



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Jani Vauhkonen

# Syötönvaihtolaitteisto teollisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

26.5.2020

Tekijä Otsikko	Jani Vauhkonen Syötönvaihtolaitteisto
Sivumäärä Aika	32 sivua 26.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Jukka Karppinen
<p>Tämä insinööri työ tehtiin Vantaan Energialle. Työn tavoitteena oli perehtyä teollisuudessa käytettävään syötönvaihtoon ja sitä suorittavaan syötönvaihtolaitteistoon.</p> <p>Työssä tuotiin esille yleisiä väylärakenteita teollisuuslaitoksista, jotta saatiin pohjustus sille, minkälaisessa ympäristössä syötönvaihtolaitteistoa käytetään. Tämän jälkeen perehdyttiin syötönvaihtomenetelmiin ja syötönvaihdon aikaisiin olosuhteisiin. Lopuksi käytiin vielä läpi lyhyesti simulointiin, kenttätestaukseen ja päätöksentekoon liittyviä seikkoja.</p> <p>Tämä insinööri työ koostettiin kokonaisuudeksi yhdistelemällä tietoja eri tutkimuksista, joissa on perehdytty syötönvaihtoon.</p> <p>Työn tuloksena saatiin koottua syötönvaihtoon ja syötönvaihtolaitteistoon keskittyvä aineisto, josta voi olla hyötyä taholle, joka suunnittelee syötönvaihtolaitteiston hankintaa, taikka seuraavaan tutkimukseen, jossa päädytään tutkimaan syötönvaihtoa syvällisemmin.</p>	
Avainsanat	syötönvaihto, syötönvaihtolaitteisto, syötönvaihtomenetelmät

Author Title	Jani Vauhkonen Motor Bus Transfer Application
Number of Pages Date	32 pages 26 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>This engineering work was done for Vantaan Energia. The aim of the work was to get acquainted with the motor bus transfer used in industry and the motor bus transfer application that performs it.</p> <p>The thesis presented general bus structures from industrial plants in order to provide a basis for the type of environment in which the motor bus transfer application is used. After this, the methods of motor bus transferring and the conditions during the motor bus transferring were introduced. Finally, aspects related to simulation, field testing and decision making were briefly reviewed.</p> <p>This engineering work was compiled as whole by combining data from different studies that have been familiar with motor bus transfer.</p> <p>As the result of the work, material focusing on motor bus transfer and motor bus transfer application was compiled, which may be useful for someone planning to acquire motor bus transfer application, or for another more in-depth study of motor bus transfer.</p>	
Keywords	Motor Bus Transfer, Motor Bus Transfer Application

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Syötönvaihtolaitteisto	3
3	Syötönvaihdon määritykset	4
3.1	Väylärakenne 1	5
3.2	Väylärakenne 2	7
3.3	Väylärakenne 3	8
3.4	Moottorikuormitetun väylän kytkennät	9
4	Syötönvaihtomenetelmät	11
4.1	Suljettu syötönvaihto	11
4.2	Avoin syötönvaihto	12
4.2.1	Nopea syötönvaihto	13
4.2.2	Tahdistuva syötönvaihto	15
4.2.3	Jäännösjännitteinen syötönvaihto	15
4.3	Avoimet syötönvaihtotilat uuden katkaisijan sulkemiseen	17
4.4	Kriteerit onnistuneelle syötönvaihdolle	17
5	Olosuhteet syötönvaihdon aikana	18
5.1	Ominaisuudet juuri ennen syötönvaihdon käynnistämistä	18
5.1.1	Vian vaikutukset	19
5.1.2	Järjestelmän erottaminen syöttölähteiden välillä	20
5.1.3	Epätahdistuneen generaattorin katkaisun vaikutukset	21
5.1.4	Lähdemuuntajan käämitysvaiheen vaihto	22
5.2	Ominaisuudet, kun syötönvaihto kesken	24
5.2.1	Ohimenevät vaikutukset moottorikuormituksen katkaisuun	24
5.2.2	Väyläjännitteen ja vaiheen heikkenemisominaisuudet syötönvaihdon aikana	25
6	Simulointi, kenttätestaus ja tekninen päätöksenteko	27

6.1	Analyttinen simulointi	27
6.2	Järjestelmän alajotestaus	29
6.3	Kenttähyväksyntätestaus	30
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	33

## Lyhenteet

AM	Apumuuntaja, joka muuntaa laitospöytäkäytössä syöttötehön siihen muotoon, että sillä voidaan käyttää laitoksen käyttölaitteita.
G	Generaattori, eli sähkögeneraattori, jolla muunnetaan laitoksessa tuotettavaa liike-energiaa sähkövirraksi.
PS	Pääsyöttölähde, ensisijainen syöttölähde, jolla syötetään tehoa laitokselle.
PSK	Pääsyöttölähteen katkaisija, ensisijaisen syöttölähteen katkaisija, jolla voidaan erottaa syöttölähde laitoksesta.
S1/2	Syöttölähde 1/2, laitoksessa voi olla kaksi tai useampia toisistaan erillisiä väyliä, joita syötetään omista syöttölähteistä. Monissa tapauksissa nämä väylät on mahdollista yhdistää toisiinsa, jolloin toisesta syöttölähteestä luovutaan.
VK	Väyläkatkaisija, jolla voidaan jakaa laitoksen väylä kahteen tai useampaan erilliseen väylään.
VS	Vaihtoehtoinen syöttölähde, toissijainen syöttölähde, jolla syötetään tehoa laitokselle, jos pääsyöttölähde ei ole toimintakuntoinen / pääsyöttölähdettä ei käytetä.
VSK	Vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisija, toissijaisen syöttölähteen katkaisija, jolla voidaan erottaa syöttölähde laitoksesta.

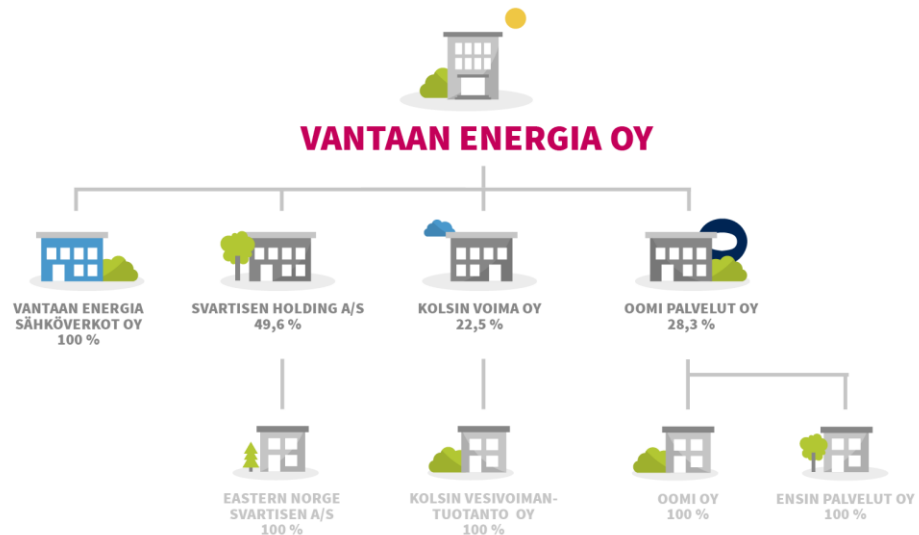
## 1 Johdanto

Teknologian lisääntyminen on johtanut maailmanlaajuisesti liiketoiminnan johtamisen yhä riippuvaisemmaksi luotettavan tehon saatavuudesta. Tämän seurauksena vaihtoehtoisia tehonsyöttöjärjestelmiä asennetaan ja laajennetaan voimalaitosten ja teollisuuslaitosten prosessin suojaamiseksi.

Tässä työssä perehdytään syötönvaihtoon ja syötönvaihtolaitteistoon, joista on hyötyä, kun halutaan varmistaa luotettava tehon saatavuus mahdollisissa ongelmatilanteissa.

Tämä insinöörityö tehdään Vantaan Energia Oy:lle, Itä-Vantaalla sijaitsevalle jätevoimalalle. Vantaan Energia on suunnitellut lisäävänsä jätevoimalan turvalaitteistoon syötönvaihtolaitteiston, joka kykenisi mahdollisen pääsyöttölinjan vikaantumisen sattuessa tekemään nopean syötönvaihdon pääsyöttölinjan ja varasyöttölinjan välillä, niin ettei laitoksen käytöstä vastaava laitteisto ajautuisi pois käytöstä ja tuotantoprosessi kärsisi.

Vantaan Energia on yksi Suomen suurimmista kaupunkienergiayhtiöistä, joka tuottaa ja myy sähköä sekä kaukolämpöä. Teollisuuden käyttöön Vantaan Energia tarjoaa lisäksi maakaasua. Yrityksen historia ulottuu vuoteen 1910, jolloin Malmin Sähkölaitos Oy:n perustava yhtiökokous pidettiin silloisella Helsingin Seurahuoneella. Vuodesta 1996 lähtien yrityksen nimi on ollut Vantaan Energia Oy. Tänä päivänä Vantaan Energian omistavat yhdessä Vantaan kaupunki, 60:n prosentin osuudella ja Helsingin kaupunki, 40:n prosentin osuudella. Vantaan Energia on mukana monissa muissa energia-alan yhtiöissä, kuva 1. [1.]



Kuva 1. Vantaan Energia [1.].

Vantaan Energia rakensi vuosina 2011–2014 Itä-Vantaalle jätevoimalan, Kehä III:n ja Porvoonväylän risteuksen koilliskulmassa sijaitsevalle tontille. Jätevoimalan koekäyttö alkoi maaliskuussa 2014, jolloin ensimmäiset jäte-erät paloivat. Jätevoimala vihittiin käyttöön 17.9.2014. [1.]

Laitoksessa poltetaan sekajätettä, jota paikalle kuljettaa Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY pääkaupunkiseudulta ja Rosk'n Roll Oy Uudeltamaalta. Jätekuormia laitos ottaa vastaan 100–150 päivittäin. [1.]

Jätevoimala polttaa vuodessa 374 000 tonnia sekajätettä, josta se tuottaa noin puolet koko Vantaan tarvitsemasta kaukolämmöstä ja noin 30 prosenttia vuotuisesta sähkötarpeesta. Jätevoimalan ansiosta Vantaan Energia on kyennyt vähentämään fossiilisten tuontipolttoaineiden käyttöä ja vuonna 2016 yhtiön hiilidioksidipäästöt vähenivät noin 15 prosenttia. [1.]



## 2 Syötönvaihtolaitteisto

Syötönvaihtolaitteisto on suunniteltu tarjoamaan prosessille jatkuvuutta, kun siirrytään syöttölähteestä toiselle. Onnistunut syötönvaihto muuttuvissa olosuhteissa on välttämätön prosessille, jolla ei ole varaa sähkökatkoksiin herkkien apulaitteiden vuoksi.

Voimalaitoksien ja teollisuuslaitoksien järjestelmille on apua ja hyötyä syötönvaihtolaitteistosta kriittisissä tilanteissa. Tällaisia järjestelmiä voi olla käytössä mm. paperitehtailla, sellutehtailla, tekstiilitehtailla, kemian laitoksilla ja voimalaitoksilla, kuten myös ydinvoimaloilla.

Syötönvaihtolaitteiston ansiosta voidaan välttää suuret pääomien menetykset, jotka liittyvät materiaalihäviöön prosessin käyttökatkoksen aikana. Lisäksi vältetään käyttökatkoksen aikaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä prosessin uudelleenkäynnistykseen liittyvät viivästykset.

Syötönvaihtolaitteistoa arvostetaan suuresti sen automaattisen toimivuuden vuoksi. Käytössä olevan syöttölähteen kytkeytyessä irti laitteisto hoitaa syötönvaihdon automaattisesti vaihtoehtoiseen käytettävissä olevaan syöttölähteeseen. Tällainen toiminta, joka välttää prosessin jatkuvuuden menetyksen on äärimmäisen toivottavaa, mikäli se ei vaaranna koko järjestelmän turvallisuusominaisuuksia.

Syötönvaihtolaitteistoa on käytetty erilaisissa energiantuotanto- ja prosessiteollisuuden skenaarioissa käyttäen erilaisia menetelmiä. Perinteisesti syötönvaihtolaitteisto on sisällytetty tyypillisen keskijänniteverkon kytkinpakettiin energiantuotannossa ja prosessiteollisuudessa. Sen vaikutus kuitenkin ylittää laitoksen sähköiset järjestelmät, koska syötönvaihtolaitteiston tehokkuus vaikuttaa suoraan tehtaan toimintoihin, tuloihin sekä lyhytaikaisiin ja pitkän aikavälin suorituskykyyn.

Sähkön saanti tuntuu itsestäänselvyydeltä, koska suomalaisten sähköverkkoyhtiöiden toimitusvarmuus on hyvällä tasolla. Luonnonvoimien edessä joutuu jokainen sähköverkkoyhtiö kuitenkin joskus nöyrytymään. Tämän vuoksi jokaisen kannattaa ottaa huomioon sähkökatkoksen mahdollisuus. [2.]

Sähkökatkoja aiheuttavat luonnontapahtumat ja tekniset viat. Sään sähköverkolle aiheuttamia riskejä ovat johdoille kaatuvat puut, salammat, lumi- ja jääkuormat, tulvat ja kova pakkanen. Myös katkon pituuteen ja laajuuteen luonto vaikuttaa oleellisesti. Teknisistä vioista aiheutuvat keskeytykset eivät yleensä ole pitkäaikaisia eivätkä laajoja, sillä vika-alue voidaan eristää muusta verkosta. Kovien myrskyjen aikaan puolestaan vikoja esiintyy paljon yhtä aikaa ja korjaustyöt ovat muutenkin hankalia. [2.]

Syötönvaihtolaitteiston hankinnan perimmäinen syy on mahdollisten sähkökatkokkien aiheuttamien vaurioiden ja kustannuksien välttäminen.

### 3 Syötönvaihdon määrittäykset

Väylärakenteet, joilla kuvataan laitosten rakennetta, jolla laitteet on kytketty toisiinsa vaihtelevat eri laitoksien vaatimusten mukaan. Yleisimmin käytettyjä väylärakenteita käydään läpi tässä osassa. Seuraavat väylärakenteet ovat tyypillisiä lämpövoimalaitoksilla, prosessiteollisuudenlaitoksilla ja ydinvoimaloissa. [3.]

Teollisuusstandardeilla, kuten NEMA MG 1-2006 ja National Electric Manufacturers Association (NEMA) -standardilla, ANSI C50.41-2000 - ”Amerikan kansallinen standardi monivaiheisille induktiomootoreille sähköntuotantoasemilla”, ovat suositelleet ohjeena raja-arvoksi 1,33 yksikköä voltia per hertsiä kohti vektoriero kriteerinä induktiomootoriväylän ja siihen kytkettyjen kuormien turvallisen syötönvaihdon määrittämiseksi pääsyöttölähteestä vaihtoehtoiseen syöttölähteeseen. [6.]

ANSI C50.41-2000 sisältää seuraavan yhtälön:

$$E_R = \sqrt{E_S^2 + E_M^2 - 2E_S E_M \cos \theta}$$

jossa,

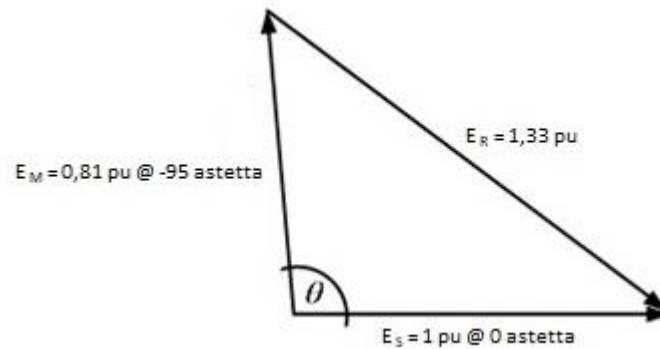
$E_R$  on tulos, jännite / taajuuden yksikköä kohti avoimen katkaisijan yli.

$E_S$  on uuden syöttölähteen jännite / taajuuden yksikköä kohti.

$E_M$  on kuormitetun väylän jännite / taajuuden yksikköä kohti.

$\cos \theta$  on uuden syöttölähteen ja kuormitetun väylän välisen vaihekulman kosini.

ANSI-standardi sisältää kuvan 2 graafisen esimerkin:



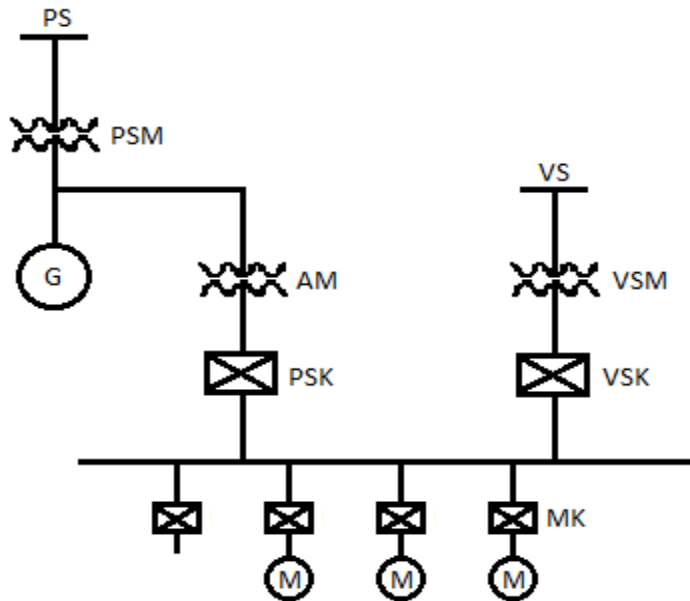
Kuva 2. Vektorikaavio määrittää tuloksen voltteja per hertsejä kohti uuden syöttölähteen sulkemisen aikana [6.].

1,33 V/Hz yksikköä kohti -kriteerien valinta kehitettiin tutkimuksista, jotka osoittivat, että tuloksena oleva ilmaraon vääntömomentti pahimmissa olosuhteissa oli olennaisesti sama kuin yksivaiheinen oikosulku moottorin liittimissä. Loukkuun jääneen vuon vaikutusta yhdessä V/Hz-kriteerin kanssa tarkasteltiin. [6.]

Rajoituksesta 1,33 yksikköä kohti, V/Hz, on tullut yleinen teollisuuskäytäntö sen helpon soveltamisen vuoksi ja mikä tärkeintä, koska se on ainoa moottorin mitoituksen suunnitteluun suoraan liittyvä peruste. Voi kuitenkin olla tarpeen myös vääntökoe tai tietokoneen simulointi moottorille ja siihen liitetulle mekaaniselle järjestelmälle. [6.]

### 3.1 Väylärakenne 1

Kuvan 3 tyyppinen väylärakenne on tarkoitettu palvelemaan yhtä kuormitettua väylää kahdesta eri syöttölähteestä. Pääsyöttölähde (PS) syöttää tehoa pääsyöttölähteen katkaisijan (PSK) kautta, kun taas vaihtoehtoinen syöttölähde (VS) syöttää tehoa vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan (VSK) kautta. [3.]

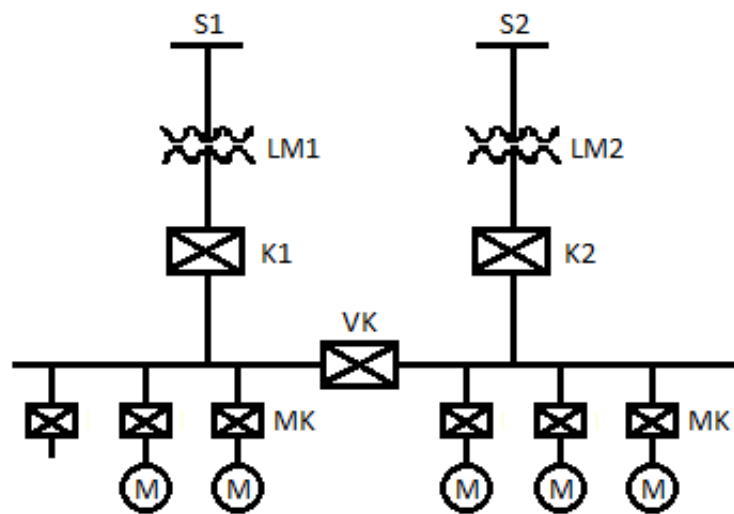


Kuva 3. Väylärakenne 1 [3.].

Laitoksen käynnistykseen ja alasajoon vaadittava teho saadaan vaihtoehtoisesta syöttölähteestä, kun generaattori on pois käytöstä. Laitoksen apulaitteisto on kytkettynä vaihtoehtoiseen syöttölähteeseen näissä tapauksissa. Apulaitteistoon kuuluvat mm. kattilan syöttöpumput, pakotetut tuulettimet, indusoituneet tuulettimet, jäähdytysvesipumput jne. Kun generaattori (G) on kytketty käyttöön, laitoksen apulaitteiston kuorma siirretään apumuuntajalle (AM), joka on kytketty pääsyöttölähteeseen. Kun apumuuntaja on kytketty pois, pääsyöttölähteelle aiemmin siirretyt kuormat on siirrettävä takaisin vaihtoehtoiselle syöttölähteelle. Tämä syötönvaihto voidaan tehdä joko manuaalisesti tai automaattisesti. Manuaaliset syötönvaihdot tehdään suunniteltujen käynnistysten ja alasajojen aikana. Automaattinen syötönvaihtotila on suositeltava, sillä se pitää moottoreiden ja muun kuorman ”kuolleen ajan” mahdollisimman pienenä. Tämä ”kuollut aika” on aika, jolloin laitteet ovat jännitteettömässä tilassa ja erityisesti tästä voi koitua ongelmia moottoreiden kanssa, jos kuollut aika pitkittyy. [3.]

### 3.2 Väylärakenne 2

Tyypillinen väylärakenne, jota käytetään prosessiteollisuudenlaitoksilla, kuten kemian laitoksissa, paperitehtaissa ja teräsvalssaamoissa, esitetään kuvassa 4. Tämän tyyppisessä väylärakenteessa on kaksi syöttölähdettä, joista molemmat syöttävät omaa väyläänsä. Nämä kaksi väylää on kytketty yhteen avoimella väyläkatkaisijalla (VK). Syöttölähde 1 (S1) on kytketty väyläänsä laitosmuuntajan 1 (LM1) ja katkaisijan 1 (K1) kautta ja vastaavasti syöttölähde 2 (S2) on kytketty väyläänsä laitosmuuntajan 2 (LM2) ja katkaisijan 2 (K2) kautta. [3.]



Kuva 4. Väylärakenne 2 [3.].

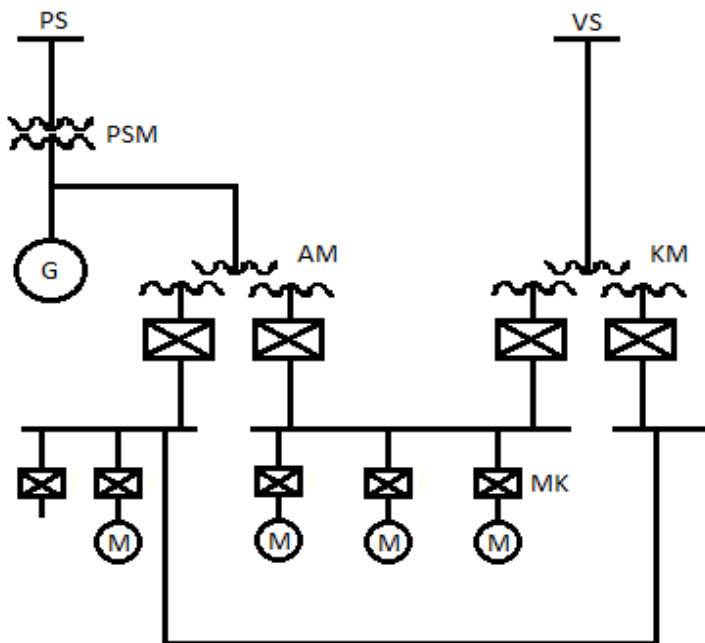
Väyläkatkaisijan sijainnin mukaan eri toimintatavat ovat mahdollisia. Normaali toimintatapa on pitää väyläkatkaisija auki, jolloin kumpikin syöttölähde syöttää omaa väyläänsä. Häätötilanteessa, joka saattaa johtuen vaikkapa laitosmuuntajan 1 vikaantumisesta, väylän kuormitukset siirretään toisen syöttölähteen varaan sulkemalla väyläkatkaisija ja avaamalla katkaisija 1, ja päinvastoin. [3.]

Prosessiteollisuudenlaitoksissa tehdään sekä manuaalisia että automaattisia syötönvaihtoja. Manuaalisia syötönvaihtoja käytetään prosessin käynnistyksen ja alasajon aikana. Syötönvaihto voidaan toteuttaa joko avoimena syötönvaihtona tai suljettuna syötönvaihtona. [3.]

### 3.3 Väylärakenne 3

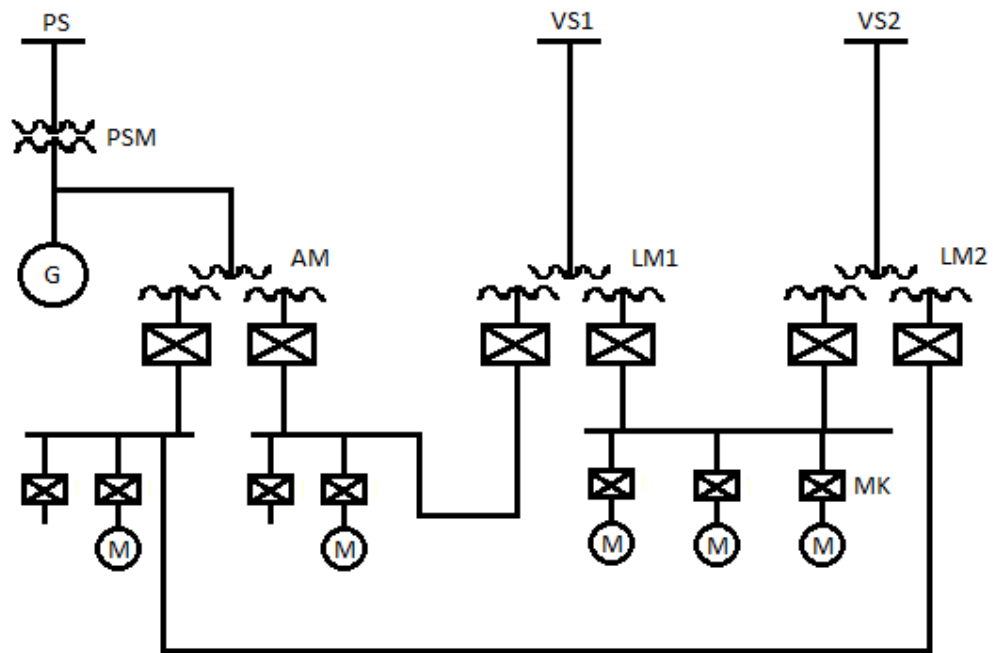
Ydinvoimalat käyttävät neljää eri väylärakennetta. Tässä kaksi laaja-alaisesti käytettyä väylärakennetta. Ydinvoimalaitoksissa palvellaan kahdenlaisia kuormituksia. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat apulaitteiston kuormat, jotka ovat välttämättömiä reaktorin sammutukseen, eristämiseen, reaktorin ytimen jäädytykseen ja suojarakennuksen lämmönpoistoon. Loput kuormitukset liittyvät laitoksen käyttöön ja ylläpitoon. Riippuen näiden kuormien syöttämisestä, väylärakenne muuttuu. [3.]

Ensimmäisessä väylärakenteessa kuormitukset saavat tehon normaalisti päägeneraattorilta apumuuntajan kautta. Kun pääsyöttö vikaantuu, kuormitukset siirretään vaihtoehtoiselle syöttölähteelle, joka syöttää tehoa laitoksen käynnistysmuuntajan kautta. Tämä väylärakenne on esitetty kuvassa 5. [3.]



Kuva 5. Väylärakenne 3 [3.].

Toisessa väylärakenteessa apulaitteiston kuormitukset saavat tehonsa vaihtoehtoiselta syöttölähteeltä 1, laitostenmuuntajan 1 kautta. Häätötilanteita varten on varauduttu vaihtoehtoisella syöttölähteellä 2. Laitoksen käyttö ja ylläpito kuormitus saa tehonsa tavallisesti päägeneraattorilta apumuuntajan kautta, kuten kuvassa 6 on esitetty. [3.]



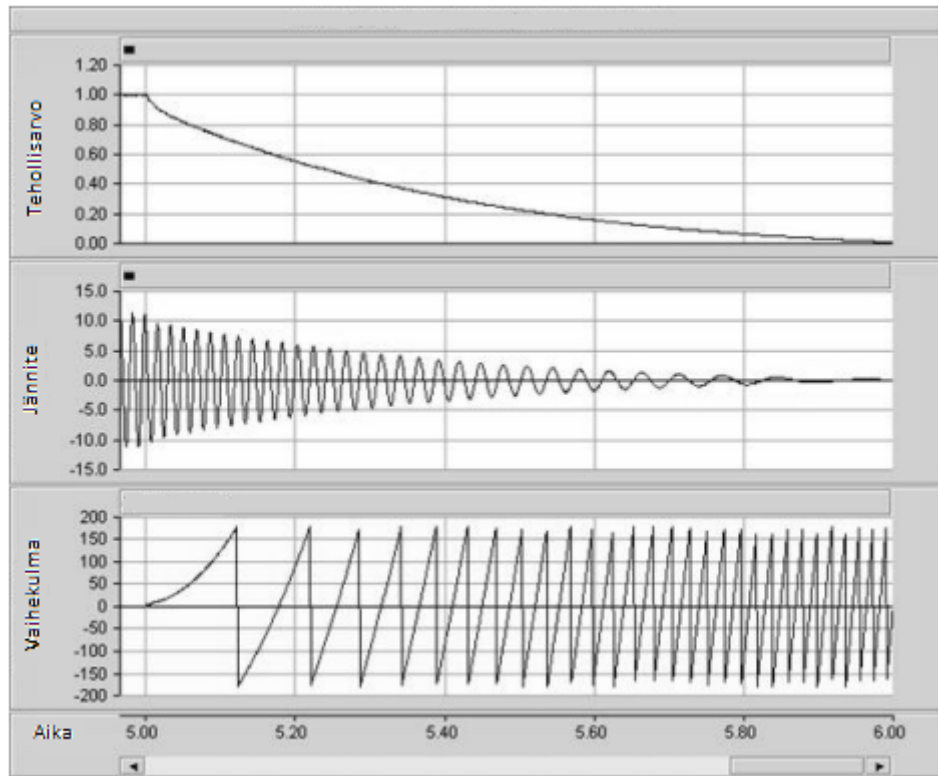
Kuva 6. Väylärakenne 3 [3.].

### 3.4 Moottorikuormitetun väylän kytkennät

Apulaitteiston kuormitukset ovat pääasiassa induktiomootteita. Kun induktiomoottori irrotetaan syöttölähteestä, moottorissa on jäännösjännite, joka muodostuu itse tuotetusta jännitteestä. Kolme tärkeää asetusta, jotka ovat ratkaisevia syötönvaihdon näkökulmasta ovat jäljelle jäävä jäännösjännite, sen purkautumisaika ja jäännösjännitteen vaihekulma. Jäännösjännitteen vaihekulma muuttuu syöttävän lähteen nimellistaajuuden (50 Hz tai 60 Hz) suhteen. [3.]

Tyypillisessä väyläjärjestelmässä voi olla useita moottoreita, jotka ovat hyvin erilaisia. Kun väylä on katkaistu, suurilla inertiakuormilla varustetut moottorit toimivat induktiogeneraattoreina, jotka syöttävät tehoa pienemmille moottoreille. Väylän jännitteellä on monimutkainen vaste siten, että jännite hajoaa nopeammin kuin suurimman yksittäisen moottorin jännite ja hitaammin kuin pienen moottorin jännite. Tärkeä haaste on yhdistettyjen moottorien väylän jännitteen avoimen piirin aikavakion (tai purkautumisvakion) estimointi. Tyypilliset alasajo-ominaisuudet on esitetty kuvassa 7. Moottoreilla kuormitettu

väylä, joka koostuu viidestä erilaisesta luokituksen ja kuorman induktiomoottorista, irrotettiin viidessä sekunnissa. Alasajo-ominaisuudet osoittavat jännitteen hajoamisen ja vaihekulman heilahduksen suhteessa vaihtoehtoiseen väylään. Väylän jännite laskee kokonaan nolnaan noin kuudessa sekunnissa. [3.]



Kuva 7. Tyypilliset alasajo-ominaisuudet [3.].

Syötönvaihtomenetelmä riippuu hajoamiskäyrän kohdasta, jossa kuormitettu väylä siirretään vaihtoehtoiselle syöttölähteelle. Jokaisella syötönvaihtomenetelmällä on omat ainutlaatuiset ominaisuudet ja piirteet, ja se tuo mukanaan monenlaisia haasteita syötönvaihdon toteutukseen. Onnistunut syötönvaihto riippuu kuhunkin laitokseen liittyvien alasajo-ominaisuuksien asianmukaisesta analysoinnista erilaisissa kuormitustilanteissa. Kun kuormitettu väylä kytketään uudelleen vaihtoehtoiseen syöttölähteeseen, on tärkeää tutkia hetkellisiä vääntömomenteja ja niiden vaikutuksia moottoreihin, kun suoritetaan uudelleenkäynnistys. Moottoreiden pyörivät massat, jotka on liitetty akseleilla, muodostavat vääntövasteen mekaaniseen järjestelmään, jota kiihdyttää hetkellisesti moottorin vääntömomentti, joka syntyy uudelleenkäynnistystyksen aikana. Tämä vääntömomentti



sisältää komponentteja useilla taajuuksilla, mukaan lukien voimajärjestelmän taajuus ja luistotaajuus. Tämä voi johtaa joko moottorin vääntömomenttien vaimennukseen tai vahvistumiseen. Siksi on suositeltavaa tutkia moottorin, käyttölaitteiden ja sähköjärjestelmän sähkömekaaniset vuorovaikutukset mihin tahansa järjestelmään, jossa käytetään nopeaa syötönvaihtoa. [3.]

## 4 Syötönvaihtomenetelmät

Syötönvaihtomenetelmät voidaan luokitella suljettuun tai avoimeen syötönvaihtoon. Suljettu syötönvaihto sisältää lyhyen rinnakkaisuuden syöttölähteiden välillä. Suljettuun syötönvaihtoon viitataan yleisesti myös rinnakkaissyötönvaihdolla. Tällöin uusi syöttölähde on kytketty väylään ennen vanhan syöttölähteen katkaisua, joten syötönvaihto suoritetaan ilman syötön keskeytystä. Avoimessa syötönvaihdossa syöttölähteitä ei aseteta rinnakkain, sillä vanha syöttölähde katkaistaan ennen uuden syöttölähteen kytkemistä väylään. Kun kuormitettu väylä on kytkettynä ilman syöttölähdettä, kuormien (=moottoreiden) nopeus hidastuu ja uuden syöttölähteen kytkeminen saattaa vaatia valvontaa.

Kaikissa syötönvaihtomenetelmissä, jos uusi syöttölähde ei täytä hyväksyttävän syöttölähteen ehtoja ja jos on mahdollista pysyä vanhan syöttölähteen piirissä, syötönvaihdon aloittaminen tulisi estää. Jos vanhassa syöttölähteessä pysyminen ei ole mahdollista ja vanhan syöttölähteen katkaisija on katkaistu, syötönvaihdon loppuunsaattaminen uuteen syöttölähteeseen tulisi niin ikään estää tai mahdollisesti syötönvaihtoa olisi viivästettävä kunnes uusi syöttölähde saadaan hyväksyttävien ehtojen piiriin. Tässä mainitussa tapauksessa syötönvaihtologiikka voitaisiin myös asettaa tarjoamaan syötönvaihtoa vaihtoehtoiselle uudelle syöttölähteelle. [5.]

### 4.1 Suljettu syötönvaihto

Suljetusta syötönvaihdosta käytetään myös termiä rinnakkainen syötönvaihto. Ennen rinnakkaisen syötönvaihdon aloittamista, väylän ja uuden syöttölähteen välinen jännite- ja vaihe-ero on arvioitava varmistaakseen, että väylä ja uusi syöttölähde ovat tahdissa toisiinsa nähden ja että uuden syöttölähteen jännite on hyväksytyjen rajojen sisällä. [5.]

Lisäksi valvontaan on sisällytettävä säännös, jos uuden syöttölähteen katkaisija on kiinni, mutta vanhan syöttölähteen katkaisija pysyy kiinni, syötönvaihtojärjestelmän on välittömästi laukaistava vanhan syöttölähteen katkaisija. Tämä sallii rinnakkaisen syötönvaihdon, mutta estää tahattoman rinnakkaiskäytön. Syötönvaihtojärjestelmän suunnittelulla on varmistettava, että rinnakkaiset olosuhteet ovat väliaikaisia, jotta voidaan rajoittaa altistumista rinnakkaissyötön aiheuttamille vioille samanaikaisen toiminnan aikana. Liialliset vikavirrat näissä olosuhteissa voivat rikkoa katkaisijoiden kestävyysluokituksia tai vaurioita voi syntyä lähdemuuntajille ja muille kytketyille laitteille. Joten, jos tapahtuu vikatilanne, jossa vanhan syöttölähteen katkaisija ei katkaise, uuden syöttölähteen katkaisijan tulee katkaista automaattisesti. [5.]

Rinnakkaista syötönvaihtoa ei voida käyttää ohimenevissä vikatilanteissa tai hätätilanteissa. Jos syötönvaihto aloitetaan ongelmien, kuten vanhan syöttölähteen vikaantumisen vuoksi, on käytettävä avointa syötönvaihtomenetelmää, joka ensin katkaisee ongelmallisen syöttölähteen katkaisijan ja valvoo sitten uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemista. [5.]

#### 4.2 Avoin syötönvaihto

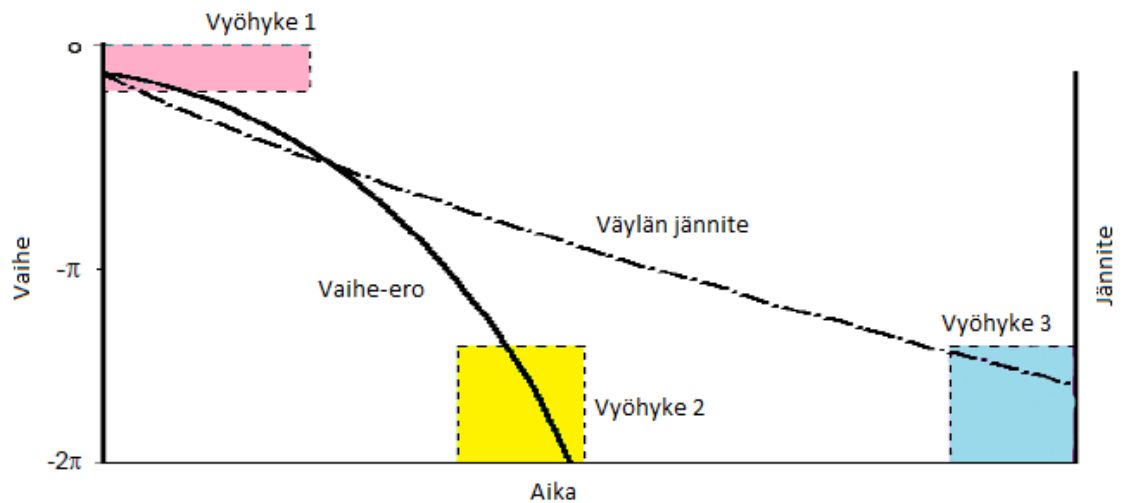
On olemassa kolme tapaa valvoa avointa syötönvaihtoa ja uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemista, kun tietyn menetelmän ehdot täyttyvät. Nämä menetelmät ovat:

- nopea syötönvaihto
- tahdistuva syötönvaihto
- jäännösjännitteinen syötönvaihto.

Lisäksi on olemassa kaksi tilaa, joilla aloitetaan uuden katkaisijan sulkemisprosessi:

- peräkkäinen
- samanaikainen

Kolme valvontamenetelmää esitetään graafisesti kolmella vyöhykkeellä kuvassa 8 väylän jännitteen ja vaihekulman vaimentuessa, kun väylä katkaistaan vanhasta syöttölähteestä.



Kuva 8. Avoimen syötönvaihdon vyöhykkeet [5.].

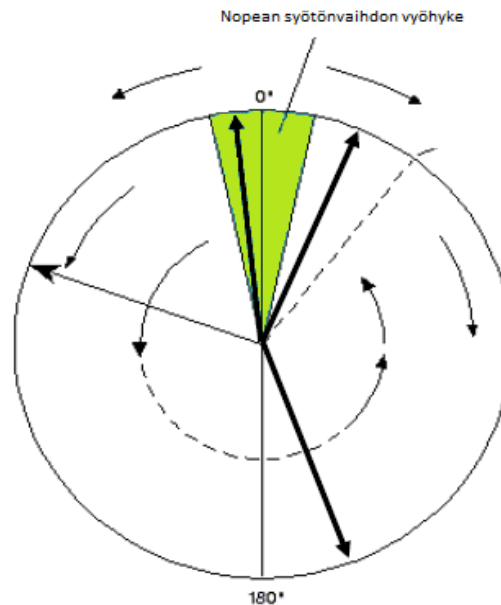
#### 4.2.1 Nopea syötönvaihto

Uuden syöttölähteen katkaisija suljetaan nopealla syötönvaihtomenetelmällä, jos vaihekulma on väylän ja uuden syöttölähteen välillä vaihekulmarajassa tai siirtyy siihen, vyöhyke 1. Tämä menetelmä vaatii tahdistuksen tarkistuksen ja mahdollisesti nopean tahdistuksen tarkistuslaitteen. Sulkemista voidaan myös valvoa ylä- ja alajännitteen tarkistuksella uudesta syöttölähteestä sen elinkelpoisuuden varmistamiseksi. [5.]

Syötönvaihtojärjestelmän on jatkuvasti tarkkailtava avoimena olevan syöttölähteen olosuhteita sen katkaisijan yli. Mukaan lukien nopeat olosuhteiden muutokset, jotka johtuvat ilmiöistä, joita voi tapahtua ennen syötönvaihtoa ja sen aikana. Siten mikä tahansa nopea muutos vaihekulmassa avoimeen uuden syöttölähteen katkaisijaan, joka tulee vyöhykkeelle 1 tai poistuu vyöhykkeeltä 1 ennen vanhan syöttölähteen katkaisijan laukaisua tai sen jälkeen, johtaa välittömään toimenpiteeseen uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemisen sallimiseksi tai estämiseksi. [5.]

Kuva 9 kuvaa tätä kahdella synkroskoopin osoittimella säätimen yläosassa, jotka edustavat kahta mahdollista alkuolosuhdetta. Ensimmäinen on vyöhykkeen 1 sisällä ja

mahdollistaisi uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemisen välittömästi, ja toinen on vyöhykkeen ulkopuolella oikealla puolella. Tässä toisessa tapauksessa väylä häiriintyisi katkaisun jälkeen, synkroskoopin osoitin pyörii aina vastapäivään, kun väylän kuorman eli moottoreiden nopeus hidastuu. Siksi lupaa sulkemiseen olisi odotettava, kunnes vaihekulma saavuttaa vyöhykkeen 1. [5.]



Kuva 9. Nopean syötönvaihdon vyöhyke [5.]

Tavanomaisilla tahdistuksen tarkistusreleillä on tyypillisesti minimiviive 0,1 sekuntia. Siihen mennessä, kun ne reagoivat heikentyvän väylän vaihekulmaan, onnistuneen syötönvaihdon mahdollisuus on voitu ohittaa. [5.]

Vielä ikävämpi tilanne koituu, jos liian hitaat tarkistusreleet päätyvät antamaan luvan syötönvaihdolla, jolloin syötönvaihto suoritetaan liian suurissa kulmavaiheissa ja moottorit voivat vaurioitua. Nopeat syötönvaihdot suoritetaan turvallisimmin nopealla tahdistuksen tarkistusreleellä, joka on erityisesti suunniteltu valvomaan väylän syötönvaihtoa. [5.]

#### 4.2.2 Tahdistuva syötönvaihto

Uuden syöttölähteen katkaisija suljetaan käyttämällä tahdistuvaa syötönvaihtomenetelmää ennustamalla liikettä kohti vaiheiden sattumaa väylän ja uuden syöttölähteen välillä. Sulkemista valvoo myös uuden syöttölähteen jännitteen ylä- ja alarajan sekä väylän ja uuden syöttölähteen välinen liukutaajuusrajan ( $\Delta F$ ) valvonta. Ennustetun vaiheen yhteensopivuuden laskentaa verrataan uuden syöttölähteen katkaisijan sulkeutumisaikaan tahdistuvaa syötönvaihtomenetelmää varten. Vaiheen yhteensopivuuden ennustamiseksi tarkasti, tahdistuvassa syötönvaihdossa käytetyn laitteen on tunnistettava nopeasti vaimeneva väylän taajuus ja vaihekulma, liukutaajuus ja liukutaajuuden muutos väylän ja uuden syöttölähteen välillä kompensoidakseen oikein katkaisijan sulkeutumisajan. Nopeaa, puolisyklin tai vähemmän, vastetta suositellaan. [5.]

Tämän menetelmän tarkoituksena on seurata jatkuvasti avoimen uuden syöttölähteen katkaisijan olosuhteita, mukaan lukien olosuhteiden nopea muutos, joka johtuu ilmiöstä, joita voi tapahtua ennen syötönvaihtoa ja sen aikana. Siten, jos yllä olevat ehdot täyttyvät, tämä järjestelmä on valmis sallimaan uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemisen siten, että katkaisijan navat ovat kiinni ensimmäisellä kululla nolla-asteen läpi. [5.]

Kuva 9 osoittaa tämän, kun synkroskoopin osoitin on valitsimen pohjassa ja edustaa mahdollista alkuolosuhdetta, joka on merkittävästi minkä tahansa hyväksyttävän sulkuvyöhykkeen ulkopuolella. Tässä tapauksessa väylän taajuuden laskiessa katkaisun jälkeen synkroskoopin osoitin pyörii aina vastapäivään, kun moottorit hidastuvat. Siksi sulkemisluvan on nyt odotettava, kunnes vaihekulma lähestyy katkaisija-aikaa ennen nollakulmaa, joka on merkitty katkoviivalla synkroskoopissa. Tämä on vyöhyke 2, joka on määritelty edeltävässä kuvassa, jossa katkaisijan sulkeminen aloitetaan 0-asteessa. [5.]

#### 4.2.3 Jäännösjännitteinen syötönvaihto

Uuden syöttölähteen katkaisija suljetaan jäännösjännitteisellä syötönvaihtomenetelmällä, jos väylän jännite laskee jäännösjännitteisen syötönvaihtorajan alapuolelle. Tämä on vyöhyke 3 kuvassa 8. Koska tätä ei ole vaihekulman tai liukutaajuuden suhteen tarkkailtu, tällä menetelmällä on estettävä uuden syöttölähteen katkaisijan sulkeminen, kunnes väylän jännite laskee alle ennalta määrätyn jänniterajan (yleensä  $<0,25pu$ )  $1,33pu$  V/Hz -rajoituksen varmistamiseksi. Toisaalta keskijänniteväylän syötönvaihdot on

suoritettava ennen kuin väylän jännite laskee niin alhaiseksi, että alijännitemoottorin suo-  
jaelementit aikakatkaisevat ja laukaisevat moottorit. Siksi väylän syötönvaihdon alijänni-  
teasetukset ja vaste on sovittava yhteen moottorin alijännitteen releajan kanssa moot-  
torin katkaisemisen estämiseksi. Pienjännitetasolla, jossa moottorit pidetään käynnissä  
kontaktoreilla, käytetään lukitus- tai tasavirtaohjaimia, jotta voidaan varmistaa, että kon-  
taktorit eivät katkaise. Syötönvaihtojärjestelmän alijännitereleen asetusarvon tarkkuus ja  
vastenopeus on mitattava ja toimittava oikein taajuuksilla, jotka ovat alle nimellisarvon,  
ja jännitteen heikentymisen muutoksen nopeudella. [5.]

Ajanjaksona, joka tarvitaan riittävään jännitteen alenemiseen odottamiseen, on huolestut-  
tavaa, että taajuus on jo heikentynyt väylän moottorien pysähtymiskohdan ohi. Tässä  
tapauksessa on harkittava tarvittavasta kuorman luopumisesta ja myös silloin, kun uusi  
syöttölähde ei voi kiihdyttää kaikkia moottoreita samanaikaisesti. Siksi tarvitaan laitoksen  
prosessin yksityiskohtainen analyysi tällaisen jäännösjännitteisen syötönvaihdon määrit-  
tämiseksi. Ohimenevän vääntömomentin vaikutus moottoreihin syötönvaihdon aikai-  
sessa uudelleenkäynnistyksessä tulisi rajoittaa käynnistysmomenttiin, ja moottoreiden  
uudelleenkäynnistys on järjestettävä oikein, jotta vältetään liiallinen jännitteen pudotus.  
Joka tapauksessa analyysi voidaan tarvita mahdollisen moottoreiden syöttökatkon kes-  
ton vuoksi. [5.]

Nämä tekijät estävät tämän menetelmän käyttämisen suunnitelluissa syötönvaihdossa  
käynnistysmuuntajalta yksikön apulaitteistolle voimalaitoksen käynnistyksen aikana.  
Yhteistuotantolaitoksilta saadut kokemukset korostavat epäonnistuneen jäännösjännit-  
teisen syötönvaihtojärjestelmän vaikutukset. Kuvailaan esimerkki tapaus, jossa voima-  
laitos koostuu kahdesta polttoturbiinista (60 MW) ja yhdestä lämmöntalteenottohöyrytur-  
biinista (70 MW). Höyryturbiinin ja kaasuturbiinin apulaitteet on kytketty toisiinsa. Juuri  
ennen kaasuturbiinin katkaisun aloittamista suojausjärjestelmä on asetettu tuottamaan  
aloituskomento syötönvaihtojärjestelmälle. Pitkä 140 millisekunnin syötönvaihtoaika johti  
jännitteeseen väylällä, joka oli moottorien katkaisimien releiden alijännite- ja aika-ase-  
tusten ulkopuolella. Höyryturbiinin apulaitteiden katkaisu johti höyryturbiinin katkaisuun.  
[5.]

#### 4.3 Avoimet syötönvaihtotilat uuden katkaisijan sulkemiseen

Jos peräkkäinen syötönvaihtotila on valittu, vanhan syöttölähteen katkaisija on katkaistava välittömästi, mutta uuden syöttölähteen katkaisijaa voidaan yrittää sulkea vasta, kun katkaisijan tilakontakti on vahvistanut, että vanhan syöttölähteen katkaisija on avautunut. Saatuaan tämän vahvistuksen, uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemisen valvomiseksi on käytettävä nopeaa, tahdistettua tai jäännösjännitteistä syötönvaihtomenetelmää. [5.]

Jos samanaikainen syötönvaihtotila on valittu, on käytettävä nopeaa, tahdistettua tai jäännösjännitteistä syötönvaihtomenetelmää uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemisen valvomiseksi odottamatta katkaisijan tilan yhteyskontaktin vahvistusta siitä, että vanhan syöttölähteen katkaisija on avautunut. Niin nopean syötönvaihtomenetelmän avulla vanhan syöttölähteen katkaisijan ja uuden syöttölähteen katkaisijan komennot katkaismiseksi ja sulkemiseksi voitaisiin lähettää samanaikaisesti vain, jos väylän ja uuden syöttölähteen välinen vaihekulma on välittömästi vaihekulman rajan sisällä syötönvaihdon aloittamisen yhteydessä. Muutoin vanhan syöttölähteen katkaisija aukaistaan, mutta uuden syöttölähteen katkaisijan sulkeutumisen on odotettava nopean, tahdistetun tai jäännösjännitteisen syötönvaihdon kriteereiden sallimia ehtoja. [5.]

On selvää, että samanaikainen syötönvaihtotila eliminoi aikaviiveen katkaisijan laukaisun vahvistukseen; tällaista syötönvaihtoa on kuitenkin valvottava nopealla katkaisinviikajärjestelmällä, jotta vältetään kahden syöttölähteen rinnakkainen käyttö, jos vanhan syöttölähteen katkaisija epäonnistuu avautumisessa. [5.]

#### 4.4 Kriteerit onnistuneelle syötönvaihdolle

Onnistuneelle syötönvaihdolle voidaan nimetä muutamia kriteereitä. Ensinnäkin onnistuneen syötönvaihdon ei tulisi altistaa laitoksen apulaitteita ”liialliseen käyttöön”, ja sen pitäisi johtaa laitos hallittuun alasajoon tai toiminnan jatkumiseen. [3.]

Suurin osa sähköntuotantolaitoksissa käytetyistä sähkömoottoreista on oikosulkumoottoreita. Näiden moottoreiden suorituskykyyn syötönvaihdon aikana tulisi kiinnittää huomiota. Kaksi parametria, jotka tulisi arvioida, ovat kytkentävelvoite ja uudelleenkytkentä. [3.]

Kun laitoksen apulaitteet siirretään pääsyöttölähteeltä vaihtoehtoiselle syöttölähteelle, suuri virtapiikki kulkee laitosmuuntajan läpi. Tällöin on huolehdittava siitä, että laitosmuuntajaa ei kuormiteta suuremmin kuin valmistajan määrittämä raja antaa luvan. [3.]

Viimeinen kriteeri, joka on tärkeä arvioitaessa syötönvaihtolaitteiston suorituskykyä, on apulaitteiden kyky ylläpitää tai palauttaa prosessin vaatimukset, jotka ovat kriittisiä turvallisen alasarjan kannalta, ja on vaikeinta määrittellä täsmällisesti. Tärkeää tässä vaiheessa on oikea valinta kuormien suhteen, jotka siirretään vaihtoehtoiselle syöttölähteelle. [3.]

## 5 Olosuhteet syötönvaihdon aikana

Jotta voidaan ymmärtää riittävästi onnistuneen avoimen syötönvaihdon kriteereihin liittyviä kysymyksiä, on ensin tarkasteltava avoimen vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan olosuhteita, joka on lopulta suljettava aiheuttamatta vahinkoa moottoreille tai prosessille, johon se on osallisena. Syötönvaihdon aloittamiseksi on otettava huomioon mahdolliset olosuhteet tai tapahtumat, joita voi tapahtua juuri ennen pääsyöttölähteen katkaisijan avaamista. Nämä olosuhteet tai tapahtumat vaikuttavat vaiheen kulma- ja taajuuseroon avoimen vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan tai vaihtoehtoisen syöttölähteen jännitteen välillä. Lisäksi heti pääsyöttölähteen katkaisijan avaamisen jälkeen tapahtuu muita ilmiöitä, jotka vaikuttavat edelleen vaihekulma- ja taajuuseroon avoimen vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan välillä ennen kuin yritetään sulkea se syötönvaihdon loppuun saattamiseksi.

### 5.1 Ominaisuudet juuri ennen syötönvaihdon käynnistämistä

Jännitteen vaihekulmaero pääsyöttölähteen ja vaihtoehtoisen syöttölähteen välillä voi olla huomattava. Tämä tapahtuu jäljempänä mainituista syistä.

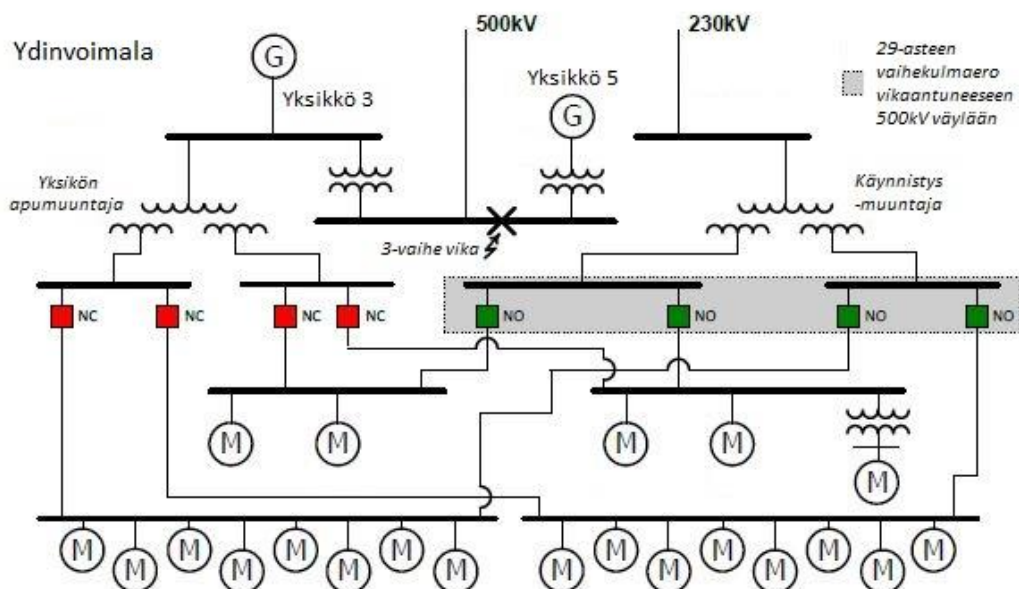
Jännitteen vaihekulmaan avoimen katkaisijan yli ennen siirtymistä pääsyöttölähteestä vaihtoehtoiselle syöttölähteelle vaikuttavat:



- vian vaikutukset
- järjestelmien erottaminen toisistaan syöttölähteiden välillä
- epätahdistuneen generaattorin katkaisun vaikutukset
- lähdemuuntajan käämitysvaiheen vaihto.

### 5.1.1 Vian vaikutukset

Pääsyöttölähteen vikaantuminen, kuvassa 10 olevan yksikön 3 generaattorin tapauksessa 500 kV-väylällä, on tapahtuma, joka laukaisee syötönvaihdon. Kuormitettu väylä on kytketty vialliseen syöttölähteeseen ennen syötönvaihtoa, jolloin vikaantuminen ja vian läheisyys väylälle aiheuttaa dynaamisen muutoksen vaihekulmassa vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijassa juuri ennen syötönvaihtoa. Kuvassa 10 3-vaiheinen 500 kV -vika aiheuttaa 29° vaiheen siirtymisen käynnistyskatkaisimien yli vaihtoehtoisesstä syöttölähteestä, 230 kV:n syötöstä. Syötönvaihtojärjestelmä tunnistaa nopeasti kaikki vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan kautta ilmenevät dynaamiset vaihekulman muutokset. Tahdistuksen tarkistusreleiden on kyettävä vastaamaan vaihekulman äkilliseen muutokseen ja estämään tahdistamaton syötönvaihto, mikä voi johtaa vaurioihin suurissa reaktorin jäähdytyspumpeissa syötönvaihdon aikana.



Kuva 10. Pääsyöttölähteen vikaantuminen [5].

Vaihtoehtoisen syöttölähteen kunto on tarkistettava nopeasti ennen syötönvaihtoa sen varmistamiseksi, että syötönvaihdon käynnistäneet tapahtumat eivät ole vaikuttaneet myös vaihtoehtoiseen syöttölähteeseen.

### 5.1.2 Järjestelmän erottaminen syöttölähteiden välillä

Järjestelmää voidaan syöttää syöttölähteistä, joissa on eri jännite. Esimerkiksi voimalaitoksissa on yleistä, että yksikön apumuuntajaa (pääsyöttölähde) syötetään generaattorin liittimistä generaattorin ollessa kytkettynä erityisen korkeajännitteeseen (500 kV, 345 kV, 230 kV) siirtojärjestelmään. Käynnistysmuuntaja (Vaihtoehtoinen syöttölähde) voidaan kytkeä matalajännitteeseen siirtojärjestelmään (tyypillisesti 161 kV, 138 kV, 69 kV). Tämä voi johtaa huomattavaan jännitteen vaihekulmaeroon kahden syöttölähteen välillä, koska nämä kaksi syöttöä tulevat sähköisen järjestelmän eri osista. Riippuen kahden syöttölähteen välisistä tehonvirtausominaisuuksista tämä vaihekulma vaihtelee jatkuvasti. Lisäksi, jos molemmat syöttölähteet eristyvät täysin, liukutaajuus kehittyy vaihtoehtoisen syöttölähteen katkaisijan yli siten, että jännitteen vaihekulmaero kahden syöttölähteen välillä voi olla merkittävä, kun syötönvaihto aloitetaan.

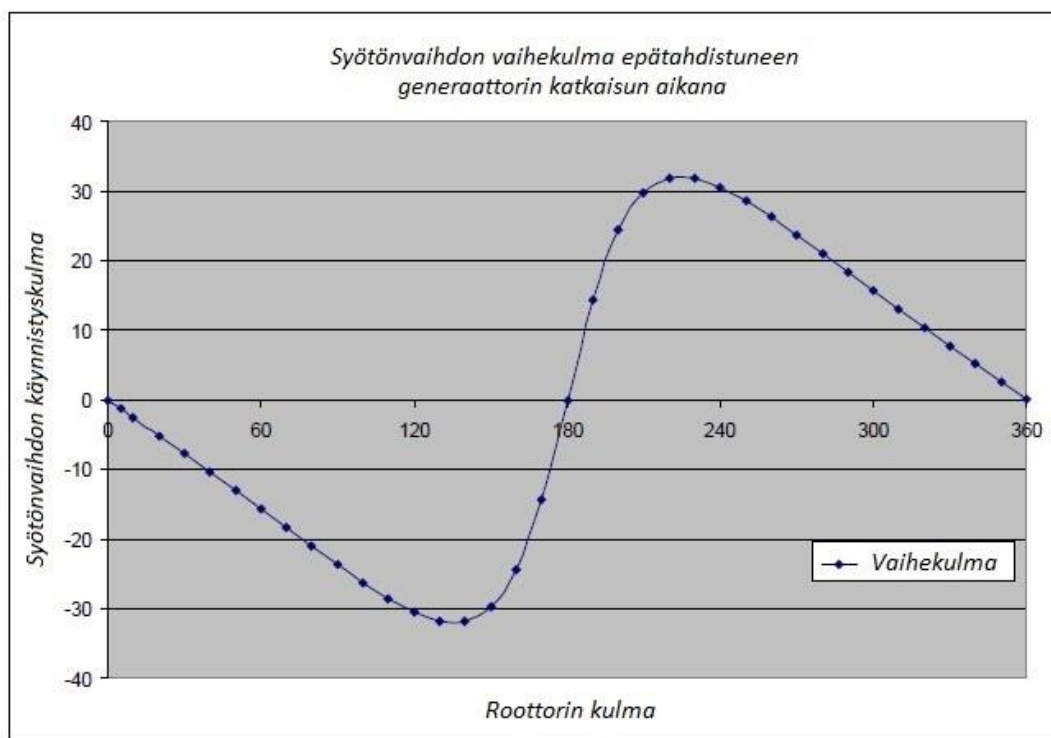
Sähköisen järjestelmän epänormaali toiminta voi aiheuttaa suuren seisovan vaihekulman kahden syöttölähteen välillä väylään. Esimerkiksi järjestelmiä toisiinsa yhdistävän muuntajan menetys tai katkaisimien avautuminen rengasväylässä voi johtaa kahden syöttölähteen välisen etäisyyden lisääntymiseen väylällä.

Normaaliolosuhteissa pääsyöttölähteen apumuuntaja syöttää koko kuorman vaihtoehtoisen syöttölähteen käynnistysmuuntajan ollessa kuormittamattomana. Seuraavat reaktiiviset häviöt aiheuttavat jännitteen vaihekulman siirtymisen kahden syöttölähteen välillä. Tämä vaihekulman muutos on yleensä paljon pienempi kuin edellä mainitut järjestelmän epänormaalit olosuhteet. Lähteitä 1 ja 2 syöttävien muiden ylävirran muuntajien kuormitus voi myös vaikuttaa vaihekulman muutokseen.

### 5.1.3 Epätahdistuneen generaattorin katkaisun vaikutukset

Tämä esimerkki osoittaa syöttölähteiden välisen dynaamisen erottelun vaikutukset, tässä tapauksessa järjestelmän ja generaattorin. Kuvasta 11 ilmenee, suurjänniteväylän ja generaattoriterminaalien välinen vaihekulmaero katkaisun kohdalla on väylän syötönvaihdon alkukulma.

Vaiheittainen rele on tarkoitettu suojaamaan generaattoria toimimasta asynkronisesti sähköjärjestelmän kanssa. Rele on tyypillisesti ohjelmoitu katkaisuun, kun generaattorin sisäinen vaihekulma on välillä 120–240 astetta suhteessa sähköjärjestelmään. Tämä suuri sisäinen tehonkulma saa vaihekulman käynnistyskatkaisijan yli siirtymään odotettua korkeampiin arvoihin. Kuvan 11 kaavio näyttää kuinka syötönvaihdon aloituskulmaan voi vaikuttaa generaattorin sisäisen roottorin kulman vaihtelu. Kuten kuvasta 11 käy ilmi, aloituskulma voi vaihdella yli 30 astetta generaattorin navan luisun vuoksi.



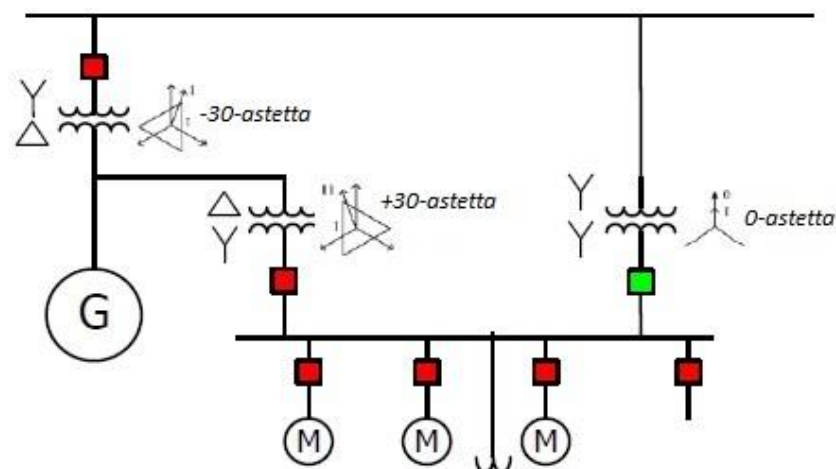
Kuva 11. Epätahdistuneen generaattorin katkaisu [5.].

Laitoksessa, jossa vaiheittainen rele katkaisee yksikön katkaisijan, mutta ei välittömästi katkaise yksikön apukatkaisinta, väylän jännitteen vaihekulma muuttuu merkittävästi

generaattorin jännitteen vaihekulman vuoksi yksikön katkaisu hetkellä. Jos väylä jätetään kytkettynä generaattorin liittimiin, väylän jännite hyppää nopeasti uuteen vaihekulmaan johtuen generaattorin sisäisen jännitteen vaihekulmasta. Tämä johtuu generaattorin reaktanssista suhteessa väylän moottoreiden ja yksikön apumuuntajan vastaavaan reaktanssiin. Vaihekulman muutos tapahtuu erittäin nopeasti, koska sitä säätelevät yksinomaan generaattorin sisäinen jännite ja moottorien sähkövoima.

#### 5.1.4 Lähdemuuntajan käämitysvaiheen vaihto

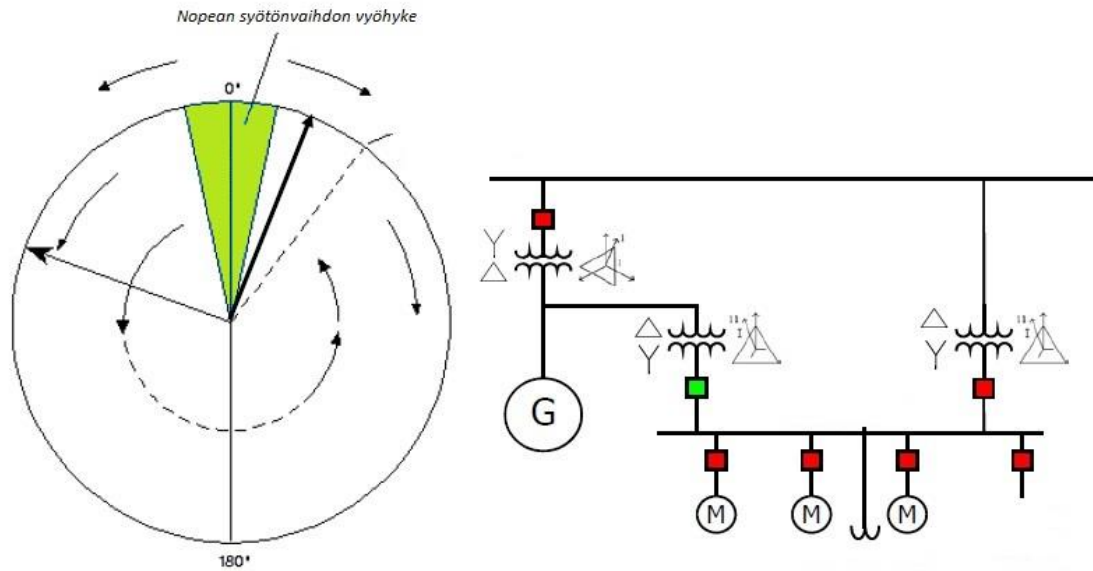
Järjestelmissä, joissa generaattori on kytketty yksikköön käytetään tyypillisesti tähtikytkentäistä tai kolmiokytkentäistä käynnistysmuuntajayhteyttä, kuva 12. Tämä johtaa samassa vaihekulmassa (=nollakulmassa) suoritettavaan syötönvaihtoon yksikön apumuuntajan ja käynnistysmuuntajan välillä. Tässä tapauksessa suljetut syötönvaihdot (rinnankäyttö) ovat mahdollisia ja avoimet syötönvaihdot ja nopeat syötönvaihdot ovat sallittuja, jos synkronoinnin tarkistuksen valvonta on riittävän nopea ja katkaisijoiden nopeudet.



Kuva 12. Generaattorilla varustettu yksikkö tähtikytkentäisellä käynnistysmuuntajalla [5.].

Joissakin laitoksissa on määritelty kolmio-tähtikytkentäinen -käynnistysmuuntaja, joka luo 30 asteen vaihekulmaeron yksikön ja käynnistysmuuntajien välillä.

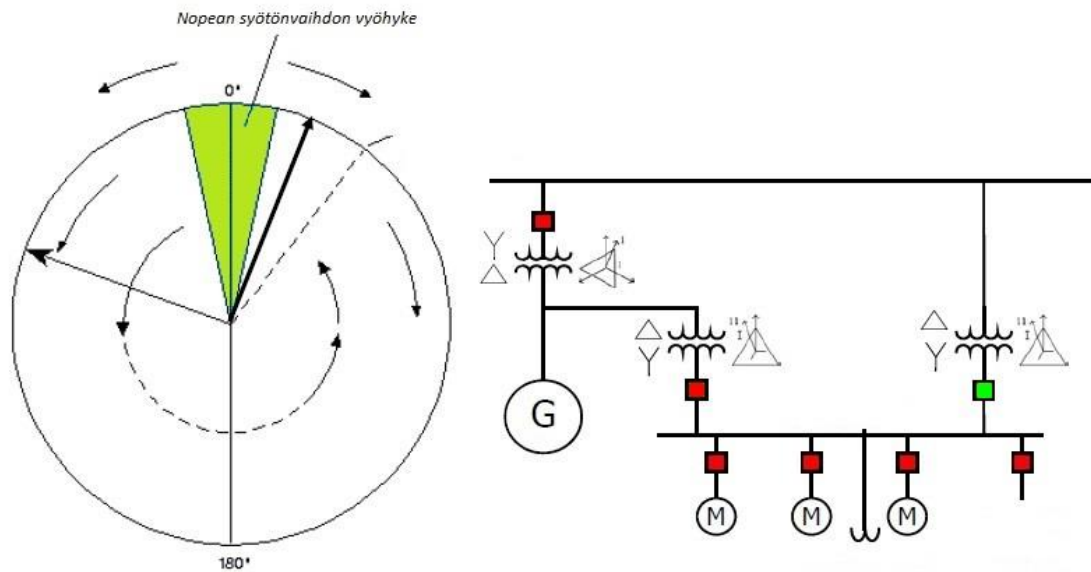
Käynnistysmuuntajan syöttölähde johtaa yksikön apumuuntajan syöttölähdettä 30 astetta kuvan 13 osoittamalla tavalla. Rinnakkaiset syötönvaihdot eivät ole mahdollisia. Kun käynnistysmuuntajan katkaisija avautuu, väylän kuormitetut moottorit alkavat menettämään nopeuttaan, mikä siirtää väylän jännitettä kohti yksikön apumuuntajan jännitettä. Näissä tapauksissa suositaan nopeaa syötönvaihtoa.



Kuva 13. Generaattorilla varustettu yksikkö kolmio-tähtikytkentäisellä käynnistysmuuntajalla [5.].

Yksikön apulaitteiden syötönvaihdon käynnistys, tahdistetun syötönvaihdon mahdollisuus

Yksikön apumuuntajan syöttölähde jätetään käynnistysmuuntajan syöttölähteeseen 30:llä asteella, kuten kuvassa 14 esitetään. Kun yksikön apumuuntajan katkaisija avautuu, väylän moottorikuorman nopeus alkaa hidastua, mikä siirtää väylän jännitteen pois käynnistysmuuntajan jännitteestä. Näissä tapauksissa suositaan tahdistettua syötönvaihtoa.



Kuva 14. Generaattorilla varustettu väylä kolmio-tähtikytkentäisellä käynnistysmuuntajalla [5].

## 5.2 Ominaisuudet, kun syötönvaihto kesken

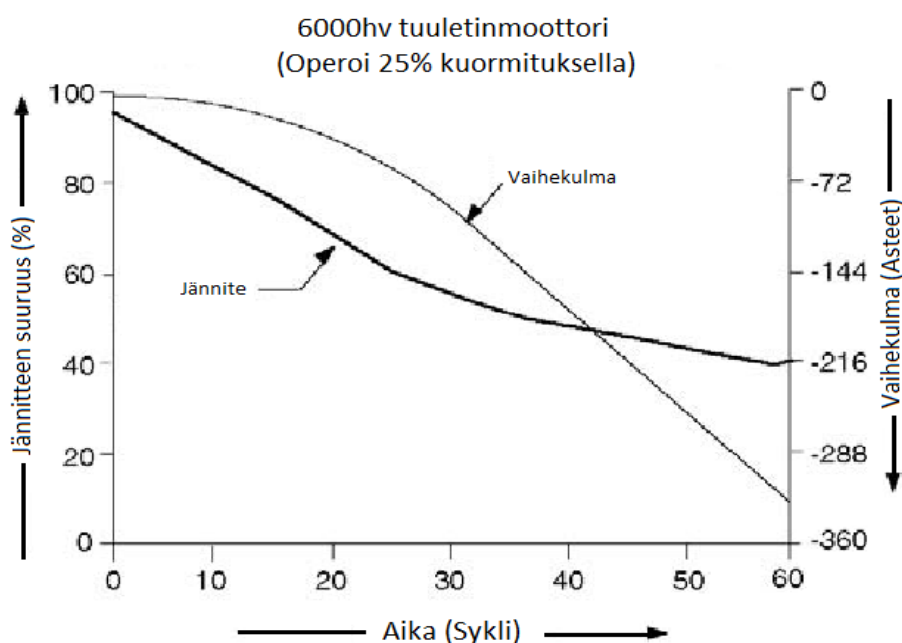
### 5.2.1 Ohimenevät vaikutukset moottorikuormituksen katkaisuun

Välittömästi alkuperäisen pääsyöttölähteen katkaisijan avaamisen jälkeen synkronisten ja induktiomootorien sekoitus väylässä kehittää väylässä jännitteen, joka määritetään useilla tekijöillä. Ensimmäinen näistä on induktiomootoreiden ominaispiirteitä, jolloin ne osoittavat olennaisesti välitöntä vaihesiirtoa moottorin irrotettaessa. 11 850 hv:n täydellä kuormalla toimivassa 7 860 hv:n induktiomootoriin perustuva simulointi tuotti lähes 10 asteen hetkellisen vaihesiirron hitaassa suunnassa irrotettaessa. Tämä vaikutus on lisäksi olosuhteisiin, jotka johtuvat muista syistä, etenkin kun katkaisu tapahtuu väylän vian jälkeen.

Tätä vaikutusta seuraa seuraava väylän taajuuden heikkeneminen, jonka nopeus riippuu väylään kytkettyjen moottorien yhdistetystä hitaudesta ja kuormituksesta.

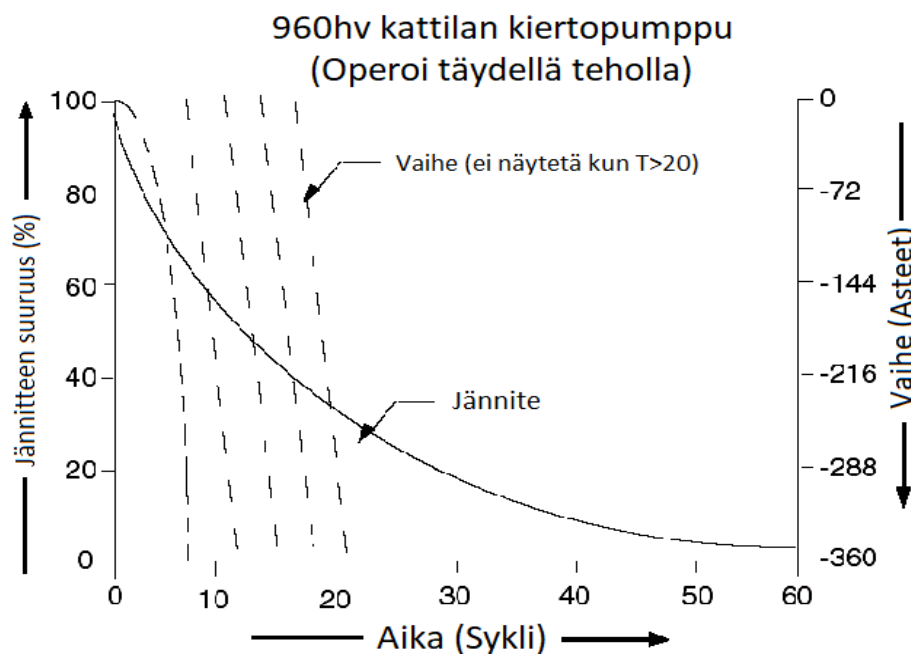
### 5.2.2 Väyläjännitteen ja vaiheen heikkenemisominaisuudet syötönvaihdon aikana

Yleensä väylän jänniteominaisuudet riippuvat väylän kuormituksista, jotka toimivat syötönvaihdon aikana. Suurin osa apulaitteiston moottoreista on induktiomootoreita ja muutamia synkronointimoottoreita, joita käytetään yksittäisissä tapauksissa. Käytettävien moottoreiden tyypit määrittävät suuressa määrin apulaitteiston väylien jänniteominaisuudet. Tässä käsitellään induktiomootoreita, koska niitä käytetään normaalisti. Esitetyt käsitteet ovat kuitenkin voimassa myös väylillä, joilla on synkronointimoottoreita. Kun väylä irrotetaan syöttölähteestä, moottoreiden liike-energia synnyttää väylälle jännitteen. Jännitteen alkuperäinen suuruus riippuu syöttölähteen eheydestä ennen katkaisua. Kolmi-vaihevika syöttävän generaattorin muuntajassa tai tehtaan lähellä olevassa suurjänniteväylässä voi kokonaan purkaa laitoksen väylän ja jäljelle jäävä jännite on olematon. Kuitenkin kaikissa muissa tapauksissa väylälle muodostuu huomattava jännite. Indusoituneella jännitteellä on dynaaminen amplitudi- ja vaiheominaisuus, joka riippuu moottorien kuormituksen inertiasta ja moottoreiden liike-energiasta. Kahden induktiomootorin ominaisuudet on esitetty kuvissa 15 ja 16. Kuva 15 edustaa 6000hv:n tuuletinmoottoria, joka toimii 25 prosentin kuormituksella ennen syötönvaihtoa. Tämä on esimerkki suuresta moottorista, jolla on suuri inertiakuormitus. Jännitteen suuruus vaatii 42 sykliä pudottaakseen 50 prosenttia alkuperäisestä arvosta ja kulma ottaa yli 60 sykliä 360 asteen kiertämisen suorittamiseksi.



Kuva 15. Tuuletinmoottorin ominaisuudet syötönvaihdon aikana [5].

Kuvassa 16 esitetyn 960 hv:n kattilan kiertopumpun moottori osoittaa dramaattisia ominaisuuksien vaihteluita syötönvaihdon aikana. Jännitteen suuruus laskee 50 prosenttiin 10 syklin aikana ja vaihe suorittaa 360 asteen pyörimisen alle kahdeksassa syklissä.



Kuva 16. Kiertopumpun ominaisuudet syötönvaihdon aikana [5.].

Tyypillisessä väyläjärjestelmässä voi olla useita moottoreita, joilla on hyvin erilaiset luokitukset. Kun väylä katkaistaan, suuret moottorit, joilla on suuri inertiaalinen kuormitus, toimivat kuten generaattorit, jotka syöttävät tehoa pienempiin moottoreihin. Väylän jännitteellä on monimutkainen keskimääräinen vaste siten, että väylän jännite hajoaa nopeammin kuin suurimman yksittäisen moottorin jännite ja hitaammin kuin pienen moottorin jännite.

Joitakin yleistyksiä voidaan tehdä moottorityypin, koon ja kuormitusominaisuuksien vaikutuksesta väyläjännitteen taajuuteen ja jännitteen vähenemiseen kytkettyjen moottorien kokonaisvaikutusten takia.

- Moottorin koko: Mitä suurempi moottori, sitä pidemmän ajan jännitteen heikentyminen vie induktiomoottorilla.
- Kuormitus: Mitä suurempi moottorien kuormitus on, sitä nopeammin väylän taajuus heikentyy.



- Hitaus: Mitä hitaammin väylän moottorien kuormituksen nopeus muuttuu, sitä hitaammin väylän taajuus heikentyy katkaisun aikana. Tämä vaikuttaa suoraan siihen, kuinka nopeasti vaihekulma muuttuu. Pienet hitauskuormat aiheuttavat vaihekulman muutoksen nopeasti, koska väylän taajuus laskee nopeasti, ja väylän ja uuden syöttölähteen välinen liukutaajuus kasvaa nopeasti (inertiaalinen varastoitu energia).
- Synkronisten ja induktiomoottorien yhdistelmä: Jännitteellä on taipumus rappeutua nopeammin väylässä, jossa kaikki moottorit ovat induktiomoottoreita. Väylässä, jossa on yhdistelmä synkronisia ja induktiomoottoreita, synkroniset moottorit yrittävät pitää jännitettä syötönvaihdon aikana.

## 6 Simulointi, kenttätestaus ja tekninen päätöksenteko

### 6.1 Analyttinen simulointi

Analyttisen simuloinnin (mallinnuksen) määritelmän pitäisi johtaa lähimpään esitykseen siitä, mitä voidaan odottaa syötönvaihtojärjestelmän toteutuksesta reaali maailmassa, ja siksi sen tulisi olla ensisijainen menetelmä, kun suunnitellaan syötönvaihtolaitteiston hankintaa.

Suunnittelusimulaatiot vaativat matemaattisen mallintamisen sovellukseen liittyvistä elementeistä, kuten moottoreista, katkaisijoista, ym. järjestelmään liitetyistä kuormista. Lisäksi vaaditaan tietokoneavusteinen analyysi, joka sallii muuttujien muuttamisen, jotta voidaan ennustaa järjestelmän käyttäytymistä eri olosuhteissa.

Nykyaikaisissa sovelluksissa syötönvaihtojärjestelmien kehittämisessä on turvauduttu tekniikkaan, joka perustuu kokemukseen ja testaukseen. Kenttämittauksia käytetään usein syötönvaihtojärjestelmän asetusten kehittämiseen. [5.]

Simulaatiolla on seuraavia etuja tekniikan hankintaan nähden.

- Simulointi vaatii useampien todellisten sovelluksien muuttujien käyttämistä sen sijaan, että pohjaudutaan useisiin oletuksiin perustuvanlaatuiseen analyysiin sijasta.
- Simulointi antaa tarkemman vastauksen arvioinnista muuttuvissa olosuhteissa ja auttaa määrittelemään sovelluksen toimintarajat.
- Simulaatio heijastaa todellista sovellusta ja auttaa luomaan käyttäjille luottamusta ennen syötönvaihtojärjestelmän varsinaista toteuttamista.
- Simulaatio muuttaa valmistelun ja harjoituksen todelliseksi kokemukseksi. Tämä on todella tärkeää kokemuspohjaa erityisissä tai ainutlaatuisissa sovelluksissa. [5.]

Syötönvaihdon simuloinnilla voidaan määrittää väylän jännitteen suuruus ja taajuus, kun väylä on katkaistu syöttölähteestä. Simulaatiolla voidaan myös määrittää vaihekulma väylän jännitteen ja uuden syöttölähteen jännitteen välillä ennen väylän uudelleen kytkemistä. Lisäksi voidaan laskea moottoreiden virrat ja momentit sen jälkeen, kun moottoreille kytketään virta uudesta syöttölähteestä. Tätä tietoa voidaan käyttää määrittämään moottoreiden mallityyppi ja vaatimukset tietyille sovelluksille. [5.]

Tarkkaa simulointia varten tarvitaan yksityiskohtaisia järjestelmätietoja. Moottoreilta vaaditaan nimellisteho, jännite, taajuus, staattorin impedanssi, roottorin impedanssi, keskinäisinduktanssi, hitausvakio, kitkakerroin ja napojen lukumäärä. Osa näistä tiedoista ei ole saatavissa suoraan moottorin tyyppikilvestä. Toinen parametri, joka voi olla tärkeä tarkan simuloinnin kannalta, on kuorman vääntömomentin nopeusominaisuus. Joillakin kuormilla on vääntöominaisuus, joka on suhteellisen vakio nopeuden kanssa. Muilla kuormilla voi olla vääntömomentti, joka vaihtelee nopeuden neliön mukaan. Lisäksi monimutkaisten vääntömomentin nopeusominaisuuksien mallintaminen joissakin simulaatioissa ei välttämättä ole suoraviivainen tehtävä. [5.]

Tietyt simulaatiopaketit tarjoavat useita menetelmiä määrien, kuten vaihekulman tai jännitteen suuruuden laskemiseksi. Sovelluksesta riippuen nämä menetelmät voivat tuottaa ristiriitaisia tuloksia. Valitun menetelmän tulisi matkia syötönvaihtoreleen toimintaa. Tämä tarkoittaa tiettyä tietämystä tietystä releestä. Kuten kaikilla tietokonesimulaatioilla,

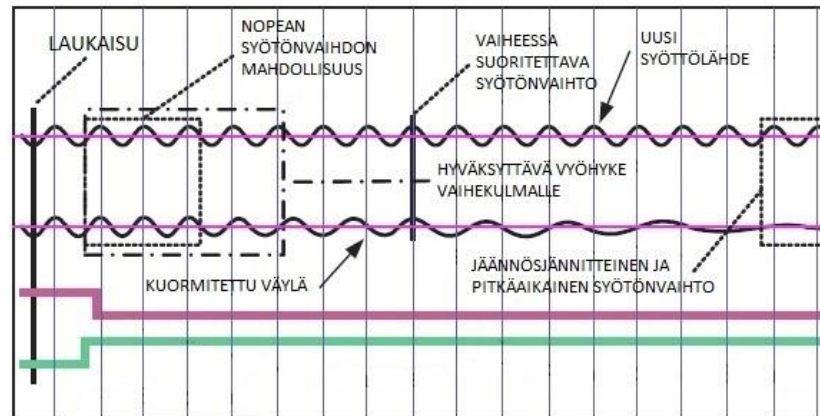
on ensiarvoisen tärkeää saada hyvä idea siitä, mitä odottaa ennen mallinnusta. Esimerkiksi viitteissä kuvataan kuinka arvioida moottorin nopeuden ja jännitteen väheneminen. Simulaatiotuloksia tulisi verrata tällaisiin laskelmiin mallin todentamiseksi. [5.]

## 6.2 Järjestelmän alasajotestaus

Avoimen syötönvaihtosuunnitelman toteuttamiseksi tarvittavien laitteiden valinnan yhteydessä suunnittelijan on ensin pohdittava, onko tietyllä väylällä moottorin koon ja tyyppin (induktio- ja synkroninen) ja niihin liittyvien kuormien sekoituksella riittävä inertia kestämään aika, joka tarvitaan nopeaan tai vaiheittaiseen syötönvaihdon suorittamiseen. Tämä aika riippuu mukana olevien katkaisijoiden nopeudesta ja laitteista, jotka valitaan seuraamaan ja hallitsemaan syötönvaihtoa. Releitä tai järjestelmiä on harkittava, jotka voivat tehdä tarvittavat nopeat laskelmat väylän ja uuden syöttölähteen jännitteen, taajuuden ja vaihekulman erojen tarkistamiseksi, ja sitten soveltaa nopeaa, tahdistettua tai jäännösjännitteistä syötönvaihtomenetelmää, joka mahdollistaa syötönvaihdon niin ettei moottoreille ja muille kuormille aiheudu häiriöitä prosessissa. [5.]

Testaus voi olla tarpeen syötönvaihtolaitteiston komponenttien vasteominaisuuksien tarkistamiseksi. Jos on mahdollista, että väylältä puuttuu riittävä hitaus mahdollistaa onnistunut syötönvaihto tarkasteltavissa olevien syötönvaihtolaitteiston komponenttien kanssa, jännitteen ja taajuuden heikkenemisominaisuudet on määritettävä. [5.]

Yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä väylän hitausominaisuuksien määrittämiseksi ja sen arvioimiseksi, onko nopea vai tahdistettu syötönvaihtomenetelmä tehokas, on suorittamalla alasajotesti. Alasajotesti sisältää väylän katkaisun odotettavissa olevissa nimellisolosuhteissa, jolloin väylä irrotetaan syöttölähteestä, tallennetaan aaltomuodot ja tarkkaillaan jännitteen ja taajuuden heikkenemisominaisuuksia väylän alasajossa, jolloin kytkettyjen moottoreiden nopeus hidastuu. Kuvan 17 tuloksena olevan oskillografisen aaltomuodon analyysi määrittää, onko väylän moottoreilla ja kuormituksilla riittävä inertia sallimaan nopea tai tahdistettu syötönvaihto onnistuneesti. [5.]



Kuva 17. Alasajon oskillografin tulos [5.]

On kuitenkin melko todennäköistä, että alasajotesti odotetuissa nimellisolosuhteissa, toisin sanoen laitoksen ollessa verkossa tai prosessin ollessa toiminnassa, ei ole sallittua. Siksi alasajotesti on ehkä suoritettava laitoksen ollessa esimerkiksi huoltoseisakin aikana vain osittaisen kuorman ollessa kytkettynä. Tällaisen simuloidun alasajotestin arvo, kun generaattori ei ole käynnissä on kyseenalainen, koska taajuuden ja jännitteen heikkenemisominaisuuksien välillä on eroja todellisen alasajon kanssa, kun verrataan normaalissa käytössä olevan laitoksen ja laitokseen, jossa suoritetaan vaiheittainen alasajotesti vain osittaisen kuorman ollessa kytkettynä. [5.]

### 6.3 Kenttähyväksyntätestaus

Jos syötönvaihtojärjestelmän toteuttamisessa käytettävien komponenttien dynaamisiin vasteominaisuuksiin luotetaan, ei ole tarpeen suorittaa alasajotestiä ennen syötönvaihtojärjestelmän toteuttamista. Suunnitteluprosessia, joka perustuu riittäviin tietoihin ja kokemukseen väylän suorituskyvyn arvioinnista, voidaan soveltaa moottorin koon ja tyyppien sekä niihin liittyvien kuormitusten yhdistelmän arviointiin. Lisäksi tällaisessa tapauksessa voidaan tosiasiallisesti suorittaa syötönvaihtojärjestelmän käyttöönoton ja kenttähyväksyntätestausten aikana osittainen alasajotesti, jännite-, liukutaajuus- ja vaihekulmarajojen alkuasetusten määrittämiseksi ja katkaisijoiden toiminta-ajan todentamiseksi. [5.]

Tällaisten testien aikana väylän syöttö katkaistaan ja suoritetaan syötönvaihto vaihtoehdoiselle syöttölähteelle, ja tulokseksi saatua V/Hz-arvoa, joka lasketaan uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemishetkellä, tarkkaillaan sen varmistamiseksi, että se on vahvistetun maksimiarvon 1,33pu V/Hz rajoissa. Tulokseksi saatua V/Hz-arvoa voidaan käyttää päätöksen tekemiseen, voidaanko turvallisempaa peräkkäistä syötönvaihtomenetelmää käyttää samanaikaisen syötönvaihtomenetelmän sijaan. [5.]

Lisäksi, jos tämä ensimmäinen testattu syötönvaihto saavutetaan nopealla syötönvaihdolla, niin matemaattista menetelmää voidaan käyttää ekstrapoloimaan ennustetut jännitteen ja taajuuden alaraja-ominaisuudet nopean syötönvaihdon muutaman ensimmäisen syklin oskillografiasta. Tämä voidaan tehdä riittävän tarkasti sen varmistamiseksi, että taajuuseroraja-asetus, joka valvoo tahdistettua syötönvaihtoa, on asetettu todellisen liukutaajuuden yläpuolelle ensimmäisen vaiheen sattumalta, jotta syötönvaihtoa ei estetä. Sitä voitaisiin myös käyttää määrittämään jäännösjännitteisen syötönvaihtomenetelmän asetus ja tehokkuus varamenetelmänä. Jäännösjännitteisen syötönvaihtoasetuksen on varmistettava, että moottorin väylän jännite ei ole laskenut liian alhaiseksi uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemishetkellä, tai moottorit eivät pysty kiihdyttämään. Jäännösjännitteisen syötönvaihdon -asetuksen on päinvastoin myös varmistettava, että väylän jännite ei myöskään ole niin korkea, että tahdistettu syötönvaihto ylittäisi vahvistetun enimmäisarvon 1,33 pu V/Hz. Uuden syöttölähteen katkaisijan sulkeutumisaika on otettava huomioon jännitteen määrittämiseksi uuden syöttölähteen katkaisijan sulkemiskohdassa. [5.]

## 7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoite muuttui ajansaatossa. Siirtymiseni täysipäiväisesti työelämään muutti työn tavoitetta ja lopulta tavoitteeksi asetettiin perehtyminen teollisuudessa käytävään syötönvaihtoon ja sitä suorittavaan syötönvaihtolaitteistoon.

Työhön kerättiin tietoja eri tutkimuksista, joissa on tutkittu syötönvaihtoa ja syötönvaihtolaitteistoa. Työhön materiaalia etsiessäni törmäsin useasti tilanteeseen, jossa materiaalia ei tuntunut millään löytyvän monista eri hakukeinoista huolimatta. Varsinkin suomenkielinen materiaali loisti poissaolollaan. Toivon mukaan tämä työ antaa lähtökohtia, kun seuraava tekijä päätyy syötönvaihtoa ja syötönvaihtolaitteistoa tutkimaan.

Työssä tuotiin esille syötönvaihtolaitteistolle tyypillisiä väylärakenteita teollisuuslaitoksista, syötönvaihdon monia eri menetelmiä ja käyttötapoja, ja syötönvaihdon aikaisia olosuhteita ja mahdollisia tilanteita. Näistä edellä mainituista löytää paljon lisää tietoa muun muassa lähteissä mainituista tutkimuksista.

Laitteille tehon syöttämisen tulisi olla ensisijaisesti aina tasaisen varmaa, joten syöttölähteeltä toiselle siirtyminen ei ole koskaan itsestäänselvyys varsinkin, kun puhutaan suurista kuormista. Viimeisessä kappaleessa on olennaista asiaa syötönvaihtolaitteistoon liittyvästä simuloinnista, testauksesta ja päätöksenteosta, kun halutaan suunnitella syötönvaihtolaitteiston lisäämistä laitosten apulaitteistoon.

## Lähteet

- 1 Vantaan Energia. 2020. Verkkoaineisto. Vantaan Energia. <<https://www.vantaan-energia.fi/me/vantaan-energia/>>.
- 2 Vinkit sähkökatkoissa 2020. 2020. Verkkoaineisto. Energiatiedollisuus. <[https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/varaustu\\_hairioihin/vinkit\\_sahkokatkoissa](https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/varaustu_hairioihin/vinkit_sahkokatkoissa)>.
- 3 Sidhu Tarlochan S., Balamourougan Vinayagam, Thakur Manish, Kasztenny Bogdan. 2005. A Modern Automatic Bus Transfer Scheme. Verkkoaineisto. <[http://ijcas.com/admin/paper/files/IJCAS\\_v3\\_n2\\_pp.376-385.pdf](http://ijcas.com/admin/paper/files/IJCAS_v3_n2_pp.376-385.pdf)>
- 4 Hunswadkar Girish, Viju N.R.. 2010. Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System. Verkkoaineisto. <[http://www.aptpower.com/downloads/papers/CBIP2010\\_Considerations\\_And\\_Methods\\_For\\_Effective\\_FBT.pdf](http://www.aptpower.com/downloads/papers/CBIP2010_Considerations_And_Methods_For_Effective_FBT.pdf)>
- 5 Gardell John, Fredrickson Dale. 2012. Motor Bus Transfer Applications Issues and Considerations. Verkkoaineisto. <[http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/IEEE\\_PSRC\\_Working\\_Group\\_J\\_9\\_Report\\_-\\_Final\\_Document\\_-\\_May\\_21,\\_2012.pdf](http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/IEEE_PSRC_Working_Group_J_9_Report_-_Final_Document_-_May_21,_2012.pdf)>
- 6 National Electrical Manufacturers Association. 2012. C50.41-2000 American National Standard for Polyphase Induction Motors for Power Generation Stations. IEEE/ANSI -standardi.