

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Julia Härmälä

VAIHEKATKON VAIKUTUKSET VOIMALAITOKSEN SÄHKÖJÄRJES-
TELMÄSSÄ

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Janne Karppanen

Työn ohjaaja: DI Mikko Keipi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Julia Härmälä

Vaihekatkon vaikutukset voimalaitoksen sähköjärjestelmässä

Diplomityö

2023

72 sivua, 30 kuvaa ja 7 taulukkoa

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Janne Karppanen

Työn ohjaaja: DI Mikko Keipi

Hakusanat: Vaihekatko, symmetriset komponentit, relesuojaus, ydinvoimalaitos,
ETAP

Vaihekatkot ovat sähköverkon vikoja, joissa yksi tai kaksi vaihetta on avoinna. Vaihekatkossa sähköjärjestelmään syntyy sähkölaitteille haitallista jännitteen ja virran epäsymmetriaa. Ydinvoimalaitoksilla ympäri maailmaa on raportoitu useita vaihekatkovoioista seuranneita tilanteita. Vaihekatko on osoittautunut vaikeaksi havaita ja siten ne ovat aiheuttaneet ydinlaitoksen turvallisuudelle tärkeiden laitteiden toimimattomuutta. Tämän työn tavoite on selvittää vaihekatkon vaikutukset Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksella ja arvioida suojalaitteiden toimivuutta vaihekatkon havaitsemiseksi. Vaihekatkon aiheuttaman jännitteen epäsymmetrian vaikutuksesta generaattoreiden, moottoreiden ja tehoelektronikan toiminta heikkenee ja niihin voi syntyä rakenneauriota. Sähköjärjestelmää syöttävät muuntajat sekä verkkoon kytketty moottorikuorma vaikeuttavat vaihekatkon havaitsemista ja vaihekatkovian sattuessa sähköjärjestelmän vaihejännitteet voivat näyttäytyä lähes normaaleina muuntajan kytkennän tai verkkoon kytketyn moottorikuorman vaikutuksesta. Vaihekatkon vaikutusten selvittämistä varten vaihekatkoja Olkiluoto 3 voimalaitoksen sähköjärjestelmässä on tässä työssä simuloitu ETAP-ohjelmalla. Mallia simuloimalla selvitettiin vaihekatkon aikaisia jännitteitä laitoksen sähköjärjestelmässä, joiden avulla arvioitiin suojalaitteiden toimivuutta. Simulointien tuloksista selviää, että verkon kuormittamattomassa käyttötilanteessa maadoittamaton ensiö- ja toisiopuolilta tähteenkytketty Y-y-muuntaja ei muodosta vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen jännitettä. Kuormitetussa tilanteessa verkkoon kytketyt oikosulkumoottorit tuottavat verkkoon vaihekatkon aiheuttamaa epäsymmetriaa pienentävää vaikutusta.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Julia Härmälä

The effects of open phase condition on the electrical system of a power plant

Master's Thesis

2023

72 pages, 30 figures and 7 tables

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila

D.Sc. Janne Karppanen

Supervisor: M.Sc. Mikko Keipi

Keywords: Open phase fault, symmetrical components, relay protection, nuclear power plant, ETAP

Open phase condition is a fault where one or two of three phases of the feeding network are disconnected. Open phase condition causes an unbalanced voltage condition in the network which is harmful to its electrical components. Several incidents of open phase conditions have been reported at nuclear power plants around the world. Operating experience has shown that open phase faults may be difficult to detect from an electrical system and that the conditions have led to inoperability of nuclear safety equipment. In this master's thesis the effects of open phase condition on Olkiluoto 3 nuclear power plant are reviewed. The operability of relay protection during open phase faults is evaluated. The effects of open phase condition in generators, motors and power electronics are their functional deterioration and structural damages caused by unbalanced currents. Transformers feeding the electrical system and induction motors connected to the network can cause difficulty detecting the open phase fault by balancing the unbalanced voltage condition. The voltages in the electrical system during an open phase fault may appear as normal due to structure or connection of transformer or due to the amount of motor load in the network. In this thesis the effects of open phase condition on the electrical system of Olkiluoto 3 were simulated using ETAP software. From the simulation results, it can be stated that during open phase fault on a network with no load the star connected Y-y transformer doesn't regenerate voltage in a lost phase. During open phase fault on a network with motor load in the induction motors generate voltage to the network and balance the unbalanced condition created by the open phase fault.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:lle Olkiluodossa sähkötekniikan yksikössä. Työn ohjaajina ovat toimineet sähkötekniikan pääinsinööri Mikko Keipi ja tarkastajina professori Jukka Lassila ja Janne Karppanen.

Haluan esittää kiitokset sähkötekniikan yksikköpäällikkö Jari Tauluvuorelle mahdollisuudesta diplomityön kirjoittamiseen ja sähkötekniikan pääinsinööri Mikko Keipille diplomityöaiheen ehdottamisesta ja työn ohjauksesta.

Olkiluodossa 24.4.2023

Julia Härmälä

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	7
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja rajausta	11
2 KOKEMUKSIA VAIHEKATKOTAPAHTUMISTA	12
2.1 Vaihekatkotapahtumia ydinvoimalaitoksissa maailmalla	12
2.1.1 Byron 1 & 2	12
2.1.2 Dungeness B	13
2.1.3 Forsmark 3.....	14
2.2 Vaihekatkoa koskevat säädökset ja suositukset.....	16
3 LASKENTA SYMMETRISILLÄ KOMPONENTEILLA.....	19
3.1 Symmetriset komponentit.....	19
3.2 Vaihekatkon kuvaus symmetrisillä komponenteilla	22
4 VAIHEKATKON YLEISET VAIKUTUKSET JA RELESUOJAUS	27
4.1 Vaikutukset muuntajaan	27
4.1.1 Maadoittamattomat Y- ja D-muuntajat	30
4.1.2 YN-d-muuntajat	31
4.1.3 YN-yn-muuntajat	31
4.2 Vaikutukset vaihtosähkökoneisiin	32
4.2.1 Vaikutukset generaattoriin.....	36
4.2.2 Vaikutukset oikosulkumoottoriin.....	38
4.3 Vaikutukset tehoelektroniikkaan.....	42
4.4 Suojareleiden rakenne ja toiminta.....	45
5 OL3-YDINVOIMALAITOKSEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	50
5.1 Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteet.....	51
5.2 Päägeneraattori, -muuntaja ja ulkopuolinen sähköjärjestelmä	52
5.3 Sisäinen sähköjärjestelmä.....	55
5.4 OL3-laitoksen sähköjärjestelmän relesuojaus	58
5.5 Jännitteenvälvontakonsepti.....	59
6 VAIHEKATKON SIMULOINTI	62
6.1 Simuloinnit ETAP-ohjelmistolla.....	62

6.1.1	Vaihekatko-työkalu	63
6.1.2	Malliverkolla simuloitua tilanteita	65
6.1.3	OL3-verkkomallilla simuloitua tilanteita	68
6.2	Johtopäätökset simulointituloksista	69
7	YHTEENVETO	71
	LÄHDELUETTELO	73

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

muuttujat

B	magneettivuon tiheys
E	jännitelähde
H	magneetikentän voimakkuus
I	virta
K	generaattorin vastajärjestelmän virran kestävyuden ominaisarvo
R	resistanssi
r	etäisyys
s	jättämä
T	vääntömomentti
t	aika
U	jännite
X	reaktanssi
Y	Jacobin matriisi
Z	impedanssi

kreikkalaiset aakkoset

ω	tahtinopeus
μ	permeabiliteetti

alaindeksit

0	nollajärjestelmä
1	myötäjärjestelmä
2	vastajärjestelmä
a	vaihe A
b	vaihe B
c	vaihe C
m	mekaaninen
m	moottori
n	nimellinen

r	roottori
s	staattori

lyhenteet

EDG	emergency diesel generator
EPR	European Pressurized Water Reactor
EU	Euroopan Unioni
IAEA	International Atomic Energy Agency
I&C	instrumentation and control
IEC	International Electrotechnical Commission
KTA	Nuclear Safety Standards Commission
PWM	Pulse width modulation
OL3	Olkiluoto 3
SBO	station black out
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SOER	Significant Operating Experience Report
STUK	Säteilyturvakeskus
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
UPS	uninterruptible power supply
WANO	World Association of Nuclear Operators
YVL	Ydinturvallisuusohjeet

1 JOHDANTO

Energian saatavuuden varmistaminen on yksi yhteiskunnan tärkeimmistä tehtävistä. Ilmas- tonmuutoksen hidastamiseksi globaalilla energiasektorilla on meneillään energiamurros, jonka myötä fossiilisista polttoaineista riippuvainen energiajärjestelmä korvataan hiilineut- raalilla ja päästöttömällä energiantuotannolla. Suomessa hiilineutraaliuteen halutaan päästä kansallisella ilmasto- ja energiastrategialla vuoteen 2035 mennessä (Valtioneuvosto, 2022).

Hiilineutraaliuden saavuttaminen edellyttää rakenteellisia muutoksia energiajärjestelmässä, fossiilisista polttoaineista luopumista ja uusiutuvan energiantuotannon lisäämistä. Hiilineut- raalien energiatoimien käytännön toteutuksessa ja kestävien investointien lisäämisessä Eu- roopan Unionissa (EU) on apuna taksonomia. Taksonomia on luokittelujärjestelmä, jossa laaditaan luettelo ympäristön kannalta kestävästä taloudellisesta toiminnasta. (European Comission, 2022) Siirryttäessä energiajärjestelmään, joka perustuu vahvasti sääolosuhteista riippuvaisiin uusiutuviin energiamuotoihin, korostuu tasaisen perustuotannon merkitys. Ydinenergia on tasaista ympäri vuorokauden tuotettavaa perusvoimaa ja tärkeä tukipilari energiamurroksessa siirryttäessä hiilineutraaliin energiajärjestelmään. Heinäkuussa 2022 ydinvoima hyväksyttiin EU:n taksonomiaan, mikä tarkoittaa, että se luokitellaan ympäristön kannalta kestäväksi investoinniksi (European Parliament, 2022). Puolet EU:n jäsenvaltioista käyttää ydinenergiaa osana energiajärjestelmiään ja pitkän aikavälin ilmastotavoitteiden saa- vuttamista (World Nuclear Association, 2022).

Suomessa ydinvoimaa tuotetaan Loviisassa kahdella voimalaitoksella yhteensä 1014 MWe teholla ja Eurajoen Olkiluodossa kolmella voimalaitoksella yhteensä 3380 MWe teholla. Vuonna 2021 ydinvoimalla tuotetun sähkön osuus oli 26 % kulutetusta sähköstä ja se tulee nousemaan noin 40 prosenttiin Olkiluoto 3 (OL3) voimalaitosyksikön aloitettua säännöllisen sähköntuotannon vuonna 2023. (Tilastokeskus, 2022., Fingrid, 2022).

Turvallisuuden varmistaminen on ydinenergian käytön edellytys kaikkialla maailmassa. Suomen ydinenergiailaissa on periaatteena, että ydinenergian käytön tulee olla yhteiskunnan kokonaisedun mukaista sen vaikutukset huomioon ottaen. Ydinenergian käytön on oltava turvallista, eikä siitä saa aiheutua vahinkoa ihmisille, ympäristölle tai omaisuudelle. (Ydin- energialaki 1987/990) Turvallisen käytön varmistamiseksi ydinvoimalan käyttöä seurataan ja mahdollisten onnettomuuksien ja vikatilanteiden riskit arvioidaan tarkasti.

Ydinvoimalaitoksiin vaikuttavista sähköjärjestelmässä tapahtuvista vikatiloista tässä työssä tutkitaan vaihekatkoa. Vaihekatko tarkoittaa yhden tai kahden vaiheen menetystä kolmivaiheisessa sähköverkossa ja sen voi aiheuttaa materiaaliheikkoudet sähköverkon johtimissa tai eristeissä tai laitteiden viat eristimissä, katkaisijoissa tai muuntajissa. Vaihekatko aiheuttaa sähköjärjestelmään epäsymmetrisen vikatilan. Sähköverkon epäsymmetria heikentää sähköjärjestelmän toimintakykyä, ylikuormittaa ja voi vaurioittaa järjestelmässä olevia sähkökoneita ja -laitteita. (Elovaara & Haarla, 2011)

Sähköverkossa olevat sähköntuotantolaitokset voivat kärsiä vaihekatkotilanteista. Ydinvoimaloissa sähköjärjestelmien toimintakyvyn heikkeneminen voi pahimmillaan johtaa laitoksen turvallisuustoimintojen epäonnistumiseen. Riippuen sähköjärjestelmää syöttävien muuntajien kytkentätavasta ja laitoksen sähköjärjestelmän kuormitustilanteesta voi vaihekatko olla hyvinkin vaikea havaita. Vaihekatkot ovat aiheuttaneet häiriöitä ydinvoimalaitoksilla ympäri maailmaa ja useassa näistä tapauksista laitoksen sähkösuojausjärjestelmät eivät ole havainneet vaihekatkoa. Tällöin voimalaitoksen sähkönsyöttöä ei ole erotettu viallisesta verkkoyhteydestä varayhteyteen tai varavoimadieseleiden automaattinen käynnistyminen ei ole tapahtunut. Viallinen sähköverkko on jatkanut voimalaitoksen kuormien syöttämistä vaihekatkosta huolimatta aiheuttaen ydinvoimalaitoksen omakäyttöverkkoon merkittävää epäsymmetriaa ja ylikuormittaen sähkölaitteita. Tilanteet ovat johtaneet odottamattomiin reaktorin pikasulkuihin ja sähkölaitteiden vioittumisiin.

Vaihekatkotapahtumien käyttökokemusraporttien pohjalta on annettu kansainvälisiä suosituksia vaihekatkoilta suojautumisen ja laitosturvallisuuden parantamiseksi. Suomessa Säteilyturvakeskus (STUK) vaatii ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista ydinvoimalaitoksilla, ja määrää ydinturvallisuusohjeissa (YVL), että ydinvoimaloissa tai sähköverkossa tapahtuvat taajuus- ja jännitevaihtelut pitää analysoida, ja ne eivät saisi aiheuttaa vaaraa ydinvoimalan turvallisuustoiminnoille. (STUK, 2019) Kansainvälisesti ohjeita ja suosituksia vaihekatkotilanteiden analysointiin ovat antaneet kansainvälinen atomienergianvirasto International Atomic Energy Agency (IAEA) ja maailman ydinorganisaatioiden yhdistys World Association of Nuclear Operators (WANO).

1.1 Työn tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja rajaus

Tämä työ tehdään Olkiluodossa Teollisuuden Voima Oyj:lle (TVO). Tavoitteena on arvioida, miten Olkiluoto 3 -laitosyksikön sähköjärjestelmän suojalaitteilla pystytään havaitsemaan vaihekatkoja. Työssä vastataan WANO:n asettamiin suosituksiin varautumisesta vaihekatkotilanteisiin. Työn tuloksista muodostetaan TVO:n käyttöön yhteenvetoraportti ja esitysaineisto, joilla voidaan esittää vaihekatkotilanteiden hallinta OL3:lla ja hyödyntää niitä lisäkoulutusaineistona esimerkiksi operaattoreille.

Työssä tarkastellaan vaihekatkon syntymistä ja sen vaikutuksia generaattoriin, muuntajiin, oikosulkumoottoreihin ja tehoelektroniikkaan. Vaihekatkoon ja sen vaikutuksiin tutustutaan kirjallisuuden ja simulointien avulla. OL3 laitoksen sähköjärjestelmän suojauksen havahtumista vaihekatkotilanteessa arvioidaan tehtyjen simulointien tuloksista. Vaihekatkoilta suojautumisen turvallisuusmerkityksen ymmärtämiseksi työssä käydään läpi tarvittavin osin OL3-laitoksen sähköjärjestelmä ja sen suojaus. Tehtävässä simulointitarkastelussa vaihekatkovikojen tapahtuma-alueeksi rajataan suurjännitemuuntajien yläjännitepuoli, kytkinkentät sekä ulkoiset suurjänniteverkot.

2 KOKEMUKSIA VAIHEKATKOTAPAHTUMISTA

Maailmalla ydinvoimaloissa tapahtuneet vaihekatkot ovat osoittaneet niillä olevan huomattavia seurauksia voimalaitoksilla, mutta monesti vaihekatkoja on ollut vaikea havaita sähköjärjestelmästä. IAEA on kerännyt selvityksiä vaihekatkotapauksista ja useat näistä kokemuksista ovat osoittaneet, että vaihekatkot voivat uhata ydinvoimaloiden turvallisuutta. Tapaus-ten johdosta eri instituutiot ovat asettaneet määräyksiä ja suosituksia ydinvoimaloille vaihekatkojen analysoimiseen, suojautumiseen, vikojen leviämisen estämiseen, niiden seurausten lieventämiseen ja henkilöstön kouluttamiseen. Suomessa ydinturvallisuusvaatimuksia asettaa, ja niiden toteuttamista valvoo Säteilyturvakeskus (STUK, 2019). Kansainvälisiä suosituksia vaihekatkojen analysoimiseksi ovat antaneet IAEA ja WANO.

2.1 Vaihekatkotapahtumia ydinvoimalaitoksissa maailmalla

Vaihekatkot ovat aiheuttaneet häiriöitä monilla ydinvoimalaitoksilla ympäri maailmaa. Useissa tapauksissa laitoksen suojausjärjestelmät eivät ole havainneet vaihekatkoa laitosta syöttävästä verkosta, jolloin vikaantunut verkko on jatkanut laitoksen sähköjärjestelmien syöttämistä. Häiriötilanteissa onkin tapahtunut moottoreiden irtoamista verkosta niiden ylikuormituttua epäsymmetrisen sähkönsyötön seurauksena. Riippuen irronneiden moottoreiden syöttämistä laitteista, monista tilanteista on seurannut myös reaktorin pikasulku. Joissakin tapauksissa syöttävän sähköverkon epäsymmetria on myös vaurioittanut moottoreita. Seuraavaksi kuvataan viisi vaihekatkotapausta kolmelta eri laitokselta eri puolilta maailmaa.

2.1.1 Byron 1 & 2

Byron-ydinvoimalaitos sijaitsee Yhdysvalloissa Illinoisissa koostuen kahdesta painevesireaktorin laitosyksiköstä. Byron 1 -voimalaitos on teholtaan 1164 MWe ja Byron 2 -voimalaitos on teholtaan 1136 MWe. (IAEA, 2022. b.)

Tammikuussa 2012 Byron 2:lla tapahtui täydeltä teholta reaktorin automaattinen pikasulku, kun reaktorin jäähdytuspumput irtosivat laitoksen sähköverkosta. Tapahtuman aiheutti vaihekatko laitoksen, ulkoiseen sähköverkkoon liittäväällä, 345 kV sähköasemalla, jossa yhden

vaiheen riippukytetty posliinieristin oli hajonnut ja vaihe tippunut maahan. Vaihekatkon seurauksena kahta reaktorin pääkiertopumppua syöttävissä 690 V kojeistoissa syntyi alijännite, joka laukaisi pumput irti verkosta. Näiden irrotessa laukesi reaktorin pikasulku, mikä puolestaan käynnisti kahden muun reaktorin jäähdytyspumpun sähkönsyötön syötönvaihdon generaattorin yksikkömuuntajilta syötetyiltä sähkökaapeilta, juuri 345 kV sähköaseman ja omakäyttömuuntajien syöttämille kojeistoille. Myös nämä kojeistot joutuivat vaihekatkosta alijännitteisiksi ja irrottivat loputkin kaksi pumppua verkosta. Kun vaihekatko huomattiin ja paikannettiin, erotettiin laitoksen sähkönsyöttö 345 kV sähköasemalta manuaalisesti, jolloin varavoimadieselgeneraattorit käynnistyivät automaattisesti ja laitoksen turvallisuustoiminnoille saatiin palautettua sähkönsyöttö. (IAEA, 2016)

Helmikuussa 2012 Byron 1 menetti ensisijaisen ulkoisen sähkönsyöttönsä, kun yksi vaiheista omakäyttömuuntajaan aukesi ja aiheutti oikosulun kytkinasemalla. Myös tämän vaihekatkon syynä oli hajonnut posliinieristin 345 kV sähköasemalla. Kuitenkin tällä kertaa alijännitesuojat havaitsivat alijännitteen ja toimivat suunnitellusti 400 V kiskossa, eristäen vikapaikan. Omakäyttömuuntajan syöttökatkaisijat avautuivat, dieselgeneraattorit käynnistyivät odotetusti ja palauttivat virran 400 V varvoimajärjestelmän kiskoihin. (IAEA, 2016)

2.1.2 Dungeness B

Dungeness-ydinvoimalaitos sijaitsee Englannin Kentissä, ja siihen kuuluvat voimalaitokset Dungeness A ja B, joihin molempiin kuuluu kaksi omaa laitousyksikköä. Dungeness B laitousyksiköillä B1 ja B2 on molemmissa kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori ja ne ovat teholtaan 615 MWe. Dungeness A oli toiminnassa vuosina 1965–2006 ja Dungeness B vuosina 1983–2021. (IAEA, 2022 b.)

Toukokuussa 2007 Dungeness B -ydinvoimalaitoksella, tapahtui yksivaiheinen vaihekatko yhden omakäyttömuuntajan huollon aikana. Normaalitylanteessa laitoksen kaksi omakäyttömuuntajaa syöttävät rinnan 275 kV kiskoa, josta laitosmuuntajat syöttävät sähköä laitoksen omakäyttösähköverkkoon. Vaihekatko syntyi omakäyttömuuntajassa SGT2, sen yläjännitepuolella, kun katkaisijan kaikki vaiheet eivät kytkettyneet, vaan yksi jäi auki. Laitos B2 oli tehoajolla 490 MWe teholla ja laitos B1 oli vuosihuoltoseisokissa. Toinen muuntaja SGT1 otettiin pois käytöstä suunniteltujen huoltotöiden vuoksi, jolloin vaihekatkon vaikutukset alkoivat ilmetä laitoksella, kun muuntaja SGT2, jossa vaihekatko oli tapahtunut ja jonka yksi

napa oli auki, jäi syöttämään laitoksen sähköjärjestelmiä yksin. Seuranneina päivinä laitoksen B2 yksi jäähdytyslaite, kaksi jäähdytysvesipumppua, yksi turbiinin apuöljypumppu ja poistopuhaltimet kokivat jännitehäiriöitä ja putosivat sähkönsyötöstä. Syitä näille ei kuitenkaan saatu heti selville, ja vasta kun verkko-operaattori löysi vaihekatkon aiheuttaneen osittain avonaisen katkaisijan omakäyttömuuntajan korkeajännitepuolella, vaihdettiin sähkönsyöttö takaisin muuntajalle SGT1 ja muuntaja SGT2 otettiin pois käytöstä ja katkaisija korjattiin. (IAEA, 2016)

Huhtikuussa 2014 Dungeness B ydinvoimalaitosyksikön laitoksen B1 ollessa suunnitellusti vuosihuoltoseisokissa, laitoksella B2 tapahtui reaktorin automaattinen pikasulku täydeltä teholta. Suunnitellun verkonhuoltotoimenpiteen aikana verkko-operaattori ja laitoksen B2 valvomo vastaanottivat negatiivisen vaihejärjestyksen hälytyksen. Siirtoverkon operaattori eristi viimeisimmäksi käytetyt laitteet ja aloitti vikatarkastelut. Hetken kuluttua negatiivisen vaihejärjestyksen suojaus laukesi yksikön B2 päägeneraattorilla, ja jota seurasi reaktorin automaattinen pikasulku. Tämän jälkeen kahden kaasunkierrättimen pinnankorkeudet laskivat niin alas, että niiden suurnopeusapumootorit ja reaktorin pääjäähdytyspumput suojalaukaistiin, jolloin reaktorin pakotettu jäähdytys menetettiin. Kaasunkierrättimien suurnopeusapumootorien lisäksi myös yksikön B1 kalvopumput suojalaukaistiin erittäin matalan pinnankorkeuden vuoksi, ja reaktorin pakkokierto ja kattilan syöttö menetettiin. Kun lopulta 11 kV jännitetasolla havaittiin alijännite, laitos erotettiin siirtoverkosta, 330V dieselgeneraattorit käynnistyivät automaattisesti ja sähkönsyöttö laitoksen dieselvarmennetuille komponenteille saatiin toteutettua. Verkko-operaattori diagnosoi tilanteen aiheuttajaksi 400 kV yhdestä vaiheesta avonaiseksi jääneen kiskokatkaisijan. (IAEA, 2016)

2.1.3 Forsmark 3

Forsmarkin ydinvoimalaitos sijaitsee Ruotsissa Forsmarkissa ja siihen kuuluu kolme kiehu-
tusvesirektorilla varustettua laitosyksikköä, Forsmark 1, 2 ja 3. Forsmark 3 -laitoksen teho on 1195 MWe. (IAEA, 2022 b.) Toukokuussa 2013 laitosyksikön ollessa vuosihuoltoseisokissa, yksikköä oltiin liittämässä vanhalta 70 kV kytkinkentältä uudelle 70 kV kytkinkentälle, kun samanaikainen generaattorin magnetointilaitteiston releiden koestus sai vastajärjestelmän suojauksen laukeamaan. Tämä suojauksen laukeaminen lähetti 400 kV katkaisijalle avaussignaalin. Katkaisijan avautuessa, sähköasemalla syntyi kahden vaiheen

vaihekatko, kun katkaisijassa yksi vaihe jäi kiinni. Suojauksen laukeaminen johti reaktorin jälkilämmönpoiston menetykseen. Varavoimadieselgeneraattorit eivät käynnistyneet automaattisesti, koska laitoksen sisäisen sähköjärjestelmän jännitteet eivät laskeneet vuosihuollon aikaisella pienellä kuormituksella dieselgeneraattoreiden käynnistysrajan alapuolelle. Varavoimadieselgeneraattorit käynnistettiin manuaalisesti ja laitos irrotettiin vikaantuneesta verkosta. Näin jälkilämmönpoisto saatiin palautettua noin 17 minuutin kuluttua. Tapahtuman seurauksena muutamia laitoksen moottoreita vaurioitui ja lämpötila polttoainealtaassa nousi 0,7 °C jälkilämmönpoiston menetyksen vuoksi. (IAEA, 2016)

Kuvattujen tapausten syyt ja seuraukset on koottu taulukkoon 2.1.

Taulukko 2.1. Kuvattujen vaihekatkotapausten syyt ja seuraukset

Laitos	Valtio	Päivämäärä	Syy	Seuraukset
Byron 1	Yhdysvallat	28.2.2012	hajonnut riippukytketty posliinieristin 345 kV sähköasemalla aiheutti yhden vaiheen vaihekatkon	jäähdytyspumppujen tippuminen verkosta ja reaktorin pikasulku, yksi vesisyöttöpumppu vaurioitui
Byron 2	Yhdysvallat	30.1.2012	hajonnut riippukytketty posliinieristin 345 kV sähköasemalla aiheutti yhden vaiheen vaihekatkon	alijännitesuojat laukesivat, vioitunut syöttö eristettiin ja dieselgeneraattorit käynnistyivät,
Dungeness B	Englanti	14.5.2007	400/275 kV omakäyttömuuntajan yläjännitepuolella katkaisija jäi auki yhdestä vaiheesta	eri pumppujen ja laitteiden tippuminen verkosta
Dungeness B	Englanti	27.4.2014	suljettaessa 400 kV kiskokatkaisija jäi auki yhdestä vaiheesta	reaktorin pikasulku laitoksella B2 ja pakotetun jäähdytyksen menetys laitoksilla B1 ja B2
Forsmark 3	Ruotsi	30.5.2013	avattaessa 400 kV katkaisija jäi kiinni yhdestä vaiheesta	reaktorin jälkilämmönpoiston menetys ja joidenkin moottorien vahingoittuminen

Kaikissa näistä tapauksista vaihekatko on tapahtunut sähköjärjestelmän korkeimman jännitteen tasolla. Dungeness B:llä ja Forsmark 3:lla vaihekatkot aiheutuivat katkaisijoiden viallisesta toiminnasta ja Byron 1:llä ja 2:lla vaihekatkot aiheutuivat eristimen hajoamisesta sähköasemalla. Kahdessa tapauksista reaktorin jäähdytys menetettiin vaihekatkotilanteen seurauksena ja kahdessa tilanteista, laitteita vaurioitui. Vain Byron 2 vaihekatkotapauksessa alijännitesuojat laukesivat vaihekatkon aiheuttamaan jännitteen alenemaan ja varavoimadieselit käynnistyivät automaattisesti.

Näiden ja muiden ydinvoimaloiden vaihekatkon aiheuttamien häiriötilanteiden johdosta kansainväliset organisaatiot ovat kiinnittäneet huomiota vaihekatkon vaikutuksiin ydinvoimalaitosten turvallisuudelle. Vaihekatkojen aikana esimerkiksi varavoimantuotannon automaattinen käynnistyminen on estynyt, ja tilanteen aiheuttama epäsymmetria sähköverkon jännitteissä ja virroissa on aiheuttanut turvallisuuden kannalta tärkeiden laitteiden toimimattomuutta. Kansainvälisellä tasolla IAEA ja WANO ovat antaneet suosituksia ja ohjeita vaihekatkotilanteiden havaitsemiseen ja laitosten sähköjärjestelmien suojausten parantamiseen. Suomessa ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista ydinvoimalaitoksilla valvoo STUK.

2.2 Vaihekatkoa koskevat säädökset ja suositukset

Suomessa ydinturvallisuusvaatimukset on asetettu ydinenergialaissa, ja niiden toteutumista on määrätty valvomaan viranomaisorganisaatio STUK. STUK hoitaa ydinvoimalaitoksen suunnittelun ja rakentamisen valvontaa, ydinvoimalaitoksen käytönvalvontaa, ydinjätehuollon valvontaa sekä radioaktiivisten aineiden kuljetuksen valvontaa. Ydinenergialain mukaan STUK:in tehtävänä on asettaa ydinenergian käyttäjille lain edellyttämän turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. (Ydinenergialaki 1987/990) STUK varmistaa, että ydinenergiaa käytetään ydinenergian turvallisen käytön vaatimuksia noudattaen. Nämä ydinenergialain mukaiset yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset on annettu ydinturvallisuusohjeissa (YVL). (STUK, 2019)

Ydinvoimaloiden sähköjärjestelmiä koskevat määräykset on annettu YVL-ohjeen *B.1 Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu* kohdassa *5.4 Sähköjärjestelmät*. Ohje käsittelee vaatimukset ulkoisen verkkoyhteyden, omakäyttöjärjestelmän, varmennettujen vaihtosähköjärjestelmien, katkottoman sähkönsyötön järjestelmien, laitosyksiköiden välisten syöttöyhteyksien, sähkö- ja automaatiojärjestelmien sähkömagneettisen yhteensopivuuden, maadoitus- ja ukkossuojausjärjestelmien sekä sähköjärjestelmien ja -laitteiden suojauksen osalta. Vaihekatkotilanteista STUK ei ole antanut vaatimuksia, mutta YVL kuitenkin edellyttää, että ydinvoimalaitosten on pystyttävä osoittamaan, että sähköjärjestelmän suunnittelussa on varauduttu käyttöhäiriöiden ja onnettomuuksien mahdollisuuteen.

Vaikka vaihekatkoja ei suoraan mainita asetuksissa, määrää YVL B.1 5.4, vaihekatkoissakin syntyvien alijännitteiden kohtaamisesta seuraavasti;

”5408. Ulkoisen verkon aiheuttamat laitoskohtaiset ja laitoksen sähkölaitteiden tai vikojen aiheuttamat taajuus- ja jännitevaihtelut on analysoitava.

5409. Vaatimuksen 5408 mukaisesti analysoidut taajuus- ja jännitevaihtelut eivät saa vaarantaa turvallisuustoimintoja normaalikäytön, odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden tai onnettomuuksien aikana.” (STUK, 2019)

Vuonna 1957 perustettu IAEA on Yhdistyneiden kansakuntien alainen yhteistyöjärjestö, jonka lähtökohtana on edistää rauhanomaista ydinenergiankäyttöä. Järjestön tavoitteen on kehittää ydinenergia-alan säteilyturvallisuutta, ydinturvallisuutta ja ydinaseriisuntaa. IAEA kannustaa ja avustaa ydinenergian tutkimusta, edistää tieteellistä ja teknistä tiedonvaihtoa, toimii materiaalien, palveluiden ja laitteistojen välittäjänä sekä vakiinnuttaa ydinturvallisuuden liittyviä standardeja. (IAEA, 2022. c.)

IAEA kerää käyttökokemuksia ydinvoimalaitoksilta ja jakaa niistä tietoa jäsenilleen erilaisissa raporteissa. IAEA:n turvallisuusraporttien sarjan julkaisussa *No. 91 Impact of Open Phase Conditions on Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants* käsitellään maailmalla ydinvoimaloissa tapahtuneita vaihekatkoja ja esitetään tekniset perusteet, jonka pohjalta vaihekatkotilanteita voidaan tarkastella. Julkaisun tavoitteena on nostaa esiin laitosten sähköjärjestelmien mahdollisia haavoittuvuuksia ja saada laitostoimijat parantamaan ydinvoimalaitosten turvallisuutta antamalla ohjeita laitoksen suojatoimenpiteiden analysoimiseksi ja vahinkojen minimoimiseksi vaihekatkotilanteissa. (IAEA, 2016)

WANO raportoi tapahtumista ydinvoimalaitoksilta ympäri maailmaa ja ohjeistaa jäseniään toteuttamaan suositustensa mukaisia tarkasteluja ja toimia. Tapahtumien kuvaukset, niiden syyt ja vaikutukset, sekä WANO:n tekemät suositukset tapahtumien pohjalta, on koottu käyttökokemusraportteihin Significant Operating Experience Report (SOER). WANO kannustaa jäseniään analysoimaan SOER suositukset voimalaitoksilla ja panemaan analyyseista seuranneet toimenpiteet täytäntöön. WANO suorittaa säännöllisiä vertaisarviointeja ydinvoimalaitoksilla ja arvioi SOER suositusten toteutumista.

Vaihekatkotapausten arvioimiseen annetut suositukset on esitetty käyttökokemusraportissa *SOER 2015-1 Safety Challenges from Open Phase Events*. Suositukset, jotka SOER 2015-1:ssä esitetään, ja joita WANO:n jäsenten kehoitetaan huomioivan ovat;

”1. Määritä nykyisen virtaväylän ja rakenteen haavoittuvuus.

2. Jos vaihekatkoksen havaintatoiminnot puuttuvat, huolehdi diagnostiikkaohjeistuksesta ja määritä valvontatoimenpiteet.

3. Jos vaihekatkoksen havaintatoiminnot puuttuvat, kehitä ja toteuta pitkän aikavälin toimenpiteitä.” (WANO, 2015)

Jotta sähköjärjestelmän toimintaa vaihekatkotilanteissa voitaisiin analysoida ja vastata suositukseen, on vikatilanteiden vaikutukset selvitettävä. Laskemalla sähköjärjestelmässä esiintyvät virrat ja jännitteet erilaisissa vaihekatkotilanteissa voidaan arvioida laitoksen sähkölaitteisiin kohdistuvia vaikutuksia ja niiden toimintaa. Sähköjärjestelmässä epäsymmetrisessä tilanteessa esiintyvien suureiden laskemiseen voidaan käyttää verkon symmetrisiä komponentteja, jotka käydään läpi seuraavassa luvussa.

3 LASKENTA SYMMETRISILLÄ KOMPONENTEILLA

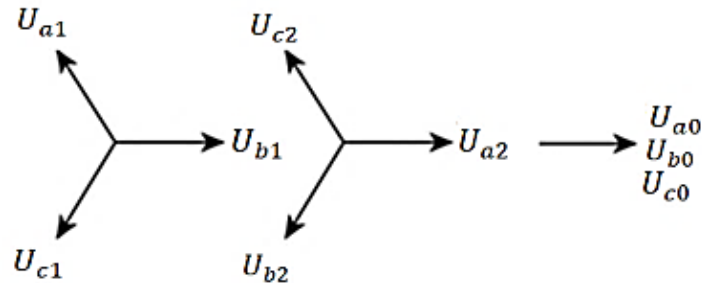
Kolmivaiheinen sähköjärjestelmä on suunniteltu symmetriseksi ja yleensä sitä voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jolla kuvataan jokaista identtistä vaihetta yhdellä kertaa. Sijaiskytkentöjen avulla voidaan analysoida sähköjärjestelmän ominaisuuksia ja vikatiloja. Järjestelmän vikatiloja tulee tarkastella, jotta se voitaisiin mitoittaa ja suojata kunnolla. Sähköjärjestelmässä esiintyvät viat ovat joko symmetrisiä vikoja tai epäsymmetrisiä vikoja. Symmetriset viat eli kolmivaiheiset oikosulut vaikuttavat jokaiseen kolmesta vaiheesta samalla tavalla ja niitä voidaan analysoida yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Epäsymmetrisiä vikoja ovat poikittais- ja pitkittäisviat. Poikittaisvioissa vaiheen ja maan välisissä impedansseissa on viasta johtuva epäsymmetria. Näitä vikoja ovat yksi- tai kaksivaiheinen maasulku ja kaksivaiheinen oikosulku. Pitkittäisvikoja ovat viat, joissa kaikkien kolmen vaiheen impedanssit eivät ole vian seurauksena yhtä suuria keskenään. Pitkittäisvikoja ovat yhden vaiheen sulakkeen palaminen, katkaisijan yksinapainen toiminta ja vaihekatkot. (Elovaara & Haarla, 2011 s.185)

3.1 Symmetriset komponentit

Symmetristä sähköjärjestelmää voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jolla kuvataan kaikkia identtisiä vaiheita. Epäsymmetristen vikojen laskemisessa ei voida käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää, koska vaiheiden jännitteet eivät ole identtisiä. Laskentaa voidaan kuitenkin yksinkertaistaa käyttämällä apuna symmetrisiä komponentteja ja muodostamalla yksivaiheinen sijaiskytkentä komponenttijärjestelmien kytkeytymisestä. Symmetriset komponentit (kuva 3.1) ovat matemaattinen tapa, jolla epäsymmetriset sinimuotoiset kolmivaihesuureet voidaan esittää kolmen symmetrisen kolmivaiheisen komponentin summana. Symmetriset komponentit ovat myötä-, vasta- ja nollajärjestelmä (kuva 3.2). (Voipio, 2006, s.275)

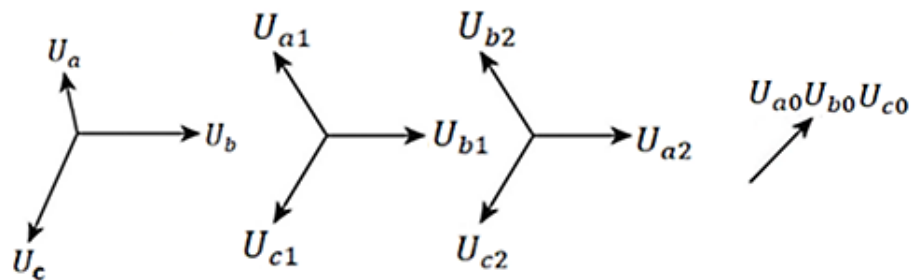
Symmetrisillä komponenteilla voidaan muodostaa kolme järjestelmää, joista kukin koostuu kolmesta symmetrisestä vektorista. Kaikissa näistä järjestelmistä kaikki kolme vektoria ovat yhtä suuria ja samassa kulmassa toisistaan. Kolmivaiheisen sähköjärjestelmän suuret U_a , U_b ja U_c viittaavat vaiheisiin A, B ja C. Nämä suuret korvataan symmetristen komponent-

tien järjestelmien komponenteilla U_1 , U_2 ja U_0 , jotka viittaavat myötäjärjestelmään, vastajärjestelmään ja nollajärjestelmään. (Clarke, 1948. s.56)



3.1. Symmetriset komponentit

Symmetrisessä järjestelmässä esiintyvät vain myötäjärjestelmä ja nollajärjestelmä. Komponenttien välillä ei ole vuorovaikutusta eri järjestelmissä. Myötäjärjestelmän jännitteiden ja virtojen voidaan katsoa kulkevan ainoastaan myötäjärjestelmän verkossa ja nollajärjestelmän jännitteiden ja virtojen voidaan katsoa kulkevan ainoastaan nollajärjestelmän verkossa. Epäsymmetrisessä tilassa sähköjärjestelmän eri vaiheiden virrat ja jännitteet eivät ole enää yhtä suuria ja verkossa esiintyy myötäjärjestelmän ja nollajärjestelmän lisäksi vastajärjestelmä (kuva 3.2). (Voipio, 2006, s.275)



Kuva 3.2. Epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä, myötäjärjestelmä, vastajärjestelmä ja nollajärjestelmä

Myötäjärjestelmä on kolmen samansuuruisen vektorin järjestelmä, jonka vaihejärjestys on A-B-C. Vektorit ovat 120° kulmassa toisistaan, jolloin vaiheen B komponentti on 120° jäljessä vaiheen A komponentista ja vaiheen C komponentti on 120° jäljessä vaiheen B komponentista. Vastajärjestelmä on kolmen samansuuruisen vektorin järjestelmä, jossa vaihejärjestys on A-C-B. Vektorit ovat 120° kulmassa toisistaan, jolloin vaiheen B komponentti on 240° jäljessä vaiheen A komponentista ja vaiheen C komponentti on 240° jäljessä vaiheen B komponentista. Nollajärjestelmä on kolmen samansuuruisen vektorin järjestelmä, jossa vektorit ovat kulmaltaan yhteneviä. (Clarke, 1948. s.56)

Epäsymmetriset vaihejännitteet ja niiden keskinäiset yhteydet toisiinsa voidaan esittää komponenttijärjestelmien avulla seuraavasti;

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} \quad (3.1)$$

$$U_b = U_{b1} + U_{b2} + U_{b0} \quad (3.2)$$

$$U_c = U_{c1} + U_{c2} + U_{c0} \quad (3.3)$$

$$U_a = U_1 + U_2 + U_0 \quad (3.4)$$

$$U_b = a^2 U_1 + a U_2 + U_0 \quad (3.5)$$

$$U_c = a U_1 + a^2 U_2 + U_0 \quad (3.6)$$

Kerroin U_a kuvaa vaiheen A jännitettä, U_b kuvaa vaiheen B jännitettä ja U_c kuvaa vaiheen C jännitettä. Kerroin U_1 kuvaa myötäjärjestelmän jännitettä, U_2 kuvaa vastajärjestelmän jännitettä ja U_0 kuvaa nollajärjestelmän jännitettä. Kerroin a kuvaa vaiheiden välistä 120° vaihesiirtoa $a = 1 \angle 120^\circ$. Näin vaihe, jonka kerroin on a pyörii 120° vaihesiirrossa vastapäivään ja vaihe, jonka kerroin on a^2 pyörii 240° vaihesiirrossa vastapäivään. (Voipio, 2006, s.276–277)

Yhtälöistä 3.4–3.6 voidaan edelleen ratkaista symmetriset komponentit epäsymmetrisen järjestelmän vaihejännitteistä;

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) \quad (3.7)$$

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c) \quad (3.8)$$

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \quad (3.9)$$

Samoin voidaan kirjoittaa epäsymmetrisen järjestelmän vaihevirratt ja virtojen symmetriset komponentit;

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.10)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (3.11)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (3.12)$$

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (3.13)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (3.14)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (3.15)$$

Kerroin I_a kuvaa vaiheen A virtaa, I_b kuvaa vaiheen B virtaa ja I_c kuvaa vaiheen C virtaa. Kerroin I_1 kuvaa myötäjärjestelmän virtaa, I_2 kuvaa vastajärjestelmän virtaa ja I_0 kuvaa nollajärjestelmän virtaa. Yhtälöistä 3.13–3.15 voidaan edelleen ratkaista symmetriset komponentit epäsymmetrisen järjestelmän vaihejännitteistä;

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (3.16)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (3.17)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.18)$$

Jos komponenttiverkkojen impedanssit tunnetaan, voidaan jännitekomponentit kirjoittaa virta- ja impedanssikomponenttien avulla:

$$U_1 = \Delta E - I_1 Z_1 \quad (3.19)$$

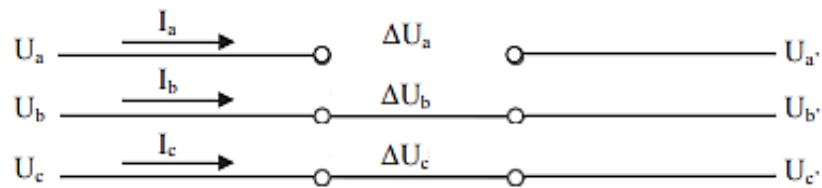
$$U_2 = -I_2 Z_2 \quad (3.20)$$

$$U_0 = -I_0 Z_0 \quad (3.21)$$

Kerroin Z_1 kuvaa myötäjärjestelmän impedanssia, Z_2 kuvaa vastajärjestelmän impedanssia ja Z_0 kuvaa nollajärjestelmän impedanssia. Kerroin ΔE kuvaa verkon jännitelähdettä. Oletuksena esitetyissä jänniteyhtälöissä on, että syöttävä verkko sisältää jännitelähteen vain myötäjärjestelmässä. (Voipio, 2006, s.285)

3.2 Vaihekatkon kuvaus symmetrisillä komponenteilla

Myötä-, vasta- ja nollajärjestelmien komponenttien avulla voidaan kuvata sähköjärjestelmän tilaa ja muodostaa yksivaiheinen sijaiskytkentä myös epäsymmetrisissä tilanteissa. Vaihekatkotilanteista kuvataan yksivaiheset (kuva 3.3) ja kaksivaiheiset (kuva 3.5) vaihekatkot.



Kuva 3.3. Yksivaiheinen vaihekatko vaiheessa A

Kuvassa 3.3 esitetään yhden vaiheen vaihekatko vaiheessa A. Vaihe A on katkennut esitetyn verkon alkupään jännitteen U_a ja loppupään jännitteen U_a' väliltä. Kun oletetaan, että vaihe A on katkennut ovat $I_a = 0$ ja $\Delta U_{b0} = \Delta U_{c0} = 0$. Katkenneen vaiheen jännitteenalenema voidaan siten kirjoittaa;

$$\Delta U_{a1} = U_{a1} - U_{a1}' = \frac{1}{3}(\Delta U_a + a\Delta U_b + a^2\Delta U_c) = \frac{1}{3}\Delta U_a \quad (3.22)$$

$$\Delta U_{a2} = U_{a2} - U_{a2}' = \frac{1}{3}(\Delta U_a + a^2\Delta U_b + a\Delta U_c) = \frac{1}{3}\Delta U_a \quad (3.23)$$

$$\Delta U_{a0} = U_{a0} - U_{a0}' = \frac{1}{3}(\Delta U_a + \Delta U_b + \Delta U_c) = \frac{1}{3}\Delta U_a \quad (3.24)$$

$$\Delta U_{a1} = \Delta U_{a2} = \Delta U_{a0} = \frac{1}{3}\Delta U_a \quad (3.25)$$

Kun katkenneessa vaiheessa ei kulje virtaa, voidaan yhtälöstä 3.10 kirjoittaa;

$$I_{a1} = -I_{a2} - I_{a0} \quad (3.26)$$

Katkenneen vaiheen A jännitteenalenemat ovat jokaisessa komponenttijärjestelmässä yhtä suuret $\Delta U_{a1} = \Delta U_{a2} = \Delta U_{a0}$, joten voidaan yhtälöistä 3.20 ja 3.21 muodostaa;

$$I_{a2}Z_{a2} = I_{a0}Z_{a0} \quad (3.27)$$

Sijoittamalla yhtälö 3.27 katkenneen vaiheen virran yhtälöön 3.26 saadaan;

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_{a0} + Z_{a2}}{Z_{a0}} \quad (3.28)$$

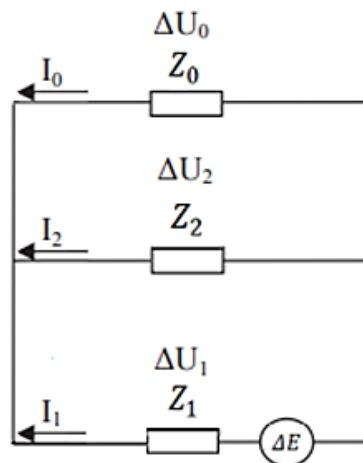
Edelleen sijoittamalla katkenneen vaiheen virran yhtälö 3.28 komponenttiverkkojen jänniteyhtälöihin 3.19–3.21, voidaan katkenneen vaiheen A komponenttiverkkojen virtayhtälöt esittää;

$$I_{a1} = \frac{\Delta E}{Z_{a1} \frac{Z_{a0} Z_{a2}}{Z_{a0} + Z_{a2}}} \quad (3.29)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_{a0}}{Z_{a0} + Z_{a2}} \quad (3.30)$$

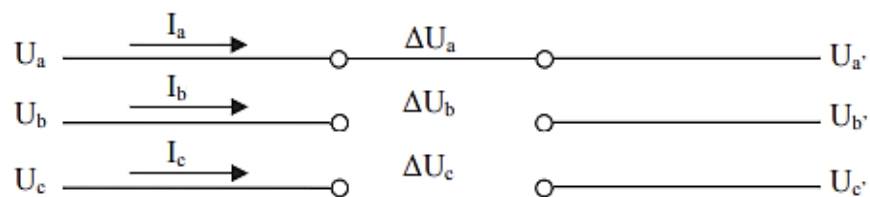
$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_{a2}}{Z_{a2} + Z_{a0}} \quad (3.31)$$

Yhtälöstä 3.29 nähdään, että yhden vaiheen katketessa verkon alkupään jännitteen U_a ja loppupään jännitteen U_a' väliltä, symmetristen komponenttien impedanssit kytkeytyvät rinnakkain (kuva 3.4). Symmetristen komponenttien järjestelmät ovat siis rinnankytkettyjä, kun sähköverkon yhden vaiheen vaihekatkotilannetta kuvataan yksivaiheisella sijaiskytkennällä. (Clarke, 1948)



Kuva 3.4. Symmetristen komponenttien järjestelmien rinnankytkentä yksivaiheisessa vaihekatkossa (muokattu lähteestä IAEA, 2016)

Kuvassa 3.5 esitetään kaksivaiheinen vaihekatko. Vaiheet B ja C ovat katkenneet esitetyn verkon alkupään jännitteiden U_b ja U_c ja loppupään jännitteiden U_b' ja U_c' väliltä.



Kuva 3.5. Kaksivaiheinen vaihekatko vaiheissa B ja C

Kun oletetaan, että vaiheet B ja C ovat katkenneet ja $I_b = I_c = 0$ ja $\Delta U_a = 0$, niin voidaan virran symmetristen komponenttien yhtälöt kirjoittaa;

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}I_a \quad (3.32)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}I_a \quad (3.33)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}I_a \quad (3.34)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3}I_a \quad (3.35)$$

Kun ehjän vaiheen A jännitteenalenema on nolla, voidaan kirjoittaa;

$$\Delta U_{a1} = -\Delta U_{a2} - \Delta U_{a0} \quad (3.36)$$

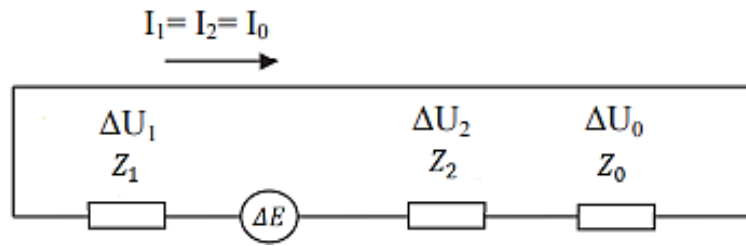
Sijoittamalla jänniteyhtälöistä 3.20 ja 3.21 virtojen ja impedanssien vasta- ja nollakomponentit yhtälöön 3.36 saadaan;

$$\Delta U_{a1} = I_{a2}Z_{a2} + I_{a0}Z_{a0} \quad (3.37)$$

Koska ehjän vaiheen A virrat ovat jokaisessa komponenttijärjestelmässä yhtä suuret $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$, voidaan edelleen muodostaa;

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{\Delta E}{Z_{a1} + Z_{a2} + Z_{a0}} \quad (3.38)$$

Koska ehjän vaiheen komponenttijärjestelmien virrat $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$ ovat yhtä suuret, ovat komponenttijärjestelmien impedanssit kahden vaiheen katketessa verkon alkupään jännitteen U_a ja loppupään jännitteen U_a' väliltä sarjaankytketyt (kuva 3.6). Symmetristen komponenttien järjestelmät ovat siis sarjaankytketty, kun sähköverkon kahden vaiheen vaihekatkotilannetta kuvataan yksivaiheisella sijaiskytkennällä. (Clarke, 1948)



Kuva 3.6. Symmetristen komponenttien järjestelmien sarjaankytkentä kaksivaiheisessa vaihekatkossa (muokattu lähteestä IAEA, 2016)

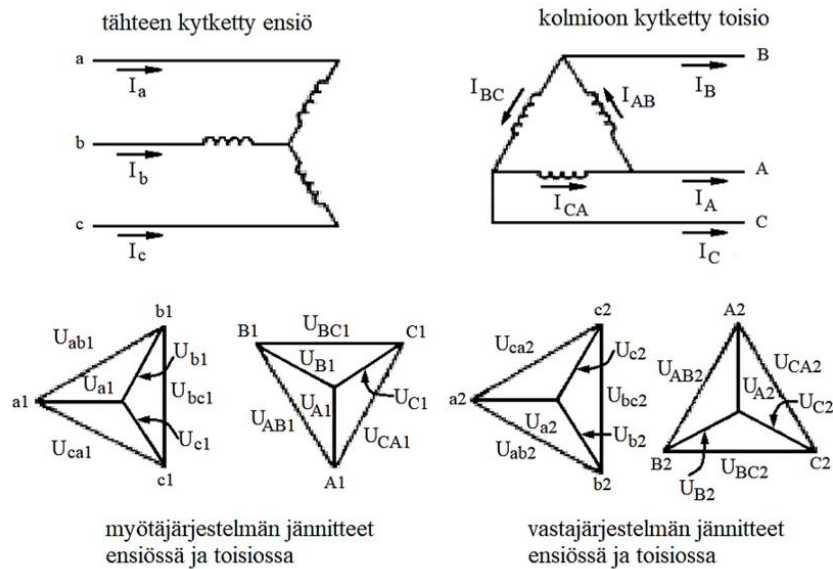
Vaihekatkojen synnyttämän jännitteen epäsymmetrian laskeminen sähköjärjestelmän eri osissa on tärkeää. Kun vikatilanteissa esiintyvät virrat ja jännitteet tiedetään, voidaan selvittää miten sähköjärjestelmän komponentit käyttäytyvät ja havahtuvatko suojalaitteet vaihekatkoon. Sähköjärjestelmää halutaan suojata vaihekatkoilta koska niiden aiheuttama epäsymmetria aiheuttaa paljon ongelmia sähköjärjestelmän eri komponenteissa. Komponenttien suojaamiseksi ja niiden oikeanlaisten toimintojen turvaamiseksi vaihekatko olisi havaittava nopeasti, mutta epäsymmetrian vaikutukset sähköjärjestelmän komponenteissa vaikeuttavat vaihekatkon havaitsemista. Seuraavassa luvussa käsitellään vaihekatkon yleisiä vaikutuksia sähköjärjestelmän eri komponentteihin.

4 VAIHEKATKON YLEISET VAIKUTUKSET JA RELESUOJAUS

Vaihekatkon aiheuttama jännitteen epäsymmetria näkyy sähköjärjestelmän laitteissa eri tavoin. Muuntajissa suurin ongelma on jännitteen muodostuminen katkenneen vaiheen käämiin muuntajan tosiopuolelle, ja alajännitepuolen sähkökiskoihin ja siten vaihekatkon havaitsemisen vaikeus. Generaattoreissa ja moottoreissa jännitteen epäsymmetria heikentää niiden toimintaa ja voi johtaa rakenneaurioihin. Oikosulkumoottorit voivat myös osaltaan muodostaa jännitettä vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen ja syöttää sitä sähköjärjestelmään. Tässä luvussa käsitellään vaihekatkon yleisiä vaikutuksia voimalaitoksissa yleisimmin käytettyihin komponentteihin; kolmivaihemuuntajiin, generaattoreihin, oikosulkumoottoreihin ja tehoelektroniikkaan. Lisäksi luvussa käydään läpi sähköjärjestelmän suojaukseen olemassa olevia suojareleitä ja sähkölaitteiden suojausta.

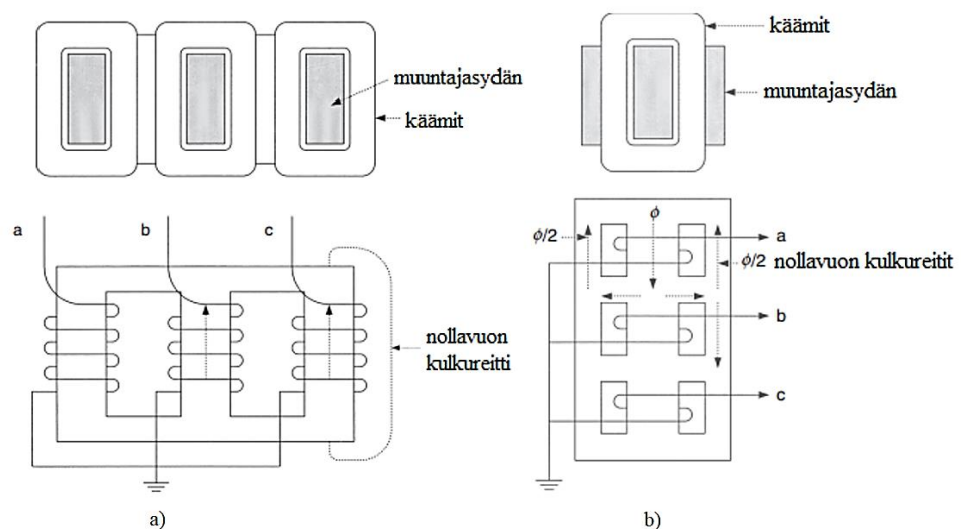
4.1 Vaikutukset muuntajaan

Avoin vaihe muuntajan ensiöpuolella synnyttää sähköverkkoon ja muuntajaan myötä- ja nolajärjestelmien lisäksi vastajärjestelmän (kuva 4.1). Jännitteen epäsymmetria ja vastajärjestelmän virrat eivät juurikaan vaikuta muuntajiin itseensä, sillä muuntajat on suunniteltu toimimaan tarpeen vaatiessa pitkiäkin aikoja epäsymmetrisissä kuormitusolosuhteissa. Niihin kohdistuu ohimenevää epäsymmetriaa, mutta myös verkon vakaan tilan epäsymmetriaa. Sähköjärjestelmän muuntajat vaikuttavat kuitenkin merkittävästi vikapaikan ja tarkastelu- paikan välillä havaittuihin jännitteisiin ja virtoihin. Yksivaiheisessa vaihekatkossa muuntajat voivat aiheuttaa jännitteiden muodostumisen uudelleen niiden ensiö- ja toisiokäämeissä katkenneiden vaiheiden käämeihin. Tähän jännitteen uudelleen muodostumiseen vaikuttavat muuntajan sydämen rakenne, käämien tähti- tai kolmiokytkentä ja tähtipisteen maadoitus. Kaksivaiheisissa vaihekatkoissa ei jännitteen syntymistä puuttuvien vaiheiden käämeihin tapahdu muissa kuin tähtipisteestään maadoitetuissa muuntajissa. (Norouzi, 2013)



Kuva 4.1. Y-d-muuntajan kytkentäkaavio ja vaihevirtojen kulkeminen sekä myötä- ja vastajärjestelmien jännitteen osoitinpiirroksot (muokattu lähteestä Anderson, 1995)

Kolmivaihemuuntajat voivat olla kolmivaiheisia kolmikäämimuuntajia tai koostua kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta. Kolmivaiheiset kolmikäämimuuntajat jaetaan sydänrakenteeltaan pylväistä koostuviin sydänmuuntajiin, ja vaippamuuntajiin. Sydämen rakenne ja pylväiden määrä vaikuttavat nollavuoroisen magneettivuon sulkeutumiseen (kuva 4.2). Pylväistä koostuva sydänmuuntaja on vaippamuuntajaa yksinkertaisempi ja jäähtykseltään edullisempi, mutta vaiheiden vuosymmetria saavutetaan vaipparakenteella paremmin, koska yhden vaiheen magneettivuolla on toisista vaiheista riippumaton sulkeutumisreitti. (Elovaara ym. 2011. s. 142).



Kuva 4.2. Sydänmuuntajan (a) ja vaippamuuntajan (b) rakenne (Das, 2016)

Symmetrisessä järjestelmässä vaiheiden magneettivuot ovat symmetriset ja niiden summa on nolla. Epäsymmetrisessä järjestelmässä voidaan summa ei kuitenkaan enää ole nolla, joten muuntajan ikeeseen syntyvä nollavuo tarvitsee sulkeutumisreitit. Muuntajan rakenteen lisäksi riippuu myös kytkentäryhmästä, miten nollavuo pääsee sulkeutumaan ja miten muuntaja käyttäytyy vaihekatkossa. Muuntajan käämit ensiössä ja toisiossa voivat olla kytketty tähtipiste- tai kolmiokytkennällä. Muuntaja voi olla myös toisiosta maadoitettu hakakytketty. Näiden muuntajien käyttäytymistä epäsymmetriatilanteissa ei kuitenkaan ole laajemmin tutkittu, sillä niiden käyttö on harvinaisempaa. Kolmivaihemuuntajien kytkentäryhmät on esitetty kuvassa 4.3. Hakakytketyt muuntajat on esitetty kuvassa 4.3, mutta niiden käyttäytymistä epäsymmetriassa ei käydä läpi tässä työssä.

Kytkentäryhmä	Osoitinpiirros	Kytkentäpiirros
D-d		
D-yn		
D-y		
D-zn		
Y-d		
Y-yn		
Y-y		
Y-zn		
YN-d		
YN-yn		
YN-y		
YN-zn		

Kuva 4.3. Kolmivaihemuuntajien kytkentäryhmät (muokattu lähteestä Hietalahti, 2011)

4.1.1 Maadoittamattomat Y- ja D-muuntajat

Ensiöpuolelta maadoittamattomat tähteen Y- ja kolmioon D-kytketyt muuntajat käyttäytyvät vaihekatkossa keskenään samankaltaisesti, riippumatta toisiopuolen kytkennästä tai sydämen rakenteesta.

Vaiheen menetyksen jälkeen kyseisen vaiheen käämin jännite on nolla. Tähteenkytketyn muuntajan kahden ehjän vaiheen käämejä vastaavat jännitteet jakautuvat tasan niiden välisestä pääjännitteestä. Vaiheen A katketessa, vaiheiden B ja C jännitteet jakautuvat niiden välisestä pääjännitteestä U_{BC} ;

$$U_A = 0 \quad (4.1)$$

$$U_B = -U_C = \frac{1}{2} U_{BC} \quad (4.2)$$

Kun kahteen ensiöpuolen ehjään vaiheeseen muodostuu puolet alkuperäisestä pääjännitteestä, toisiopuolen vastaaviin kahteen ehjään vaiheeseen indusoituvat vaihejännitteet ovat puolet alkuperäisestä pääjännitteestä. (Norouzi, 2013)

Kun kyseessä on kolmiokytketty muuntaja, vaiheen menetyksen jälkeen kahden ehjän vaiheen välinen pääjännite pysyy ennallaan, mutta muiden vaiheiden vaihejännitteet putoavat puoleen. Vaiheen A katketessa, vaiheiden B ja C välinen pääjännite U_{BC} pysyy ennallaan;

$$U_A = 0 \quad (4.3)$$

$$U_C = -U_B = -\frac{1}{2} U_{BC} = \frac{1}{2} U_{BC} \angle 180^\circ \quad (4.4)$$

Ensiöpuolelta maadoittamattoman muuntajan ehjät johtimet ovat vaihekatkossa virran ainoa mahdollinen kulkureitti. Tällöin ensiön ehjien vaiheiden vaihevirrat ja magneettivuot pylväissä ovat vastakkaisuuntaiset toisistaan, jolloin nollavuolle ei ole kulkureittiä eikä se pääse indusoimaan jännitettä katkenneeseen vaiheeseen. Y- tai D-muuntajan ensiö- ja toisiopuolelle syntyy siis aina huomattavat jännite-epäsymmetriat vaiheiden välille. (Norouzi, 2013)

4.1.2 YN-d-muuntajat

Ensiöpuolelta maadoitetut tähteen- ja toisiopuolelta kolmioon kytketyt YN-d-muuntajat käyttäytyvät samankaltaisesti riippumatta muuntajan rakenteesta. Kun yksi vaihe menetetään YN-d-muuntajan yläjännitepuolelta, pysyvät kahden ehjän vaiheen yläjännitteet yhtä suurina kuin ennen katkoa. Myös alajännitepuolen kahteen ehjään vaiheeseen indusoituvat jännitteet pysyvät yhtä suurina kuin aiemmin. YN-d-muuntajassa myös menetetyn vaiheen alajännitepuolen vastaavaan vaiheeseen indusoituu jännite.

Kuormittamattomalla muuntajalla tämän vaihekatkossa menetetyn vaiheen toisiopuolelle indusoitunut jännite on samansuuruinen kuin ennen katkoa. Kuormittamattomassa YN-d-muuntajassa kaikki vaihejännitteet muodostuvat siis toisiopuolelle samansuuruisiksi, kuin ennen vaihekatkoa. Kun muuntajalle lisätään kuormaa muuntaja jatkaa toisiopuolen kuormitusten syöttämistä kaikilla kolmella vaiheella, mutta vain kaksi ehjää vaihetta siirtävät tehoa. Vaikka toisiopuolella vaiheeseen, joka on ensiöpuolelta katkennut, indusoituu jännite, se ei siirrä tehoa eikä siten myöskään virtaa. Tällöin kaikki teho siirtyy kahta ehjää vaihetta pitkin. Kun muuntajalle lisätään kuormaa, vaihejännitteet ja -virrat muuttuvat yhä enemmän epäsymmetrisiksi lisääntyneen hajavuon ja jännitteenaleneman seurauksena. (Norouzi, 2013)

4.1.3 YN-yn-muuntajat

Ensiö- ja toisiopuolilta maadoitetuissa tähteenkytketyissä YN-yn-muuntajissa sydämen rakenteella on suuri vaikutus jännitteiden muodostumisessa toisiopuolen käämeihin vaihekatkon tapahtuessa. Jos sydän on nelipylväinen tai koostuu kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta, ei vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen muodostu jännitettä. Myös harvinaisemmat ensiöpuolelta maadoitetut ja toisiopuolelta maadoittamattomat tähteenkytketyt YN-y-muuntajat käyttäytyvät kuten nelipylväiset ja kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta koostuvat muuntajat, eivätkä muodosta jännitettä menetetyn vaiheen käämeihin.

Kolmepylväisissä YN-yn-muuntajissa maadoitettu tähtikytkentä ensiössä aiheuttaa jännitteiden uudelleen indusoitumisen toisiopuolelle, sillä magneettivuolle ei ole muuta sulkeutumisreittiä, kuin pylväs, josta vaihe on menetetty. Kolmepylväisessä YN-yn-muuntajassa katkenneen vaiheen käämeihin muodostuu siis jännite, kun magneettivuo kulkee ensiöpuolella

menetetyn vaiheen pylvään kautta. Menetetyn vaiheen pylvääseen muodostunut magneettivoito indusoi jännitteen katkenneeseen vaiheeseen ensin ensiöpuolelle ja sitten vastaavaan toisioon. Kolmepylväisissä YN-yn-muuntajissa myös katkenneessa vaiheessa siirtyy tehoa toisin kuin YN-d-muuntajissa. YN-yn-muuntajissa vaihekatkossa kohonnut hajavuo saa aikaan suuremman vaikutuksen uudelleen muodostuvaan jännitteeseen, kuin YN-d-muuntajissa. Kuitenkin myös YN-yn-muuntajissa epäsymmetria alkaa ilmetä muuntajan kuorman kasvaessa tarpeeksi suureksi. (Norouzi, 2013)

4.2 Vaikutukset vaihtosähkökoneisiin

Vaihtosähkökoneita ovat generaattori ja moottori. Vaihtosähkökoneiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään. Normaaliajolla sähkökoneessa esiintyvät myötäjärjestelmä ja nollajärjestelmä sekä niiden magneettivuot. Määrittämällä roottoriin syntyvät magneettivuot, voidaan tarkastella komponenttijärjestelmien virtoja sähkökoneessa. Magneettivuon tiheyden B ja magneettikentän voimakkuuden H välinen suhde voidaan määrittää roottorin materiaalin permeabiliteetin μ avulla.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.5)$$

Virran I ja sen indusoiman magneettivuon tiheyden B välinen suhde etäisyydellä r virtajohdimesta on;

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} I \quad (4.6)$$

Nollajärjestelmän virrat ovat suuruudeltaan ja kulmaltaan samansuuruisia, ja ne voidaan esittää vaihevirtojen tehollisarvoina. (Hamilton & Wang, 2010)

$$i_{a0} = i_{b0} = i_{c0} = I_0 \sin(\omega t) \quad (4.7)$$

Nollajärjestelmän magneettivoitien tiheydet eri vaiheissa voidaan esittää vektoreiden \vec{B}_{a0} , \vec{B}_{b0} ja \vec{B}_{c0} avulla;

$$\vec{B}_{a0} = B_0 \sin(\omega t) \angle 0^\circ \quad (4.8)$$

$$\vec{B}_{b0} = B_0 \sin(\omega t) \angle 120^\circ \quad (4.9)$$

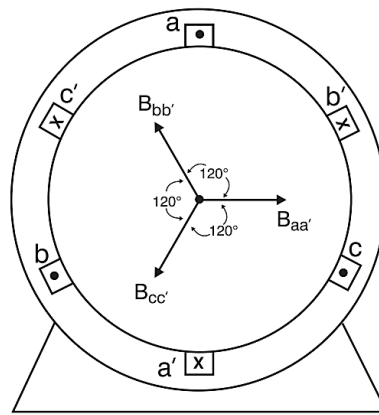
$$\vec{B}_{c0} = B_0 \sin(\omega t) \angle -120^\circ \quad (4.10)$$

$$B_0 = \frac{\mu}{2\pi r} I_0 \quad (4.11)$$

Nollavirtojen indusoima kokonaisvuo \vec{B}_0 on eri vaiheiden magneettivoiden summa. (Hamilton & Wang, 2010)

$$\vec{B}_0 = \vec{B}_{a0} + \vec{B}_{b0} + \vec{B}_{c0} \quad (4.12)$$

Koska vaiheiden A, B ja C nollavirrat ovat yhtä suuret, ovat vaiheiden magneettivuot tasapainossa ja nollajärjestelmän virta on nolla.



Kuva 4.4. Sähkökoneeseen syntyvät nollajärjestelmän magneettivuot (Hamilton & Wang, 2010)

Myötäjärjestelmän virrat voidaan esittää vaihevirtojen tehollisarvoina seuraavasti;

$$i_{a1} = I_1 \sin(\omega t) \quad (4.13)$$

$$i_{b1} = I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (4.14)$$

$$i_{c1} = I_1 \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (4.15)$$

Edelleen magneettivoiden tiheydet eri vaiheissa voidaan esittää vektoreiden avulla;

$$\vec{B}_{a1} = B_1 \sin(\omega t) \angle 0^\circ \quad (4.16)$$

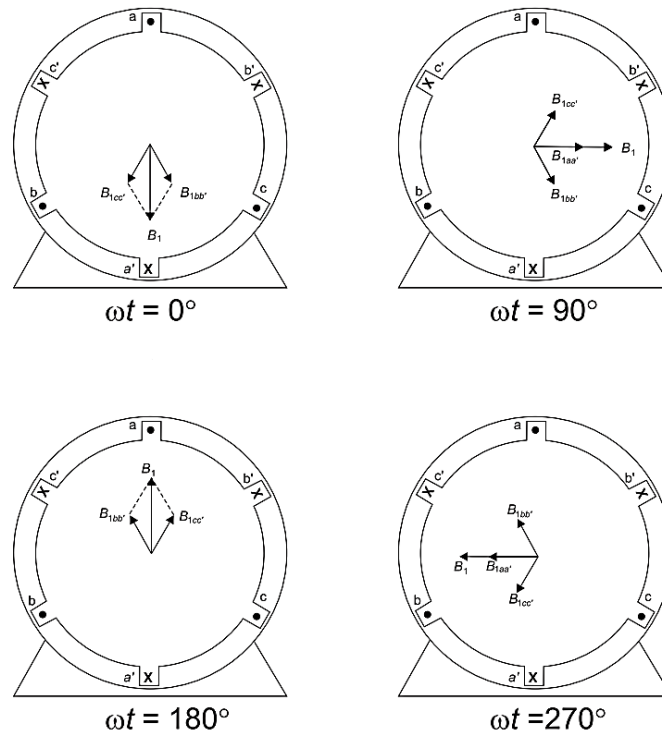
$$\vec{B}_{b1} = B_1 \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (4.17)$$

$$\vec{B}_{c1} = B_1 \sin(\omega t + 120^\circ) \angle -120^\circ \quad (4.18)$$

$$B_1 = \frac{\mu}{2\pi r} I_1 \quad (4.19)$$

Myötävirttojen indusoima kokonaisvuo \vec{B}_1 on eri vaiheiden magneettivoiden summa.

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_{a1} + \vec{B}_{b1} + \vec{B}_{c1} \quad (4.20)$$



Kuva 4.5. Sähkökoneeseen syntyvät myötäjärjestelmän magneettivuot eri kulmasiirroilla ωt (Hamilton & Wang, 2010)

Kuvassa 4.5 havainnollistetaan myötäjärjestelmän virran indusoimaa kokonaismagneettivuota sähkökoneessa siirtokulmilla $\omega t = 0^\circ$, $\omega t = 90^\circ$, $\omega t = 180^\circ$ ja $\omega t = 270^\circ$. Myötäjärjestelmän magneettikenttä pyörii sähkökoneessa vastapäivään, jolloin myös roottori pyörii vastapäivään kulmanopeudella ω . Koska magneettivuon ja roottorin välillä ei ole suhteellista liikettä, ei magneettivuon tiheys indusoi roottoriin virtaa (Hamilton & Wang, 2010).

Vaihekatkossa epäsymmetrian aiheuttama vastajärjestelmän virta synnyttää sähkökoneeseen myötäjärjestelmän lisäksi vastajärjestelmän ja roottorin pyörimissuuntaa vastaan pyörivän vastajärjestelmän magneettikentän. Vastajärjestelmän virrat voidaan esittää vaihevirtojen tehollisarvoina.

$$i_{a2} = I_2 \sin(\omega t) \angle 0^\circ \quad (4.21)$$

$$i_{b2} = I_2 \sin(\omega t + 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (4.22)$$

$$i_{c2} = I_2 \sin(\omega t - 120^\circ) \angle -120^\circ \quad (4.23)$$

Edelleen magneettivuon tiheydet eri vaiheissa voidaan esittää vektoreiden avulla;

$$\vec{B}_{a2} = B_2 \sin(\omega t) \angle 0^\circ \quad (4.24)$$

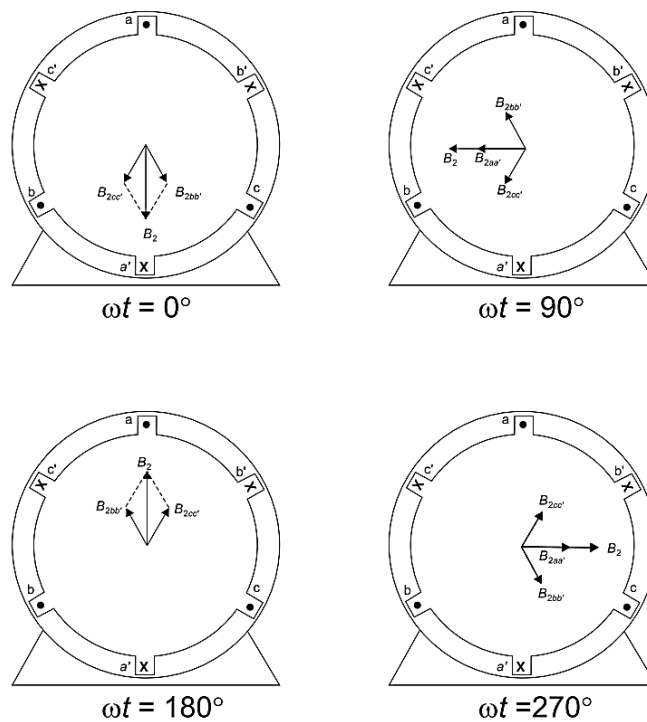
$$\vec{B}_{b2} = B_2 \sin(\omega t + 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (4.25)$$

$$\vec{B}_{c2} = B_2 \sin(\omega t - 120^\circ) \angle -120^\circ \quad (4.26)$$

$$B_2 = \frac{\mu}{2\pi r} I_2 \quad (4.27)$$

Vastavirtojen indusoima kokonaisvuo \vec{B}_2 on eri vaiheiden magneettivoiden summa.

$$\vec{B}_2 = \vec{B}_{a2} + \vec{B}_{b2} + \vec{B}_{c2} \quad (4.28)$$



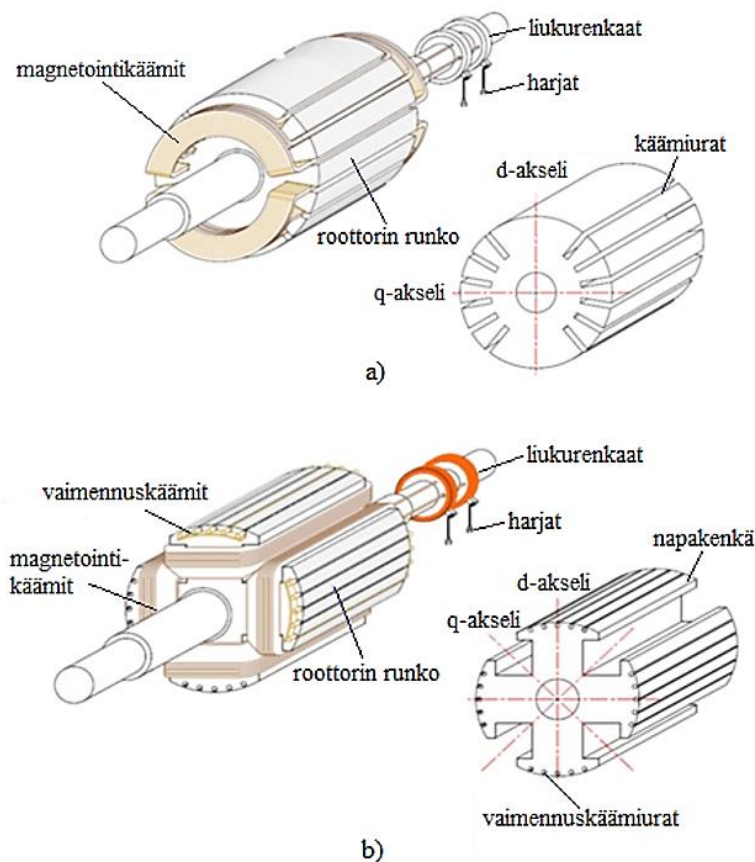
Kuva 4.6. Sähkökoneeseen syntyvät vastajärjestelmän magneettivuot eri kulmasiirroilla ωt (Hamilton & Wang, 2010)

Kuvassa 4.6 havainnollistetaan vastajärjestelmän virran indusoimaa kokonaismagneettivuota sähkökoneessa siirtokulmilla $\omega t = 0^\circ$, $\omega t = 90^\circ$, $\omega t = 180^\circ$ ja $\omega t = 270^\circ$. Vastajärjestelmän magneettikenttä pyörii sähkökoneessa myötäpäivään. Koska roottori pyörii vastapäivään kulmanopeudella ω , näyttää vastajärjestelmän magneettivuon pyörivän kulmanopeudella 2ω . Magneettivuon ja roottorin välillä on tässä tapauksessa suhteellista liikettä, ja magneettivuon indusoi sähkökoneen roottoriin virtaa ja aiheuttaa roottorin lämpenemistä. (Hamilton & Wang, 2010) Lämpeneminen voi aiheuttaa mekaanisia rakenne- tai eristysvaurioita roottorissa jo sekunneissa. (Reimert, 2006)

4.2.1 Vaikutukset generaattoriin

Voimalaitoksissa sähköä tuottavat tahtigeneraattorit. Tahtigeneraattorit jaetaan niiden roottorin rakenteen mukaan umpinapaisiin ja avonapaisiin tahtikoneisiin. Umpinaparoottorissa (kuva 4.7. a.) magnetointikäämit kulkevat roottorin akselin suuntaisesti magnetointinapojen välisissä urissa. Umpinaparoottorin ilmavälit ovat symmetrisiä, mutta käämiuria ei ole sijoitettu koko roottorin kehälle. Umpinaparoottoreita käytetään nopeasti, jopa 3000 rpm, pyörivissä generaattoreissa, esimerkiksi höyry- ja turbiinivoimalaitoksissa. (Hietalahti, 2011. s.87)

Avonaparoottorissa (kuva 4.7. b.) magnetointikäämit kierretään avonaisten napasydänten ympärille. Jokaisella navalla on omat magnetointikääminsä ja navat magnetoituvat vuorotellen S- ja N-navoiksi. Napojen päissä olevat napakengät on muotoiltu siten, että ilmaväli suurenee reunoilta. Avonapaisia koneita käytetään hitaasti, alle 500 rpm, pyörivissä generaattoreissa, esimerkiksi vesivoimalaitoksissa. (Hietalahti, 2011. s.88)



Kuva 4.7. Umpinaparoottorin (a) ja nelinapaisen avonaparoottorin (b) rakenne (muokattu lähteestä Costa, et al., 2020)

Umpinaparoottorin rungon päissä on tukirenkaat, jotka pitävät magnetointikämmien päät paikoillaan, ja tarjoavat käämeissä kulkevalle sähkövirralle kulkureitin. Tukirenkaat on usein kutistettu suoraan paikalleen roottorin runkoon. Vaihekatkossa roottoriin indusoituneet vastajärjestelmän virrat tuottavat suurimman lämpenemisen roottorin rungon päissä, kun virrat kulkevat urista napoihin ja tukirenkaisiin ja tukirenkaista napojen kautta takaisin uriin. Vastajärjestelmän virran muodostuessa käämiuriin tapahtuu kuumenemistä, joka voi johtaa urien hehkutukseen ja murtumiseen. (Batchelor & King, 1965)

Generaattorin kestävyys vastajärjestelmää ja sen virtaa vastaan riippuu roottorirakenteiden välisestä kosketuksesta. Matala resistanssi minimoi kuumenemisen ja estää valokaaren muodostumisen kosketuspisteissä. Roottorin sähköjohtavuuden parantamiseksi roottorin napapinnoille voidaan lisätä vaimennuskäämejä, joiden avulla roottorin pinnan poikki muodostuu pieniresistanssisia kulkureittejä virralle (kuva 4.7). Vaimennuskäämien päät on yhdistetty tukirenkaisiin matalaresistanssisen kulkureitin muodostamiseksi käämiurista tukirenkaisiin. (Batchelor & King, 1965)

Avonapageneraattoreissa vaimennuskäämitys muodostuu magnetointinapojen pinnalle päistään juotetuista johtimista. Ne tarjoavat pieniresistanssisen kulkureitin napojen pinnoilla esiintyville virroille. Juotettuihin vaimennuskäämeihin ei synny yksittäisiä kuumia kohtia kuten umpinaparoottoreissa. Vaimennuskäämit voivat olla toisistaan erotettuja tai toisiinsa kytkettyjä. Erotetut vaimennuskäämit eivät ole yhteydessä toisten napapintojen vaimennuskäämeihin, kun taas toisiinsa kytketyt käämit on yhdistetty johtimilla eri napojen välillä. (Reimert, 2006)

Jos vaimennuskäämejä ei ole kytketty toisiinsa, kulkeutuu suuri osa vaihekatkossa roottoriin indusoituneesta virrasta magnetointinapojen pinnalta naparautaa pitkin roottoriin ja siitä seuraavaan magnetointinapaan. Navan liitos roottoriin tarjoaa nollavirralla vastusta ja siten tuottaa lämpöä roottorirakenteeseen ja voi vaurioittaa roottorin eristeitä. Jos vaimennuskäämit on kytketty toisiinsa napojen välillä, pienenee naparautadassa vaihekatkossa kulkeva virta huomattavasti. Sen sijaan suuri osa virrasta kulkee napojen välisissä johtimissa, jotka kytkyvät vaimennuskäämit toisiinsa. Käämeihin indusoitunut virta voi vaurioittaa johtimia niiden epätasaisen lämpölaajenemisen vuoksi. (Reimert, 2006)

Vaihekatkossa vastajärjestelmän virran synnyttämä, roottorin myötäjärjestelmän magneettikentän kanssa päinvastoin pyörivä, magneettikenttä tuottaa roottoriin akselin vääntömo-

mentin värähtelyä. Nämä värähtelyt välittyvät myös generaattorin staattoriin. Jos staattori on jousiasennettu, värähtely saadaan vaimennettua, mutta ilman jousitusta värähtely voi aiheuttaa räsitystä staattorin kannattimiin. Kuitenkin vääntömomentin värähtely on vaihekatkon ilmetessä pienempi ongelma verrattuna roottorin lämpenemiseen. (Reimert, 2006)

Yleensä tahtigeneraattorit on suunniteltu toimimaan jonkin aikaa koneen nimellisvirtaa vastaavalla vastajärjestelmän virralla. Generaattorin suojausjärjestelmän toimintaperiaate on yleensä suunniteltu tämän virran kestoajan perusteella. Aika, jonka generaattori kestää oman nimellisvirtansa suuruista vastajärjestelmän virtaa voidaan laskea yhtälön 4.24 mukaan.

$$t = \frac{K}{(I_2)^2} \quad (4.29)$$

Kerroin t on aika sekunteina, I_2 on vastajärjestelmän virta ja K on generaattorille ominainen vakioarvo suhteessa roottorin lämpökapasiteettiin. Suure t edustaa siis aikaa, kuinka kauan generaattorin nimellisvirtaa vastaava vastajärjestelmän virtaa voidaan ylläpitää vahingoittamatta generaattoria merkittävästi. (IAEA, 2016) Suurissa nestejohdejäähdytteisissä generaattoreissa vastajärjestelmän virroilla on enemmän vaikutusta generaattoriin, kun pienemmissä ilmajäähdytteisissä generaattoreissa. Nestejäähdytteisten generaattoreiden ominaisarvo K on siten pienempi kuin ilmajäähdytteisten generaattoreiden K arvo. (Batchelor & King, 1965)

4.2.2 Vaikutukset oikosulkumoottoriin

Oikosulkumoottorit ovat voimalaitoksilla yleisesti käytettyjä sähkökoneita, joita käytetään mekaanisen energian tuottamiseksi erilaisille laitteille normaaleissa laitosprosesseissa sekä onnettomuustilanteiden turvallisuusjärjestelmissä. Vaihekatkon aiheuttama epäsymmetrinen virta aiheuttaa oikosulkumoottoriin normaalisti olemassa olevan myötäjärjestelmän lisäksi vastajärjestelmän. Vastajärjestelmä muodostaa moottoriin roottorin pyörimistä vastaan pyörivän magneettivuon. Vastajärjestelmän synnyttämä magneettivuo indusoi roottoriin vastajärjestelmän virran, ja tämä ylimääräinen virta tuottaa moottoriin lämpöä. Epäsymmetria kasvattaa moottoreihin kohdistuvaa räsitystä, mikä johtaa moottoreiden suorituskyvyn alenemiseen ja pahimmillaan moottoreiden vaurioitumiseen. (Elovaara & Haarla, 2011 s.446)

Normaalikäytössä oikosulkumoottorin roottori pyörii hieman pienemmällä nopeudella kuin staattorin tuottama magneettivuon. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi s . Jos moottori pysyy käynnissä vaihekatkon syntyessä, jatkaa roottori pyörimistä myötäjärjestelmän jättämällä s ja vastajärjestelmän magneettivuon nopeuteen nähden jättämällä $2-s$. Roottorin resistanssi riippuu jättämästä. Myötäjärjestelmän resistanssi on $\frac{R}{s}$ ja vastajärjestelmän resistanssi on $\frac{R}{2-s}$. (Anderson, 1995) Myötä- ja vastavirrat roottorissa voidaan sitten laskea;

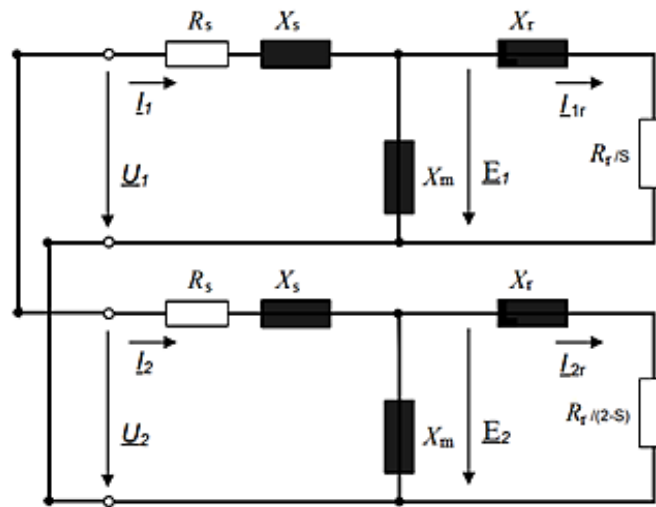
$$I_{1r} = \frac{E_1}{\left(\frac{R_r}{s}\right) + jX_r} \quad (4.30)$$

$$I_{2r} = \frac{E_2}{\left(\frac{R_r}{2-s}\right) + jX_r} \quad (4.31)$$

Yhtälöissä 4.30 ja 4.31 R_r kuvaa roottorin resistanssia, X_r roottorin reaktanssia, s jättämää, I_{1r} myötäjärjestelmän virtaa roottorissa, I_{2r} vastajärjestelmän virtaa roottorissa ja E_1 ja E_2 verkon lähdejännitteitä.

Moottorit on usein kytketty kolmioon tai tähteen niitä maadoittamatta, jolloin moottoreissa ei ilmene nollajärjestelmän komponenttia, sillä nollavirralla ei ole kulkureittiä (Batorowicz, et al., 2015). Vaihekatkossa moottorin käämit kuormittuvat eri tavalla riippuen siitä, onko moottori kytketty tähteen vai kolmioon. Tähtikytketyssä moottorissa käämien virrat ovat samat kuin viallisen tilanteen aikaiset vaihevirit eli viallisen käämin kautta ei kulje virtaa. Kolmiokytketyssä moottorissa terveiden vaiheiden välisen käämin vaihevirta on kaksinkertainen kahden muun käämin virtoihin verrattuna. (Mörsky, 1992)

Jo pienikin vastajärjestelmän jännite voi muodostaa roottorin käämeihin myötäjärjestelmän virtoja huomattavasti suurempia vastajärjestelmän virtoja. Tämä johtuu moottorin suhteellisen pienestä vastajärjestelmän impedanssista. Moottorin sijaiskytkennässä myötä- ja vastajärjestelmän impedanssit moottorissa on sarjaankytketty (kuva 4.8).



Kuva 4.8. Myötä- ja vastajärjestelmän sijaiskytkentä moottorissa (muokattu lähteestä Deprez, 2008)

Roottorin nopeus riippuu moottorin ja kuorman vääntömomentin ja nopeuden ominaisuuksien yhteensovittamisesta, joten epäsymmetrian vaikutukset riippuvat moottorin syöttämän kuorman tyypistä. Jos moottorin kuorma pysyy vakiona vaihekatkon sattuessa, myötäjärjestelmän jännite laskee ja virta nousee moottorin staattorissa ehjissä vaiheissa. Huolimatta virrankulutuksen noususta, moottorin vääntömomentti laskee myötäjärjestelmän jännitteen laskun takia. (Anderson, 1995) Mekaaninen vääntömomentti vaihetta kohden voidaan laskea seuraavasti;

$$T_m = T_{m1} + T_{m2} \quad (4.32)$$

Yhtälössä 4.32 T_m on mekaaninen vääntömomentti vaihetta kohden, T_{m1} on myötäjärjestelmän mekaaninen vääntömomentti ja T_{m2} on vastajärjestelmän mekaaninen vääntömomentti. Myötä- ja vastajärjestelmän vääntömomentit voidaan laskea moottorin tehon ja tahtinopeuden ω avulla.

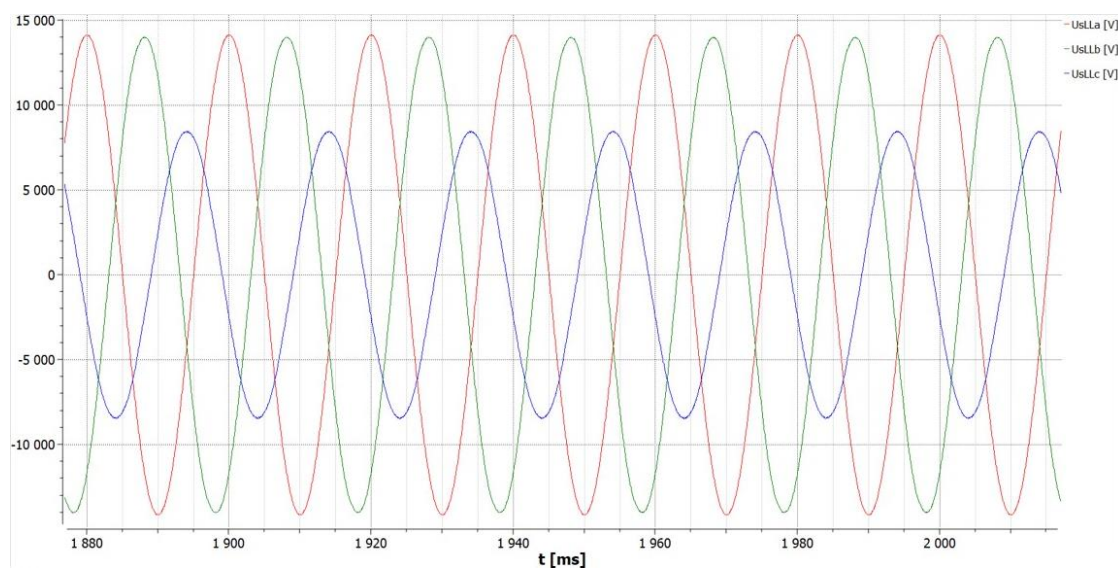
$$T_{m1} = \frac{(I_{r1})^2 R_r}{\omega s} \quad (4.33)$$

$$T_{m2} = \frac{(I_{r2})^2 R_r}{\omega(2-s)} \quad (4.34)$$

Vääntömomentin laskiessa moottori hidastuu ja hakeutuu uuteen toimintapisteeseen. Moottori voi myös pysähtyä vääntömomentin ja nopeuden laskettua, jos se ei vakiokuormalla pysty tuottamaan kuorman tarvitsemaa tehoa. (Anderson, 1995)

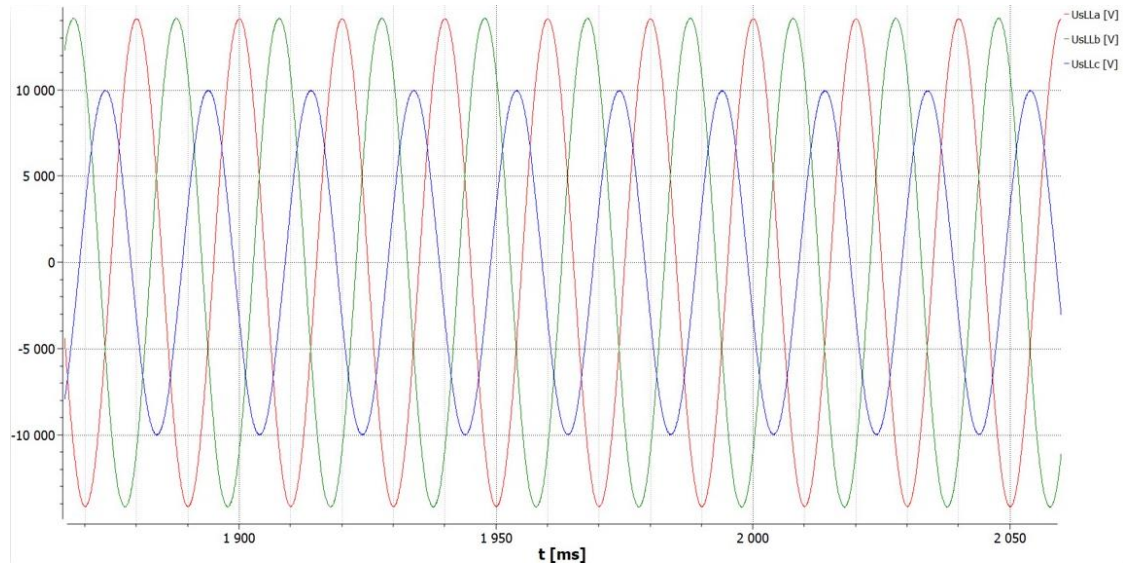
Alle 1 % suhteellista epäsymmetriaa myötä- ja vastajärjestelmän välillä pidetään sallittuna moottoreissa, mutta jo 3 % epäsymmetria laskee moottorin kuormitettavuutta 12 %:lla ja 5 % epäsymmetria 25 %:lla. (Von Jouanne & Banerjee, 2001) Kansainvälinen sähkötekninen komissio International Electrotechnical Commission (IEC) ohjeistaa standardissa *IEC 60034-26 Rotating electrical machines* olla käyttämättä moottoreita yli 5 % jännitteen epäsymmetrialla, sillä se johtaa todennäköisesti moottorin vaurioitumiseen (IAEA, 2016). Suomessa kansallinen standardi *SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet* asettaa jännitteen epäsymmetrian raja-arvoksi 2 % nimellisarvosta (SFS-EN 50160, 2010).

Vaihekatkotilanteessa käynnissä pysyvän oikosulkumoottorin staattorin myötäjärjestelmän virran ja syntyvän vastajärjestelmän virran virtasumma luo moottoriin pyörivän magneettikentän sijasta sykkivän magneettikentän. Roottorin pyöriessä edelleen myötäjärjestelmän jättämällä s ja vastajärjestelmän jättämä on suhteessa roottorin pyörimiseen $2-s$. Tällöin roottoriin indusoituu lähes kaksinkertaisella syöttötaajuudella jännitteitä, jotka pyrkivät synnyttämään roottoriin tämän vastajärjestelmän kumoavia virtoja. (Pyrhönen, 2023) Moottorin staattorikämeihin generoituva jännite voi näyttäytyä moottoria syöttävässä verkossa asti ja siten tasapainottaa verkon jännite-epäsymmetriaa. Kuvissa 4.9 ja 4.10 on esitetty 100 % ja 80 % kuormalla käyvien moottoreiden syöttämät jännitteet tilanteessa, joissa yksi vaihe on katkaistu.



Kuva 4.9. 100 % kuormalla käyvän 10 kV moottorin syöttämät jännitteet tilanteessa, jossa yksi vaihe on katkaistu (ABB, 2023)

Kuvassa 4.9 on esitetty jännitteet moottorin käydessä 100 % kuormalla tilanteessa, jossa yksi vaihe katkaistaan. Moottori pystyy se luomaan puuttuvaan vaiheeseen jännitteen, ja näin ollen moottorin syöttämät jännitteet näyttäytyvät kahdessa jännitteessä lähes normaalin suuruisina ja vain yhdessä alhaisempina.



Kuva 4.10. 80 % käyvän 10 kV moottorin syöttämät jännitteet tilanteessa, jossa yksi vaihe on katkaistu (ABB, 2023)

Kuvasta 4.10 nähdään, että moottorin käydessä 80 % kuormalla tilanteessa, jossa yksi vaihe katkaistaan, on moottorin katkaistuun vaiheeseen luoma jännite korkeampi kuin 100 % kuormalla käyvän moottorin luoma jännite katkenneessa vaiheessa.

Kun käyvät oikosulkumoottorit muodostavat vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen jännitteen, ne pienentävät vaihekatkossa verkkoon syntyntä jännite-epäsymmetriaa ja vaikeuttavat vaihekatkon havaitsemista sähköjärjestelmässä. Muodostuneen jännitteen suuruus riippuu muun muassa moottorin kuormituksesta.

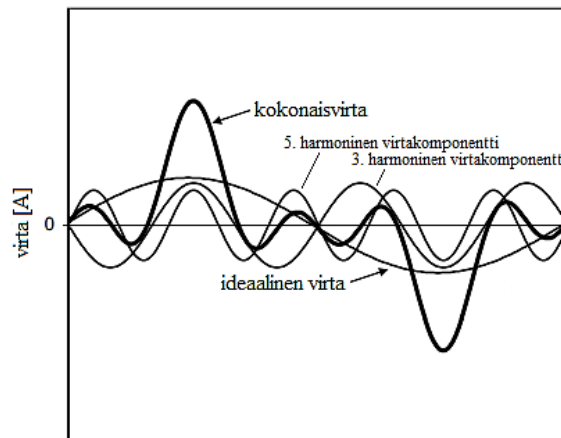
4.3 Vaikutukset tehoelektroniikkaan

Suuntaajat ovat tehoelektroniikkalaitteita, joilla muokataan sähköenergiaa haluttuun muotoon. Suuntaajat koostuvat tehopuolijohteista, joita ovat piidiodit, tyristorit ja tehotransistorit. Suuntaajat voivat toimia ottamalla sisään ja syöttämällä ulos tasavirtaa, ottamalla sisään ja syöttämällä ulos vaihtovirtaa, ottamalla sisään tasavirtaa ja syöttämällä ulos vaihtovirtaa (vaihtosuuntaaja) tai ottamalla sisään vaihtovirtaa ja syöttämällä ulos tasavirtaa

(tasasuuntaaja). Niitä käytetään tasavirta- ja vaihtovirtamoottorikäytöissä. (Aura & Tonteri, 1996. s.341–342)

Kolmivaiheiseen sähköjärjestelmään vaihekatkossa syntynyt epäsymmetria kohdistuu suuntaajiin, jotka ottavat verkosta vaihtojännitettä. Vaihtojännitettä tasajännitteeksi muuttavan tasasuuntaajan häiriöt epäsymmetriatilanteessa riippuvat tasasuuntaajassa käytetystä suuntaustekniikasta. Suuntaustekniikka toteutetaan yleisimmin joko ohjaamattomana tai ohjatuna tasasuuntaussiltana. Ohjaamattomassa diodisiltatasasuuntaajassa epäsymmetrinen syöttöjännite aiheuttaa ulostulojännitteen vääristymää. Ohjatuille tasasuuntaajille jännitteen epäsymmetria aiheuttaa tahdistusvaikeuksia. (IAEA, 2016)

Epäsymmetrinen jännite aiheuttaa tasasuuntaajan ulostulojännitteen vääristymää. Vaihtovirtaa syöttävät suuntaajat tuottavat siniaaltoja, joissa on paljon virran harmonisia yliaaltoja (kuva 4.11). Virran yliaallot ovat virran signaaleja, joiden taajuus on eri, kuin verkon perustaajuus 50 Hz. Harmoniset yliaallot ovat verkon taajuuden monikertoja, toisen kertaluvun harmonisen yliaallon taajuus on 100 Hz, kolmannen 150 Hz, neljännen 200 Hz. Kuvassa 4.9 kuvataan virran aaltomuoto ja sen harmonisia yliaaltokomponentteja. (Aura & Tonteri, 1996)

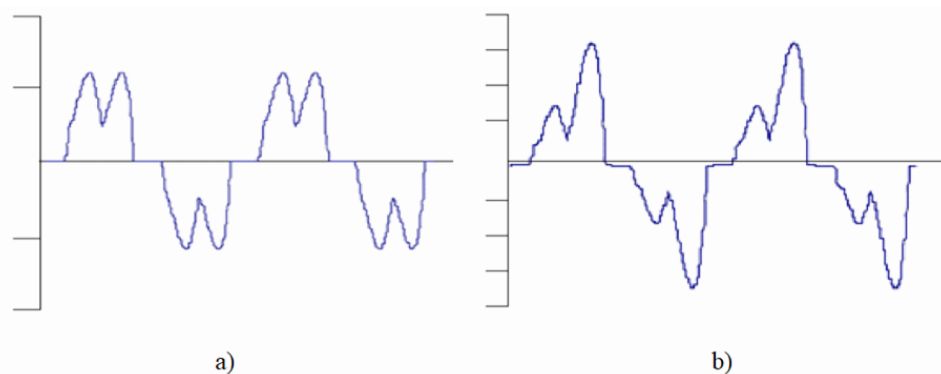


Kuva 4.11. Virran aaltomuoto ja sen 3. ja 5. harmoninen yliaaltokomponentti (muokattu lähteestä Singh, et al., 2006)

Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän tasapainoisessa tilassa virran harmoniset yliaaltokomponentit eri vaiheissa ovat yhtä suuret. Epäsymmetrisessä tilassa harmoniset yliaaltokomponentit eri vaiheissa muuttuvat keskenään eri suuruisiksi ja niiden summautuessa kokonaisvirtaan, muuttuu virran aaltomuoto epäsinimuotoiseksi. (Singh, et al., 2006)

Jännitteen epäsymmetrian aikana suuntaajan tulossa harmoniset yliaallot eivät rajoitu suuntaajan ominaisiin yliaaltoihin, vaan virran tulossa voi esiintyä verkkovirran yliaaltojen nollakomponentin yliaaltoja, joita ei normaalitilanteessa ilmene. (Von Jouanne & Banerjee, 2001) Yliaallot jaetaan positiiviseen, negatiiviseen, ja nollakomponenttiin. Positiivisen komponentin yliaaltoja ovat kertaluvultaan 1., 4., 7., 10. jne. yliaallot ja negatiivisen komponentin yliaaltoja ovat kertaluvultaan 2., 5., 8., 11. jne. yliaallot. Nollakomponentin yliaaltoja kutsutaan myös kolmansiksi harmonisiksi yliaalloiksi ja niitä ovat kertaluvultaan 3., 6., 9., 12. jne. yliaallot. Epäsymmetrian aiheuttamat nollakomponentin yliaallot kulkeutuvat sähköjärjestelmän nollajohtimeen, ja aiheuttavat johdinten ylikuormittumista ja kuumenemista. (Elovaara & Haarla, 2011 s.448–450)

Kun suuntaajan tulojännite on epäsymmetrinen, muuttuu virta kaksoispulssimaisesta aaltomuodosta yksipulssiseksi aaltomuodoksi (kuva 4.12) virtojen jakautuessa epätasaisesti diodisillan jalkojen kesken (Von Jouanne & Banerjee, 2001). Pienemmällä pulssiluvulla virta sisältää enemmän yliaaltoja (Hietalahti, 2013).

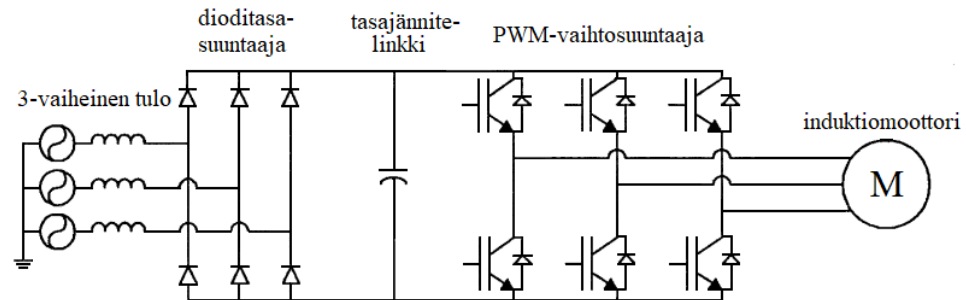


Kuva 4.12. Tasasuuntaajan tyypillinen vaihevirta (a) ja vaihevirta 5 % jännitteen epäsymmetrialla (b) (ABB, 2022. b.)

Virtojen epätasainen jakautuminen tasasuuntaajan diodisillan jalkojen kesken aiheuttaa johdumishäviöitä ja voi johtaa tasasuuntauksen epäonnistumiseen (Choi & Jeong, 2002). Lisääntynyt virta voi myös aiheuttaa diodien kuumenemista ja lyhentää niiden käyttöikä (Von Jouanne & Banerjee, 2001).

Suuntaajien lisäksi voimalaitosverkoissa voi esiintyä taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttaja on laite, joka sisältää sekä tasasuuntaajan, että vaihtosuuntaajan (kuva 4.13). Taajuusmuuttaja kytketään sähköä syöttävän verkon ja sähkömoottorin väliin, ja sen tarkoitus on muokata moottorin syöttötaajuutta sekä jännitettä. Taajuusmuuttajan tulojännitteen epäsymmetrian

kasvaessa, sen tulovirta muuttuu epätasapainoisemmaksi. Koska taajuusmuuttaja sisältää tasasuuntaajan muuttuu virran aaltomuoto myös tasasuuntaajassa kaksoispulssiaaltomuodosta yksipulssiaaltomuodoksi tasasuuntaajan diodien epäsymmetrisen johtavuuden vuoksi.



Kuva 4.13. Taajuusmuuttaja pulssinleveysmoduloidulla vaihtosuuntaajalla (muokattu lähteestä Von Jouanne & Banerjee, 2001)

Jos taajuusmuuttajassa on signaalimuokkaustapana käytössä pulssinleveysmodulaatio (PWM), tarjoaa se taajuusmuuttajalle paremman vastustuskyvyn jännitehäviöille ja ohimeneville häiriöille tasajänniteväylän säätömahdollisuudella. Pulssinleveysmodulaatiolla virran aaltomuoto pysyy sinimuotoisempana ja siinä on vähemmän virran yliaaltoja. Jännitteen epäsymmetria aiheuttaa kuitenkin myös PWM-taajuusmuuttajiin tulovirran vääristymää. (Von Jouanne & Banerjee, 2001)

Taajuusmuuttajien syöttövirran epätasapaino voi olla suuri, jo pienellä jännitteen epäsymmetrialla. Jännitteen epäsymmetrian kasvaessa taajuusmuuttajan tulovirran epätasapaino voi kasvaa jopa 10–50 % nimellisvirrasta, taajuusmuuttajan sisäisestä reaktanssista ja sähkönsyötön impedanssista riippuen. Suuri tulovirran epätasapaino voi laukaista ylikuormitussuojan ja pysäyttää niiden syöttämät moottorit ja järjestelmät. Monien moottorinohjauskeskusten suojaus on suunniteltu laukeamaan 5 % virran epätasapainosta, kuten on suositeltu moottorien käytön raja-arvoksi. (Dahiya, et al., 2013)

4.4 Suojareleiden rakenne ja toiminta

Sähköjärjestelmän suojauksella tarkoitetaan yleisesti relesuojausta, joka koostuu releiden, mittamuuntajien sekä katkaisijoiden muodostamasta kokonaisuudesta. Lisäksi suojaukseen voi kuulua automaatiota ja erillisiä suojausjärjestelmiä. Suojauksen tehtävänä on irrottaa vikaantunut laite tai järjestelmän osa muusta sähköverkosta niin, että loput verkosta voi jatkaa toimintaa ilman häiriöitä tai vaurioita.

Releitä on olemassa sähkömekaanisia, staattisia ja numeerisia releitä. Vanhimmat releet ovat sähkömekaanisia releitä, ja niiden toiminta perustuu releen osien mekaaniseen liikkeeseen. Staattiset releet koostuvat puolijohdekomponenteista ja ovat sen ansiosta kooltaan pienimpiä, kun sähkömekaaniset releet. Staattisilla releillä pystytään suorittamaan sähkömekaanisia releitä vaativampia suojaustoimintoja ja integroimaan useampia toimintoja samaan releeseen. Numeerisen releen suojausasettelut ja -toiminnot ovat edelleen kehittyneempiä, kuin staattisissa releissä. Numeerisissa releissä mittaus- ja suojaustoimintojen toteutus on tehty mikroprosessorin avulla ja tietoa käsitellään numeerisessa eli digitaalisessa muodossa. Numeeriset releet mahdollistavat kaksisuuntaisen tiedonsiirron. Tyypillisesti releestä luetaan mittaus-, tila- ja asettelutietoja, ja se vastaanottaa ohjaus- ja asettelutietoja. Myös numeerisissa releissä useampi suojaustoiminto integroidaan samaan laitteeseen. (Mörsky, 1992. s.21–26)

Relesuojaus koostuu varsinaisen suojareleen lisäksi mittamuuntajasta, katkaisijasta, aputehonlähteestä ja viestiyhteyksistä. Mittamuuntajat muuntavat sähköjärjestelmän virran ja jännitteen releille sopivaan muotoon. Ne erottavat järjestelmän mittauspiirin galvaanisesti päävirtapiiristä ja suojaavat releitä ylikuormilta. Katkaisija on sähköverkon primääripiirin osa, jolle rele antaa toimintaohjeita. Katkaisija saa jännitteen apuenergiälähteestä ja avautuu tai sulkeutuu releen käskyn mukaisesti. Apuenergiälähteet täydentävät relesuojausta ja toteuttavat sähkönsyöttöä katkaisijoille myös sähköverkon vikatilanteissa. Apuenergianlähteet ovat usein tasasuuntaajilla syötettyjä akustoja. (Mörsky, 1992. s.16–17)

Relesuojauksen on oltava selektiivinen, aukoton, nopea ja luotettava. Suojauksen selektiivisyys tarkoittaa sähköjärjestelmän vian eristämistä vain sen vaikutusalueelle, jolloin järjestelmästä poistetaan mahdollisimman pieni osa. Selektiivisyys voidaan toteuttaa aikaselektiivisesti, virtaselektiivisesti tai käyttämällä suoja-alueita esimerkiksi differentiaalisuojauksella. Kun vierekkäiset suoja-alueet peittävät osittain toisensa, suojaus on aukoton.

Suojauksen nopealla toiminnalla pyritään estämään vian leviäminen järjestelmän ehjiin osiin ja minimoimaan vian aiheuttamat vahingot. Suojauksen nopeuteen vaikuttavat vian tunnistamiseen kuluva aika ja katkaisijan tai toimilaitteen toiminta-aika. Voimalaitoksissa suojauksen on toimittava nopeasti, mutta myös suunnitellusti. Releen tulee toimia silloin, kun verkossa on vika, mutta se ei saa aiheuttaa tarpeettomia laukaisuja normaaleissa käyttötilanteissa tai suunnitelluissa poikkeustilanteissa.

Virtareleet ovat yksisuuntareleitä, jotka mittaavat verkon virtaa ja toimivat kun releeseen asetettu kulutetun virran kynnyksarvo ylittyy. Ylivirtareleitä ovat hetkellinen, vakioaikainen sekä käänteisaikainen ylivirtarele. Hetkellinen virtarele toimii välittömästi, kun sen läpi kulkeva virta ylittää asetusarvon. Vakioaikaylivirtareleen toiminta-aikaa voidaan säätää, ja se toimii asetetun ajan päästä ylivirran havaitsemisesta, virran suuruudesta riippumatta. Käänteisaikaylivirtarele toimii sitä nopeammin, mitä enemmän virta ylittää releen asetusarvon. Hetkellisiä ylivirtareleitä ja vakioaikaylivirtareleitä käytetään tyypillisesti oikosulkusuojareleinä. (Mörsky, 1992. s.35)

Jännitereleet mittaavat asennuspaikan jännitettä. Alijänniterele toimii jännitteen alittaessa releen asetusarvon ja ylijänniterele jännitteen ylittäessä releen asetusarvon. Alijännitereleellä tunnistetaan jännitteen alenemat sähköisillä koneilla, jolloin voidaan välttää ei toivotut käyttötilat ja mahdollinen verkon stabiilisuuden menetys. Ylijännitereleellä suojataan sähköiset koneet ja järjestelmään liitetyt komponentit liian korkeilta jännitteiltä, joita voi esiintyä voimalaitosverkoissa esimerkiksi magnetoinnin tai jännitteensäädön toimiessa virheellisesti. (Siemens, 2010)

Taajuusreleet mittaavat asennuspaikan taajuutta. Taajuusreleitä voidaan käyttää moottoreiden ja sähkölaitteiden erottamiseen sähköjärjestelmästä taajuuden muutoksissa. Alitaajuusreleiden tärkeä käyttökohde on valtakunnallinen alitaajuussuojaus tuotantovajetilanteissa. Ylitaajuusreleitä käytetään generaattoreiden suojauksessa. (Mörsky, 1992. s.40)

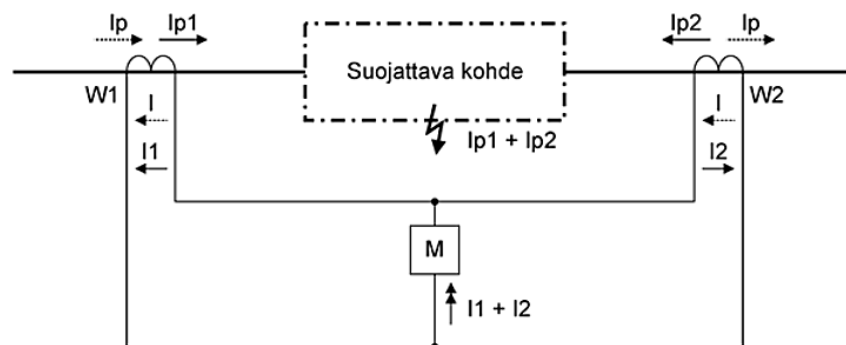
Suunta- ja tehoreleet mittaavat kohteen jännitteen ja virran hetkellisarvoja, tai näistä johdettuja tehoja. Rele muodostaa virran ja virran sekä jännitteen välisen vaihesiirtokulman suuruuteen verrannolliset suureet ja mittaa niitä. Rele havahtuu ja toimii, kun releen mittaama virta ylittää asetteluarvon ja vaihesiirtokulma on määritetyllä alueella. Maasulun suuntareleet mittaavat suojattavan kohteen nollajännitteen ja nollavirran hetkellisarvoja ja havahtuvat verkon maasulkuihin. (Mörsky, 1992. s.40) Takatehorele mittaa suojattavan kohteen verkosta ottaman pätötehon hetkellisarvoa ja sen suuntaa. Takatehorelettä voidaan käyttää estämään generaattoria käymästä moottorina. (Siemens, 2010)

Epäsymmetria- eli vinokuormitusreleiden tehtävä on tunnistaa epäsymmetria sähköjärjestelmässä. Rele tunnistaa verkon epäsymmetrian pelkistämällä vastakomponentin erilleen kolmivaihejärjestelmän virroista ja jännitteistä. Vinokuormitusrele voidaan toteuttaa varustamalla herkkä ylivirtarele suodattimella, joka pystyy erottamaan vastakomponentin

kuormitusvirran symmetrisistä komponenteista. Vinokuormitusrele voi laueta termisen ominaiskäyrän tai vakioaikaisen laukaisuportaan asetuksilla. Vinokuormitusreleitä käytetään suojaamaan generaattoreita ja moottoreita niihin kohdistuvilta rasituksilta verkon epäsymmetrisissä vikatilanteissa, kuten vaihekatkovoioissa. (Siemens, 2010)

Erovirta- eli differentiaalirele toimii virtavertailuperiaatteella ja mittaa suojattavalle kohteelle tulevia ja sieltä lähteviä virtoja. Rele toimii, kun suojattavalle kohteelle tulevat ja sieltä lähtevät virrat eroavat toisistaan ja virtojen ero ylittää releen asetteluvarvon. Differentiaalireleet soveltuvat muuntajien, generaattoreiden ja kiskostojen suojaukseen. Näissä sähköisissä komponenteissa virtojen muutokset ovat yleensä merkki viasta. (Mörsky, 1992. s.46–47)

Erovirtasuojaus (kuva 4.14) toteutetaan virtamuuntajilla W1 ja W2, jotka kytketään suojattavan kohteen molemmille puolille. Virtamuuntajien toisiokäämeihin muodostettuun suljettuun piiriin asennetaan mittauslaite M, joka ilmaisee virtaeron. (Siemens, 2010)



Kuva 4.14. Differentiaalireleen periaatekaavio (SIEMENS, 2010)

Etäisyys- eli distanssireleet mittaavat asennuspaikan ja vikapaikan välistä impedanssia. Rele toimii, kun mitattava impedanssi alittaa asetteluvarvon. Releen mittaama impedanssi on sitä pienempi mitä lähempänä vikapaikka on. Distanssirele päättlee vian suunnan virran ja jännitteen vaihesiirtokulman avulla. Distanssireleillä suojattava alue toteutetaan vyöhykkeillä, joilla jokaisella on oma ulottumansa ja aikahidastus suojattavalle alueelle. (Mörsky, 1992. s.57)

Muuntajan suojauksessa käytetään pääsuojareleenä yleensä differentiaalirelettä. Differentiaalirelettä käytetään ensisijaisesti muuntajan suojaukseen sisäisiltä oikosuluilta. Muuntajan differentiaalireleellä voidaan havaita oikosulut, maasulut, käämisulut ja kierrossulut, jotka aiheuttavat virtamuuntajiin riittävän suuren erovirran. Muuntajan varasuojina toimivat ylivirta- ja nollavirtareleet. Ylivirtareleellä suojataan muuntajaa ulkoisilta oikosuluilta.

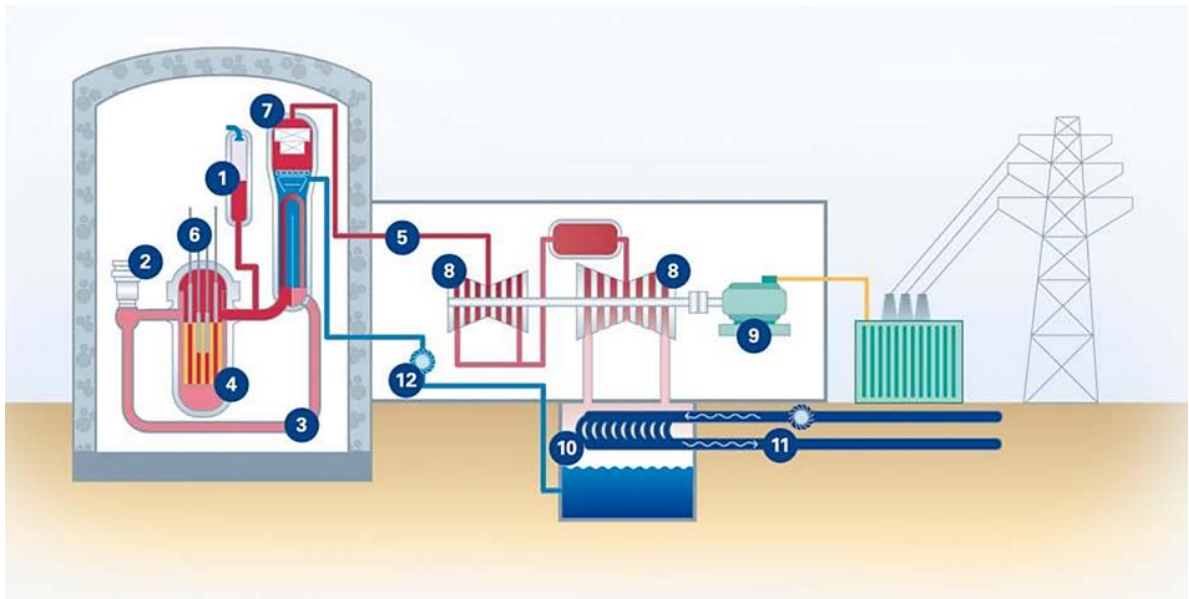
Nollavirtarelettä käytetään mittaamaan vaihevirtojen summavirtaa muuntajan tähtipisteen ollessa maadoitettuna. Muuntajan suojana käytetään myös kaasurelettä. Kaasurele sijoitetaan muuntaja-astian ja paisuntasäiliön väliseen paisuntaputkeen. Vikatilanteessa valokaaren tai muun lämpenemisen aiheuttama, eristeaineista tai öljystä muodostunut, kaasu nousee kaasureleen putkeen korvaten öljyn kaasulla ja rele toimii, kun siihen on kertynyt riittävästi kaasua (Mörsky, 1992. s.202). Kaasurele saattaa pystyä ennakoimaan eristeaurion muodostuneen kaasun perusteella.

Generaattorisuojauksen tehtävänä on suojata generaattoria vaurioitumiselta ja pitää generaattorin syöttämä sähköverkko mahdollisimman stabiilina. Tahtigeneraattori voi joutua tekemisiin sisäisten ja ulkoisten vikojen kanssa. Kun suojaus havaitsee vian, se avaa mahdollisimman nopeasti katkaisijat generaattorin erottamiseksi verkosta. Kaiken kokoisissa generaattoreissa tärkeintä on staattorin suojaus. Staattorin suojaukseen kuuluu oikosulku-, käämisulku-, kierrossulku-, maasulku-, ylivirta-, ja ylijännitesuojaus. Generaattorin koosta riippuen suojataan myös laajasti muilta vioilta. Erillistä epätahtisuojausta käytetään varsinkin suurissa tahtigeneraattoreissa. (Anderson, 1999) Tahtigeneraattori voi joutua epätahtitilaan magnetointilaitteiston tuottaman liian matalan sisäisen jännitteen tai sähköverkon liian matalan jännitteen takia. Kun generaattori menettää tahtikäytön, se kokee korkeiden virtapiikkejä ja taajuuden heilahtelua. Vinokuormitusreleellä suojataan generaattoria sähköjärjestelmän epäsymmetrian aiheuttamalta vastajärjestelmältä. Tietokoneavusteisesti epäsymmetriasuojan toiminta-aika saadaan laskettua virran vastakomponentin ja generaattorin oman vastajärjestelmän aikakertoimen perusteella. Vinokuormitusrelettä voidaan käyttää myös roottori- ja staattorikämmityksien ylikuormitussuojana.

Moottoreiden suojauksen laajuus riippuu moottorin koosta. Moottoreita syöttävä verkko varustetaan yli- ja alijännitesuojilla, jotka laukaisevat moottorit irti verkosta havahtuessaan. Suurjänniteoikosulkumoottorien suojaus voidaan toteuttaa moottorisuojareleellä, joka sisältää oikosulku- ylikuormitus, epäsymmetriasuojat sekä käynnistyksen valvonnan. Suurjännitemoottorien suojaus toteutetaan virran epäsymmetriaa tarkkailevan epäsymmetriasuojareleen avulla. Epäsymmetriareleen toiminta-ajan tulisi olla sitä lyhyempi mitä suurempi epäsymmetria on. Maasulkusuojaus toteutetaan suurjännitemoottoreissa nollavirtareleen avulla, joka on lukittu kiskoston nollajännitereleeseen (Mörsky, 1992. s.178).

5 OL3-YDINVOIMALAITOKSEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

OL3 on nettosähköteholtaan noin 1600 MWe tehoinen European Pressurized Water Reactor (EPR) painevesilaitos. Laitoksen primääripiirissä korkeassa paineessa pidettävää vettä kierretään pääkiertopumppujen reaktorista höyrystimille. Reaktorissa lämmennyt vesi luovuttaa höyrystimessä lämpöenergiaansa sekundääripiiriin. Sekundääripiirin paine on primääripiirin painetta pienempi, joten sekundääripiirin vesi kiehuu höyrystimessä (kuva 5.1). Synnytynyt vesihöyry johdetaan korkeapaineturbiinille, ja sieltä välitulistimien kautta matalapaineturbiineille. Turbiinit on kytketty akselin välityksellä päägeneraattoriin, joka turbiinien pyöriessä alkaa myös pyöriä ja tuottaa sähköä valtakunnan kantaverkkoon sekä laitoksen omakäyttösähköverkkoon. (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. a.)



Kuva 5.1. Painevesilaitoksen toimintaperiaatekaavio. Paineistin (1), pääkiertopumppu (2), primääripiiri (3), reaktori (4), sekundääripiiri (5), säätöelementit (6), höyrystin (7), turbiini (8), päägeneraattori (9), lauhdutin (10), merivesiputkisto (11), ja syöttövesipumppu (12) (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. a.)

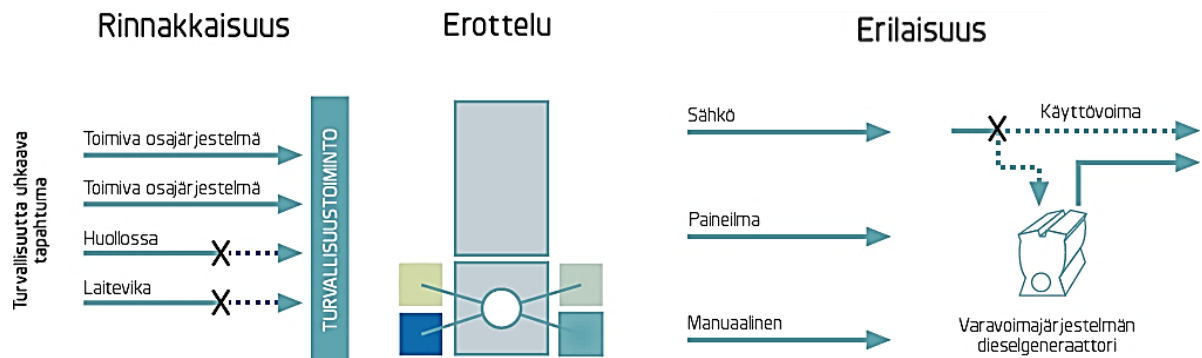
Voimalaitoksen sähköjärjestelmä syöttää tehoa voimalaitosprosessien sähkökäyttöisille toimilaitteille, automaatiolle sekä laitoksen turvallisuustoimintoja toteuttaville järjestelmille. Sen lisäksi, että ydinvoimalaitos tarvitsee sähköä toimintoihinsa tehoajolla, tarvitaan sähkönsyöttöä myös laitoksen alasajossa, vuosihuollossa ja laitoshäiriöissä. Suurissa laitoshäiriöissä suojausautomaatio sammuttaa reaktorin reaktoripikasululla. Pikasulku tehdään säätösauvoilla, joiden sähkönsyöttö on integroitu suoraan omakäyttösähköjärjestelmään.

Reaktori on sammutuksen jälkeen pystyttävä pitämään alikriittisenä sen kaikissa lämpötiloissa. Sammuttamisen jälkeen siellä oleva polttoaine tuottaa yhä lämpöä, joka on poistettava reaktorista alikriittisyyden takaamiseksi ja monen jälkilämmönpoistojärjestelmän tehonlähde on sähkö. Ydinvoimalan tärkeimmät turvallisuustoiminnot ovat reaktiivisuuden hallinta, jälkilämmön poisto ja radioaktiivisuuden hallinta. Toimintojen luotettavuuden takaamiseksi niihin osallistuvien järjestelmien ja laitteiden toiminnalle asetetaan tiukat vaatimukset. Sähköjärjestelmän korkean käytettävyyden varmistamiseksi, on sen suunnittelussa otettu huomioon turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteet.

5.1 Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteet

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa käytetään periaatteita, joilla varmistetaan, että turvallisuuden kannalta tärkeät toiminnot tapahtuvat luotettavasti onnettomuuksien estämiseksi ja niiden seurausten lieventämiseksi. Koska monen turvallisuusjärjestelmän tehonlähde on sähkö, on turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteita käytetty sähköjärjestelmän suunnittelussa. Näitä suunnitteluperiaatteita ovat rinnakkaisuusperiaate, erotteluperiaate ja erilaisuusperiaate (kuva 5.2).

Rinnakkaisuusperiaatteen mukaan turvallisuusjärjestelmät jaetaan useaan toisiaan korvaavaan osaan. Turvallisuusjärjestelmät suunnitellaan siten, että järjestelmä pystyy toteuttamaan toimintonsa $N+2$ vikakriteerin mukaan, eli vaikka mikä tahansa järjestelmän yksittäinen laite vioittuisi ja mikä tahansa toinen järjestelmän laite olisi samaan aikaan pois käytöstä korjauksen tai huollon takia. Tämä kriteeri toteutuu, kun useampi laite toteuttaa samaa toimintoa. Myös turvallisuusjärjestelmien toimintaa ohjaavat suojausjärjestelmät toteuttavat $N+2$ kriteerin. Suojausjärjestelmät suunnitellaan toimimaan, vaikka kaksi suojalaitetta eivät toimisikaan, ja ne toimivat vain, jos vähintään kaksi suojalaitetta toimivat. Näin yksittäisen laitteen aiheuton toiminta ei aiheuta turhaa turvallisuustoiminnon käynnistymistä. (Sandberg, 2004 s.102) OL3-laitoksen sähköjärjestelmässä rinnakkaisuusperiaatetta on käytetty jakamalla sähkönsyöttö neljään rinnakkaiseen toisistaan riippumattomaan osajärjestelmään.



Kuva 5.2. Rinnakkaisuus-, erottelu- ja erilaisuusperiaatteet (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. c.)

Erotteluperiaatteella tarkoitetaan turvallisuusjärjestelmien fyysistä ja toiminnallista erottelua toisistaan. Fyysinen erottelu on sitä, että rinnakkaiset toisiaan varmistavat turvallisuusjärjestelmien osajärjestelmät sijoitetaan fyysisesti eri tiloihin. Toiminnallisella erottelulla pyritään välttämään rinnakkaisten tai toisiinsa liittyvien järjestelmien keskinäinen vuorovaikutus. Erotteluperiaatteen käytöllä varmistetaan, etteivät tulipalo, tulva tai muut ulkoiset uhat estä turvallisuusjärjestelmien toimintaa. (Sandberg, 2004 s.103-104) OL3-laitoksen sähköjärjestelmässä erotteluperiaatetta on toteutettu sijoittamalla rinnakkaiset osajärjestelmät fyysisesti omiin rakennuksiinsa.

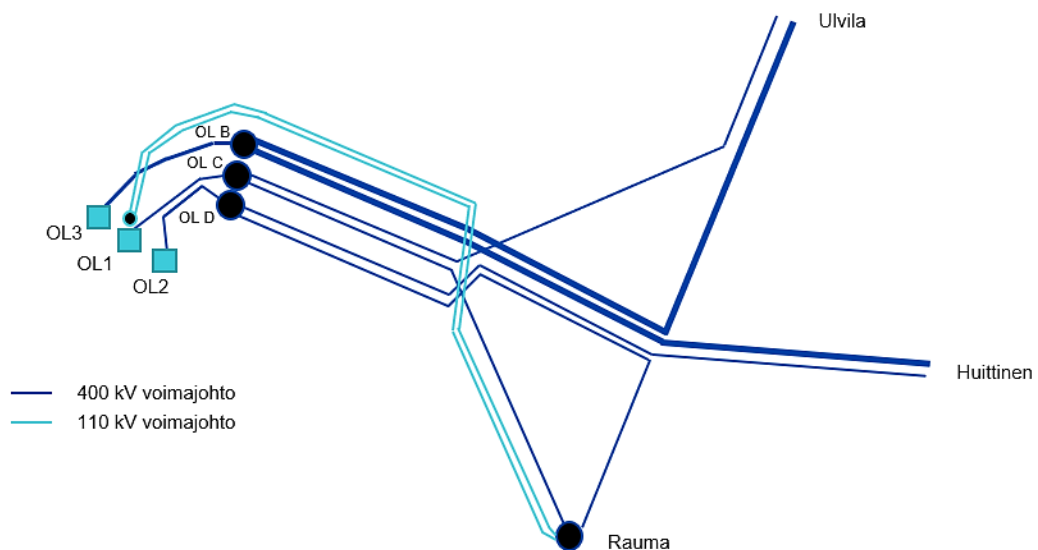
Erilaisuusperiaate tarkoittaa, että sama turvallisuus- tai suojaustoiminto toteutetaan eri toimintaperiaatteisiin perustuvilla järjestelmillä ja laitteilla. Tämä parantaa luotettavuutta ja pienentää eri osajärjestelmissä samanaikaisesti esiintyviä yhteisvikoja. (Sandberg, 2004 s.104) Eri sähkönsyöttölähteiden käytön lisäksi on erilaisuusperiaatetta käytetty OL3-laitoksen sähköjärjestelmässä esimerkiksi sähköjärjestelmän suojaamiseen erilaisilla, eri valmistajien ja eri sarjojen suojalaitteilla.

5.2 Päägeneraattori, -muuntaja ja ulkopuolinen sähköjärjestelmä

Ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmän päätehtävät ovat sähkötehon tuottaminen ja syöttäminen laitoksen toiminnan edellyttämille järjestelmille sekä valtakunnan kantaverkkoon. On tärkeää ymmärtää sähköjärjestelmän toiminta normaali- ja häiriötilanteissa, sillä sähköjärjestelmän häiriöt vaikuttavat ydinvoimalaitoksen toimintoihin ja turvallisuuteen. Turvallisuuden takaamiseksi sähköjärjestelmän kestävyys ja käyttäytyminen eri tilanteissa on analysoitava. Myös sähköisten komponenttien ja laitteiden toiminta ja rakenne voivat vaikuttaa

sähkövikojen leviämiseen ja havaitsemiseen sähköjärjestelmästä. Komponenttien ominaisuudet on hyvä tuntea kokonaisvaltaisen analysoinnin suorittamiseksi.

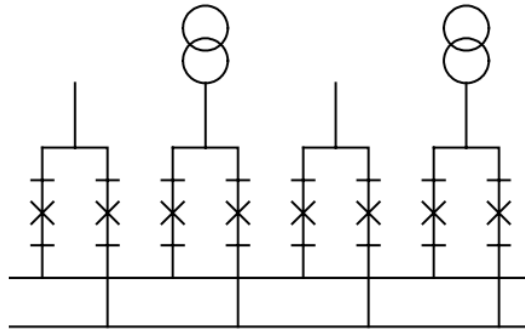
Voimalaitoksella sähkötehoa tuotetaan turbiinien pyörittämällä päägeneraattorilla. OL3 laitoksen päägeneraattori on nimellisteholtaan 1992 MVA nelinapainen harjattomasti magnetoitu tahtigeneraattori. Päägeneraattorin staattori on vesijäähdytetty ja roottori vetyjäähdytetty. (Siemens AG, 2014) Normaaliajolla päägeneraattori syöttää päämuuntajan kautta 400 kV kytkinkenttää. Päämuuntaja koostuu kolmesta yksivaiheisesta kaksikämmimuuntajasta ja on nimellisteholtaan 701 MVA. Päämuuntaja on ensiöpuolelta tähteen- ja toisiopuolelta kolmioon kytketty YN-d-muuntaja. Fingridin 400 kV verkko on tehollisesti maadoitettu, joten muuntajan tähtipiste on kytketty maadoitukseen maadoituskuristimen kautta. (Eklund, et al., 2018) Laitoksen normaalilla tehoajolla päägeneraattorin tuottamaa sähköä syötetään 400 kV kytkinkentän kautta valtakunnan kantaverkkoon ja laitoksen sisäiseen omakäyttösähköjärjestelmään.



Kuva 5.3. Verkkoliitännät Olkiluodosta (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b.)

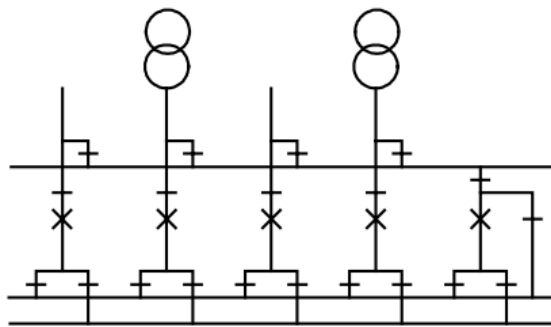
YVL:n mukaisesti OL3-laitosyksiköllä on kaksi ulkoista verkkoyhteyttä; 400 kV ja 110 kV yhteydet. Päägeneraattorin tuottama teho siirretään valtakunnan kantaverkkoon 400 kV verkkoyhteyden kautta. Laitoksen sähköjärjestelmän ulkopuolinen 400 kV sähköjärjestelmä koostuu OL3 laitoksen 400 kV kytkinkentästä, ilmajohdosta sen ja Fingridin 400 kV sähköaseman OL B välillä, ja kahdesta OL B:lta lähtevästä ilmajohdosta. Nämä OL B:lta lähtevät siirtolinjat yhtyvät Ulvilan ja Huittisten 400 kV sähköasemille (kuva 5.3). (Latva, 2013)

Fingridin omistamalla 400 kV OL B sähköasemalla on duplex- eli kaksoiskatkaisijajärjestelmä (kuva 5.4). Duplex-järjestelmä mahdollistaa toisen katkaisijakentän tai koko kiskon huoltamisen ilman keskeytystä, jolloin laitosesyksikön tuottama teho voidaan siirtää yhden kiskon ja katkaisijan kautta verkkoon. (Eklund, et al., 2018)



Kuva 5.4. Kaksoiskatkaisijajärjestelmä (Duplex) (ABB, 2022. a.)

OL3 laitoksen varasyöttöyhteys koostuu 110 kV sähköasemasta ja maakaapelista sen ja 110/10 kV varasyöttömuuntajien välillä. Rakenteeltaan 110 kV sähköasema on kaksikiskoapukiskojärjestelmä (kuva 5.5) ja sieltä lähtee kaksi ilmajohtoa Rauman 110 kV sähköasemalle. Varasyöttöyhteydellä voidaan syöttää sähköä vuosihuollossa tai 400 kV verkon menetyksessä kantaverkosta laitoksen sähköverkkoon, mutta ei laitoksen sähköverkosta valtakunnan kantaverkkoon. (Eklund, et al., 2018)

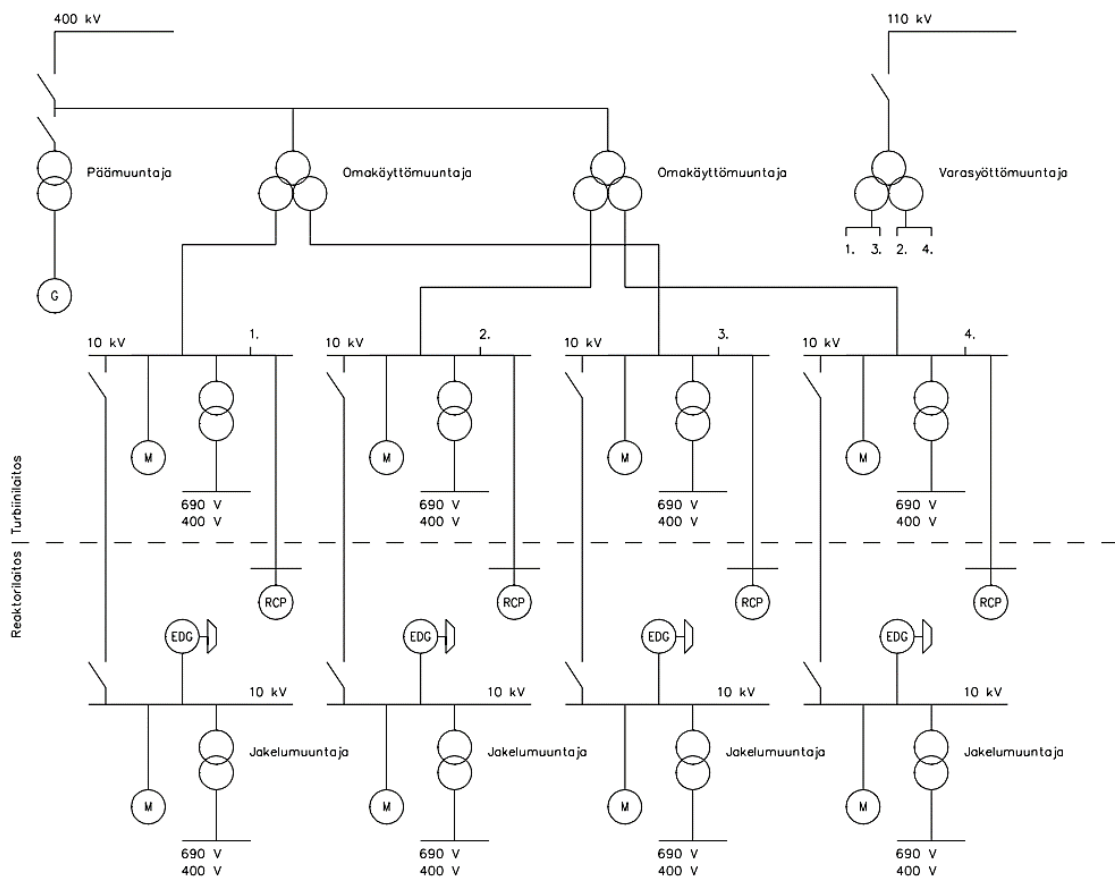


Kuva 5.5. Kaksikiskoapukiskojärjestelmä (ABB, 2022. a.)

Ulkoisten 400 kV ja 110 kV verkkoyhteyksien välillä on YVL:n mukaisesti automaattinen syötönvaihtoautomaatiikka. Jos normaali sähkönsyöttö 400 kV liitynnän ja omakäyttömuuntajien kautta menetetään, sähkönsyöttö vaihtuu automaattisesti 110 kV verkkoon liitetyle varasyöttömuuntajalle. Syötönvaihdon käynnistyminen aiheuttaa sähkötuotannon keskeytyksen voimalaitoksella.

5.3 Sisäinen sähköjärjestelmä

Voimalaitoksen omakäyttösähköjärjestelmää käytetään tehon syöttämiseen turbiinilaitokselle ja reaktorilaitokselle kaikille niiden sähköä tarvitseville järjestelmille ja laitteille (kuva 5.6). Omakäyttösähköjärjestelmä jaetaan normaalisähkönsyöttöjärjestelmään ja hätäsähkönsyöttöjärjestelmään. Normalisähkönsyöttöjärjestelmä syöttää muita kuin turvallisuuteen liittyviä kuormia. Hätäsähkönsyöttöjärjestelmä syöttää kaikkia turvallisuuteen liittyviä kuormia, ja siitä suurin osa sijoittuu reaktorilaitokselle. Laitoksen jännitetasot ovat 10 kV, 690 V, 400 V, 230 V ja tasavirralla 220 V ja 24 V. Sähköjärjestelmä on jaettu neljään osajärjestelmään, joista jokaisessa on kaikki laitoksen sähkönsyöttöön tarvittavat jännitetasot, moottorit ja sähkölaitteet.



Kuva 5.6. Olkiluoto 3 -laitosyksikön sähköjärjestelmän yksinkertaistettu pääkaavio. Päägeneraattori (G), hätä-diesलगeneraattorit (EDG), keskijännitemoottorit (M), pääkiertopumput (RCP) (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b.)

Päägeneraattorin ja päämuuntajan jälkeen sähköjärjestelmä yhdistyy 400 kV kiskoon ja 400 kV laitosjohdon sekä laitoskatkaisijoiden kautta 400 kV kantaverkkoon. Omakäyttömuun-

tajien kautta sähköä siirretään laitoksen omakäyttösähköverkkoon. Keskijännitekiskoista syötetään suurimpia moottoreita. Reaktorilaitoksella suurimmat moottorit ovat pääkiertopumppujen moottorit. Reaktorilaitoksella sähkönsyöttö on varmennettu keskijännitekiskoista hätädieselgeneraattoreilla. Keskijännitetasolta sähkönjakelu jatkuu yhä pienjännitetasolle.

Omakäyttösähköjärjestelmä on jaettu neljään osajärjestelmään, jotka on erotettu toisistaan sekä sähköisesti että fyysisesti. Laitoksen kaksi 400/10,5 kV omakäyttömuuntajaa saavat sähkönsyöttönsä 400 kV kiskosta päägeneraattorilta tai ulkoisesta 400 kV verkosta. Kumpikin omakäyttömuuntaja syöttää kahta osajärjestelmää. Rakenteeltaan omakäyttömuuntajat ovat öljyeristeisiä kolmivaiheisia kolmikäämimuuntajia. Muuntajat ovat maadoittamattomia tähteenkytkettyjä YN-y-muuntajia. (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b.)

Laitosyksikön ottaessa sähkönsyöttönsä ulkoisesta 110 kV verkosta, syötetään kaikkia neljää osajärjestelmää yhdellä 110/10,5 kV varasyöttömuuntajalla. Muuntaja on maadoittamaton tähteenkytketty Y-y-muuntaja. (Eklund, et. al. 2018) Omakäyttö- ja varasyöttömuuntajat ovat kytketty laitoksen 10 kV keskijänniteverkkoon, josta syötetään edelleen laitoksen pienjänniteverkkoa.

Keskijännitekiskosta syötetään 10 kV moottoreita, joista suurimmat ovat primääripiirissä reaktorin pääkiertopumppujen moottorit ja sekundääripiirissä syöttövesipumppujen moottorit. Voimalaitoksen turvallisuuden kannalta tärkeiden laitteiden sähkönkäyttö on reaktorilaitoksella varmistettu jokaisessa osajärjestelmässä keskijännitekiskosta omalla hätädieselgeneraattorilla. Hätädieselgeneraattorijärjestelmän pääkomponentit ovat dieselmoottorit ja dieselgeneraattorit. Jokaisessa hätädieselgeneraattorikonaisuudessa on muusta verkosta täysin riippumattomat tukijärjestelmät. Hätädieselgeneraattorit syöttävät tarvittavia kuormia hätäsähkönsyöttöjärjestelmässä. Laitoksen normaaliajolla dieselmoottorit ovat valmiustilassa ja käynnistyvät automaattisesti jännitteen tai taajuuden laskiessa käynnistyskriteerien alle. Hätädieselgeneraattorijärjestelmillä voidaan syöttää laitoksen dieselvarmennettua sähköverkkoa 72 tuntia. (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b.)

Pienjännitejakelujärjestelmään syötetään sähköä keskijänniteverkosta jakelumuuntajien kautta. Turbiinilaitoksen pienjänniteverkosta syötetään kaikkia normaalisähkönsyöttöä tarvitsevia kuormia, moottoreita, erillisjärjestelmiä, sekä jakelumuuntajia, erikoismoottoreita, toimilaitteita, valaistusta ja pistorasiajärjestelmää. Reaktorilaitoksen normaalisähkön-

syöttöjärjestelmän pienjänniteverkko syöttää normaalikäyttöön tarkoitettuja ei-turvallisuusluokiteltuja kuluttajia. Reaktorilaitoksen hätäsähkösyöttöjärjestelmän pienjänniteverkko toimittaa sähköä kuluttajille, joita tarvitaan normaalikäytössä ja häiriötilanteissa, kuten pienjännitemoottoreita, venttiilien toimilaitteita, nestejärjestelmään liittyviä alijakeluja ja hätävalaistusjärjestelmää. Jos tehonsyöttö katkeaa, pienjännitteistä jakelujärjestelmää syötetään hätädieseljärjestelmästä.

Reaktorilaitoksella on kaksi sähkökatkosdieseljärjestelmän SBO-dieselgeneraattoria, jotka on kytketty hätäsähkösyöttöjärjestelmän 690 V kiskoihin kahdessa osajärjestelmässä. SBO-dieselgeneraattorit otetaan käyttöön vasta siinä vaiheessa, jos hätädieelit ovat yhteisvian myötä poissa käytöstä SBO-dieselgeneraattorijärjestelmän pääkomponentit ovat dieselmoottorit ja dieselgeneraattorit. Kuten hätädieselgeneraattorijärjestelmissä, myös SBO-dieselgeneraattorijärjestelmissä on omat muusta verkosta täysin riippumattomat tukijärjestelmät. Järjestelmät on suunniteltu sähkökatkostilanteisiin, joissa kaikki laitoksen ulkopuoliset sähkösyöttölähteet menetetään ja hätädieselgeneraattorit eivät ole käytössä. SBO-dieselgeneraattoreilla voidaan käyttää määrättyjä latteita reaktorilaitoksella hätäsyöttövesipumpuja, jälkilämmönpoistoa, ilmastointijärjestelmän osia ja hätävalaistusta. (Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b.)

Sähkösyötön häiriötilanteiden aikana turvallisuusluokiteltuja sähkökuluttajia syötetään keskeytyksettömän sähkösyöttöjärjestelmän (UPS) akuista hätädieselgeneraattoreiden käynnistymiseen saakka. Kuluttajat, joita akuista syötetään ovat laitteita, joita tarvitaan normaalikäytössä sekä häiriötilanteissa ja jotka vaativat keskeytymätöntä sähkösyöttöä. Järjestelmällä syötetään 400 V vaihtovirtaa esimerkiksi pienjännitemoottoreille ja erillisjärjestelmille ja 220 V tasavirtaa muun muassa magneettiventtiileille ja ohjaus- ja valvontalaitteita syöttäville DC/DC-suuntaajille. Akkuvarmennettu sähkönjakelujärjestelmä pystyy syöttämään keskeytymättömän sähkösyöttöjärjestelmän kuluttajia hätädieselgeneraattoreiden käynnistyessä tarvittaessa kahden tunnin ajan YVL:n mukaisesti (STUK, 2019). Jos hätädieselgeneraattorit eivät ole käytettävissä, käynnistyvät SBO-dieselgeneraattorit.

SBO-dieselgeneraattorien menetyksen varalta on reaktorilaitoksella lisäksi erillinen akkuvarmennettu sähkönjakelu vakavien onnettomuuksien hallintaa varten. Tämä sähkösyöttöjärjestelmä syöttää vaihtovirtaa 400 V ja 230 V jänniteverkkoon ja tasavirtaa 220 V ja 24 V jänniteverkkoon turvallisuusluokitelluille kuluttajille, joita tarvitaan normaalikäytössä ja häiriötilanteissa, ja jotka vaativat katkeamattoman sähkösyötön. Molemmat akku-

varmennetut keskeytymättömän virransyötönjärjestelmät koostuvat akuista, akkulatureista, purkumuuntimista, tasasuuntaajista, pienjännitekytkinlaitteista, DC/DC-suuntaajista ja vaihtosuuntaajista. Järjestelmien tasasuuntaajat saavat syöttönsä hätäsähkönsyöttöjärjestelmän 690 V kiskoista. Keskeytymättömän sähkönsyötön järjestelmästä saavat sähkönsyöttönsä myös reaktoria kontrolloivat säätösauvat.

5.4 OL3-laitoksen sähköjärjestelmän relesuojaus

400 kV laitosjohto on suojattu kahdella differentiaalireleellä sekä distanssi- ja nollavirtareleillä. Fingrid ylläpitää sähköaseman kiskosuojausta, katkaisijan vikasuojausta ja lähtevien voimalinjojen suojausta. Sähköverkon häiriön tapahtuessa OLB sähköasemalla tai sieltä lähtevillä voimajohdoilla Fingridin suojausjärjestelmä eristää vioittuneen osan. Jos vika syntyy 400 kV laitosjohdolla tai omakäyttömuuntajalla, laitoskatkaisijat ja generaattorikatkaisija avataan, sähköntuotanto keskeytetään ja käynnistetään syötönvaihto 110 kV syötölle. (Latva, 2013)

OL3-laitoksen päägeneraattorin ja muuntajien suojaustoiminnot toteutetaan numeerisilla monitoimireleillä. Jokainen releyksikkö sisältää kokonaisen suojalaitteen, jossa on tasasähkömuuntaja sähkönsyöttöä varten, jännite- ja virtamuuntajat, A/D-muunnin, elektroninen yksikkö, binääriset valvontatulot sekä laukaisureleet. Releyksiköt sisältäville suojakaapeille on kahdennettu virransyöttö tasasähköjärjestelmistä. Kukin rele sisältää erilaisia suojaus- ja valvontatoimintoja. Nykyaikaisilla suojareleillä kaikki suojaustoiminnot on mahdollista sijoittaa yhteen laitteeseen, mutta suojauksen kannalta tämä ei kuitenkaan ole välttämättä paras vaihtoehto. Laitevikaantumisen vuoksi on järkevämpää hajauttaa suojaustoiminnot useampaan laitteeseen. Sähköjärjestelmässä onkin useampia samaa laitetta suojaavia ja samoja suojaustoimintoja toteuttavia suojareleitä.

Taulukko 5.1. Päägeneraattorin ja muuntajien tyypillisiä suojaustoimintoja

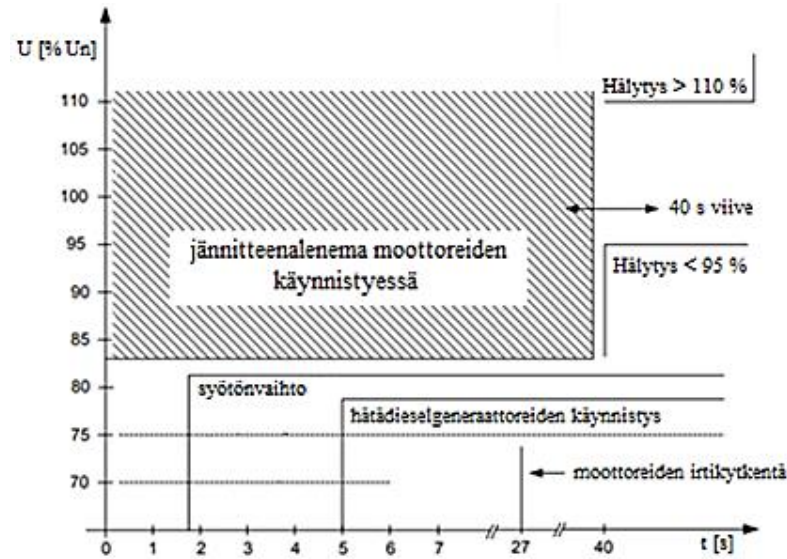
	päägeneraattori	päämuuntaja	omakäyttö- muuntaja	varasyöttö- muuntaja
Differentiaali	X	X	X	X
Ylivirta	X	X	X	X
Staattorin maasulku	X			
Roottorin maasulku	X			
Takateho	X			
Impedanssi	X			
Ylijännite/alijännite	X		X	
Ylitaajuus/alitaajuus	X		X	
Vinokuorma	X			
Epätahti	X			
Ylimagnetointi/alimagnetointi	X		X	

Päämuuntajan ja sähkökiskojen suojausjärjestelmä kattaa differentiaalisuojauksen ja 3-vaiheisen ylivirtasuojauksen. Omakäyttö- ja varasyöttömuuntajia suojaavat monitoimireleet ja muuntajien suojausjärjestelmiin kuuluu differentiaalisuojaus, ylivirta-suojaus, ylimagnetointisuojaus, 2-vaiheinen yli- ja alijännitesuojaus sekä yli- ja alitaajuussuojaus. Keski-jännitemoottoreiden suojareleet suorittavat ylivirtasuojauksen, ylikuormasuojauksen, epäsymmetriasuojauksen, suunnattua maasulkusuojauksen, roottorin jumisuojauksen ja differentiaalisuojauksen. Vaihekatkon havaitsemisen kannalta oleellisia suojaustoimintoja, joilla sähköjärjestelmän vikatilanne voidaan havaita, ovat päägeneraattorin vinokuormitusuoja, jännitesuojat etenkin alijännitesuojat, epätahtisuoja sekä muuntajien differentiaalisuojat.

5.5 Jännitteenvalvontakonsepti

Jännitteenvalvonnalla toteutetaan yli- ja alijännitteen sekä taajuuden valvontaa ja suojausta OL3-laitoksen sähköverkossa. Jännitteenvalvontakonseptiin on määritetty raja-arvot jännitteen ja taajuuden muutoksille ja niistä aiheutuville automatisoiduille toiminnoille. Jännitteenvalvontaa toteutetaan sähköjärjestelmän suojareleillä ja laitosautomaatiolla. Järjestelmä havaitsee jännitteen muutokset ja toteuttaa toimenpiteitä jännitteenvalvontakonseptin mukaisesti. Automaation suojaustoimenpiteisiin alijännitetilanteessa kuuluu syötönvaihto 400

kV verkosta 110 kV verkkoon, hätädieselgeneraattoreiden käynnistys, moottorikuorman vähentäminen ja irrottaminen alijännitteisistä kiskoista.



Kuva 5.7. Jännitevalvontakonseptin raja-arvot keskijännitetasolla (muokattu lähteestä Areva SA, 2020)

Jännitevalvontakonseptin mukaisesti tapahtuu sähköverkon syötönvaihdon käynnistys 1,8 sekunnin jälkeen alijännitteen havaitsemisesta ja hätädieseileiden käynnistys viiden sekunnin jälkeen alijännitteen havaitsemisesta sähköverkossa. Jos alijännite jatkuu yhä syötönvaihdon jälkeen, alkaa automaatio vähentämään kuormaa 27 sekunnin jälkeen. Kaikkien toimenpiteiden laukaisurajat ja aikaviiveet on asetettu moottorien käynnistyksessä tapahtuvien jännitteen notkahdusten arvojen alapuolelle, jotta ei aiheutuisi turhia syötönvaihtoa tai hätädieselgeneraattoreiden käynnistymistä. Jännitteen muutoksista annetaan hälytys valvomoon, kun jännite ylittää 110 % tai alittaa 95 % nimellisjännitteestä. Valvomoon menevien hälytysten aikaviive on 40 sekuntia suurten moottoreiden käynnistyksen yhteydessä tapahtuvien jännitteen notkahdusten tasaantumiseksi. Jännitteen palauduttua sallittuihin rajoihin kuormat jälleenkytketään automaattisesti kiskoihin kiinni. (Areva SA, 2020)

Jos 400 kV kiskon jännite ylittää 110 % tai alittaa 83 % nimellisjännitteestä tai taajuus laskee alle 47,5 Hz, siirtyy OL3-laitos saarekekäytölle. Saarekekäytöllä laitostakaisija 400 kV verkkoon avataan ja laitoksen tuottama ja tarvitsema sähkö syötetään päägeneraattorilta vain laitoksen omakäyttösähköverkkoon. Jos taajuus pysyy yhä alhaisena tai päägeneraattori ei ole käytössä, tapahtuu syötönvaihto 110 kV verkkoyhteydelle. Syötönvaihto 110 kV verkkoyhteydelle tapahtuu, jos jännite laskee alle 82 % nimellisjännitteestä omakäyttömuuntajien alajännitepuolella. (Areva SA, 2020)

Syötönvaihto tapahtuu 10 kV vaihtokytkentäautomaatiikan avulla. Keskiännittekiskon sähkönsyötön turvaamiseksi 10 kV kojeistot on varustettu kahdella toisistaan riippumattomalla syöttökatkaisijalla, joiden nopealla vaihdolla syötönvaihtoautomaatiikka toimii. Kun syöttö vaihdetaan 400 kV verkosta 110 kV verkkoon, turbiini pysäytetään ja aloitetaan reaktorin pikasulku. Valitut pääkiertopumput, päälauhdepumput, pääsyöttövesipumput ja päämerivesipumput irrotetaan verkosta.

Laitoksen sähköjärjestelmän keskiännitetasolla kaikkien kolmen vaiheen jännitettä valvotaan omalla 3-vaiheisella jännitereleellä jokaisessa kojeistossa. Jos minkä tahansa keskiännitetaso vaiheen jännite laskee alle asetetun arvon, keskiännitemoottorit irrotetaan verkosta automaation kautta.

Laitoksen sähköjärjestelmän pienjännitetasolla kaikkien kolmen vaiheen jännitettä valvotaan omalla 3-vaiheisella jännitereleellä jokaisessa kojeistossa. Häätäsähkönsyöttöjärjestelmässä kaikkien kolmen vaiheen jännitettä valvotaan lisäksi yhdellä 2-vaiheisella jänniteanturilla jokaisessa kojeistossa. Jos minkä tahansa pienjännitetaso vaiheen jännite laskee alle asetetun arvon, annetaan automaatiolle viiveellä signaali kuormien vähentämiseen. Jos jännite palautuu alle 27 sekunnissa, kytketään kuormat portaittain takaisin sähköjärjestelmään, muuten moottorit jäävät irti sähköjärjestelmästä. (Areva SA, 2020)

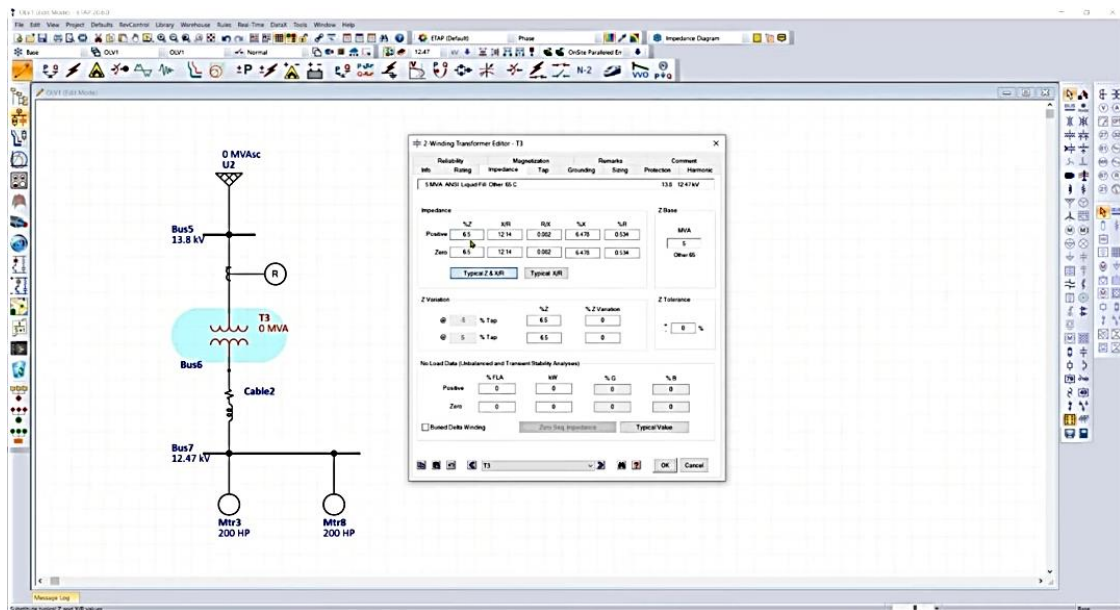
Alijännite reaktorilaitoksen 10 kV kiskoissa aiheuttaa hätädieselgeneraattoreiden käynnistuksen. Jos kiskoissa vähintään kahden pääjännitteen arvot laskevat alle 80 %:iin nimellijännitteestä tai 47,2 Hz:iin, saavat hätädieselgeneraattorit käynnistyskäskyn. Häädieselgeneraattoreiden käynnistyskäsky on määritetty saksalaisen Ydinturvallisuustandardikommis-sion Nuclear Safety Standards Commission (KTA) turvallisuusstandardin KTA 3702 mukaan (KTA 3702, 2014). Häädieselgeneraattorit on kytketty reaktorilaitoksen 10 kV kiskoihin omakäyttösähköjärjestelmän jokaisessa osajärjestelmässä. Alijännitteen havaitsemisesta 5 sekunnin kuluttua 10 kV kiskon katkaisija avataan, jolloin syöttö turbiinilaitokselta katkeaa ja hätädieselgeneraattorit saavat käynnistyskäskyn. Häädieselgeneraattoreiden käynnistyttyä 10 kV kisko ja määrätty kuormat saavat sähköä hätädieselgeneraattoreilta. Häädieselgeneraattorijärjestelmä syöttää kaikkia tarvittavia kuormia ulkopuolisen verkon mentyksessä.

6 VAIHEKATKON SIMULOINTI

Vaihekatkon mallintamiseksi työssä tehtiin ETAP-ohjelmalla vaihekatkotilanteista. Simuloinnilla pystytään mallintamaan käsin laskentaa helpommin ja nopeammin suuria verkkoja ja selvittämään verkon komponenttien esimerkiksi muuntajien ja moottoreiden yhteisvaikutuksia vaihekatkotilanteessa. Simuloiteja vaihekatkosta suoritettiin erillisellä yksinkertaisella malliverkolla sekä varsinaisella OL3-laitoksen sähköverkkomallilla Yksinkertaisella malliverkolla tehtyjen simulointien päämääränä oli tuoda esiin vaihekatkon ja sähkölaitteiden käyttäytymisen vaikutus verkossa. OL3-laitoksen verkolla tehtyjen vaihekatkosimulointien selvittiin jännitteiden suuruus sekä epäsymmetria laitoksen omakäyttösähköjärjestelmässä eri jännitetasoilla. OL3-laitoksen verkolla tarkastellut simulointitilanteet ovat laitoksen eri käyttötilanteet syötöillä generaattorilta, generaattorilta ja 400 kV verkosta, 400 kV verkosta ja 110 kV verkosta.

6.1 Simuloinnit ETAP-ohjelmistolla

OL3-laitoksen sähköjärjestelmän vaihekatkotarkastelun simulointiin käytettiin ETAP-ohjelmaa. ETAP on samannimisen yhdysvaltalaisen yrityksen kehittämä, valmistama ja ylläpitämä 64-bittinen sähköverkon mallinnusohjelma, joka on kehitetty Microsoft Windows 2008, 2012 7, 8/8.1, 10 ja 11 käyttöjärjestelmille. ETAP:issa sähköverkkomalli on täysin vuorovaikutteinen, ja siihen voi tehdä muutoksia, suorittaa järjestelmätutkimuksia ja tarkastella tutkimustuloksia graafisesti. Työssä käytetty ETAP-lisenssi oli ETAP 22.0.1 versiolle.



Kuva 6.1. Esimerkkikuva ETAP käyttöliittymästä (ETAP, 2022. a.)

ETAP:issa mallinnettava sähköverkko näkyy piirikaaviona. Komponenttien parametrit voi tuoda verkkomalliin ETAP:in kirjastoista tai asettaa käsin komponenttieditorissa. Näkymän yläpalkista voi valita käytettävän työkalun, jonka toiminnot sitten näkyvät oikeassa sivupalkissa. Työkalupalkin yläpuolelta löytyvät projektin 3D tietojen työkalurivi ja vielä näiden yläpuolelta ETAP ohjelman yleistoiminnot, kuten uuden projektin luonti, tallennus, näkymän zoomaus jne. Näkymän vasemmasta reunasta löytyvät valittavissa olevat komponentit, komponentti- ja systeemikirjastot sekä projektinhallintatyökalut.

6.1.1 Vaihekatko-työkalu

Vaihekatkotilanteiden simuloimiseksi hankittiin ETAP:iin lisäosana Unbalanced load flow/open-phase fault -työkalu, jolla voidaan mallintaa sähköverkon tehonjakoa epäsymmetrisessä tilanteessa ja aiheuttaa ja mallintaa 1- ja 2-vaiheisia vaihekatkoja sähköverkkomalliin.

ETAP:in epäsymmetrisen tilan tehonjako -laskentatyökalu laskee kiskojen jännitteet, haarojen tehokertoimet, virrat ja tehonjaon yksittäisille vaiheille koko sähköjärjestelmässä. Työkalua voidaan käyttää malleille, joissa voi olla useita verkko- ja generaattoriliitännöitä. Se voi käsitellä sekä säteittäisiä että silmukajärjestelmiä. Epäsymmetrisen tilan tehonjako -työkalu

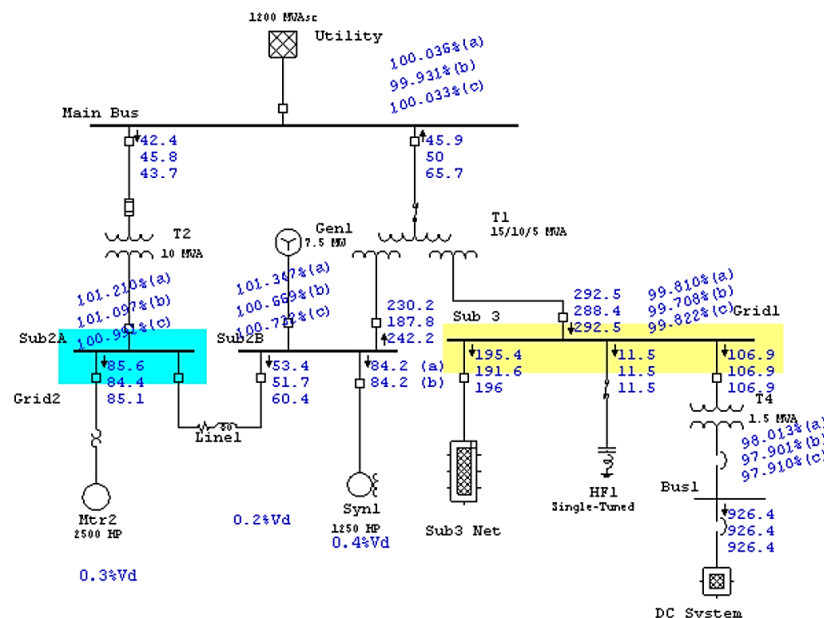
käyttää laskentaan Newton-Raphson tehonjakolaskennan virran injektointimenetelmää (current injection method). (ETAP, 2022. b.)

Virran injektointimenetelmä muodostaa ja ratkaisee iteroiden tehonjaon yhtälön;

$$[\Delta U^{abc}][Y^{abc}] = [\Delta I^{abc}] \quad (6.1)$$

Yhtälössä ΔU^{abc} kuvaa kiskon 3-vaiheista jännitevektoria, ΔI^{abc} kuvaa kiskon 3-vaiheista virtavektoria ja Y^{abc} on Jacobin matriisi. Tietokonelaskennassa virran injektointimenetelmällä tehonjako saadaan ratkaistua muita menetelmiä vähemmällä iteraatioilla ja se toimii hyvin suuriin ja raskaasti kuormitettuihin sähköverkkoihin. (ETAP, 2022. b.)

Epäsymmetrisen tilan tehonjako -työkalusta löytyy toiminto vaihekatkoviiale. Vaihekatkoviika-toiminnolla voidaan asettaa 1- tai 2-vaiheinen vaihekatko sähköverkkomalliin. Kun johtimelle asetetaan vaihekatkoviika, mallin kyseisen haaran impedanssimatriisi muuttuu. Muutos vastaa yhdestä tai kahdesta vaiheesta avoimen, muuten suljetun katkaisijan sijoittamista johdolle, jolle vaihekatkoviika on asetettu. Muu sähköverkko säilyy ennallaan ja tällä muutoksella suoritetaan sitten epäsymmetrisen tilan tehonjakolaskenta. (ETAP, 2022. b.)



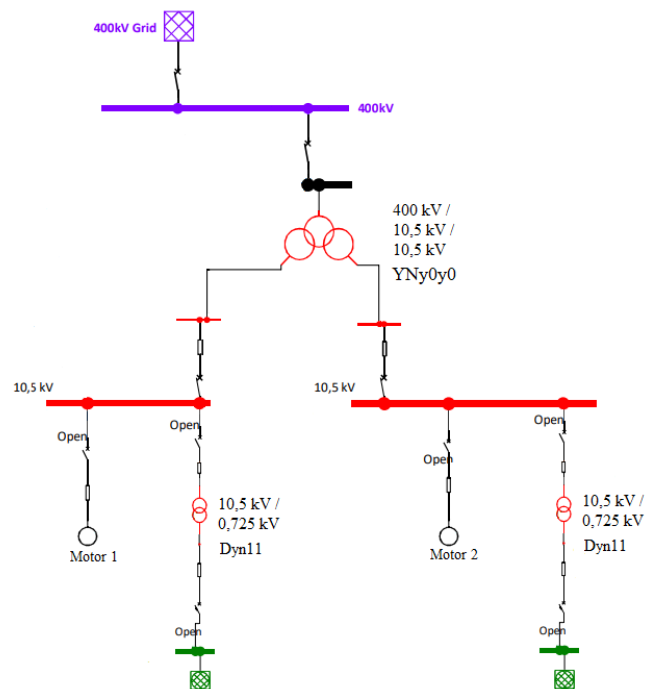
Kuva 6.2. Esimerkkikuva ETAP näkymästä epäsymmetrisen tilan tehonjakolaskennan jälkeen (ETAP, 2022. a.)

Vaihekatko-toimintoa käytettäessä saadaan laskennan tuloksina kiskojen vaiheiden jännitteet helposti näkymään piirikaaviokuvaan. Jännitteet voidaan valita näytettäväksi vaiheista tai vaiheiden välisistä pääjännitteistä. Jännitteet voidaan näyttää kV-arvoina tai prosentti-

osuuksina nimellisjännitteistä. Lisäksi voidaan piirikaaviossa näyttää kuormien syöttöjännitteen prosenttiosuus sen nimellisjännitteestä, johtojen jännitteenalenemat, tehonjaon laskennan arvot monissa eri yksiköissä. Laskennasta saadaan tehtyä esimerkiksi pdf-muotoinen tulosraportti, josta voidaan lukea laskennan lähtötiedot ja tulokset, joita ei näy suoraan piirikaaviokuvasta.

6.1.2 Malliverkolla simuloidut tilanteet

Vaihekatkon vaikutusten ja sähkölaitteiden käyttäytymisen simuloimiseksi mallinnettiin ETAP:ille työssä yksinkertainen malliverkko (kuva 6.3), jolla pyrittiin tuomaan esille moottorikuorman vaikutus jännitteisiin. Siihen kuului malliverkkoa syöttävä 400 kV verkko, 400 kV kisko, maadoittamaton Y-y-y-kytketty 400/10,5 kV kolmikäämimuuntaja, 10,5 kV kiskot ja niihin kytketyt moottorit ja jakelumuuntajat.



Kuva 6.3. ETAP:ille rakennettu malliverkko muuntajan ja moottorin käyttäytymisen simuloimiseksi

Kaksivaiheisissa vaihekatkoissa muuntajan kytkentä tai rakenne ei aiheuta normaalia tilaa vastaavan jännitteen syntymistä muuntajan käämeihin millään sydänrakenteella tai kytkennällä. Kaksivaiheisessa vaihekatkossa jäljelle jäävä ehjä vaihe ei pysty syöttämään lainkaan tehoa maadoittamattoman Y-y-muuntajan läpi, joten sen alajännitepuolella ei ole jännitettä

missään vaiheessa. Tällöin muuntajan syöttämän verkon jännite katoaa kokonaan, eikä myöskään moottorikuormat pysy enää käynnissä.

Malliverkolla simuloidut tilanteet olivat ehjä sähköjärjestelmä ilman vikaa, 1-vaiheinen vaihekatkotilanne ilman kuormaa ja 1-vaiheinen vaihekatkotilanne kuormalla. Keskijännitekiskoissa kuormina oli yksi moottori ja yksi jakelumuuntaja kummassakin 10,5 kV kiskossa. Ehjän sähköjärjestelmän simuloinnin tuloksena olivat symmetriset nimellijännitteen suuret jännitteet jokaisessa pääjännitteessä, kuten normaalitilanteessa on tarkoitus. Tämän simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Pää- ja vaihejännitteet 10,5 kV kiskossa normaalitilanteessa, kun verkossa ei ole vikaa.

Uab	10,48 kV	Ua	6,06 kV
Ubc	10,48 kV	Ub	6,06 kV
Uca	10,48 kV	Uc	6,05 kV

Seuraavassa tilanteessa simuloitiin kuormittamattoman muuntajan yläjännitepuolelle 1-vaiheinen vaihekatkotilanne vaiheeseen A. Simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa 6.2. Vikatilanteessa katkaistu vaihe synnyttää verkkoon jännitteen epäsymmetrian ja kuormittamattomassa verkossa ainoa jännitteiden suuruuteen vaikuttava komponentti on muuntaja. Malliverkkoon mallinnettu Y-y-y-kytketty kolmikäämimuuntaja toimii simuloinnin perusteella kuten luvussa 4 on kuvattu. Pääjännitteet muuntajan alajännitepuolella sähköjärjestelmän 10,5 kV kiskossa ovat ehjistä vaiheista B ja C muodostuvassa pääjännitteessä Ubc nimellinen 10,49 kV ja katkenneen vaiheen A kanssa muodostuvissa pääjännitteissä Uab ja Uca jännite putoaa 5,25 kV:iin eli puoleen nimellisestä. Käytetty maadoittamaton ensiö- ja toisiopuolilta tähtenkytketty muuntaja ei siis simuloinnin perusteella muodosta katkenneeseen vaiheeseen jännitettä.

Taulukko 6.2. Pää- ja vaihejännitteet 10,5 kV kiskossa, kun verkossa on 1-vaiheinen vaihekatkovika muuntajalla ja verkossa ei ole kuormaa.

Uab	5,25 kV	Ua	1,23 kV
Ubc	10,49 kV	Ub	5,97 kV
Uca	5,25 kV	Uc	4,75 kV

Malliverkolla simuloitiin myös tilanteet, joissa malliverkossa oli 10,5 kV kiskoon kytketty kuormaksi pelkkä moottori ja moottori sekä jakelumuuntaja. Myös näissä tilanteissa tehtiin

1-vaiheinen vaihekatko muuntajan yläjännitepuolelle vaiheeseen A. Simulointien tulokset on esitetty taulukoissa 6.3 ja 6.4.

Taulukko 6.3. Pää- ja vaihejännitteet 10,5 kV kiskossa, kun verkossa on 1-vaiheinen vaihekatkovika muuntajalla, verkon kuormana on moottori.

Uab	7,8 kV	Ua	4,64 kV
Ubc	10,44 kV	Ub	5,25 kV
Uca	9,91 kV	Uc	6,36 kV

Moottorein kuormitetun verkon tilanteessa simuloidut pääjännitteet muuntajan alajännitepuolella sähköjärjestelmän 10,5 kV kiskossa ovat ehjistä vaiheista B ja C muodostuvassa pääjännitteessä Ubc nimellinen 10,44 kV ja katkenneen vaiheen A kanssa muodostuvassa pääjännitteessä Uab 7,8 kV ja pääjännitteessä Uca 9,91 kV. Katkaistusta vaiheesta muodostuvat pääjännitteet ovat korkeammat, kuin kuormittamattomassa tilanteessa. Tämä johtuu siitä, että moottorit luovat jännitteen katkenneeseen vaiheeseen.

Taulukko 6.4. Pää- ja vaihejännitteet 10,5 kV kiskossa, kun verkossa on 1-vaiheinen vaihekatkovika muuntajalla, verkon kuormana on moottori- ja 10,5 kV /690 V jakelumuuntajakuorma.

Uab	7,23 kV	Ua	4,09 kV
Ubc	10,49 kV	Ub	5,21 kV
Uca	9,41 kV	Uc	6,35 kV

Kuormitettuun tilanteeseen lisättäessä kuormaksi jakelumuuntajat simuloidut pääjännitteet muuntajan alajännitepuolella sähköjärjestelmän 10,5 kV kiskossa ovat ehjistä vaiheista B ja C muodostuvassa pääjännitteessä Ubc nimellinen 10,49 kV ja katkenneen vaiheen A kanssa muodostuvassa pääjännitteessä Uab 7,23 kV ja pääjännitteessä Uca 9,41 kV.

Kuormitetuissa tilanteissa pääjännitteet muuntajan alajännitepuolella sähköjärjestelmän 10,5 kV kiskossa ovat ehjistä vaiheista B ja C muodostuvassa pääjännitteessä Ubc nimellisen jännitteen ja katkenneen vaiheen A kanssa muodostuvissa pääjännitteissä Uab ja Uca pääjännitteet laskevat nimellisen jännitettä alhaisemmiksi, mutta ei kuitenkaan puoleen nimellisen jännitteestä, kuten kuormitetussa tilanteessa. Koska muuntaja ei muodosta katkenneeseen vaiheeseen jännitettä, johtuu kuormitetuissa tilanteissa pääjännitteiden nouseminen siitä, että yhä käynnissä olevat moottorit luovat pyöriessään katkenneeseen vaiheeseen jännitteen ja syöttävät sen myös 10,5 kV kiskoon.

6.1.3 OL3-verkkomallilla simuloitunut tilanteet

Vaihekatkon mallintamiseksi OL3-laitosyksikön verkossa käytettiin työssä laitostoimittajan tekemää ja TVO:n verifioimaa OL3-laitoksen ETAP-sähköverkkomallia. OL3 ETAP-malli sisältää laitosta syöttävän sähköverkon, päämuuntajan, omakäyttö-, varasyöttö- ja jakelumuuntajat, laitoksen omakäyttökuormat sekä UPS-järjestelmät.

Laitoksen alkuperäinen sähköverkkomalli oli tehty ETAP versiolla 16.2.0, josta se käännettiin vaihekatkosimulointeja varten työssä käytössä olleelle ETAP 22.0.1 versiolle. Laitoksen sähköverkkomallissa muuntajat oli mallinnettu kaksikämmimuuntajina ja ne vaihdettiin kolmikäämmimuuntajiksi vaihekatkosimulointeja varten. Laitoksen omakäyttömuuntajat ja varasyöttömuuntaja ovat maadoittamattomia tähteenkytkettyjä Y-y-y-muuntajia.

Laitosmallilla simuloitiin vikatilanteita laitoksen eri käyttötiloissa. Sähköverkkomalliin nämä käyttötilat muodostettiin kytkemällä eri tilanteissa toimivat moottorit verkkoon tai irti verkosta. Nämä laitoksen eri käyttötilat on koottu taulukkoon 6.5.

Taulukko 6.5. Simuloitunut käyttötilanteet

	Käyttötilanne	Syöttö
1	täystehoajo	päägeneraattorilta ja 400 kV verkosta
2	osatehoajo	päägeneraattorilta ja 400 kV verkosta
3	vuosihuolto	400 kV verkosta
4	saareke	päägeneraattorilta
5	varasyöttötilanne	110 kV verkosta

Tilanteessa 1 generaattori on käynnissä ja laitosyksikkö toimii suurella teholla tahdistettuna 400 kV verkkoon ja laitosyksikön tarvitsema sähköteho syötetään omakäyttömuuntajien kautta omakäyttösähköjärjestelmään 400 kV kiskosta. Moottorikuormaa on kaikissa osajärjestelmissä ja turbiini- ja reaktorilaitoksella. Tilanteessa 2 laitosyksikkö toimii osateholla tahdistettuna 400 kV verkkoon, generaattori on käynnissä ja laitosyksikön tarvitsema sähköteho syötetään omakäyttömuuntajien kautta omakäyttösähköjärjestelmään. Moottorikuormaa on kaikissa osajärjestelmissä ja turbiini- ja reaktorilaitoksella. Tilanteessa 3 laitosyksikkö on sammutetussa tilassa ja päägeneraattori ja päämuuntaja ovat irti sähköverkosta. Omakäyttösähköjärjestelmä kuluttaa pienellä teholla sähköä ja saa syöttönsä omakäyttömuuntajien kautta 400 kV verkosta. Vain reaktorilaitoksella on moottorikuormaa tilanteessa

3. Tilanteessa 4 laitousyksikkö toimii osateholla irrotettuna 400 kV verkosta. Laitousyksikön tarvitsema sähköteho tuotetaan päägeneraattorilla ja syötetään päämuuntajan sekä omakäyttömuuntajien kautta omakäyttösähköjärjestelmään. Moottorikuormaa on kaikissa osajärjestelmissä ja turbiini- ja reaktorilaitoksella. Tilanteessa 5 laitousyksikkö on sammutetussa tilassa ja sähköverkko kuluttaa pienellä teholla sähköä. Päägeneraattori ja päämuuntaja ovat irti sähköverkosta. Omakäyttösähköjärjestelmä saa syöttönsä varasyöttömuuntajan kautta 110 kV verkosta. Moottorikuormaa on kaikissa osajärjestelmissä pääosin reaktorilaitoksella.

ETAP:issa eri käyttötiloista luotiin ”study case editor” toiminnolla erilliset ”study case” pohjat, joihin voitiin tallentaa kyseisessä laskentatilanteessa laskennassa käytettäviä muuttujia, kuormituksia ja tulosraporttiin tallennettavaksi haluttavia tietoja. Kuormat kytkettiin verkkoon halutun käyttötilanteen mukaisesti. Simuloinneissa kytkettiin verkkoon suurimmat kuormat jokaisessa osajärjestelmässä turbiinilaitoksen ja reaktorilaitoksen 10 kV keskijänniteverkossa. Simuloituja vikatilanteita olivat 1-vaiheiset vaihekatkot päämuuntajan (A), omakäyttömuuntajan (B) ja varasyöttömuuntajan (C) yläjännitepuolella. Simulointien tulokset on esitetty erillisessä raportissa (Teollisuuden Voima Oyj, 2023).

6.2 Johtopäätökset simulointituloksista

Vaihekatkon aikana sähköjärjestelmän epäsymmetriaan vaikuttavat sitä syöttävän muuntajan kuormitus, kytkentä ja rakenne sekä verkkoon kytketty moottorikuorma. Työssä tehtyjen simulointien tuloksista voidaan todentaa kirjallisuudessa esitetty Y-y-muuntajan toiminta vaihekatkossa. Maadoittamaton ensiö- ja toisiopuolilta tähteenkytketty Y-y-muuntaja ei muodosta vaihekatkossa menetettyyn vaiheeseen jännitettä. Kuormittamattoman muuntajan toisiopuolella yksi pääjännite säilyy nimellisjännitteessään ja kaksi pääjännitteistä laskevat puoleen nimellisjännitteestä.

Lisäksi simulointituloksista nähdään, että kuormitetussa verkossa käynnissä olevat oikosulkumoottorit tuottavat verkkoon vaihekatkon aiheuttamaa epäsymmetriaa pienentävää vaikutusta. Moottorit luovat pyöriessään katkenneeseen vaiheeseen jännitteen ja syöttävät sen myös muualle verkkoon. Kuormitetussa verkossa vaihekatkon aikaiset pääjännitteet nousevat lähemmäs nimellisjännitettä, kuin kuormittamattomassa tilanteessa. Vaihekatkotarkasteiluissa on siis tarpeen ottaa oikosulkumoottoreiden vaikutus huomioon ja käyttää mallinnusohjelmia, joissa moottoreiden dynaaminen mallinnus onnistuu.

Vaihekatkon vaikutukset OL3-voimalaitoksen sähköjärjestelmään ovat hyvin erilaiset riippuen siitä, missä käyttötilassa laitos on vaihekatkon tapahtuessa. Laitoksen käyttötilanne vaikuttaa omakäyttösähköverkon kuormitukseen. Sillä tapahtuuko vaihekatko 110 kV vai 400 kV verkkosyötöllä, ei ole juurikaan merkitystä, sillä molemmista syötöistä laitoksen sähköverkkoa syötetään Y-y-kytkettyjen muuntajien kautta. Juuri Y-y-kytketty muuntaja ei vaikuta jännitteen epäsymmetrian havaitsemiseen sähköverkosta. Vaikuttavaksi tekijäksi jännitteiden käyttäytymiseen sähköverkossa vaikuttaa siis vain laitoksen sähköverkon kuormitus.

Laitoksen käyttötilanteissa, joissa sähköverkossa on kiinni moottorikuormaa, aiheuttaa moottoreiden pyöriminen verkkoon vastajärjestelmän jännitteen muodostumisen vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen.

Laitoksen käyttötilanteissa, joissa sähköverkossa ei ole kiinni moottorikuormaa, aiheuttaa kuormittamattomuus merkittävän epäsymmetrian verkossa pääjännitteiden välille vaihekatkossa, yhden vaiheen puuttuessa kokonaan.

Kaksivaiheisella vaihekatkolla on luonnollisesti yksivaiheista vaihekatkoa suurempi vaikutus jännitteiden epäsymmetriaan sähköverkossa. Tällöin Y-y-muuntajan syöttämän verkon jännite katoaa kokonaan ja verkko joutuu täydelliseen sähkönmenetystilanteeseen.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutustua vaihekatkon vaikutuksiin voimalaitoksen sähköverkossa sekä arvioida, miten hyvin nykyisillä Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitosyksikön sähköjärjestelmän suojalaitteilla pystytään havaitsemaan vaihekatkoja.

Vaihekatko aiheuttaa sähköverkkoon epäsymmetrisen vikatilanteen, mikä kasvattaa verkon sähkökoneisiin kohdistuvaa räsitusta ja voi johtaa niiden suorituskyvyn alenemiseen ja pahimmillaan koneiden vaurioitumiseen. Ydinvoimalaitoksilla eri puolilla maailmaa on raportoitu useita vaihekatkotilanteita, joissa vaihekatkovika on aiheuttanut turvallisuudelle tärkeiden sähkölaitteiden toimimattomuutta, kun vaihekatkoa ei ole havaittu sähköjärjestelmästä. IAEA ja WANO ovat antaneet kansainvälisiä ohjeita ja suosituksia vaihekatkon vaikutusten tarkastelemiseksi ja niiltä suojautumiseksi ydinvoimalaitoksilla.

Tärkeimpiä suojalaitteita vaihekatkon havaitsemiseksi voimalaitoksen sähköverkosta ovat alijännitesuojat, muuntajan differentiaalisuoja, generaattorin sekä moottoreiden vinokuormitusuojat ja katkaisijoiden toimintaa tarkkailevat suojat. Suojausta ja vaihekatkon havaitsemista vaikeuttavat verkossa olevat muuntajat ja oikosulkumoottorit. Muuntajan kytkennän tai verkkoon kytketyn moottorikuorman vaikutuksesta sähköjärjestelmän vaihejännitteet voivat näyttäytyä lähes normaaleina.

Vaihekatkon yhteisvaikutusten selvittämiseksi työssä simuloitiin ETAP-ohjelmalla vaihekatkotilanteita OL3:n sähköjärjestelmän verkkomallilla. Simuloituja tilanteita olivat vaihekatkot OL3-laitoksen eri käyttötiloissa ja simulointien tuloksia käytettiin sähköjärjestelmän suojalaitteiden toiminnan arviointiin. Simulointien tuloksista todettiin, että maadoittamattomat Y-y-muuntajat eivät muodosta jännitettä yksivaiheisessa vaihekatkotilanteessa katkenneeseen vaiheeseen, mutta omakäyttöverkossa käynnissä olevat oikosulkumoottorit voivat luoda puuttuvan vaiheen jännitteen sähköverkkoon. Kun käyvät oikosulkumoottorit muodostavat vaihekatkossa katkenneeseen vaiheeseen jännitteen, ne pienentävät vaihekatkossa verkkoon syntynyttä jännite-epäsymmetriaa.

Vaihekatkon vaikutukset OL3-voimalaitoksen sähköjärjestelmään ovat hyvin erilaiset riippuen siitä, missä käyttötilassa laitos on vaihekatkon tapahtuessa, sillä laitoksen käyttötilanne vaikuttaa omakäytösähköverkon kuormitukseen. Sillä tapahtuuko vaihekatko 110 kV vai

400 kV verkkosyötöllä, ei ole juurikaan merkitystä, sillä molemmista syötöistä laitoksen sähköverkkoa syötetään Y-y kytkettyjen muuntajien kautta. Laitoksen käyttötilanteissa, joissa sähköverkossa on kiinni moottorikuormaa, syntyy sähköverkon vaihekatkossa katkeneeseen vaiheeseen jännitettä moottoreiden pyörimisen vaikutuksesta. Käyttötilanteissa, joissa laitoksensähköverkossa ei ole kiinni moottorikuormaa, syntyy vaihekatkossa sähköverkkoon pääjännitteiden välille merkittävä epäsymmetria yhden vaiheen puuttuessa kokonaan.

LÄHDELUETTELO

ABB, 2023. *Asynchronous Motor in Single-Phase Disruption*, rev. D (sisäinen tiedosto)

ABB, 2022. a. *ABB TTT-käsikirja 2000-07* [Verkossa] Saatavilla [Index of /~kurki/automaatiolabrat/TTT \(oamk.fi\)](#) [Viitattu 2. elokuuta 2022].

ABB, 2022. b. *Unbalanced voltage supply The damaging effects on three phase induction motors and rectifiers*. [Verkossa] Saatavilla:

[https://library.e.abb.com/public/0c4186f3e7354f6982124decf92742d8/AVC-20%20white%20paper%20\(low%20res\).pdf](https://library.e.abb.com/public/0c4186f3e7354f6982124decf92742d8/AVC-20%20white%20paper%20(low%20res).pdf) [Viitattu 30. syyskuuta 2022].

Allen, A., Hope, E., Krvavac, J., Urbina, M. & Wisniewski, J. 2017. *Nuclear Plant Auxiliary System Modeling and Analysis for Open Phase Conditions*. [Verkossa] Saatavilla:

[Nuclear plant auxiliary system modeling and analysis for open phase conditions | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#) [Viitattu 20. maaliskuuta 2023].

Anderson, P., 1995. *Analysis of Faulted Power Systems*. 1. painos, New York: Wiley-IEEE Press. 1307 s.

Anderson, P., 1999. *Power System Protection*. 1. painos, New York: Wiley-IEEE Press. 540 s.

AREVA SA, 2020. *Voltage Monitoring Concept AC-Switchgear*, rev. O (sisäinen tiedosto)

Aura, L. & Tonteri, A., 1996. *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. 1. painos, Helsinki: WSOY. 544 s.

Batchelor, J. & King, E., 1965. *Effects of Unbalanced Current on Turbine-Generators*.

[Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/4766162> [Viitattu 14. heinäkuuta 2022].

Batorowicz, D., Goieva, O., Hanson, J., Schoenberger, W. & Shustov, A., 2015. *Impact of Open Phase Fault Conditions on Electrical Protection and Motor Behaviour*. Costa, M.,

Salles, M. & Cardoso, J., 2020. *Electromechanical Energy Conversion Through Active Learning*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7795082> [Viitattu 21. heinäkuuta 2022].

- Choi, J.-Y. & Jeong, S.-G., 2002. *Line Current Characteristics of Three-Phase Uncontrolled Rectifiers Under Line Voltage Unbalance Condition*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1158983> [Viitattu 22. heinäkuuta 2022].
- Clarke, E., 1948. *Circuit Analysis of A-C Power Systems, Volume I, Symmetrical and Related Components*. 3. painos, New York: John Wiley & Sons Inc. 540 s.
- Costa, M., Salles, M. & Cardoso, J., 2020. *Electromechanical Energy Conversion Through Active Learning*. 1. painos, Lontoo: IOP Publishing. 382 s.
- Dahiya, R., Deswal, S. & Jain, D., 2013. *Effect of Voltage Unbalance on Adjustable Speed Drives and its Mitigation Using Supercapacitor*. [Verkossa] Saatavilla: <https://vixra.org/pdf/1405.0092v1.pdf> [Viitattu 21. heinäkuuta 2022].
- Das, J. C., 2016. *Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling*. 1. painos, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 184 s.
- Deprez, W., 2008. *Energy Efficiency of Induction Machines: A Critical Assessment*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjE4beFrJb6AhUMiIsKHebGDQgQFnoECAYQAAQ&url=https%3A%2F%2Flirias.kuleuven.be%2Fretrieve%2F69104&usg=AOvVaw3BtGaT1kDALO5Ye9JS9KE-> [Viitattu 7. heinäkuuta 2022].
- Eklund T., Heininen, T., Kuivalainen, J., Latva, J., Saros, Suokanto, T., H., Vaaheranta, M., 2018. *OL3 suunnitteluperusteet – sähkötekniikka*, versio 1 (sisäinen tiedosto)
- Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. *Sähköverkot I, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta*. 1. painos, Helsinki: Otatieto. 520 s.
- European Commission, 2022. *EU taxonomy for sustainable activities*. [Verkossa] Saatavilla: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en#what [Viitattu 20. heinäkuuta 2022].
- European Parliament, 2022. *Taxonomy: MEPs do not object to inclusion of gas and nuclear activities*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220701IPR34365/taxonomy-meps-do-not-object-to-inclusion-of-gas-and-nuclear-activities> [Viitattu 20. heinäkuuta 2022].

ETAP, 2022. a. ETAP [Verkossa] Saatavilla: [ETAP Resource Center | Tutorials | Brochures | Webinars | Case Studies](#) [Viitattu 13. tammikuuta 2023].

ETAP, 2022. b. *ETAP User Guide* (sisäinen tiedosto)

Fingrid, 2022. *Olkiluoto 3 kantaverkkoon*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/olkiluoto-3-kantaverkkoon/> [Viitattu 19. heinäkuuta 2022].

Hamilton, R. & Wang, J., 2010. *A review of negative sequence current*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/5469515> [Viitattu 20. syyskuuta 2022].

Hietalahti, L., 2011. *Muuntajat ja sähkökoneet*. 1. painos, Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. 130 s.

Hietalahti, L., 2013. *Sähkövoimatekniikan perusteet*. 1. painos, Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. 302 s.

IAEA, 2016. *Impact of Open Phase Conditions on Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.iaea.org/publications/11026/impact-of-open-phase-conditions-on-electrical-power-systems-of-nuclear-power-plants> [Viitattu 6. kesäkuuta 2022].

IAEA, 2022. b. *Power Reactor Information System*. [Verkossa] Saatavilla: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=US> [Viitattu 10. kesäkuuta 2022].

IAEA, 2022. c. *International Atomic Energy Agency*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.iaea.org/> [Viitattu 10. heinäkuuta 2022].

Latva, J., 2013. *System Description OL3 400 kV Off-Site System, 30AC*, versio 8 (sisäinen tiedosto)

Mörsky, J., 1992. *Relesuojaustekniikka*. 1. painos Hämeenlinna: Otatieto. 459 s.

Norouzi, A., 2013. *Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/6822031> [Viitattu 30. kesäkuuta 2022].

Nuclear Safety Standards Commission, 2014. *KTA 3702 (2014–11) Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants*. [Verkossa] Saatavilla: [KTA 3702 \(2014-11\) Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants \(kta-gs.de\)](#) [Viitattu 10. maaliskuuta 2023].

Pyrhönen, J., 2023. Kysymys moottorista vaihekatkossa. Sähköpostikeskustelu 5.4.2023.

Reimert, D., 2006. *Protective Relaying for Power Generation Systems*. 1. painos, Boca Raton: Taylor and Francis Group. 561 s.

Sandberg, J., 2004. *Ydinturvallisuus*. 1. painos, Hämeenlinna: Säteilyturvakeskus. 418 s.

Siemens, 2010. *SIPROTEC System Description*. [Verkossa] Saatavilla [SIPROTEC Manual B9 en.pdf - SIPROTEC System Description - ID: 109742467 - Industry Support Siemens](#) [Viitattu 10. maaliskuuta 2023].

Singh, A., Singh, G. & Mitra, R., 2006. *Impact of Source Voltage Unbalance on AC-DC Rectifier Performance*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/document/4147791> [Viitattu 27. syyskuuta 2022].

STUK, 2019. *Stuklex*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-1#a5> [Viitattu 26. toukokuuta 2022].

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2010. *SFS-EN 50160*, Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Teollisuuden Voima Oyj, 2023. *OL3 - suojaustarkastelu vaihekatkotilanteissa*. (sisäinen tiedosto)

Teollisuuden Voima Oyj, 2022. a. *Ydinvoimalaitosyksikkö OL3*. [Verkossa] Saatavilla: https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf [Viitattu 27. heinäkuuta 2022].

Teollisuuden Voima Oyj, 2022. b. Teollisuuden Voiman sisäinen koulutusmateriaali (sisäinen tiedosto)

Teollisuuden Voima Oyj, 2022. c. *Turvallisuuspiirteet ja -järjestelmät*. [Verkossa] Saatavilla: [TVO - Turvallisuuspiirteet ja -järjestelmät](#) [Viitattu 10. elokuuta 2022].

Tilastokeskus, 2022. *Sähkön kokonaiskulutus kasvoi 6 % vuonna 2021*. [Verkossa] Saatavilla: <https://stat.fi/julkaisu/cku5h6iao1vzd0b06zowq5vqg> [Viitattu 19. heinäkuuta 2022].

Valtioneuvosto, 2022. *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta ilmasto- ja energiastrategiasta, Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia*. [Verkossa] Saatavilla: <https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f807c35c1> [Viitattu 20. heinäkuuta 2022].

Voipio, E., 2006. *Virtapiirit ja verkot*. 20. painos, Helsinki: Otatieto. 362 s.

Von Jouanne, A. & Banerjee, B., 2001. *Assessment of Voltage Unbalance*. [Verkossa] Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/956770> [Viitattu 21. heinäkuuta 2022].

WANO, 2015. *SOER 2015-1 Safety Challenges from Open Phase Events*.

World Nuclear Association, 2022. *Nuclear Power in the European Union*. [Verkossa] Saatavilla: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx> [Viitattu 13. kesäkuuta 2022].

Ydinenergialaki 1987/990, 1987. *Ydinenergialaki*. [Verkossa] Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990> [Viitattu 18. kesäkuuta 2022].