on nimeltään "IEEE Standard for Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions". Tämä standardi määrittelee sähkötehon mittaamiseen liittyviä termejä ja käsitteitä erilaisissa olosuhteissa, kuten sinimuotoisissa, ei-sinimuotoisissa, tasapainoisissa tai epätasapainoisissa sähköjärjestelmissä. Standardi 1459 tarjoaa yhtenäiset määritelmät ja terminologian eri tehon laadun parametreille ja mittaustekniikoille. Se auttaa sähkötehon mittaamiseen liittyvien tietojen yhtenäistämässä ja vertailukelpoisuudessa eri laitteiden, järjestelmien ja tutkimusten välillä. Standardi sisältää määritelmiä, kaavoja ja menetelmiä tehon, virran, jännitteen, taajuuden, harmonisten komponenttien ja muiden sähkötehon mittaamiseen liittyvien suureiden laskemiseksi ja arvioimiseksi. Se tarjoaa myös ohjeita sähkötehon laadun analysointiin. (IEEE Std 1459, 2010, s. 1)

5 Sähköverkon tehokertoimen parantaminen

Useat sähkölaitteet, kuten yksivaiheiset ja kolmivaiheiset moottorit, vaativat sekä pätötehoa että loistehoa toimiakseen. Pätöteho muunnetaan hyödylliseksi mekaaniseksi voimaksi, kun taas loisteho tarvitaan ylläpitämään moottorin magneettikenttiä. Tämä johtaa loistehon siirtoon vuorovaikutteisesti sekä generaattorin että kuorman välillä, kuten kuvassa 23 näkyy. (Beama, n.d., s. 7)

Kuva 23. Pätötehon ja loistehon tilanne ennen tehokertoimen parantamista.

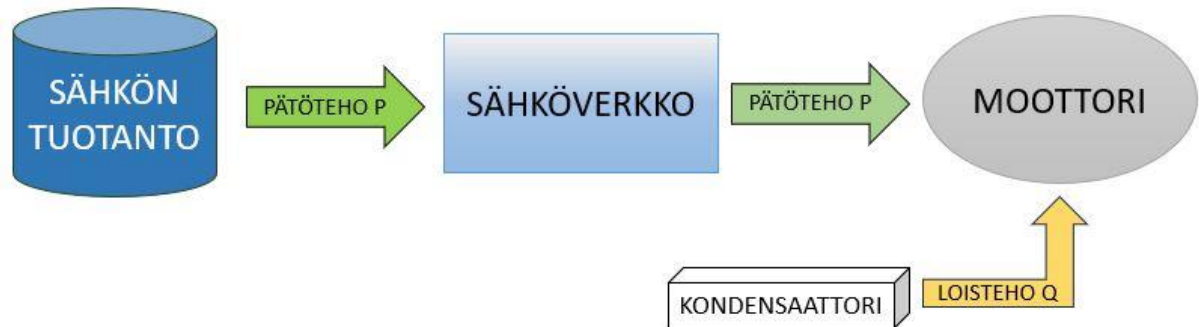


Tämä aiheuttaa haasteita sähkötehon laadussa ja sähköjärjestelmän tehokertoimen heikkenemisessä. Tästä syystä tarvitaan toimenpiteitä tehokertoimen parantamiseksi, jotta voidaan ratkaista sähköverkon sähkönlaatuongelmat.

Sähköverkon tehokertoimen parantaminen on tärkeä tavoite energiatehokkuuden edistämiseksi ja sähköjärjestelmän optimoinnissa. Tehokertoimen parantamisella on useita etuja, kuten energiankulutuksen vähentäminen, tehohäviöiden pienentäminen, sähkökustannusten alentaminen, laitteiden suorituskyvyn parantaminen ja ympäristövaikutusten vähentäminen. Tehokertoimen parantamiseen on kaksi yleisintä tapaa: kondensaattorit ja synkroniset moottorit. Kondensaattorimenetelmä on yleensä taloudellisesti ja käytännöllisesti edullisempi verrattuna synkronimoottoreihin. Kumpikin näistä menetelmistä soveltuu erilaisiin käyttötarpeisiin. (Beeman, 1955, ss. 439–440)

Kondensaattorit kompensoivat loistehoa, joka tarvitaan moottorien magneettikentän ylläpitämiseen. Tämä auttaa estämään loistehon siirtymistä kuorman ja sähköntuotannon välillä molempiin suuntiin kuten näkyy kuvassa 24. Kondensaattorit myös parantavat tehokerrointa ja sähkölaatua. (Beama, n.d., s. 9)

Kuva 24. Pätötehon ja loistehon tilanne tehokertoimen parantamisen jälkeen.

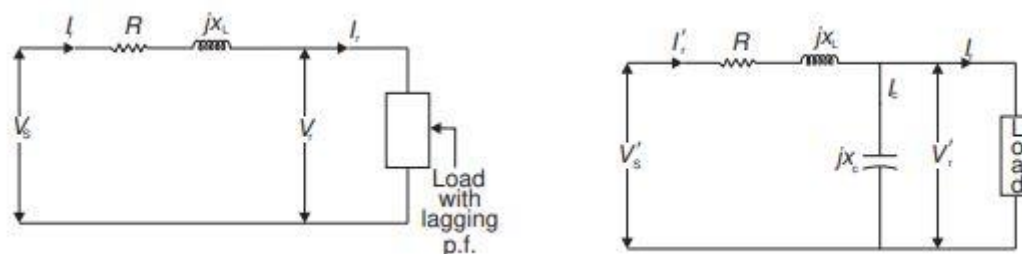


5.1 Tehokertoimen parantamiseen käytetyt menetelmät

Tehokertoimen parantamiseksi käytetään erilaisia menetelmiä, joiden tavoitteena on vähentää loistehoa ja parantaa sähköjärjestelmien kokonaishyötysuhdetta. Yksi yleisesti käytetyistä tehokertoimen parantamisen menetelmistä on kondensaattoreiden tai synkronisten moottoreiden käyttö, kuten aiemmin mainittiin. (Beeman, 1955, s. 440)

Yksi tehokkaimmista menetelmistä parantaa tehokerrointa on asentaa kondensaattoreita. Nämä kondensaattorit toimivat loistehon lähteinä ja auttavat tasapainottamaan induktiivisten kuormien aiheuttamaa loistehoa. Kondensaattorit kytketään rinnan induktiivisten kuormien kanssa kuten näkyy kuvassa 25, mikä merkittävästi parantaa tehokerrointa. (Fleckenstein, 2016, s. 303)

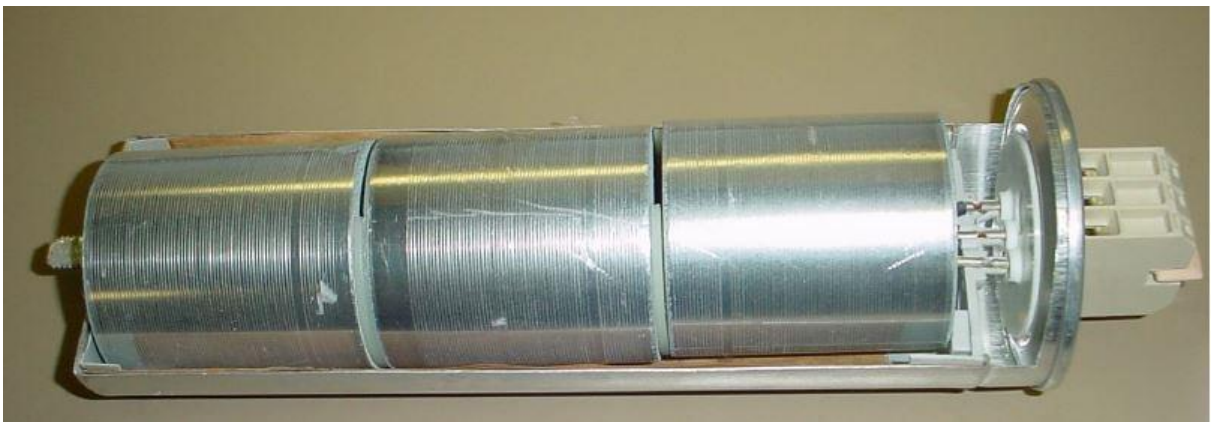
Kuva 25. Kondensaattorien sijainti teollisuuden sähköjärjestelmissä (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 364).



Kondensaattori, kuten kuvassa 26 näkyy, on sähköinen komponentti, joka pystyy varastoimaan sähkövarauksen. Kondensaattoreita käytetään sekä tasavirta- että

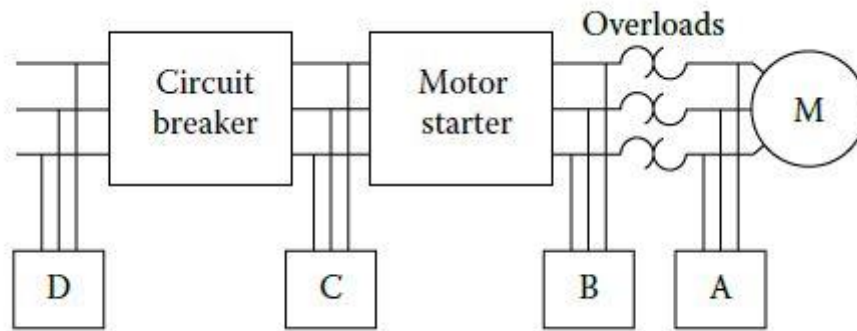
vaihtovirtapiireissä. Kaikissa kondensaattoreissa on ulkoiset johtimet tai liittimet, jotka yhdistyvät kondensaattorin sisällä oleviin johtimiin. Kondensaattorin kuoren sisällä ohuet kerrokset johtavaa metallia ovat yhteydessä liittimiin ja erotettu toisistaan ei-johtavalla eristysmateriaalilla. Eristysmateriaali toimii eristeenä kahden vastakkaisen johtavan kerroksen välillä. Mitä pienempi etäisyys johtimien välillä on, sitä suurempi on kapasitanssin arvo. Samoin mitä suurempi johtimien pinta-ala on, sitä suurempi on kapasitanssin arvo. Tehokertoimen korjaamiseen käytettävissä kondensaattoreissa eristysmateriaali koostuu yleensä ohuista polyesteri- tai polypropeenilevyistä. Johtavat metallikerrokset ja eristysmateriaali rullataan yleensä putken muotoon. Kokoonpanot sijoitetaan usein metallisen sylinterin tai metallisen laatikon sisään. Jotkut suunnittelut sisältävät sulakkeita kuoren sisällä. Turvallisuussyistä kolmivaihejärjestelmissä käytettävissä kondensaattorikokoonpanoissa yleensä on vastuksia, jotka purkavat sähkövarauksen kondensaattoreista muutamassa minuutissa virran katkaisemisen jälkeen. Kapasitanssin arvo määritellään kirjaimella "C". C:n arvo on suhde sähkövarauksen Q ja potentiaalın V välillä. Q:n yksikkö on coulombit ja kapasitanssin yksikkö on faradit F. (Fleckenstein, 2016, s. 303)

Kuva 26. Kondensaattorin sisäosaa (Orman, 2012, s. 12).



Kondensaattorien sijoittamisella moottorin läheisyyteen on useita vaihtoehtoja, kuten kuvassa 27 on esitetty. Kukin mahdollinen sijainti on nimetty sijainniksi A, B, C ja D. Jokaisella sijainnilla on omat hyötynsä.

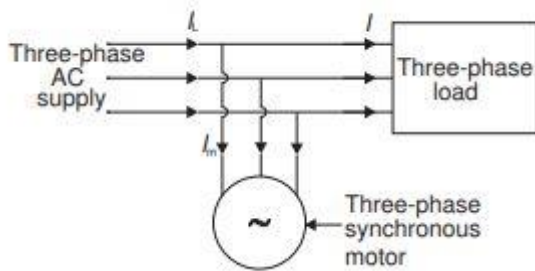
Kuva 27. Kondensaattorien sijainnit (Fleckenstein, 2016, s. 304).



Sijainti A on erityisen hyödyllinen asennuksessa, jossa moottorille on pitkät johtimet. Kondensaattoripankin asentaminen lähelle moottoria vähentäisi virtoja johtimissa ja aiheuttaisi vähemmän jännitehäviötä moottorin liitäntäjohtimiin. Ylikuormitukset on mitoitettava ottaen huomioon alhaisemmat linjavirrat. Sijainti B mahdollistaa ylikuormitusten mitoittamisen normaalin menettelyn mukaisesti, koska kondensaattorivirrat eivät kulje ylikuormitusten läpi. Sijainti C estää mahdollisuuden liian korkeaan jännitteeseen, joka voisi syntyä moottorin pysäyttämisen ja sen jälkeisen nopean käynnistämisen seurauksena. Tämä on parempi sijainti moottoreille, joita käynnistetään usein, moninopeuksisille moottoreille ja suunnanvaihtosovelluksille. Sijainti D mahdollistaa piirin katkaisijan, moottorin käynnistimen ja ylikuormitusten mitoittamisen perinteisen menettelyn mukaisesti. Sijainti voi myös tarjota tehokerroinparannusta muille moottoreille, mikä olisi kustannustehokkaampi tapa korjata alhainen tehokerroin. Sijainnissa D kondensaattoreille tarvitaan oma katkaisukytkin ja omat ylikuormitussuojat. (Fleckenstein, 2016, ss. 304–305)

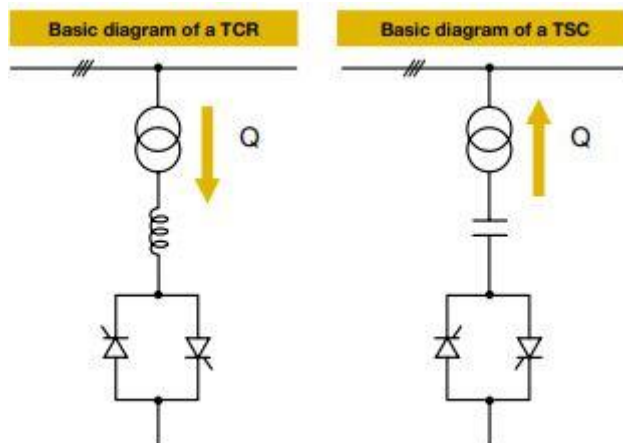
Toinen tehokkaimmista menetelmistä tehokerroinparannukseen on asentaa synkroniset moottorit, jotka pystyvät säätämään tehokerrointa tuottamalla tai imevällä loistehoa tarpeen mukaan. Ne ovat erityisen hyödyllisiä suurissa teollisuuden ja sähköntuotannon sovelluksissa, joissa tehokerrointa on jatkuvasti tarpeen säätää. Synkronimoottorit kuten kuvassa 28 näkyy voivat toimia myös kvar-generaattoreina, tuottaen kilovareja samalla tavalla kuin perinteinen generaattori. Niiden kyky tuottaa kilovareja riippuu kiihdytyksestä (excitation) ja synkronimoottorien tapauksessa myös kuormituksesta. Alakiihdytettynä (underexcited) ne eivät tuota tarpeeksi kilovareja omaan tarpeeseensa ja joutuvat siksi ottamaan lisäkilovareja järjestelmästä. Ylikiihdytettynä (overexcited) ne voivat tarjota kaikki omat kilovaritarpeensa ja lisäksi tuottaa kilovareja järjestelmään. Näin ollen niitä voidaan pitää kilovarigeneraattoreina. (Beeman, 1955, s. 452)

Kuva 28. Synkroniset moottorit (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 367).



Voimaelektroniikan merkittävä kehitys kannustaa korvaamaan synkroniset moottorit staattisilla järjestelmillä loistehon säätöön, kuten esimerkiksi TSC (thyristor switched capacitors) ja TCR (thyristor controlled reactors). Nämä ovat elektronisia loistehon kompensointijärjestelmien versioita, jotka perustuvat sähkömekaanisiin komponentteihin. Kuitenkin näissä järjestelmissä eri kondensaattoreiden kytkentä ei tapahdu kontaktoreiden avulla avautumalla ja sulkeutumalla, vaan ohjauksen avulla, jota suorittavat vastakkain asetetut tyristoriparit. Kuten kuvassa 29 näkyy TSC mahdollistaa vaiheittaisen ohjauksen kondensaattoriryhmien toimittamasta loistehosta, kun taas TCR mahdollistaa jatkuvan ohjauksen induktorin vetämästä loistehosta. Yhdistämällä TSC:n ja TCR:n voidaan saavuttaa jatkuva säätö toimitetun/vetämän loistehon suhteen. (ABB, 2010, s. 8)

Kuva 29. TSC:n ja TCR:n toiminta (ABB, 2010, s. 8).

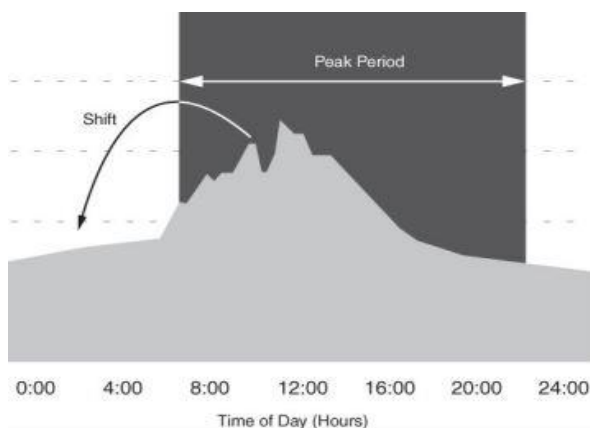


5.2 Kuormanhallinta ja optimointi

Sähkökuormanhallinta ja optimointi ovat erityisen tärkeitä teollisuusympäristössä, joissa sähkön käyttö voi olla suurta ja monimuotoista. Tässä ympäristössä on usein tarve optimoida sähkönkulutusta, tehostaa energian käyttöä ja hallita kuormaa parhaalla mahdollisella tavalla. Tämä voi johtaa kustannussäästöihin, energiatehokkuuden parantamiseen ja parempaan sähköjärjestelmän luotettavuuteen.

Kuormanhallinta viittaa olemassa oleviin järjestelmiin, jotka sopeutuvat sähkön tarjontaan ja kysyntään. Sähköenergian kysyntä vaihtelee, on aikoja tai jaksoja, jolloin kysyntä on suurempi. Sähkövoimayhtiön on pystyttävä tuottamaan tarvittava teho näinä aikoina, joten suurten sähkökuormien siirtämistä suurten kysyntäaikojen ulkopuolelle alhaisen kysynnän aikoihin kannustetaan kuten näkyy kuvassa 24. Näitä menetelmiä, joilla tätä tavoitellaan, kutsutaan kuormanhallinnaksi. (Malone, 2010)

Kuva 30 .Kuormahuippujen siirto (DEMOUSELLE ym., 2009, s. 6).



Sähkökuormituksen hallinnalla teollisuusympäristössä on useita etuja sähköenergian tuottajille, jakelijoille ja teollisuusasiakkaille. Ensimmäinen näistä eduista on, että sähkökuormituksen hallinta poistaa tarpeen lisätä sähköenergian tuotantoa tai kasvattaa muuntajien ja kaapeleiden kokoa. Kuormanohjaus tehostuu, koska suurta kuormitusta voidaan ohjata ruuhka-aikoina. Lisäksi sähkökuormituksen hallinta vaikuttaa merkittävästi ympäristöön, koska se mahdollistaa energian tehokkaamman käytön. (DEMOUSELLE ym., 2009, s. 14)

Sähkökuormanhallinnalla on merkittävä vaikutus tehokertoimeen, erityisesti teollisuusympäristössä. Sähkökuormanhallinta auttaa tasapainottamaan sähkönkulutusta eri

kuormien välillä, mikä vähentää loistehoa ja parantaa tehokertoimen arvoa. Esimerkiksi, jos teollisuuslaitoksessa käytetään samanaikaisesti sekä resistiivisiä kuormia (jotka eivät aiheuta loistehoa) että induktiivisiä kuormia (jotka aiheuttavat loistehoa), kuormanhallinta voi optimoida näiden kuormien jakautumisen ja vähentää loistehon vaikutusta. Tämä johtaa parempaan tehokertoimeen ja tehokkaampaan sähkönkulutukseen teollisuuden prosesseissa.

Otetaan esimerkiksi metallitehdas ja tarkastellaan, miten sähkökuormia hallitaan metallitehtaissa. Metallien sulatus tapahtuu induktiouuneissa ajankohtina, jolloin sähkön huipputarve on alhainen. Samalla kaikki työ, joka ei kuluta sähköä, ajoitetaan huipputarveaikoihin, kuten induktiouunien tyhjentäminen ja lataaminen. Huippukäyttöaikoina säädetään induktiouuneissa olevien metallien sulamislämpötilaa, mikä auttaa vähentämään energiankulutusta. On tärkeää huomata, että kaikki nämä toimenpiteet edellyttävät tarkkaa tutkimusta uunien käyttöjaksojen suhteen, jotta toiminnot voidaan ajoittaa asianmukaisesti ja samalla rajoittaa käytössä olevien uunien määrää. (DEMOUSELLE ym., 2009, s. 30)

5.3 Sähköverkon suunnittelu tehokkuuden maksimoimiseksi

Yleensä sähköä tuotetaan voimalaitoksissa ja jaetaan eri kuluttajaryhmille sähköverkon johtojen välityksellä. Sähköverkon johdot toimivat siis reitteinä, joiden kautta sähkö virtaa sen alkuperästä voimajärjestelmän kulutuspaikoihin. Sähköverkon johdolla on sekä lähetävä että vastaanottava pää, ja se sisältää parametreja, kuten resistanssin, induktanssin, kapasitanssin ja konduktanssin. Sähköverkon johdon suorituskyky ja suunnittelu riippuvat täysin näistä parametreista, jotka ovat tasaisesti jakautuneet pituuden mukaan. Sähköverkon johdon suorituskyky liittyy tehokkuuden, säätelyn ja tehovirtojen laskemiseen, joihin nämä parametrit vaikuttavat. Yleensä jännite-, virta- ja tehokerroin-arvot ovat tiedossa lähetävässä päässä. Nämä arvot ovat järjestelmäsuunnittelun edellytyksiä. Sähköverkon tehokkuus määritellään vastaanottopään tehon suhteenä lähetyspään tehoon. Sähköverkon tehokkuus voidaan laskea seuraavan kaavan avulla. (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 87)

Kaava 21. Sähköverkon tehokkuuden laskentakaava.

$$\eta = \frac{P_{Anto}}{P_{Otto}} \cdot 100$$

Missä η on sähköverkon tehokkuus

Yllä olevasta kaavasta voidaan päätellä, että mitä lähempänä vastaanotettu teho on lähetettyä tehoa, sitä korkeampi on energiatehokkuus. Toisin sanoen, jos vastaanotetun tehon ja lähetetyn tehon välillä on suuri ero, tämä tarkoittaa alhaista hyötysuhdetta. Tällöin sähköenergiaa siirretään ja häviöitä tapahtuu suuresti kuljetusprosessin aikana. Tämä puolestaan johtaa moniin ongelmiin, kuten sähkön huonoon laatuun ja tehokertoimen heikkenemiseen.

Sähköverkossa voi esiintyä jännitehäviötä kuljetusprosessin aikana. Kun siirtolinja kuljettaa virtaa, sen resistanssi ja induktanssi aiheuttavat jännitehäviötä linjassa. Tämä johtaa vastaanottopään jännitteen alenemiseen verrattuna lähettävän pään jännitteeseen. Säättely määrittää vastaanottopään jännitteen muutoksena, kun kuorma kytketään pois päältä. Lähetyspään jännitteen ollessa vakio, säättely ilmaistaan vastaanottopään jännitteen suhteena täydellisellä kuormalla, kuten kaavassa 22 on esitetty. (Sivanagaraju & Satyanarayana, 2009, s. 88)

Kaava 22. Jännitteen säädön laskentakaava.

$$\% \text{ Säättö} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \cdot 100$$

Missä V_{NL} on vastaanottopään jännite kuormittamattomana ja V_{FL} on vastaanottopään jännite täydellä kuormalla.

Siksi teollisuusalueiden sähköverkkojen suunnittelussa on otettava huomioon jännitehäviöt. Jännitehäviötä voidaan vähentää käyttämällä poikkipinta-alaltaan suurempia johtimia tai useita johtimia rinnakkain. Lisäksi voidaan käyttää johtimia, joilla on pieni induktanssi. Yleensä paksummissa johtimissa on vähemmän induktanssia. Lisäksi voidaan käyttää muuntajia (step-up transformer) jännitteen nostamiseen lähettävän pään puolella, jolloin virta, joka kulkee johtimien läpi kuljetuksen aikana, vähenee. (Voltage Disturbance, 2018)

6 Tapaustutkimus teollisuusympäristöstä

Tässä luvussa raportissa käsitellään teollisuusympäristön esimerkkiä, joka auttaa ymmärtämään sähkölaatua ja sähkötietojen analysointia. Esimerkkinä käytetään metallitehdasta, joka tyypillisesti käyttää suuria sähkömoottoreita, sulatusuuneja ja muita sähkökuormia. Tällaisissa tilanteissa on välttämätöntä seurata ja analysoida sähkötehoa, jotta voidaan välttää sähkön laatuongelmat ja estää liiallinen sähköverkon kuormitus, joka johtuu loistehosta.

6.1 Tapaustutkimuksen esittely ja tavoitteet

Metallitehdas, joka erikoistuu metallien valmistukseen, kohtaa haasteita sähkölaadun ja tehokertoimen kanssa. Tehtaalla on havaittu ongelmia sähkötehon epävakaudesta ja alhaisesta tehokertoimesta. Tämä johtaa sähkötehohäviöihin, korkeampiin kustannuksiin ja tehottomampaan toimintaan. Tässä tapausesimerkissä tarkastellaan tehtaan tilannetta ja ehdotetaan ratkaisuja sähkölaadun parantamiseksi ja tehokertoimen vahvistamiseksi.

Metallitehdas sijaitsee teollisuusalueella ja erikoistuu erilaisten metallituotteiden valmistukseen. Tehdas toimii jatkuvasti 24/7 ja käyttää merkittäviä määriä sähkövoimaa tuotantoprosesseissaan. Viime aikoina tehtaalla on kohdattu sähkölaatuongelmia, kuten laitteiden virranvaihteluita. Lisäksi heikko tehokerroin on vaikuttanut haitallisesti sähkötehokkuuteen ja aiheuttanut ylimääräisiä kustannuksia.

Tavoitteena on perusteellisesti analysoida metallitehtaan sähkömittaustiedot, jotta saadaan täydellinen kuva kaikista nykyisistä ja mahdollisista ongelmista. Tämän analyysin avulla pyritään tarkasti laskemaan tehtaan laitteiden tehokerroin, loisteho ja virta. Tarkoituksena on löytää ratkaisu, joka auttaa parantamaan tehtaan sähköenergian laatua sekä tehokertoimen tilaa.

6.2 Mittaustulosten analysointi ja tehokertoimen arviointi

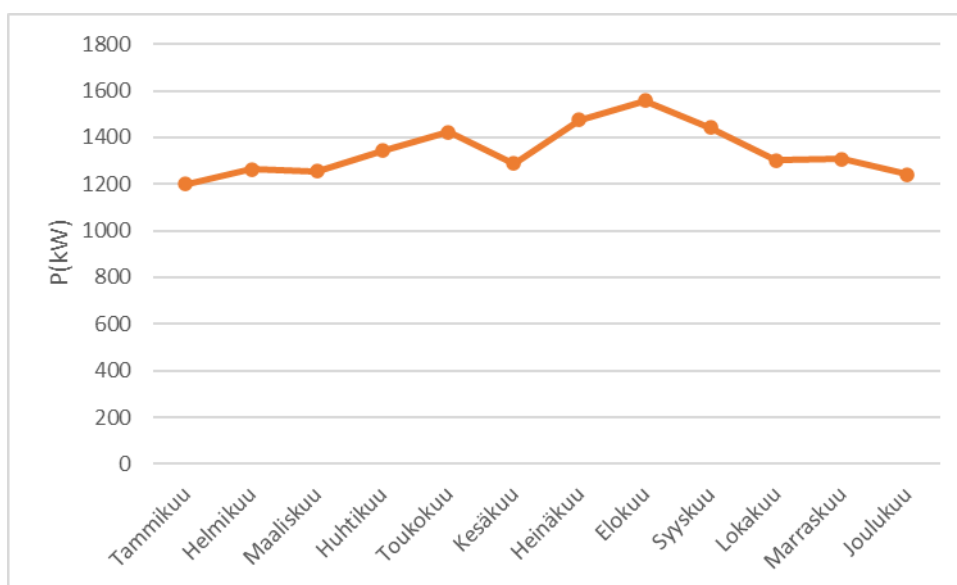
Tehtaan käytettävissä olevat sähköiset mittaustiedot sisältävät tiedot tehtaan näennäistehosta ja pätötehosta. Näitä tietoja tarvitaan ongelmien analysoinnissa, ratkaisujen ehdottamisessa ja suunnittelussa. On tärkeää huomata, että käytetty analyysityyppi perustuu matemaattiseen analyysiin, joka hyödyntää kaavoja kaikkien analyysin perusosatekijöiden laskemiseksi.

Taulukko 2. Metallitehtaan sähkömittaustiedot.

Kuukausi	S(kVA)	P(kW)
Tammikuu	1500	1200
Helmikuu	1620	1263.6
Maaliskuu	1590	1256.1
Huhtikuu	1700	1343
Toukokuu	1780	1424
Kesäkuu	1590	1287.9
Heinäkuu	1820	1474.2
Elokuu	1900	1558
Syyskuu	1780	1441.8
Lokakuu	1690	1301.3
Marraskuu	1655	1307.45
Joulukuu	1590	1240.2

Taulukossa 2 on esitetty tehtaan sähkömittaustiedot, jossa pätöteho P ja näennäisteho S on mitattu kuukausittain, jotta saadaan kattava käsitys tehtaan sähkönkulutuksesta ja muutosten seurannasta eri ajanjaksoina. Mittaustietojen perusteella voidaan havaita, että tehtaan suurin pätöteho oli elokuussa 1588 kW, kun taas pienin pätöteho tapahtui tammikuussa, jolloin se oli 1200 kW, kuten kuvassa 31 näkyy.

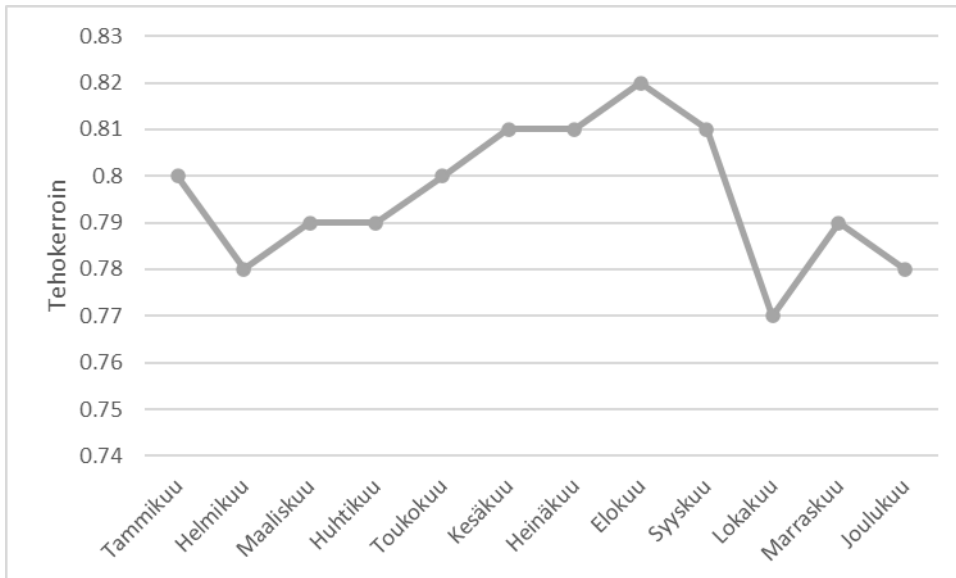
Kuva 31. Tehtaan minimi- ja maksimipätötehon kaaviokuva.



Tehokerroin voidaan laskea sekä pätötehon P että näennäistehon S avulla kaavan 10 perusteella, ja se auttaa selvittämään tehtaan kuukausittaista tehokertoimen arvoa. Tehokerroin on hyödyllinen työkalu, jonka avulla voidaan tunnistaa mahdolliset

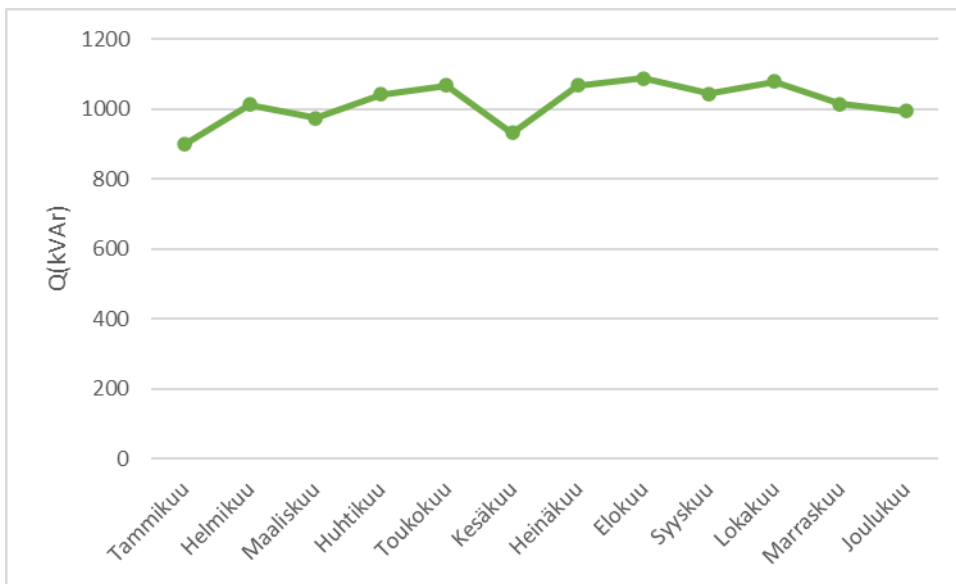
sähkönlaatuongelmat tai tehohäviöt tehtaalla. Kuvasta 32 voidaan havaita, että tehtaan suurin kuukausittainen tehokerroin oli elokuussa 0.82, kun taas pienin tehokerroin oli lokakuussa, jolloin se oli 0.77.

Kuva 32. Tehtaan minimi- ja maksimitehokerroin kaaviokuva.



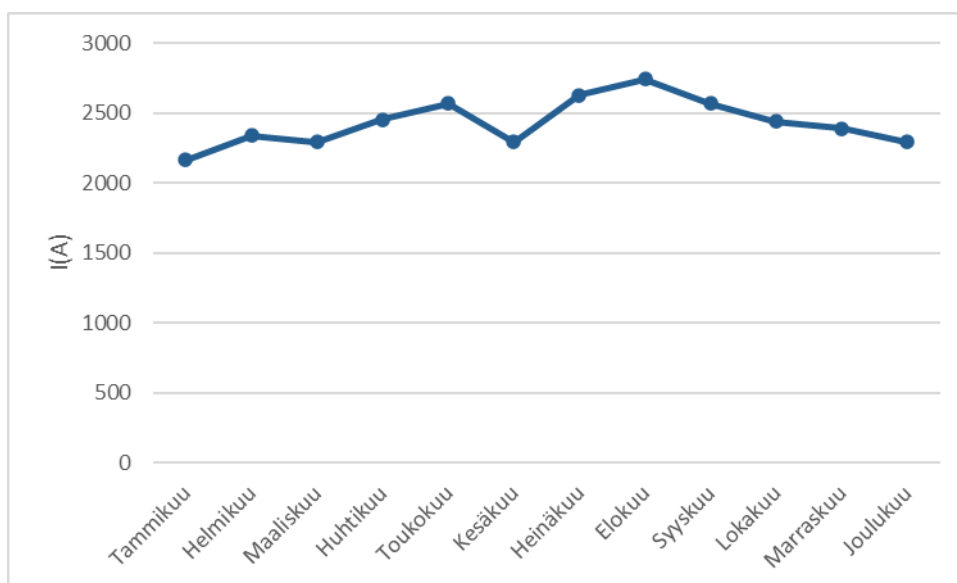
Loisteho voidaan laskea kaavan 14 perusteella. Loistehon määrän laskeminen auttaa alustavassa arvioinnissa tehtaan sähkötehohäviöistä ja antaa myös visuaalisen esityksen tehtaan tehokolmiosta, kun laskenta on suoritettu kaikkien tehokolmion elementtien osalta. Kuvasta 33 näkyy, että suurin loisteho esiintyi elokuussa, arvoltaan 1087.491 kVAr, kun taas pienin loisteho havaittiin tammikuussa, arvoltaan 900 kVAr.

Kuva 33. Tehtaan minimi- ja maksimiloistehon kaaviokuva.



Tehtaan kuukausittainen virrankulutus lasketaan kaavan 19 avulla, joka perustuu tehtaan päätötehoon, jännitteen arvoon ja tehokertoimen laskelmiin. Tehokerroinanalyysin aikana virta arvon laskemisella on useita analyyttisiä etuja. Tarkasti laskettu virta arvo auttaa arvioimaan sähkönlaadun tilaa, kuten sähkövirran tasaisuutta ja mahdollisia häiriöitä. Tämä auttaa havaitsemaan mahdollisia sähkönlaatuongelmia. Virta arvojen analysointi auttaa myös tunnistamaan kuormituksen jakautumista ja tasapainottamaan sitä. Epätasapainoinen kuormitus voi johtaa tehohäviöihin ja vaikuttaa tehokerroinlukemiin. Tarkasti lasketut virta arvot mahdollistavat myös tehtaan sähkönkäytön suorituskyvyn arvioinnin. Tehokkaampi sähkön käyttö johtaa parempaan tehokertoimeen, pienempiin tehohäviöihin ja kustannussäästöihin. Virta arvojen analysointi auttaa tunnistamaan alueet, joissa on parannettavaa, ja joissa sähkönkäyttöä voidaan optimoida. Kuvasta 34 näkyy, että suurin virrankulutus tapahtui elokuussa, arvoltaan 2742.21 A, kun taas pienin virrankulutus havaittiin tammikuussa, arvoltaan 2165.06 A.

Kuva 34. Tehtaan minimi- ja maksimi virrankulutus kaaviokuva.



Suoritetut tarvittavat laskelmat osoittavat, että tehtaan tehokerroin on alhainen, mikä viittaa siihen, että tehtaan sähkölaatuun liittyy ongelmia. Esiintyy sähköenergiähäviöitä, joiden arvioidaan olevan noin 23 prosenttia kuukausittaisesta tehohäviöstä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tehdas hyödyntää vain 77 prosenttia sähköenergiastaan. Tämä puolestaan johtaa korkeampiin ostoenergiakustannuksiin ja tehtaan käyttämien sähkölaitteiden tehottomampaan toimintaan. Tämä tulkinta perustuu raportin teoreettiseen osaan, jossa todetaan, että tehokertoimen arvo, joka on lähellä tai yhtä suuri kuin yksi, osoittaa, ettei tehtaassa ole tehohäviöitä tai sähkönlaatuongelmia. Toisaalta, jos tehokertoimen arvo ei ole yhtä suuri tai lähellä yhtä, se viittaa tehohäviöihin ja sähkönlaatuun liittyviin ongelmiin tehtaassa. Koska tehokerroin saavutti korkeimman arvonsa 0.82, tämä viittaa siihen, että on tarpeen tutkia keinoja parantaa tehokertoiminta ja sähköenergian laatua.

6.3 Parannustoimenpiteiden suunnittelu ja toteutus

Teollisuuslaitoksille, jotka kuluttavat suuria määriä sähköenergiaa, tehokertoimen ja sähkönlaadun optimointi on merkittävä tavoite. On olemassa useita keinoja parantaa sähkötehonlaatua ja tehokertoimen arvoa. Yksi tehokas ratkaisu on hyödyntää kondensaattoreita, jotka auttavat kompensoimaan loistehon kulutusta ja edistävät tehtaan sähköjärjestelmän tehokkuutta.

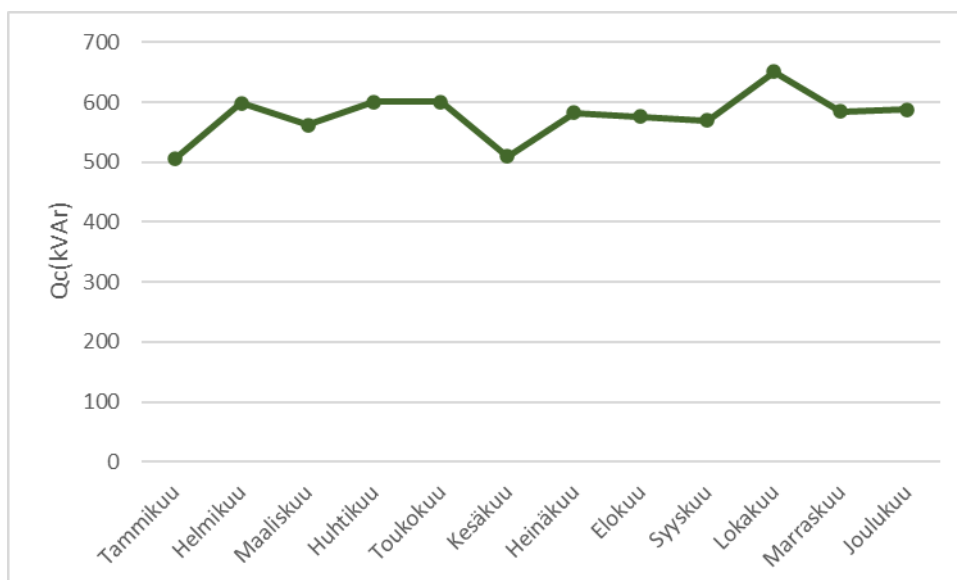
Parannusprosessi ja sopivan kondensaattorin valinta edellyttävät tarkkoja laskelmia uuden loistehon arvosta sen jälkeen, kun uusi tehokerroin on valittu. Uusi loistehon arvo vaikuttaa

merkittävästi sopivan kondensaattorin koon valintaan, mikä puolestaan voi parantaa tehokertoimen määrää ja sähköjärjestelmän tehonlaatua. Tässä parannusprosessissa oletetaan, että uudeksi tehokertoimen arvoksi valitaan 0.95, ja kaavan 14 avulla voidaan laskea uusi loistehon arvo.

Kun saadaan uusi loistehon arvo, lasketaan vanhan loistehon ja uuden loistehon arvon välinen ero käyttäen kaavaa 17 tai voidaan käyttää kaavaa 18. Toisin sanoen, lasketaan kondensaattorin loistehon määrä $ckVAR$. Kondensaattorin loistehon määrä on erittäin tärkeä tekijä sopivan koon valinnassa, mikä puolestaan auttaa parantamaan sähkölaatua ja samalla parantaa tehokertoimen arvoa.

Kondensaattorin optimaalinen koko tehtaan sähköjärjestelmään voidaan määrittää kondensaattorin loistehon perusteella. Kuvasta 35 voidaan havaita, että kondensaattorin loistehon pienin arvo on 505.57 $kVAR$ ja suurin arvo on 650.57 $kVAR$. On tärkeää huomata, että valitun kondensaattorin loistehon arvon on oltava hieman suurempi kuin vaadittu arvo 650.57 $kVAR$, jotta tehokertoimen parannusjärjestelmä toimii kaikissa tapauksissa. Kondensaattorin loisteholaskelmien perusteella voidaan päätellä, että tehdas tarvitsee tehokertoimen parannusjärjestelmän, jonka arvo on 700 $kVAR$. Tämä järjestelmä auttaa parantamaan tehtaan sähköjärjestelmän sähkön laatua.

Kuva 35. Tehtaan minimi- ja maksimi kondensaattorin loisteho kaaviokuva.



Valitaan tehokertoimen parannusjärjestelmä Schneider Electricin VarSet-kondensaattoripankista. Tämä kondensaattoripankki on varustettu automaattitoiminnolla, ja

sen loistehon kapasiteetti on 700 kVAR. Tehokertoimen parannusjärjestelmä toimii 400 V:n jännitteellä ja 50 Hz:n taajuudella kuten kuvassa 36 näkyy.

Kuva 36. Schneiderin 700kVAR VarSet-kondensaattoripankki (Schneider Electric, 2024c).



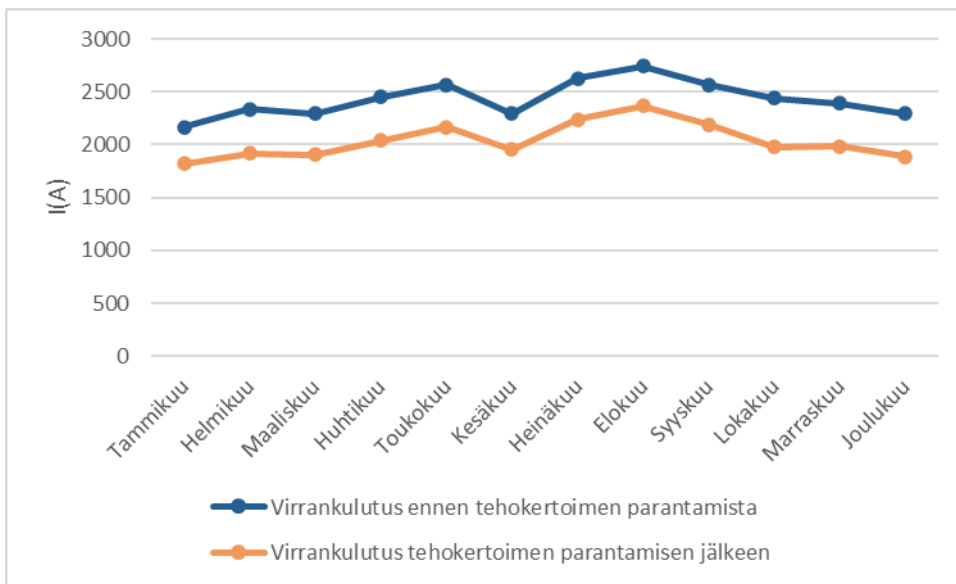
6.4 Tulosten arviointi ja vaikutusten analysointi

Kun tarkastellaan tehokertoimen optimoinnin tuloksia, kiinnitetään huomiota uuden tehokertoimen vaikutuksiin tehtaan sähkövirrankulutukseen, loistehon määrään ja ostettujen sähkön kustannuksiin.

Kuten aiemmin mainittiin tässä raportin teoreettisessa osassa, tehokertoimen parantaminen vähentää loistehon tarvetta. Tämä johtuu siitä, että suurempi loistehon kulutus tarkoittaa suurempaa virrankulutusta. Kuitenkin tehokertoimen kasvaessa loisteho pienenee. Tämän matemaattisten laskelmien perusteella johtaa sähkökulutuksen vähenemiseen sähköverkossa. Tämä puolestaan johtaa suurempiin sähköenergiansäästöihin ja sähköjärjestelmän kuormituksen vähenemiseen.

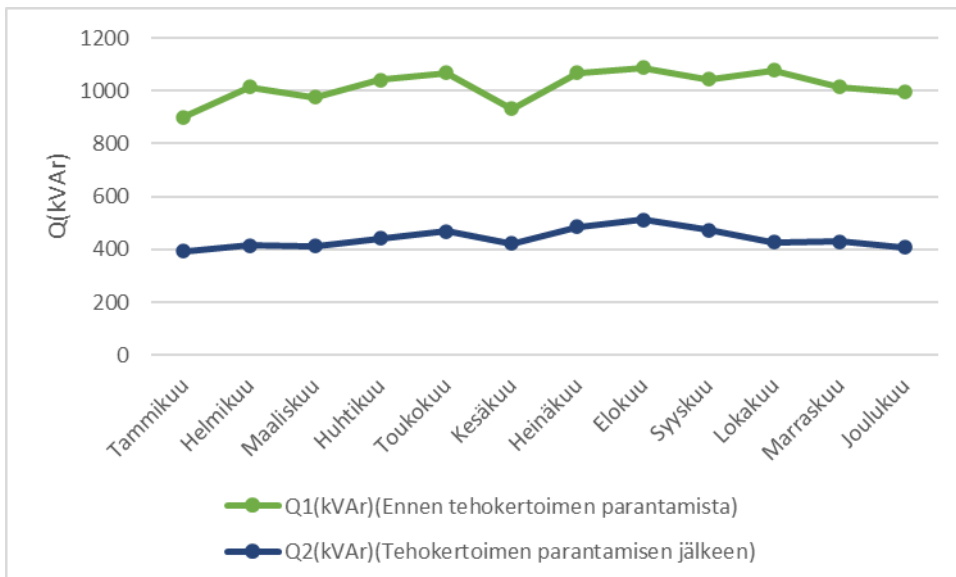
Kun tarkastellaan kuvaa 37, jossa vertaillaan virrankulutuksen tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen, huomataan merkittävä lasku sähkövirrankulutuksessa. Tämän perusteella voidaan päätellä, että tehokertoimen parantaminen on saavuttanut ensisijaisen tavoitteensa, joka on tehtaan sähkövirrankulutuksen vähentäminen.

Kuva 37. Virrankulutuksen tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.



Kun verrataan kahta tapausta ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen, kuten Kuvassa 38 näkyy, voidaan havaita tehokertoimen parantamisen merkittävä vaikutus loistehon määrän vähenemiseen. Tämän perusteella voidaan todeta, että tehokertoimen parantamisprosessi on saavuttanut toisen tavoitteensa merkittävästi.

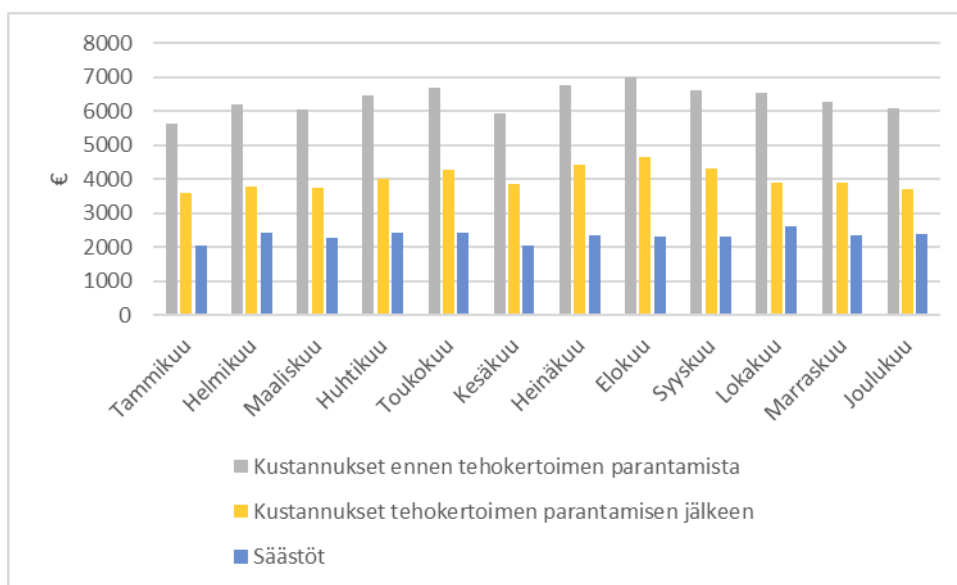
Kuva 38. Loistehon tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.



Kun tarkastellaan sähkölaskua ja tehokertoimen parantamisen vaikutusta siihen, havaitsetaan, että teollisuuskuormien sähkölaskut perustuvat pätötehon ja loistehon kulutukseen. Tehokertoimen parantamisen vaikutus näkyy selvästi ostetun energian

kustannusten laskennassa, koska se vaikuttaa merkittävästi loistehoon. Tämä puolestaan johtaa tehtaan sähkölaskun alenemiseen, mikä on havaittavissa vertaamalla sähkölaskua ennen ja jälkeen tehokertoimen parannusta kuten kuvassa 39 näky. Näin voidaan todeta, että tehokertoimen parantaminen on saavuttanut kolmannen tavoitteensa, eli tehtaan sähkölaskujen pienentämisen.

Kuva 39. Sähkölaskun tilaa ennen tehokertoimen parantamista ja sen jälkeen.



On tärkeää huomata, että matemaattisissa laskelmissa tehokertoimen parantamisen vaikutusta ostetun energian kustannuksiin ei ole otettu huomioon sähkön siirtomaksujen osalta. Laskelmissa käytettiin pätötehon hintaa 1,65 euroa/kW ja loistehon hintaa 4,05 euroa/kVAR. Lisäksi on huomioitava kuukausittaiset perusmaksut, jotka olivat 16,50 euroa.

7 Yhteenveto tutkimustuloksista

Metallitehtaan tehokertoimen parantaminen on osoittautunut tehokkaaksi tavaksi vähentää tehtaan sähkönkulutusta, loistehoa ja ostetun sähkön hintaa. Analyysin tulokset perustuvat tehokertoimen laskennan kaavoihin ja osoittavat useita merkittäviä vaikutuksia.

Ensinnäkin tehokertoimen parantaminen vähentää loistehon tarvetta. Suurempi loistehokulutus johtaa korkeampaan virrankulutukseen, mutta tehokertoimen kasvaessa loisteho pienenee. Tämä puolestaan vähentää metallitehtaan sähkönkulutusta, mikä johtaa suurempiin säästöihin sähkötehon käytössä ja vähentää tehtaan kuormitusta, mikä edistää laitteiden tehokasta toimintaa.

Toiseksi tehokertoimen parantaminen saavuttaa tavoitteen alentaa tehtaan virrankulutusta. Analyysin tulokset osoittavat, että tehokertoimen parantaminen vähentää merkittävästi tehtaan virrankulutusta, jopa noin 17 prosenttia. Tämä osoittaa, että tehokertoimen parantaminen onnistuu vähentämään sähkönkulutusta metallitehtaalla.

Kolmanneksi tehokertoimen parantaminen vaikuttaa suoraan metallitehtaan sähkölaskuun. Analyysin tulokset osoittavat, että tehokertoimen parantamisella saavutettiin noin 2337 euron kuukausittainen säästö. Tämä osoittaa, että tehokertoimen parantaminen on tehokas tapa vähentää tehtaan sähkölaskuja.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tehokertoimen parantaminen on tärkeä ja tarpeellinen toimenpide teollisuusympäristössä. Se auttaa luomaan korkeamman hyötysuhteen sähköteholle, vähentämään tehohäviöitä ja parantamaan sähkötehon laatua metallitehtaalla.

7.1 Tärkeimmät havainnot ja johtopäätökset

Tehokertoimen parantamisessa tehdyt havainnot ja niistä johdetut tärkeimmät johtopäätökset ovat seuraavat

Sähköenergiansäästö: Tehokertoimen parantaminen johtaa merkittävään sähköenergiansäästöön. Tehokertoimen kasvaessa sähkönkulutus vähenee, mikä puolestaan johtaa pienempiin energiakustannuksiin. Tämä on erityisen tärkeää teollisuuslaitoksille, joissa sähkönkulutus on yleensä suuri osa kokonaisenergiankulutusta.

Taloudelliset hyödyt: Tehokertoimen parantaminen tuottaa taloudellisia etuja.

Sähköenergiansäästön myötä tehtaan sähkölaskut pienenevät, mikä voi johtaa huomattaviin kustannussäästöihin pitkällä aikavälillä. Tehokkaampi sähköenergiankäyttö voi myös parantaa tehtaan kilpailukykyä ja kannattavuutta.

Tehokkaampi sähkönkäyttö: Tehokertoimen parantaminen parantaa sähkönkäytön tehokkuutta. Tehokertoimen kasvaessa sähkön ja loistehon suhde paranee, mikä vähentää sähköenergiahäviöitä ja tehostaa sähkönkulutusta. Tämä voi johtaa parempaan suorituskykyyn ja luotettavuuteen laitteiden toiminnassa.

Sähkön laadun parantuminen: Tehokertoimen parantaminen voi parantaa myös sähkön laatua. Parempi tehokerroin vähentää loistehon tarvetta, mikä puolestaan voi parantaa jännitteen vakautta ja vähentää häiriöitä sähköjärjestelmässä. Tämä voi vaikuttaa positiivisesti laitteiden suorituskykyyn ja vähentää mahdollisia vikatilanteita.

Ympäristövaikutukset: Tehokertoimen parantaminen edistää kestävästä kehitystä ja ympäristönsuojelua. Sähköenergiansäästö vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja siten hiilidioksidipäästöjä. Tehokkaampi sähköenergiankäyttö auttaa vähentämään ympäristön kuormitusta ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia.

Näiden havaintojen perusteella voidaan päätellä, että tehokertoimen parantaminen on tärkeä toimenpide sähköenergiatehokkuuden lisäämiseksi ja kestävästä kehityksen tukemiseksi. Se tarjoaa taloudellisia etuja, parantaa sähkönkäytön tehokkuutta, vähentää ympäristövaikutuksia ja parantaa sähkön laatua. Tehokertoimen optimointi tulisi siksi ottaa huomioon teollisuuslaitosten sähköenergiatehokkuutta parannettaessa.

7.2 Suositukset tehokkuuden edistämiseksi teollisuuden sähköverkoissa

Suositukset tehokkuuden edistämiseksi teollisuuden sähköverkoissa sisältävät useita toimenpiteitä.

Ensinnäkin tehokertoimen seuranta on tärkeä vaihe, jossa sähköverkon tehokkuutta mitataan ja seurataan säännöllisesti. Tämä auttaa havaitsemaan mahdolliset ongelma-alueet ja tehostamistarpeet.

Toiseksi kuormanhallinta on keskeinen tekijä tehokkuuden parantamisessa.

Kuormanhallinnassa pyritään tasapainottamaan kuormitusta ja välttämään ylikuormitusta.

Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä älykkäitä järjestelmiä ja automaatiota, jotka optimoivat kuormien käyttöä ja vähentävät tehohäviöitä.

Kolmanneksi investoiminen sähköenergiatehokkaisiin laitteisiin ja teknologioihin voi merkittävästi parantaa tehokkuutta. Esimerkiksi vanhentuneiden laitteiden vaihtaminen energiatehokkaampiin malleihin tai taajuusmuuttajien ja optimoitujen moottorien käyttö voi johtaa huomattaviin energiansäästöihin.

Neljäntenä tehokertoimen parannuslaitteet, kuten kondensaattorit, voivat tasapainottaa sähköverkon tehokerrointa ja kompensoida tehohäviöitä, mikä johtaa parempaan tehokkuuteen.

Viidenneksi henkilöstön kouluttaminen energiatehokkuudesta ja tehokertoimen merkityksestä sekä tietoisuuden lisääminen energiansäästötoimenpiteistä ja oikeanlaisen käytön merkityksestä kannustavat tehokkuuden parantamiseen.

Kuudenneksi edistyneiden sähköenergianhallintajärjestelmien käyttö mahdollistaa sähkönkulutuksen reaaliaikaisen seurannan ja ohjauksen. Nämä järjestelmät havaitsevat energiatehottomuutta ja tarjoavat tietoa tehokkuuden parantamiseksi.

Lopuksi uusiutuvan energian hyödyntäminen, kuten aurinko- ja tuulienergian käyttö, vähentää riippuvuutta perinteisistä sähköverkoista ja parantaa tehokkuutta. Aurinkopaneelien tai tuulivoimaloiden asentaminen teollisuusalueille tuottaa puhtaan energian lisäksi säästöjä sähkönkulutuksessa.

Lähteet

- ABB. (2010). *Technical Application Papers No.8 Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants*. ABB.
<https://library.e.abb.com/public/4704e67320c08992c1257870002e4700/1SDC007107G0202.pdf>
- ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. (2000). *SÄHKÖN LAATU*. ABB.
https://heikkilaakso.com/opetus/abb/040_0007.pdf
- Avtron Power Solutions. (n.d.). *Resistive, Inductive, and Capacitive Load Banks*.
<https://avtronpower.com/resources/articles/resistive-inductive-and-capacitive-load-banks/>
- Beama. (n.d.). *GUIDE TO POWER FACTOR CORRECTION*. Beama.
<https://www.beama.org.uk/static/uploaded/080037a7-4dd8-4776-a6a5abb0988269ba.pdf>
- Beeman, D. (1955). *INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK*. Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY.
https://www.academia.edu/20200203/INDUSTRIAL_POWER_SYSTEMS_HANDBOOK_Donald_Beeman
- CLOU GLOBAL. (15.9.2023). *Power Factor Correction for Energy Efficiency*.
<https://clouglobal.com/power-factor-correction-improving-energy-efficiency-in-industrial-applications/>
- Dash Control Systems. (16.11.2017). *Voltage Fluctuations Effect on Industrial Facilities*.
<https://dashcontrol.com/blog/voltage-fluctuations-effect-industrial-facilities>
- De Metz-Noblat, B., & Jeanjean, G. (1997). *Dynamic stability of industrial electrical networks*. schneider-electric.
https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/Dynamic_stability_of_industrial_electrical_networks.pdf
- DEMOUSELLE, A., DUNNE, T., HAGMANN, H. R., KEVERS, J. M. H., LINDSKOUG, S., OTTOSSON, H., REYNAUD, J. F., AOKI, H., & GRATTIER, W. (2009). *Electric Load Management in Industry*. Leonardo ENERGY. <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2017/08/Electric-Load-Management-in-Industry.pdf>
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Hayne Beaty, H. (2004). *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*.
https://gcebargur.ac.in/sites/gcebargur.ac.in/files/lectures_desk/electrical_power_systems_quality.pdf

ETAP. (n.d.). *What is power factor and harmonics.*

<https://www.etaplighing.com/en/blog/power-factor-and-harmonics-simply-explained>

Fleckenstein, J. E. (2016). *Three-Phase Electrical Power*. CRC Press.

https://engineerrefe.com/?jet_download=MTI1NTYyNDk0NjQzMMA5NTEzMDQ0NTQ4MDUy

Fluke. (2012). *Fluke 434-II/435-II/437-II Three Phase Energy and Power Quality Analyzer Users Manual*. Fluke. https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umeng0100.pdf

Fluke. (2024). *Fluke 434 / 435 -sähkölaatu ja energia analysaattorit.*

<https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotestaus/sahkonlaatu/434-435>

Grant Maloy, S. (4.9.2023). *What is Power Analysis and Power Measurements* Dewesoft.

<https://dewesoft.com/blog/what-is-power-analysis>

Iderus, S., Geno, P., Praghash, K., & RAI Vadde, A. (2022). *Optimization and Design of a Sustainable Industrial Grid System.*

https://www.researchgate.net/publication/361846530_Optimization_and_Design_of_a_Sustainable_Industrial_Grid_System

IEEE Standards. (1997). *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.*

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7978195/mod_folder/content/0/IEEE%20399-1997.pdf?forcedownload=1

IEEE Std 1459. (2010). *IEEE Standard for Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.*

IEEE.

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf

Industry Support Siemens. (27.9.2013). *What is the difference between cosine phi and the power factor?*

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/748/51402748/att_88178/v1/faq_51402748_e.pdf

José, M. (5.6.2013). *Reactive Power Compensation.*

<https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/4-jos%C3%A9-matias---reactive-power-compensation.pdf?sfvrsn=2>

Maheshwari, H. (2023). *Power Quality Analysis*. Government of india- Ministry of railways.

[https://indianrailways.gov.in/railwayboard/uploads/PDF/Final%20Booklet%20on%20Power%20Quality%20Analysis%20\(1\).pdf](https://indianrailways.gov.in/railwayboard/uploads/PDF/Final%20Booklet%20on%20Power%20Quality%20Analysis%20(1).pdf)

- Malone, K. (24.10.2010). *Electrical Load Management*.
<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/malone1/>
- Motiva. (15.4.2024). *Teollisuus*.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/energian_loppukaytto/teollisuus
- Orman, R. (2012). *Power Factor Correction Solutions & Applications*.
https://na.eventscloud.com/file_uploads/ae662b68c3cd8a5602913a42c8bcf0fc_Rick_Orman_EFC2016.pdf
- Schneider Electric. (11.10.2016). *Understanding the Sources of Power-Quality Disturbances*.
<https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/power-management-metering-monitoring-power-quality/2016/10/11/understanding-sources-power-quality-disturbances/>
- Schneider Electric. (2023). *Power Factor and Power Quality*.
<https://www.se.com/uk/en/product-category/4300-power-quality-and-power-factor-correction/>
- Schneider Electric. (2024a). *Electrical Load*. <https://www.se.com/uk/en/brands/local/asco-power-articles/electrical-load.jsp>
- Schneider Electric. (2024b). *Explaining Power Factor Correction and Its Importance*.
<https://eshop.se.com/in/blog/post/explaining-power-factor-correction-and-its-importance.html>
- Silvonen, K. (2017). *SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIIKKA*.
<https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1513524/course/section/188482/tXt4.pdf>
- Sivanagaraju, S., & Satyanarayana, S. (2009). *ELECTRIC POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION*.
https://www.academia.edu/90478239/ELECTRIC_POWER_TRANSMISSION_AND_DISTRIBUTION
- Stanford University. (20.4.2023). *The Grid: Electricity Transmission, Industry, and Markets*.
<https://understand-energy.stanford.edu/energy-currencies/electricity-grid>
- Stull, R. (24.10.2023). *Why is Power Factor Important When Measuring Efficiency?*
<https://www.cui.com/blog/why-is-power-factor-important-when-measuring-efficiency>
- Tsegaye, C. (n.d.). *Power factor*. https://www.academia.edu/7147628/Power_factor
- Voltage Disturbance. (20.3.2018). *AC Voltage Drop and System Power Factor*.
<https://voltage-disturbance.com/power-engineering/ac-voltage-drop-and-system-power-factor/>

Liite 1. Kilowattikertoimen useille tehokertoimen optimointiprosesseille (Beeman, 1955, s. 450).

Original power factor $\cos \theta_1$	Desired improved power factor, $\cos \theta_2$																				
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.50	0.982	1.008	1.034	1.060	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.306	1.337	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.589	1.732
0.51	0.937	0.962	0.989	1.015	1.041	1.067	1.094	1.120	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.687
0.52	0.893	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.050	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.248	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	0.850	0.876	0.902	0.928	0.954	0.980	1.007	1.033	1.060	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600
0.54	0.809	0.835	0.861	0.887	0.913	0.939	0.966	0.992	1.019	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.196	1.230	1.267	1.308	1.356	1.416	1.559
0.55	0.769	0.795	0.821	0.847	0.873	0.899	0.926	0.952	0.979	1.007	1.035	1.063	1.093	1.124	1.156	1.190	1.227	1.268	1.316	1.376	1.519
0.56	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151	1.188	1.229	1.277	1.337	1.480
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986	1.016	1.047	1.079	1.113	1.150	1.191	1.239	1.291	1.442
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.076	1.113	1.154	1.202	1.262	1.405
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.776	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040	1.077	1.118	1.166	1.226	1.369
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004	1.041	1.082	1.130	1.190	1.333
0.61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.156	1.299
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.726	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937	0.974	1.015	1.063	1.123	1.266
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.721	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.474	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.918	0.961	1.026	1.169
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.935	0.995	1.138
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.965	1.108
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.786	0.827	0.875	0.935	1.078
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.906	1.049
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936

