



STATCOM- ja SVC-aseman omakäyttömuuntajan suojausvaihtoehdot

Ville Lind

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

LIND VILLE:
STATCOM- ja SVC-aseman omakäyttömuuntajan suojausvaihtoehdot

Opinnäytetyö 45 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2023

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin STATCOM- ja SVC-asemien omakäyttömuuntajan suojausvaihtoehtoja. Opinnäytetyössä määritettiin omakäyttömuuntajalle sopivat suojausmenetelmät. Lisäksi tutkittiin omakäyttömuuntajan lämpenemisen vaikutusta muuntajan elinikään ja kuormittumiseen. Opinnäytetyön toimeksiantaja General Electric Grid Solutions Tampere on aikaisemmin ulkoistanut omakäyttömuuntajan suojaamisen. Opinnäytetyö tarjoaa esityksen omakäyttömuuntajan suojauksen toteutukseen.

STATCOM- ja SVC-asetat tarvitsevat omakäyttömuuntajaa piensähköjärjestelmiensä sähköistämiseen, omakäyttömuuntajat ovat olennainen osa asemien toimintaa. Piensähköjärjestelmävikä voi aiheuttaa koko aseman irtikytketymisen sähköverkosta. Suojausvaihtoehtojen rajaaminen tapahtuu taloudellisesta näkökulmasta siten, että riittävä suojaus saavutetaan. Muuntajan suojaamiseen löytyy monipuolisesti aineistoa, mikä helposti johtaa omakäyttömuuntajan suojauksen ylimitoittamiseen. Omakäyttömuuntajan suojausmenetelmien valinnassa on ongelmallista niiden yhteensopivuus STATCOM- ja SVC-asemien muiden suojausten kanssa.

Opinnäytetyön lopputuloksena on saatu esitys, jonka avulla voidaan tarkastella STATCOM- ja SVC-asemien omakäyttömuuntajan suojauksen toteutusta. Opinnäytetyön lopputulosta voidaan soveltaa perussuojaustason toteuttamiseen.

Asiasanat: omakäyttömuuntaja, suojaus, statcom, svc

ABSTRACT

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

LIND VILLE:

Protection Methods of the Auxiliary Transformer in a STATCOM and SVC Station

Bachelor's thesis 45 pages, appendices 2 pages
May 2023

The purpose of this thesis was to investigate STATCOM and SVC stations' auxiliary transformer protection possibilities. In the thesis it was determined the sufficient level of protection and protection methods. In addition, the research was made to explore the connection between the transformer heat for life expectancy and load.

STATCOM and SVC stations need an auxiliary transformer to power up auxiliary systems. The auxiliary systems are a critical part of STATCOM and SVC stations. The failing of auxiliary systems can collapse the entire station, causing disconnection from the grid. Defining the protection methods are investigated via economical viewpoint keeping in mind that there is a sufficient level of protection achieved. There is plenty of material for setting up protection for a transformer which can lead to oversizing the protection of the auxiliary transformer. The problem was to choose adequate protection methods that work with other protections that are set up in a STATCOM and SVC station.

As a result, this thesis will provide frames that are suitable for a view to set up the protection of an auxiliary transformer of the STATCOM and SVC station. The result of this thesis can be applied to set up a basic level of protection and if necessary, for scaling up the protection level.

Key words: auxiliary transformer, protection, statcom, svc

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	STAATTISET SÄHKÖSIIRTOLAITTEISTOT	7
	2.1 Static Var Compensator, SVC.....	7
	2.2 Static Synchronous Compensator, STATCOM	9
3	PERUSSUOJAUSTASON MÄÄRITTELYÄ	18
	3.1 Sulakkeet	18
	3.2 Kaasurele ja lämpötilan mittaus	25
	3.3 Numeeriset releet.....	27
	3.3.1 Käänteisaikaylivirtasuojaus	29
	3.3.2 Vakioaikaylivirtasuojaus ja jäännösjännitesuojaus	31
4	MUUNTAJAN SUOJAAMINEN YLILÄMPENEMISELTÄ	32
	4.1 Muuntajan mitoittaminen ja valinta	32
	4.1.1 Lämpötilan seuranta	33
	4.2 Muuntajan valinta	35
	4.3 Toimittajan ehdottama muuntajan suojausrele (DMCR).....	38
5	POHDINTA	39
	LÄHTEET	41
	LIITTEET	44
	Liite 1. DMCR Muuntajan suojausrele.....	44

LYHENTEET

FACTS	Joustava vaihtovirta sähkönsiirto järjestelmä (Flexible Alternating Current Transmission System)
IGBT	Eristyshilainen bipolaaritransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MMC	Modulaarinen monitasosuuntaaja (Modular Multilevel Converter)
STATCOM	Staattinen synkronikompensoaattori (Static Synchronous Compensator)
SVC	Staattinen loistehon kompensoaattori (Static Var Compensator)
TCR	Tyristoreilla ohjatut kelat (Thyristor Controlled Reactor)
TSC	Tyristoreilla kytketyt kondensaattorit (Thyristor Switched Capacitor)
TSR	Tyristoreilla kytketyt kelat (Thyristor Switched Reactor)
VSC	Jännitelähde konvertteri (Voltage Source Converter)
VT	Jännitemuuntaja (Voltage Transformer)

1 JOHDANTO

Muuntaja on keskeinen komponentti sähköjakelujärjestelmissä. Muuntaja laitteena ei usein ole helposti korvattavissa, jolloin sen suojaaminen täytyisi järjestää siten, että vikatilanteessa muuntajalle tapahtuisi mahdollisimman vähän vahinkoa. Muuntajan suojaustaso vaihtelee muuntajan tehon, käyttötarkoituksen, sijainnin sekä olosuhteiden mukaan.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan suojausvaihtoehtoja STATCOM- (**S**tatic **S**ynchronous **C**ompensator) ja SVC- (**S**tatic **V**ar **C**ompensator) asemien omakäyttömuuntajalle. Suojausvaihtoehtojen tarkastelu tehdään taloudellisesta näkökulmasta siten, että riittävä suojaustaso saavutetaan. Kaikkia suojausvaihtoehtoja ei tuoda esiin vaan, valitaan riittävät vaihtoehdot, joilla saavutetaan luotettava suojaustaso. Taloudellinen näkökulma on tärkeä, koska STATCOM- ja SVC-asemien tarjouskilpailun voittaminen edellyttää hyvää hinta/laatu suhdetta. Toistaiseksi General Electric Grid Solutions on jättänyt omakäyttömuuntajan hankinnan ja suojaamisen jollekin paikallisyksikölle tai muulle taholle. Tulevaisuudessa on mahdollista sisällyttää omakäyttömuuntajan hankinta ja sen suojaaminen osaksi STATCOM- tai SVC-tarjousta.

Opinnäytetyöhön liittyvän materiaalihaun yhteydessä oltiin yhteydessä eri yritysten edustajiin ja selvitettiin markkinoilla olevia ratkaisuja omakäyttömuuntajan suojaamiseen. Tämä opinnäytetyö sisältää läpileikkauksen vartenotettaviin suojausvaihtoehtoihin sekä esityksen muuntajan suojauksen toteuttamiseen. Varsinaiset laskelmat ja tutkimus erilaisista suojausmenetelmistä tapahtuu vasta, kun asiakas on valinnut toteutettavan STATCOM- tai SVC-kokonaisuuden.

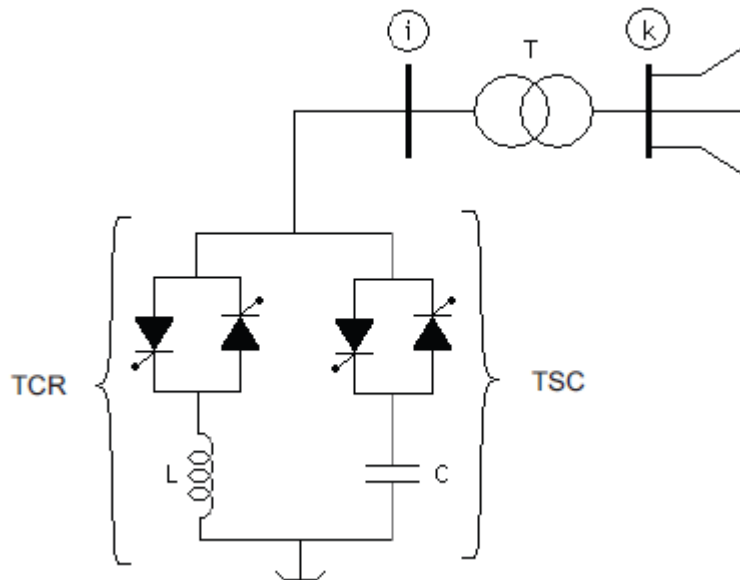
2 STAATTISET SÄHKÖSIIRTOLAITTEISTOT

FACTS on lyhenne, joka tulee sanoista **F**lexible **A**lternating **C**urrent **T**ransmission **S**ystems. Suomeksi käännettynä se olisi joustava vaihtovirtasähkösiirtojärjestelmä (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 1. 2011, 335). FACTS laitteet ovat staattisia laitteita vaihtovirran tehon siirtoon ja niillä lisätään sähkösiirtoverkkojen säädettävyyttä sekä tehon siirron kapasiteettia (Ndlela. Davidson 2022, 5).

FACTS laitteet voivat ehkäistä sähkösiirtojärjestelmän romahdukselta. Jos sähkösiirtojärjestelmässä ilmenee suuria häiriöitä, voidaan FACTS järjestelmillä vakauttaa verkon jännitettä, estää verkon sähkökatkoja tai verkon kaatuminen. Taloudelliset hyödyt ovat myös merkittäviä. Esimerkkinä Ruotsi, jossa on kahdeksan 400 kV sähkösiirtojärjestelmää, joista jokainen järjestelmä käyttää FACTS laitteistoa. Tutkimusten mukaan tarvittaisiin vähintään neljä 400 kV verkkoa lisää, mikäli FACTS laitteistoa ei olisi käytössä osana Ruotsin 400 kV sähkösiirtojärjestelmää. (Acharya. Nadarajah & Sode-Yome 2005.)

2.1 Static Var Compensator, SVC

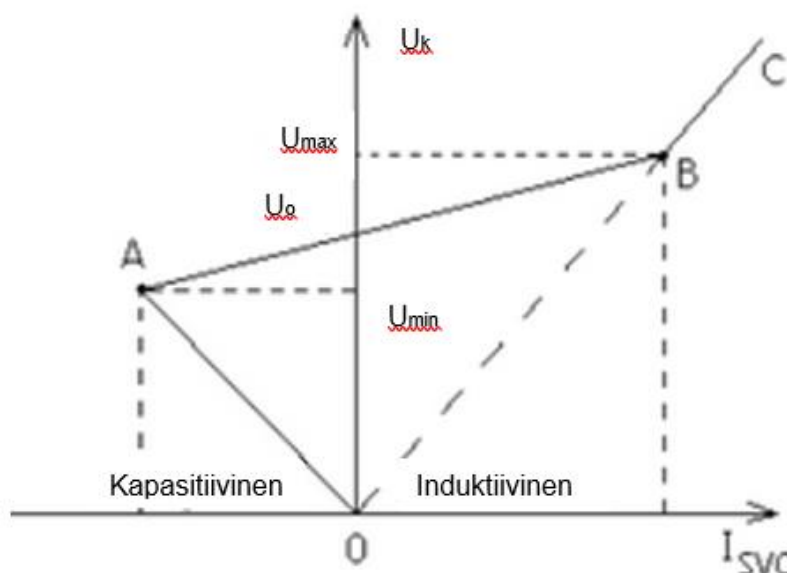
SVC (**S**tatic **V**ar **C**ompensator) eli staattinen loistehon kompensattori (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 1. 2011, 337). SVC:ssä toimii yleensä rinnakkain tyristoriohjattu kela (TCR) (**T**hyristor **C**ontrolled **R**eactor), ja tyristorilla kytketty kondensaattori (TSC) (**T**hyristor-**S**witched **C**apacitor). Kuvassa 1. on nähtävissä SVC:n rakenne yksiviivapiirroksena. Kelaa ja kondensaattoria voidaan kytkeä verkkoon tyristoreilla halutulla tavalla.



KUVA 1. Yksiviivapiirros SVC-laitteesta (Bulac C ym.2009)

Kuvassa 1. SVC-laitteisto on kytketty keskijännitekiskoon (i) ja suurjännitemuuntajan (T) oikealla puolella on suurjänniteverkko (k) (Bulac C ym.2009).

Staattinen kompensattori (SVC) toimii kytkemällä tyristörejä, joilla muutetaan reaktanssin arvoa. Kondensaattorin susceptanssi suhteessa reaktanssin susceptanssiin määrittää ottaako SVC verkosta loistehoa vai tuottaako SVC verkkoon loistehoa. Kuvassa 2. on nähtävissä SVC:n toiminta-alue kaavio. Jos SVC tuottaa verkkoon loistehoa, se nostaa verkon jännitettä ja mikäli SVC ottaa verkosta loistehoa se pienentää verkon jännitettä. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 1. 2011, 337.)



KUVA 2. SVC:n toiminta-alue kaavio. U_k on verkon jännite ja U_0 on jännitteen ohjearvo (Bulac C ym.2009, muokattu)

Mikäli verkon jännite U_k on isompi kuin U_0 , silloin SVC ottaa verkosta loistehoa. Puolestaan jos verkon jännite U_k on pienempi kuin U_0 silloin SVC tuottaa loistehoa verkkoon. Väli A-B ovat SVC-laitteen jatkuvan tilan toiminta-alue. (Bulac C ym.2009.). Ensimmäinen kaupallinen SVC on asennettu vuonna 1974 ja sen toimitti General Electric (Acharya, Nadarajah & Sode-Yome 2005).

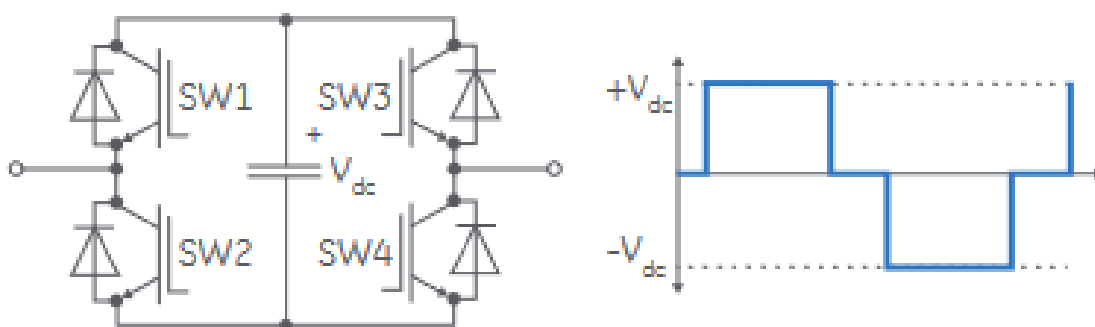
2.2 Static Synchronous Compensator, STATCOM

STATCOM nimi tulee sanoista **S**tatic **S**ynchronous **C**ompensator. Suomennettuna STATCOM voisi olla staattinen synkronikompensaattori tai staattinen tahtikompensaattori. STATCOM perustuu IGBT (**I**nulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor) puolijohdekomponentteihin, jotka ovat siltarakenteisia itsekommutoivia puolijohteita, joiden toimintaan tarvitaan tasasähköpiiri. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 1. 2011, 339.)

Jännitemuuntajat (VT, **V**oltage **T**ransformer) mittaavat sähköverkon vaiheiden jännitteitä. VT:n tuottama jännitetietoa lähetetään alimoduuleille (submodules), joilla tuotetaan vaihtojännitteen aaltomuotoa. Kuvassa 3. on esillä yhden submoduulin sisältämät neljä IGBT:ä sekä sen tuottama aaltomuoto. Jos VT:n mittaama jännitetieto on laskenut tavoitteesta, STATCOM toimii kapasitiivisena laitteena tuottaen kapasitiivista loistehoa verkkoon. Mikäli VT:n mittaama

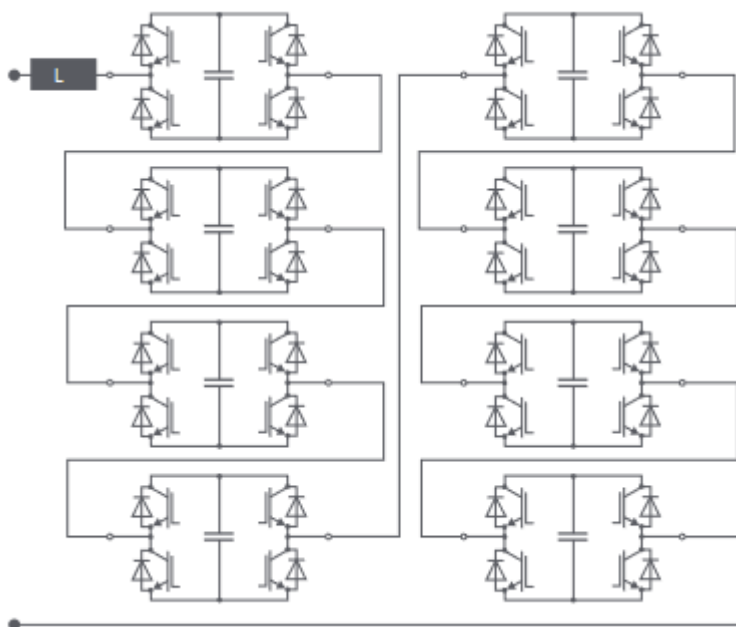
jännitetieto on noussut tavoitteesta, STATCOM toimii induktiivisena laitteena tuottaen induktiivista loistehoa verkkoon.

STATCOM:in toimintaperiaatteena on valvoa sähköverkon jännitettä ja jatkuvasti säätää reaktiivista loistehoa verkossa. Näin STATCOM toimii sähköverkon häiriötilanteissa ja parantaa verkon vakautta.



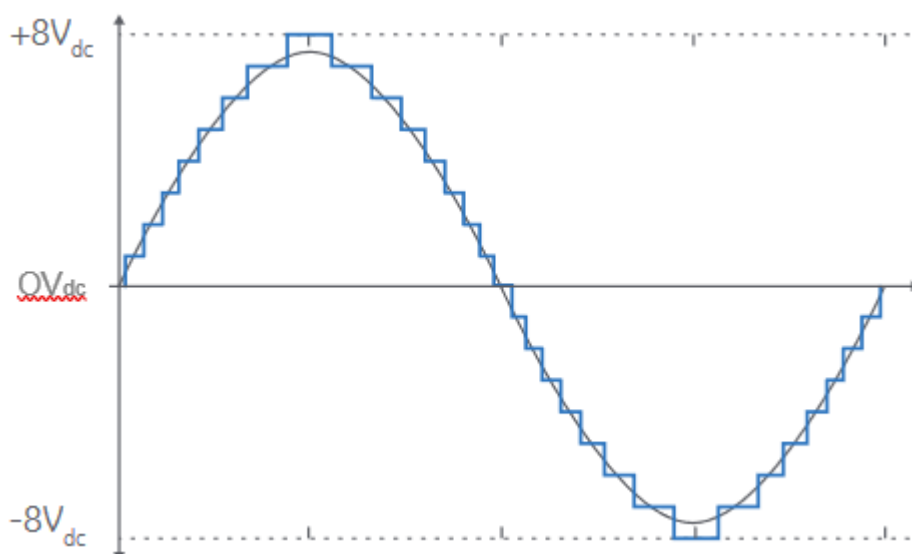
KUVA 3. Submoduuli ja sen aaltomuoto (General Electric. Grid Solutions 2018)

Kuvan 3. jännitteen kanttimuoto on STATCOM:in yhden submoduulin tuottamaan jännitteen aaltomuoto. Kun useampi submoduuli on kytketty sarjaan kuvan 4 mukaisesti saadaan rakennettua siniaaltomuotoa vastaavampi jännite.



KUVA 4. Usean submoduulin sarjakytkentä (General Electric. Grid Solutions 2018)

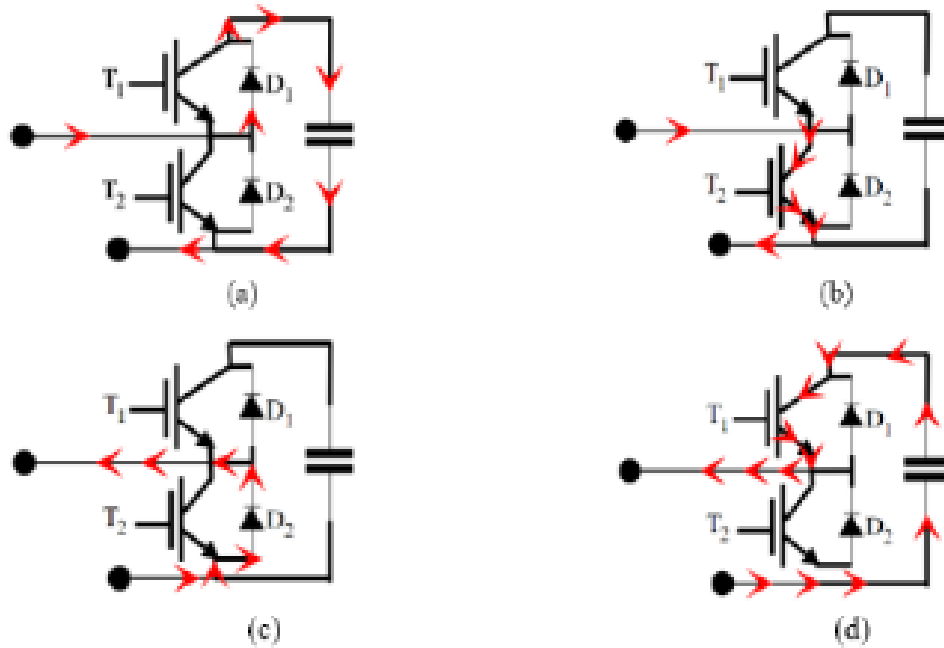
Kuvassa 4. nähty usean submoduulin sarjakytkentä mahdollistaa suuremman jännitteen sekä siniaaltorakenteen jännitteelle. Kuvassa 5. on nähtävissä useamman sarjaan kytketyn submoduulin tuottama jännitteen muoto.



KUVA 5. Usean submoduulin tuottama siniaaltomuoto (General Electric. Grid Solutions. 2018 muokattu)

Kuvan 5. aaltomuoto on hieman kantikas verrattuna normaaliin siniaaltoon, mutta tarpeeksi hyvä verkon loistehon kompensointiin ja vakauttamiseen. Kuvassa 3. nähty yhden submoduulin IGBT:n venttiilin tuottama kolmivaiheinen aaltomuoto (+jakso, 0 jakso, -jakso) on vielä kaukana siniaallosta. Mutta kun useita submoduuleita on kytketty sarjaan (kuvassa 5). Saadaan jännitteen aaltomuoto rakennettua lähemmäksi sähköverkossa olevaa siniaaltomuotoa. (General Electric. Grid Solutions 2018, 6.)

STATCOM:in tuottaman jännitteen rakentuminen, selittyy IGBT:n toiminnan mukaisesti. Kuvassa 6. on nähtävillä submoduulin virran kulkusuunta IGBT:ssä, kondensaattorin ja diodien välillä.

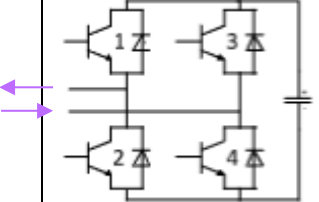
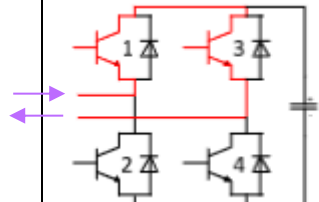
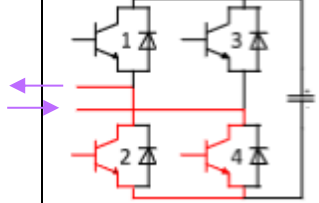
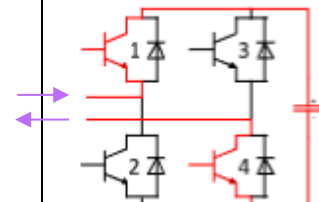
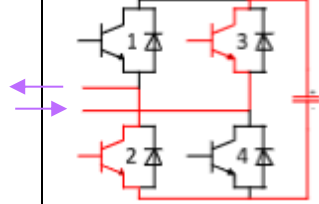


KUVA 6. Submoduulin virran kulkutien ohjaus (Beyhan, Elif & Akpınar, Eyup 2020)

Kuvassa 6 kohdassa (a) virta kulkee D_1 kautta ja T_2 on ei johtavassa tilassa, positiivinen virta kulkee kondensaattoriin ja kondensaattori latautuu. Submoduuli on ohitustilassa kohdissa (b) ja (c) pitäen virran positiivisessa tai negatiivisessa tilassa. Kohdassa (d) T_1 on kytketty päälle ja T_2 ei ole päällä, virta kulkee kondensaattorista kohti positiivista liitäntää ja kondensaattori purkautuu. (Beyhan, Elif & Akpınar, Eyup 2020.)

IGBT:n tilaa ja kytkentää käsitellään taulukossa 1. Taulukon 1 jälkeisessä tekstissä selvitetään kuvan 5. jännitteen aaltomuodon rakentumista.

TAULUKKO 1. IGBT kytkentä ja tila (General Electric Grid Solutions. Power Electronics Tampere 2010.)

Tila ja kytkentä malli	Selitys
 <p style="text-align: center;">[0, 0, 0, 0]</p>	<p>Estotila, ei toiminnassa oleva silta. Kondensaattori lataa tai purkautuu diodien kautta.</p> <p>Jos $U_{in} > U_{dc}$, diodit 1 ja 4 johtavat. Jos $U_{in} < U_{dc}$, diodit 2 ja 3 johtavat. Jos $U_{in} \geq U_{dc}$, virtaa ei kulje.</p>
 <p style="text-align: center;">[1, 0, 1, 0]</p>	<p>Positiivinen ohitustila. Kondensaattorista ei kulje virtaa. Submoduuli tuottaa nollajännitteen ulostuloihin</p>
 <p style="text-align: center;">[0, 1, 0, 1]</p>	<p>Negatiivinen ohitustila. Kondensaattorista ei kulje virtaa. Submoduuli tuottaa nollajännitteen ulostuloihin</p>
 <p style="text-align: center;">[1, 0, 0, 1]</p>	<p>Positiivinen tila. Submoduuli tuottaa positiivisen U_{dc} jännitteen ulostuloihin</p>
 <p style="text-align: center;">[0, 1, 1, 0]</p>	<p>Negatiivinen tila. Submoduuli tuottaa negatiivisen U_{dc} jännitteen ulostuloihin.</p>

U_{in} on sähköverkon mitattu jännite. U_{dc} on kondensaattorin tuottama tasajännite (taulukko1).

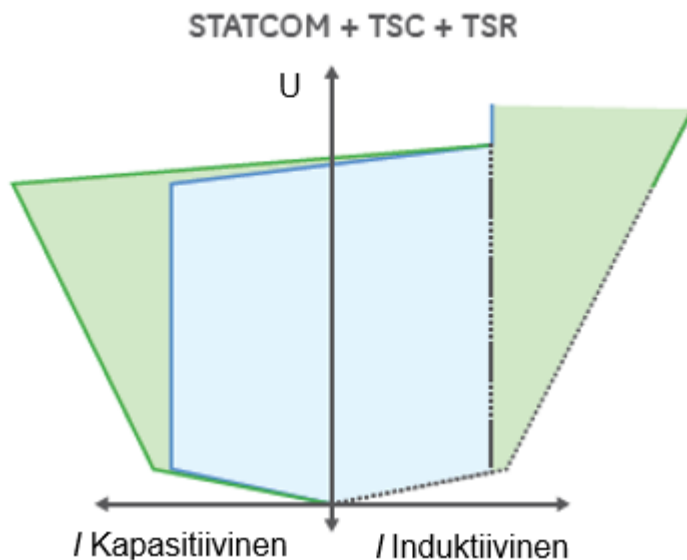
Kytkemällä taulukon 1. IGBT 1 ja 4 [1,0,0,1], saadaan positiivinen askel siniaaltomuotoon. Kytkemällä positiivinen ohitustila [1,0,1,0] saadaan nollajännite positiiviseen askeleeseen. Kun useita submoduuleita on sarjassa, voidaan jokaisen submoduulin IGBT 1 ja 4 kytkeä päälle askel askeleelta, jokaisen askeleen perään kytketään positiivinen ohitustila (kuvassa 5. positiivisen puolijakson porras). Se kuinka monta submoduulia kytketään sarjaan määrittää suurimman jännitteen arvon. Kun kuvan 5. jännitteen puolijakson huipulta lähdetään kohti nollaa, kytketään edellä mainitut submoduulit pois käänteisessä järjestyksessä, kunnes saavutetaan nollajännite. Sama kuvio toistuu, kun siirrytään negatiiviselle puolijaksolle, mutta silloin kytketään taulukon 1. IGBT 2 ja 3 [0,1,1,0] sekä negatiivinen ohitustila [0,1,0,1] askel askeleelta. Kun saavutetaan jännitteen puolijakson negatiivinen huippu, tullaan sieltä kohti nollaa kytkemällä submoduulit pois käänteisessä järjestyksessä.

Modular Multilevel Converter (MMC), suomeksi voisi olla modulaarinen venttiilikonvertteri, on usean submoduulin muodostama venttiilimoduuli. Useita venttiilimoduuleita kytkettynä yhteen muodostuu kokonainen venttiili, joka tuottaa yhden vaiheen aaltomuodon. Se miten monta sarjaan kytkettyä submoduulia yhdessä venttiilissä on, määrittää se kuinka korkean jännitteen venttiili voi tuottaa. Siten saadaan jännitteen suuruudelle kaava 1.

$$\pm N * U_{dc} \quad (1)$$

,jossa N on submoduulien lukumäärä ja U_{dc} yhden submoduulin tuottama jännitteen arvo. (General Electric Grid Solutions, Power Electronics Tampere 2010.)

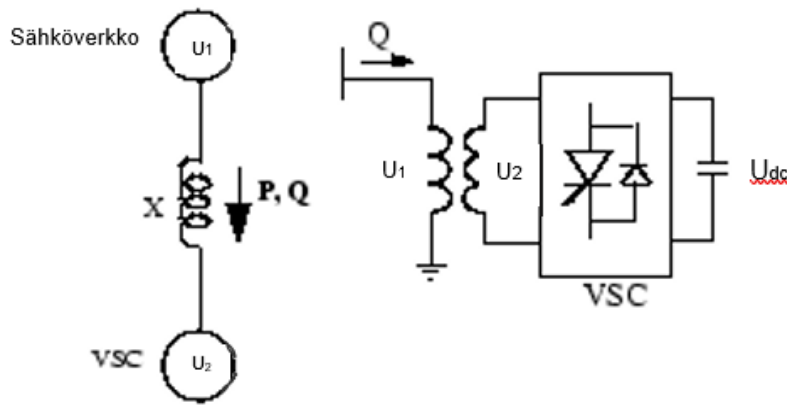
Kuvassa 7. on esitetty STATCOM:in toiminta-alue. Sinisellä pohjalla on STATCOM sellaisenaan, ilman ns. hybridi-STATCOM ominaisuutta. Vihreällä pohjalla on laajempi toiminta-alue, kun STATCOM on hybridi-STATCOM, jossa on lisäksi TSC (tyristorikytketty kondensaattori) ja TSR (**T**hyristor-**S**witched **R**eactor) eli (tyristorikytketty reaktori). (General Electric. Grid Solutions. Static Synchronous Compensator 2018.) TSR – luokitellaan ns. shunttikytketyiksi laitteiksi, eli rinnankytketyiksi kompensointilaitteiksi. (Ndlela. Davidson 2022, 5.)



KUVA 7. STATCOM toiminta-alue, kuvassa I virta. (General Electric Grid Solutions 2018, muokattu)

Kuvassa 7. STATCOM toimii laajalti koko jännitteen vaihtelun alueella ja kuvan kaltaisella hybridi-STATCOM:illa (vihreät osa-alueet) saavutetaan reilusti lisää reaktiivista loistehon säätöä. Kuvassa 7. STATCOM:in toiminta-alue (vaalean sininen) käytetään siten, että verkon jännite (U) pyritään pitämään tavoite arvossa. Mikäli jännite (U) nousee yli STATCOM:in jännitteen, tuottaa STATCOM induktiivista loistehoa verkkoon, jolloin sähköverkon jännite laskee. Mikäli jännite (U) on alle STATCOM:in jännitteen, tuottaa STATCOM kapasitiivista loistehoa verkkoon, nostaen sähköverkon jännitettä. (General Electric. Grid Solutions. Static Synchronous Compensator 2018.)

Kuvassa 8. on esitetty STATCOM:in VSC (**V**oltage **S**ource **C**onverter) venttiili, joka sijaitsee toisiopuolella verkkoon kytketystä päämuuntajasta. VSC käyttää submoduulien IGBT piirejä tuottaakseen jännitteen DC-lähteestä.



KUVA 8. STATCOM:in toimintaperiaate. (MathWorks 2022, muokattu)

VSC tuottaa jännitteen U_2 , DC-jännitelähteestä. Pätöteho ja loisteho siirtyy lähteiden U_1 ja U_2 välillä. U_1 on sähköverkonjännite, jota STATCOM säätelee ja U_2 on jännite, jonka VSC on tuottanut. X on reaktanssi, joka on muuntajan ja suodattimien välillä.

Symbolien selitykset

U_1 on pääjännite lähteestä 1 (Sähköverkon jännite)

U_2 on linjasta linjaan jännite lähteestä 2 (VSC)

X on reaktanssi muuntajan ja suodattimien yhteydessä

δ on vaihekulma U_1 suhteessa U_2

P on päteho

Q on loisteho

Kaava 2. STATCOM:in tuottamalle päteholle (normaalitilanne verkossa)

$$P = \frac{(U_1 U_2) \sin \delta}{X} \quad (2)$$

Kaava 3. STATCOM:in loisteholle (jännitteensäädön tarve)

$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2 \cos \delta)}{X} \quad (3)$$

Kuvan 8. symbolien merkitys selviää tarkastelemalla STATCOM:in toimintaa. STATCOM on valmiustilassa, kun on normaalitilanne verkossa, silloin U_2 jännite, jonka VSC tuottaa on samassa vaiheessa U_1 jännitteen kanssa ($\delta \approx 0$). Jos U_2 jännite on matalampi kuin U_1 , Q (loisteho) tulee U_1 :sta kohti U_2 :sta, jolloin STATCOM ottaa verkosta loistehoa. Mikäli U_2 on suurempi kuin U_1 , Q (loisteho) tulee U_2 :sta, U_1 :seen, jolloin STATCOM tuottaa loistehoa verkkoon. Määrä, jonka STATCOM tuottaa loistehoa verkkoon määräytyy kaavalla 4.

$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2)}{X} \quad (4)$$

Kondensaattori kuvassa 8. on kytketty DC-puolelle VSC:tä ja toimii DC-jännitelähteenä. Kun STATCOM on valmiustilassa jännite U_2 on hieman jäljessä jännitettä U_1 , jotta voidaan kompensoida muuntajan ja VSC:n häviöt sekä pitää kondensaattori ladattuna. (MathWorks 2022.)

3 PERUSSUOJAUSTASON MÄÄRITTELYÄ

Omakäyttömuuntaja ei tarvitse niin suurta suojausta kuin esimerkiksi päämuuntaja, joka yhdistää STATCOM:in tai SVC:n sähköverkkoon. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että omakäyttömuuntaja on käyttötehoiltaan pienempi ja sen syöttämä teho menee vain laitoksen omaan käyttöön. Pienjännitesähkökeskus omalle sähkökäytölle SVC- tai STATCOM-asemalla sisältää oman katkaisijan ja sulakkeita. Ylivirta- ja oikosulkuilanteet, jotka mahdollisesti voisivat tapahtua laitoksen sisäisessä sähkökäytössä yleensä laukaisevat laitoksen oman pienjännitesähkökeskuksen sulakkeita ennen kuin vika pääsee muuntajalle saakka. Lisäksi STATCOM- ja SVC-laitokset on suojattu maasulun havaitsevalla jäännösjännitesuojauksella, joka laukaisee aseman pääkatkaisijan, mikäli omakäyttömuuntajaan tulee maasulku (General Electric. Grid Solutions. Power Electronics Tampere 2022.)

Asiakkaan vaatimukset, laitoksen sijainti ja muuntajan teho ratkaisevat miten omakäyttömuuntajan suojaus tullaan toteuttamaan. Siksi on hyvä määritellä perustaso suojaukselle turvallisuuden ja taloudellisuuden näkökulmasta. Omakäyttömuuntaja kannattaa suojata oikosululta ja ylivirralla. Lisäksi muuntajan lämpötilaa kannattaa seurata, koska muuntajan lämpötila vaikuttaa muuntajan käyttöeliniikään sekä kertoo muuntajan kuormituksesta. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 1. 2011, 158.)

3.1 Sulakkeet

Sulakkeista puhuttaessa käytetään ST-kortistossa sanaa suurjännitesulake keskijännitteellä, kun taas kaupallisissa lähteissä saatetaan käyttää termiä keskijännite (MV, **M**edium **V**oltage).

Sulakkeita käytetään yleensä kytkinlaitteiston yhteydessä. Sulake on yksinkertainen ja yleisesti käytetty suojausmenetelmä. Sulake on yksinkertaisuudestaan huolimatta monipuolinen laite, koska se hoitaa releen ja katkaisijan sekä erottimen tehtävät samanaikaisesti ja edullisesti. Teknisesti se ei ole niin monipuolinen mitä nykyaikaiset releet, mutta ansaitsee oman paikkansa muuntajan suojausvaihtoehtoihin. (Mörsky 1992, 14.)

Muuntajan sulakkeet tulevat muuntajan ensiöpuolelle ja niiden valitsemiseksi on hyvä ottaa huomioon muutamia asioita. Muuntajan ylikuormittumiseen reagoi rele tai lämpömittari, ei sulake. Muuntajan kytkentäsysäysvirta ei saa vaikuttaa sulakkeen toimintakykyyn. Jos sulaketta ei ole valittu oikein, muuntajan kytkentäsysäysvirta saattaa johtaa sulakkeen tarpeettomaan toimimiseen normaalissa käyttötilanteessa. Sulakkeen nimellisvirran tulisi olla n.1,5–2 kertainen muuntajan nimellisvirtaan. Oikosulkuvirran pitäisi olla 4–5 kertainen sulakkeen nimellisvirtaan nähden, koska sulakkeen läpi kulkeva oikosulkuvirta täytyy olla sulakkeen minimikatkaisukykyvirtaa suurempi. Sulakkeen mitoittamisessa otetaan huomioon, ettei muuntajan terminen rasitus oikosulkutilanteessa kasva liian suureksi. Selektiivisyyden huomiointi ensiöpuolen releiden ja toisiopuolen pienjännitekeskuksen suojiin kanssa. Sulakkeiden nimellisjännite täytyy olla verkon suurin sallittu käyttöjännite. Esimerkiksi 24 kV sulakkeita ei saa käyttää 12 kV verkossa. Valmistaja ilmoittaa kullekin muuntajalle sopivan sulakkeen ja selektiivisesti sopivat pienjännitesulakkeet. (Mörsky 1992, 396.)

Sulakkeet, jotka tulevat omakäyttömuuntajan ensiöpuolelle ovat virtaa rajoittavia suurjännitesulakkeita (sj). Virtaa rajoittavilla suurjännitesulakkeilla suojataan muuntajan suurjännitekaapeleita, muuntajaa, pienjännitekeskusta syöttävää kaapelia, sekä pienjännitekeskusta. Virtaa rajoittavien sulakkeiden käytöllä voidaan ehkäistä muuntajapalon riskiä ja parantaa henkilöturvallisuutta. Niiden nopea toiminta-aika oikosulkutilanteissa pienentää vahinkojen määrää. Sulakevalinta koordinoidaan muuntaja- ja kojeistovalmistajan suositusten mukaisesti. Oikosulkuvirtoihin on syytä kiinnittää huomiota ja valita sellaiset sulakkeet, jotka toimivat myös pienemmillä suurjännitteen oikosulkuvirroilla, esimerkiksi ns. Full range tyyppiset -sulakkeet (Full range- sulaketyyppi muuntajan suojaamiseen).

Taulukossa 2. on suuntaa antava ohje muuntajan oikosulkutilannetta suojaavan sulakkeen valintaan. Sulakkeen koko on ilmoitettu ampeereina.

TAULUKKO 2. Ohjeellinen muuntajalle tulevan sulakkeen valintataulukko (ST 53.11.2019).

Muunta- ja kVA	200	315	500	800	1000	1250	1600
Jännite 10 kV	25	40	63	63	100	100	100
Jännite 20 kV	16	25	25	40	63	63	63

Omakäyttömuuntaja, joka voisi olla SVC- tai STATCOM- asemalla on esimerkiksi kokoa 300–500 kVA. Taulukon 2. mukaan valittaisiin 20 kV jännitteellä 25A sulake. Sulakkeiden palaessa, muuntamossa täytyy olla varasulakkeina 3 kpl käytössä olevaa sulaketyyppiä. Yhdenkin muuntajan sulakkeen palaessa vaihdetaan kaikki 3 sulaketta, koska käytössä olleiden ehjien sulakkeiden toimintakyky on saattanut heikentyä. (ST53.13. 2019, 13.).

Yleisesti SVC:n tai STATCOM:in keskijännitekisko on omakäyttömuuntajan voimanlähteenä. Vikatilanteessa keskijännitekiskossa voi olla niin suuri oikosulkuvirta, ettei sitä saada poikki katkaisijalla tai sulakkeilla. Suuri oikosulkuvirta on ongelma silloin kun tulee tilanne, jossa omakäyttömuuntaja täytyy erottaa keskijännitekiskon syötöstä. Mikäli liian suuri oikosulkuvirta on ongelmaksi virran katkaisulle, täytyy asentaa sarjareaktori omakäyttömuuntajan ensiöpuolelle. Sarjareaktori kuristaa oikosulkuvirran, sopivaksi asennettuja sulakkeita varten esimerkiksi alle 40 kA. Virtaa rajoittavat sulakkeet ovat nopein ja paras tapa minimoida vahinko omakäyttömuuntajalle ja toisiopuolen järjestelmille. Omakäyttömuuntaja voidaan myös suojata ylivirtareleellä, koska sulakkeet eivät sovellu hyvin ylivirtasuojaukseen. (Halonen, Thorvaldsson & Wikström 2009.)

Virranrajoitussulakkeet jakautuvat kolmeen ryhmään niiden ominaisuuksien mukaan. Muuntajan kytkentäsysäysvirta, sulakkeiden käyttöympäristö ja sulakkeen nimellisvirta vaikuttavat sulakkeen valintaan.

Back-Up sulake:

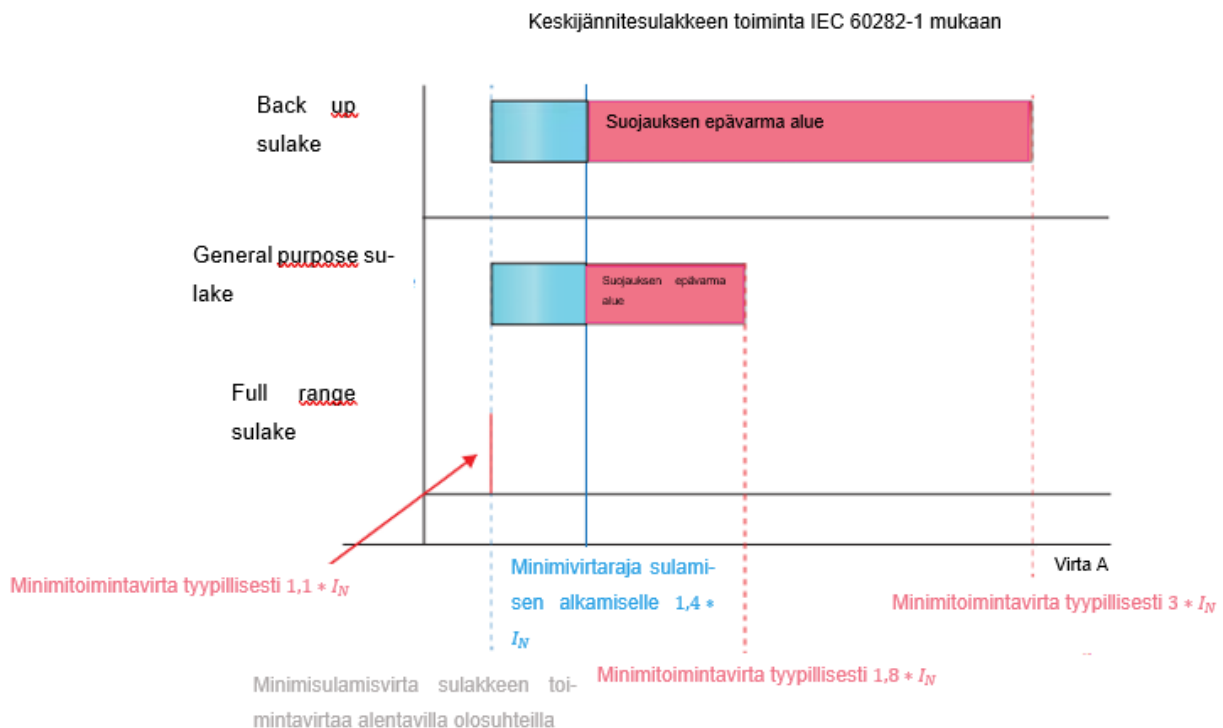
Virranrajoitussulake, joka katkaisee virran sulakkeen nimellisvirran mukaisesti, aina sulakkeen maksimioikosulkuvirtaan saakka (40kA). Suojauksessa sisältää suurimman epävarman toiminta-alueen (kuvio 1), alkaen minimivirtarajasta (1,4 kertaa nimellisvirta), minimoimintavirtaan (3 kertaa nimellisvirta).

General purpose sulake:

Virranrajoitussulake, joka katkaisee virran siten, että sulakkeen palamisaika alkaa sulakkeen minimivirtarajasta (1,4 kertaa nimellisvirta). Minimivirtarajasta eteenpäin sulakkeen toiminta-aika on maksimissaan 1 tunti (kuvio 1). Minimitoimintavirta (1,8 kertaa nimellisvirta) laukaisee sulakkeen välittömästi.

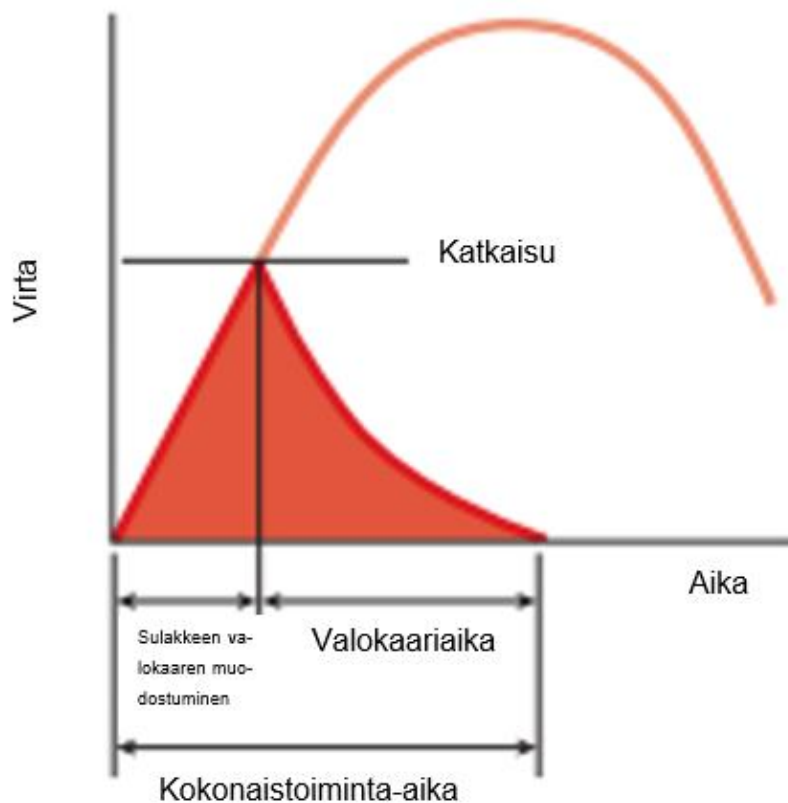
Full-range-sulakkeet:

Virranrajoitussulake, joka katkaisee oikosulkuvirran siniaallon puolijakson aikana aina kun oikosulkuvirta ylittää sulakkeen minimoimintavirran (1,1 kertaa nimellisvirta). Ei epävarmaa toiminta-aluetta (kuvio 1).



KUVIO 1. Sulaketyypit ja toiminta-alueet. I_N on sulakkeen nimellisvirta (EATON Bussman 2017. MV fuse links, muokattu)

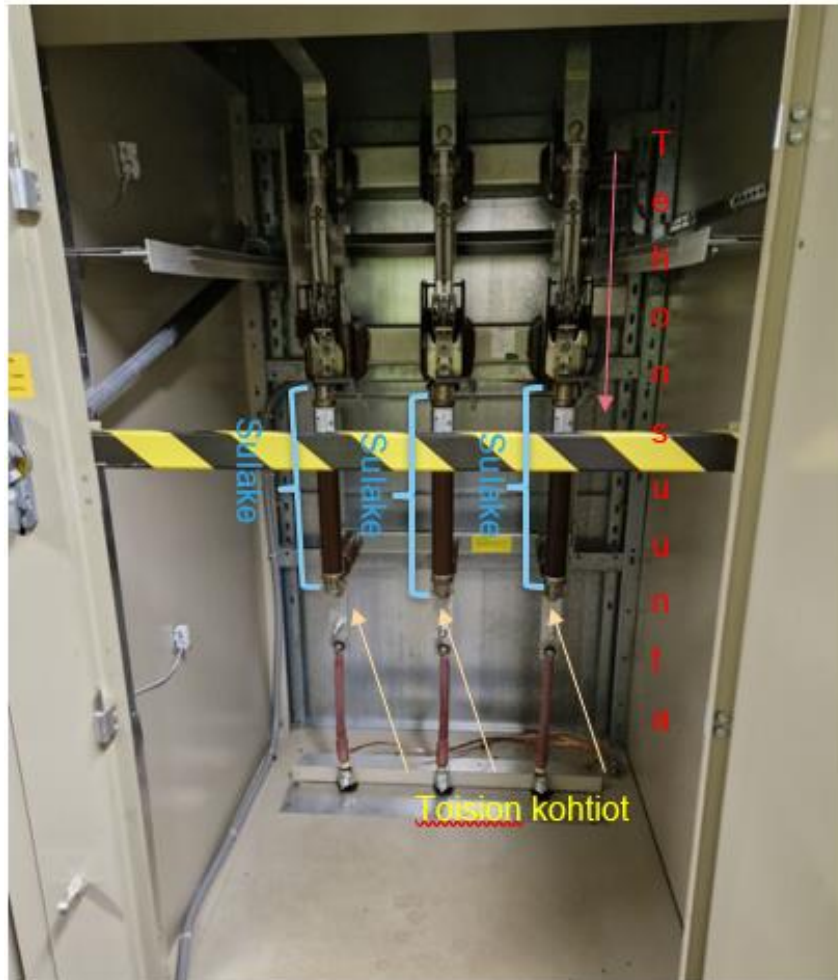
Kuviossa 1. on alariville sijoitettu Full-range-sulaketyyppi. Kuviosta nähdään, että Full-range-sulake palaa poikki välittömästi, kun oikosulkuvirta ylittää sulakkeen nimellisvirran ($1,1 * I_N$). Keskirivillä olevan General purpose -sulakkeen toiminta-aika alkaa, kun sulakkeen sulamisvirtaraja ylitetään, silloin alkaa sulakkeen palamisen aika, joka voi kestää yhden tunnin. General purpose -sulakkeen minimi palamisvirta on n. 1.8 ($1,8 * I_N$) kertaa sulakkeen nimellisvirta ja sisältää virta-alueen (punaisella), jossa suojaus on epävarma johtuen sulakkeen tarvitsemasta toimintavirran määrästä. Ylärivillä oleva Back up -sulake toimii lähes samalla tavalla mitä General purpose -sulake, mutta sulakkeen minimipalamisvirta on 3-kertainen sulakkeen asetettuun nimellisvirtaan ($3 * I_N$). Back up -sulakkeella on pisin aika, jossa suojaus on epävarmaa, johtuen sulakkeen tarvitsemasta virtamäärästä ja toiminta-ajasta, jossa sulakkeen tulee toimia (punaisella). (EATON Bussman MV fuse links 2017, 6). Laitetoimittajan mukaan virranrajoitussulakkeet ovat turvallisia, luotettavia, ympäristöystävällisiä sekä kustannustehokkaita. Kuviossa 2. on esillä virranrajoitussulakkeen toiminta oikosulkutilanteessa.



KUVIO 2. Kokonaistoiminta-aika ja katkaisuvirta (EATON Bussman 2017. MV fuse links, muokattu)

Kuviossa 2. nähdään, kuinka virranrajoitussulake katkaisee oikosulkuvirran 1. jakson puoliaallon aikana (Eaton. Bussmann MV fuse links 2017, 6.)

Kuvassa 9. nähdään varokekuormanerotin, jollainen voi olla sähköasemalla ennen omakäyttömuuntajaa.



KUVA 9. Varokekuormanerotin keski-jännitekojeistossa (Elenia 2023, muokattu)

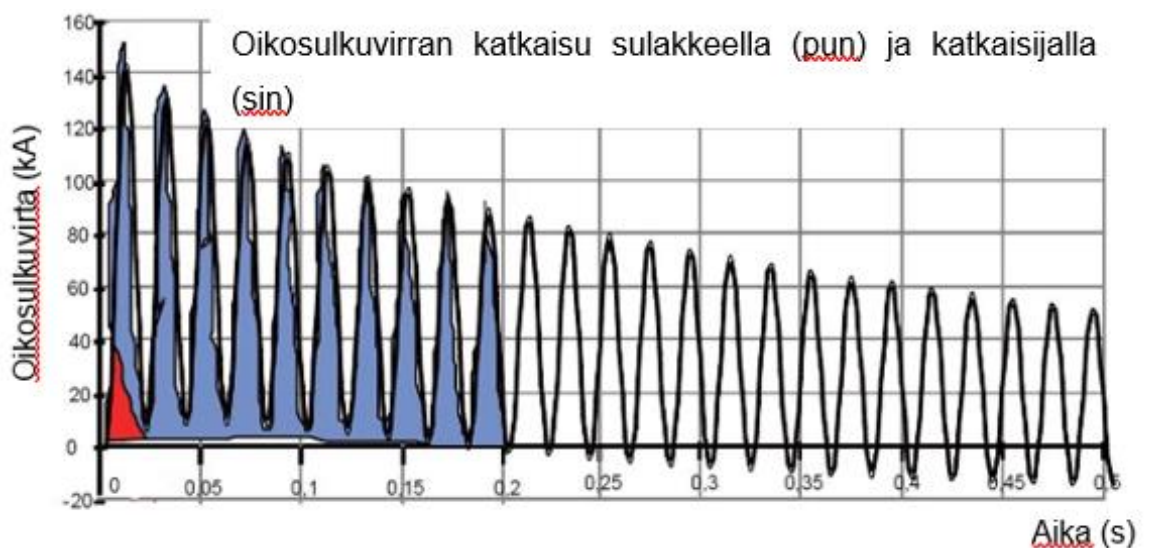
Kuvassa 9. tulee esiin sulakkeiden sijoittuminen varokekuormanerottimeen, kuvaa muokattu tulkitsemisen helpottamiseksi.

Varokekuormanerotin eroaa kuormanerotimesta siten, että siinä on vapaalaukaisulaite ja se varustetaan sulakkeilla (ABB,TTT käsikirja 2000, 335). Yhden vaiheen sulakkeen palaminen voi aiheuttaa muuntajalle tilanteen, jossa muuntaja jatkaa toimintaa vajaanapaisesti verkkoon kytkettynä kahdella

vaiheella. Jotta yhdenkin sulakkeen palaminen aiheuttaa varokekuormaerottimen laukaisun, on varokekuormaerottimessa usein nastalaukaisulaite. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 196.) Nastalaukaisulaite aiheuttaa piirin kaikki napaisen erottamisen (ABB,TTT käsikirja 2000, 335). Sulakkeen palaessa, aktivoituu sulakkeen laukaisunasta (*striker*), joka on yhteydessä varokekuormaerottimen nastalaukaisumekanismiin. Laukaisunastan liike aiheuttaa varokekuormaerottimen laukaisumekanismiin aktivoitumisen, joka aiheuttaa sähköpiirin avautumiseen varokekuormaerottimessa. (Eaton. Bussmann MV fuse links 2017, 6.)

Sulakkeen vaihdon ja asettamisen aikana, sulakkeiden kohtiot maadoitetaan maadoituskytkimellä. Jos kuormanerottimen rakenne varmistaa sulakkeiden vaihdon turvallisuuden, riittää vain toision sulakekohtion maadoittaminen. (ST53.13. 2018,13.)

Kuvassa 10 on esillä tilanne, jossa on verrattu katkaisijan ja sulakkeen toimintaa oikosulkutilanteessa. Katkaisija ja sulake katkaisevat yhtä suuren oikosulkuvirran. Sinisellä käyrällä on katkaisijan läpi päästämä oikosulkuvirta. Punaisella käyrällä on virranrajoitussulakkeen läpi päästämä oikosulkuvirta. Sulake toimii huomattavasti nopeammin kuin katkaisija.



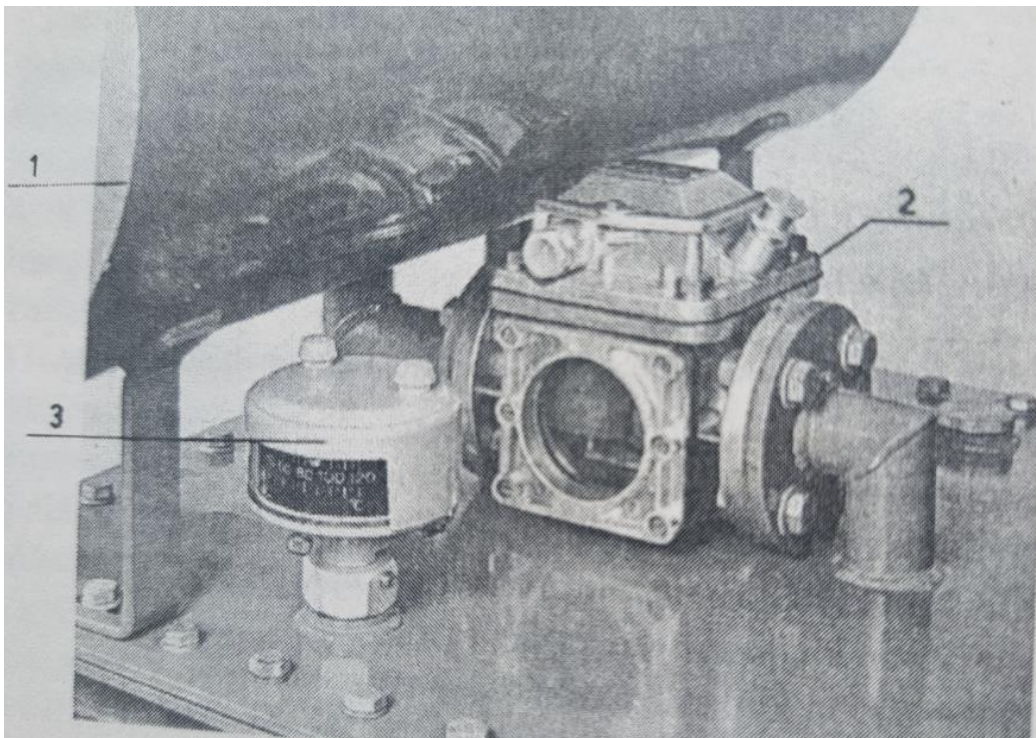
KUVA 10. Virranrajoitussulakkeen ja katkaisijan läpi pääsevä oikosulkuvirta

(ABB. MV Switching devices selection for application and purpose 2023. Muokattu)

Kuvassa 10. virranrajoitussulake toimii 5 millisekunnissa ja päästää lävitse arviolta 20 kertaa vähemmän energiaa vikatilanteessa verrattuna katkaisijaan. Tämä minimoi mekaanista ja termistä vahinkoa, koska oikosulkuvirran huippu jää saavuttamatta. (ABB. MV Switching devices selection for application and purpose 2023.)

3.2 Kaasurele ja lämpötilan mittaus

Jos omakäyttömuuntajaksi valitaan sellainen muuntaja, jossa on paisuntasäiliö, muuntajaan kannattaa ottaa kaasurele (Buchholzin rele). Kaasurele tulee yleensä kaikkiin sellaisiin muuntajiin, jotka ovat öljytäytteisiä ja niissä on erillinen paisuntasäiliö. Kaasurele sijoitetaan putkeen, joka yhdistää paisuntasäiliön ja muuntajan öljytilan. Kuvassa 11. nähdään missä kaasurele sijaitsee, putkessa muuntajan ja paisuntasäiliön välissä. Muuntajan ylikuumentuminen, purkaukset tai valokaari-ilmiöt saavat aikaan eristeaineiden tai öljyn hajoamisen kaasuyhdisteiksi. Kaasu kerääntyy kaasureleeseen ja aiheuttaa kaasureleen uimurin ohjaamien koskettimien välityksellä hälytyksen tai laukaisun pois verkosta. Kuvassa 11. Kaasurele, lämpömittari ja paisuntasäiliö. (Aura & Tonteri 2002, 289.)



KUVA 11. Numero: 1. Muuntajan paisuntasäiliö. 2. Kaasurele. 3. Kosketinlämpömittari (Aura. & Tonteri 2002)

Kaasurele toimii vasta kun siihen on kertynyt tarpeeksi kaasua. Releen sisällä on aina muuntajaöljyä, sekä öljyn purkautunutta kaasua. Rele toimii releessä olevan öljyn pinnakorkeuden muutosten perusteella. Jos kaasua muodostuu hitaasti, öljyn pinta ei laske laukaisurajalle ja kaasukuplat nousevat paisuntasäiliöön. Kun tapahtuu eristyksen läpilyönti, öljy kaasuuntuu voimakkaasti, jolloin kaasua tulee paisuntaputkea pitkin niin paljon, että öljyn pinta laskee laukaisurajalle. Releen laukaisukytkin toimii myös voimakkaista öljyn liikkeistä, jolloin rele toimii myös ilman öljyn kaasuuntumista. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 359.)

Kaasurele havaitsee muuntajan sisäisen tähtipisteen läheisyydessä tapahtuvan maasulun. Kaasureleen laukaisun jälkeen, releeseen kerääntynyt kaasu otetaan talteen ja lähetetään analysoitavaksi vikatyypin selvittämiseksi. Releen sisältämän kaasun perusteella pystytään päättelemään muuntajan mahdollinen vika ja vian vakavuus. Releen toiminta on melko luotettavaa, mutta rele saattaa toimia aiheettomasti muutama päivä käyttöönoton jälkeen. Muuntajaan on mahdollisesti jäänyt ilmaa, joka kerääntyy releeseen ja aiheuttaa hälytyksen. (Mörsky 1992, 202–203.)

Muuntajan lämpöä mitataan yleensä kosketinlämpömittarilla tai kapillaarilämpömittarilla. Lämpömittari asennetaan muuntajan kannessa olevaan öljytäytteisen muuntajan lämpömittaritaskuun. Kapillaarilämpömittari asennetaan muuntajan sivuun tai muuntajan sijoituspaikan etuseinään. Kapillaarilämpömittarin anturi asennetaan muuntajan kannessa olevaan öljytäytteisen muuntajan lämpömittaritaskuun. Molemmat lämpömittarityypit on varustettu kahdella sulkukoskettimella joista toinen on hälytyksen (*alarm*) kosketin ja toinen aiheuttaa muuntajan irtikytkennän (*trip*). (Aura & Tonteri 2002, 289.). Kuvassa 12. nähdään muuntajan kapillaarilämpömittari ja anturiosa.



KUVA 12. Muuntajan kapillaarilämpömittari (Messko & Betech 2023)

Kuvan 12. lämpömittarin anturiosa (kuvassa vasemmalla) asennetaan muuntajan kannessa olevaan öljyllä täytettyyn lämpömittaritaskuun. (Aura & Tonteri 2002, 289). Kun omakäyttömuuntajaa suojataan ylikuormitukselta, varustetaan muuntaja kosketinlämpömittarilla ja kuormanerotin laukaisulaitteella. (ST53.13. 2018, 13).

3.3 Numeeriset releet

Yleisesti numeeriset releet ovat jonkin sähkövirtapiirissa tapahtuvan muutoksen vaikutuksesta toimiva laite. Releiden tehtävänä on toimia sähkövirtapiirin suureiden muuttuessa sille ohjelmoidulla tavalla siinä vaiheessa, kun releen toiminta-arvoa vastaava suure ylittyy. Se miten rele on ohjelmoitu vaikuttaa siihen lähettääkö rele tietoa muuttuneesta tilanteesta vai aiheuttaako rele sähkövirtapiirin virransyötön katkeamisen. Releet voisi jakaa kahteen ryhmään, niihin, jotka ovat laitosten päävirtapiireihin kytkettyjä ensiö- eli primäärireleitä.

Sekä niihin, jotka ovat mittamuuntajien toisiopuolelle kytkettyjä toisio- eli sekundäärireleitä.

Releiden valinnassa on tärkeää ottaa huomioon muutamia seikkoja. Selvittää mikä on suojattava kohde ja miten rele sopii kohteen suojaamiseen. Releelle tulevien mittamuuntajien ja muiden toisilaitteiden nimellisarvot, releen toimintatarkkuus ja toiminta-aika sekä releen tarvitsema apusähkön laatu ja tarve. Suojattavan kohteen aiheuttamien häiriöiden huomioiminen on tärkeää, koska ne voivat vaikuttaa releen toimintaan. Releen asennuksen jälkeen rele on pystyttävä koestamaan, jotta varmistutaan suojauksen toiminnasta vikatilanteessa. Releen huoltaminen täytyy järjestää siten, että on turvallinen ja luotettava keino esimerkiksi releen kunnon tarkistamiseen. Suojaus suhteutetaan usein suojattavan kohteen kriittisyyden mukaan, mutta hinta on monesti määrittävä tekijä. (Mörsky 1992, 19–20, 196.)

Usein releissä on kaksi toimintoa, havahtuminen ja laukaisu. Havahtumista (*pick up*) voidaan käyttää siten, että releen tarkkaileman suure ylittää toiminta-arvon. Mikäli rele on havahtuneena tarpeeksi pitkään se antaa käskyn laukaisuun (*trip command*) katkaisijalle, lähettää hälytyksen tai suorittaa molemmat toiminnot. Kun mitattava suure poistuu releen toiminta-alueelta, rele palautuu sille asetettuun toimintatilaan (*reset* tai *drop-out*). Releen *toiminta-ajaksi* (*operating time*) kutsutaan aikaa, joka alkaa vian havaitsemisessa releen sisääntulossa johtaen laukaisukäskyn päälle kytkemiseen releen lähdössä (*trip*) tai hälytykseen. Vian alkamisen ja vikapaikan erottamisen aikaväliä kutsutaan vian *erotusajaksi* (*fault clearance time*). (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 344.)

Muuntajan kytkeytyessä verkkoon muuntajassa tapahtuu kytkentäsäysvirta. Releen täytyy toimia nopeasti vikatilanteessa, mutta ei tarpeettomasti muuntajan kytkentäsäysvirran aikana. Releen asettelussa/ohjelmoinnissa on otettava huomioon toinen harmoninen yliaaltovirta, jota esiintyy muuntajan kytkentäsäysvirran aikana. Toista harmonista taajuutta ei esiinny vikavirran aikana, joten rele voidaan ohjelmoida siten, että releen toiminta estetään toisen harmonisen yliaallon tapahtuessa, jolloin rele ei reagoi kytkentäsäysvirtaan. (Mörsky 1992,196.)

STATCOM- ja SVC-asemien omakäyttömuuntajan suojausten määrittää aina asiakas sekä olosuhteet. Mikäli olosuhteet tai asiakas vaatii numeerisia releitä, apumuuntajan suojauksessa voitaisiin tarjota relesuojauksessa seuraavia releen suojausfunktioita: käänteisaikaylivirtasuojaus, vakioaikaylivirtasuojaus ja jäännösjännitesuojaus.

3.3.1 Käänteisaikaylivirtasuojaus

Rele toimii sulakkeen tavoin, mitä enemmän virta ylittää releen asetetun toiminta-arvon, sitä nopeammin rele toimii. Käänteisvaikutuksen voimakkuuden valintaan on standardikäyrä IEC 60255-3. Standardin IEC 60255-3 mukaisen käyrän käänteisaikahidasteinen laukaisuaika t_{TRIP} voidaan laskea yhtälön 5 avulla. Yhtälön 5 käyttämiseen täytyy valita käyrän jyrkkyys esimerkiksi very inverse, joka on esillä taulukossa 3.

$$t_{TRIP} = \frac{A * k}{\left(\frac{I}{I_{>}}\right)^p - 1} \quad (5)$$

Yhtälössä 5

I on verkon vikavirta

$I_{>}$ on releelle aseteltu havahtumisvirta

A on kerroin, joka valitaan taulukon 3 mukaisesti

p on kerroin, joka valitaan taulukon 3 mukaisesti

k parametri on aikakerroin

A ja p parametrien suuruus vaikuttaa siihen miten jyrkkä laukaisukäyrä halutaan. Mitä jyrkempi laukaisukäyrä otetaan käyttöön sitä nopeammin rele reagoi muuttuvaan suureeseen.

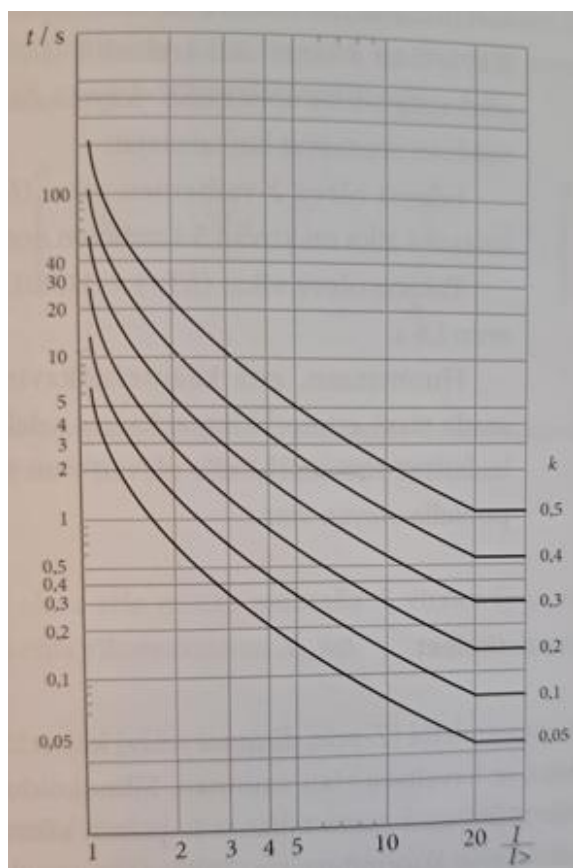
Taulukossa 3. On esillä IEC- Standardin 60255 käänteisaikaylivirtasuojauksen parametrit A ja p eri jyrkkyyksille.

TAULUKKO 3. Käyrän jyrkkyys (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 347.)

Käyrän jyrkkyys	A	p
NORMAL	0,14	0,02
VERY INVERSE	13,5	1
EXTREMELY INVERSE	80	2
LONG TIME INVERSE	120	1

Taulukon 3. mukaisesti voidaan valita jyrkkyys väliltä Normal - Long time inverse. Tämä vaikuttaa käänteisylivirtasuojauksen herkkyyteen vikatilanteessa.

Kuviossa 3. on k parametrin vaikutus laukaisuaikaan, kun käyrän jyrkkyudeksi on valittu very inverse. Käänteisaikaylivirtasuojausta voitaisiin käyttää, jos omakäyttömuuntajaa ei suojata sulakkeilla.



KUVIO 3. IEC Standardin 60255–3 mukainen käänteisaikaylivirtasuojauksen very inverse käyriä.

Vaaka-akselilla kuviossa 3. on oikosulkuvirran ja havahtumisasetteluvirran suhde ja pystyakselilla on laukaisuaika. Käyrien oikealla puolella on k parametrin vaikutus laukaisuaikaan. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 346–347.)

3.3.2 Vakioaikaylivirtasuojaus ja jäännösjännitesuojaus

Periaatteessa vakioaikaylivirtasuojaus koostuu hetkellisestä ylivirtareleestä ja aikareleestä. Releen toiminta-aika asetetaan aikareleestä ja ylivirtareleellä asetetaan virta-arvo. Kun virta ylittää vakioaikaylivirtasuojauksen asetetun virta-arvon alkaa rele mittamaan aikaa, kun aika ylittää releen toiminta-aika arvon rele ohjaa laukaisun esimerkiksi katkaisijalle. (Mörsky 1992, 35–36.)

Vakioaikaylivirtasuojaus, ei laukaise hetkellistä ylivirtaa vaan palautuu takaisin normaaliin tilaan, jos virta palautuu vaaditussa ajassa alle releen asetteluarvon. Vakioaikaylivirtasuojaja on monipuolinen suojauskeino ja sopii suojaamaan muuntajaa, johtoa, kondensaattoria, reaktoria ja generaattoria. (Elovaara & Haarla. Sähköverkot 2. 2011, 346.)

STATCOM- ja SVC-laitosalueella on jäännösjännitesuojaus. Suojaus on herkkä havaitsemaan jäännösjännitteen, joka mitataan keskijännitekiskon jännitemuuntajan avokolmiosta. Jännitemuuntaja (VT) summaa vaihejännitteiden epäsymmetrian ja se näkyy jäännösjännitteenä avokolmiossa. Suojaus havaitsee maasulun keskijännitekiskossa ja koko STATCOM- ja SVC- alueella. Aseman jäännösjännitesuojaus kattaa suojan omakäyttömuuntajalle maasulkutapauksessa. (General Electric. Grid Solutions. Protection Specification. Smoothsine 2022.)

Rele havaitsee jäännösjännitteen, joka ylittää releen asetuksen, esimerkiksi 10 prosenttia vaiheiden välisestä jännitteiden epäsymmetriasta. Nollaylijänniterele toimii vakioaikareleen tavoin. Kun jäännösjännite kohoaa yli asetusarvon, alkaa rele mittaamaan aikaa, esimerkiksi 300 ms. Jos vika ei poistu asetetussa ajassa rele lähettää laukaisuviestin katkaisijalle. (ABB 615 series 2019, 609.)

4 MUUNTAJAN SUOJAAMINEN YLILÄMPENEMISELTÄ

Omakäyttömuuntaja kytketään STATCOM- tai SVC-aseman keskijännitekiskoon. Keskijännitekiskon jännite voi olla joissakin kohteissa 66 kV, mutta minimissään 20 kV, riippuen toteutuksesta. Muuntajan tarkka mitoittaminen tapahtuu siinä vaiheessa, kun on tiedossa pienjännitekeskuksen huipputeho, joka vaihtelee projektikohtaisesti.

4.1 Muuntajan mitoittaminen ja valinta

Omakäyttömuuntajan tehtävänä on toimia STATCOM- ja SVC-aseman omakäyttölaitteiden energian lähteenä. Omakäyttömuuntaja syöttää energiaa jäähdytys laitteille, lämmitykselle, valaistukselle, ohjausjärjestelmille sekä aseman tarvitsemille pumpuille ja pistorasioille. Omakäyttömuuntajan teho voi vaihdella 200–500 kVA välillä. Usein se on 66/0,4 kV, 33/0,4 kV tai 20/0,4 kV jännitetason ja kytkentäryhmän Dyn11 muuntaja. Yhtä mallia, joka sopisi jokaiseen kohteeseen ei ole saatavilla, vaan se valitaan aina asemalle tulevan omalle käytölle tarvittavien laitteiden ja niiden kokonaishuipputehon mukaan. (IEEE Guide for Specification of Transmission Static Synchronous Compensator Systems 2018. 109–110.)

Hyvä tapa mitoittaa muuntaja aseman omakäyttöjärjestelmiä varten on mitoittaa muuntaja 125 %:iin laskennallisesta omakäyttöjärjestelmien kuormasta. Mikäli tulevaisuudessa muuntajan kuormitusta joudutaan kasvattamaan tai jos muuntajan kuormituksen epäsymmetrisyys kasvaa, esimerkiksi pienjännitekeskukseen kytkettyjen uusien sähkölaitteiden lisäyksien jälkeen, ei muuntajaa tarvitse vaihtaa. Jos muuntajan käyntilämpötilat sen sallivat, voidaan muuntajaa tarvittaessa ylikuormittaa. Tämä kuitenkin vaatii muuntajan käyntilämpötilojen seurantareleen, joka tekee hälytyksen tai laukaisee katkaisijan lämpötilan ylittäessä toimintalämpötilan. (IEEE242. 2001, 416.)

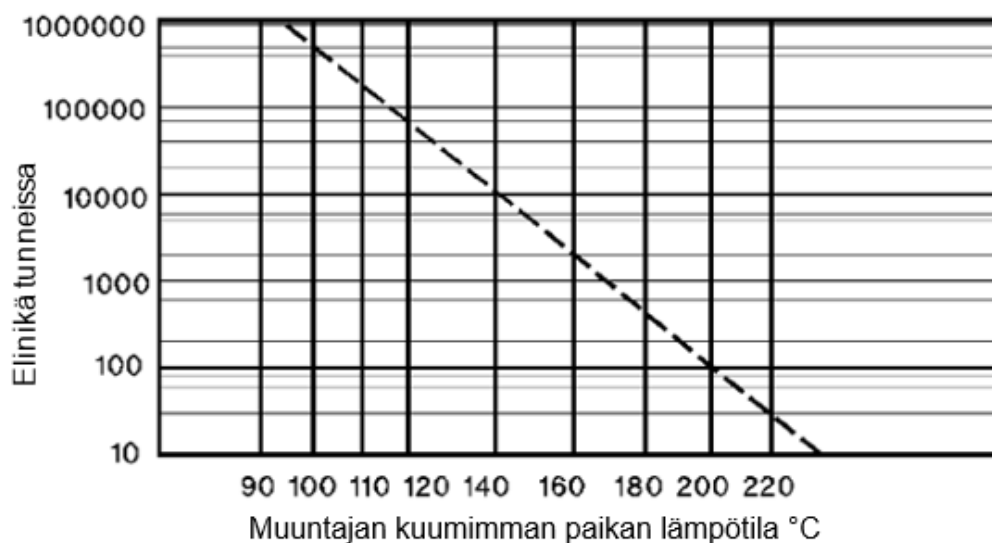
Suunnitteluvaiheessa täytyy arvioida kohteen vuotuinen sähköenergian tarve ja suurin tarvittava sähköteho. Muuntajan ympäristö ja olosuhteet vaikuttavat siihen millainen muuntaja kannattaa valita omakäyttömuuntajaksi. Yleisesti käytetään öljyeristeisiä muuntajia, joissa eristysneste (muuntajaöljy) on tyyppiä O1

(mineraaliöljy). Eristysneste O1 on eriste ja toimii väliaineena muuntajan jäähtytyksessä. Samalla se toimii myös valokaaren sammuttajana, jos muuntajan eristysnestetilassa tapahtuu oikosulkuvalokaari. (ST53.13.2018, 8.)

4.1.1 Lämpötilan seuranta

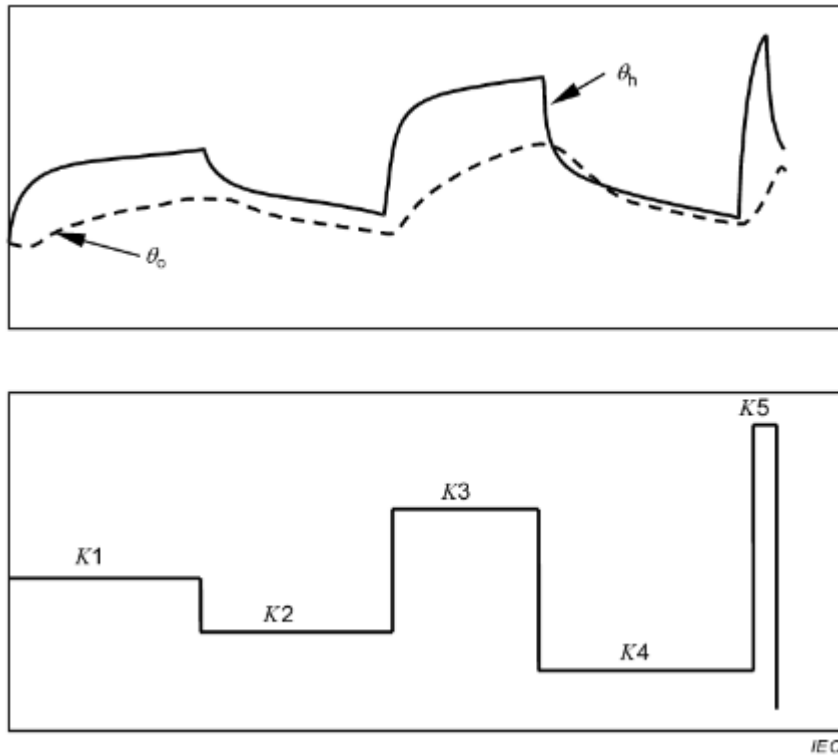
Lämpötilan seuraaminen on omakäyttömuuntajan paras ennuste eliniälle ja kuormitukselle. Ylilämpeneminen lyhentää muuntajan eristyksien elinikää. Elinikä on verrannollinen keston, kuinka kauan muuntaja on yllämmennyt ja miten korkealle lämpötila ylilämpenemän aikana kohoaa. Lämpötilojen kohotessa vakava ylilämpenemä voi johtaa eristyksien välittömään pettämiseen. Vakava ylilämpenemä voi johtaa muuntajan nesteen kuumentumisen yli leimahduslämpötilan, joka johtaa tulipaloon. Ylilämpeneminen voi muodostaa muuntajan nesteen kaasuntumista, joka voi johtaa muuntajan vikaantumiseen. (IEEE 242. 2001, 409.)

Kuviossa 4. nähdään muuntajan kuumimman paikan lämpötilan vaikutus muuntajan eliniän arvioimiseen, mittaukset on tehty käämien lämpötiloista. Kuumin paikka on muuntajan käämitys, josta lämpö siirtyy muuntajan eristysnesteeseen (muuntajaöljy). Vaaka-akselilla on lämpötila ja pystyakselilla elinikä tunneissa. Kun lämpötila kohoaa, laskee muuntajan elinikä. (IEEE C57.100. 2022, 14.)



KUVIO 4. Muuntajan elinikä suhteessa lämpötilaan (IEEE C57.100. 2022, muokattu)

Muuntajan käämien lämpötila nousee huomattavasti nopeammin kuin muuntajan nesteen lämpötila. Muuntajan nesteen lämpötilaa mitataan muuntajan kanteen asennetulla lämpömittarilla. Lämpöä johtuu muuntajan käämeistä nesteen yläosaan viiveellä. Seuraavassa kuviossa 5. havainnollistetaan muuntajan lämpötilan seuranta.



KUVIO 5. Muuntajan nesteen lämpötilan seuranta (IEC 60076-77. 2017, 34.)

θ_h on käämien kuumimman kohdan lämpötila, käämit sijaitsevat muuntajan sisällä, keskellä muuntajaa. Käämien lämpötilaan vaikuttaa muuntajan kuormittuminen.

θ_o on nesteen lämpötila mitattuna muuntajan yläosasta. Muuntajan eristysneste toimii muuntajan jäähdytysväliaineena ja se ympäröi muuntajan käämitystä.

K on muuntajan kuormitus, joka voisi vastata normaalia käyttötilannetta. Kuormitus vaihtelee, kun sähkölaitteita kytetään päälle ja pois.

Kuviosta 5. nähdään miten kuormitus $K1$ näkyy kuumimman kohdan lämpötilan nousuna θ_h . Kun käämien lämpötila nousee, alkaa muuntajan nesteen lämpötila θ_o seurata käämien lämpötilan nousua. Kuormituksen muuttuessa välillä $K1$ - $K5$, seuraa käämien lämpötila θ_h kuormitusta. Käämien lämpötila θ_h nousee

kuormituksen lisääntyessä ja laskee kuormituksen vähentyessä. Muuntajan nesteen lämpötila θ_o seuraa viiveellä käämien lämpötilan θ_h muutoksia. (IEC 60076-77. 2017, 34.)

Omakäyttömuuntajan kuormittumisen seurantaan paras keino on lämpömittari. O1-eristeisen muuntajan normaalivarustukseen kuuluisi siis nestemäärän mittari ja lämpömittari. Lämpömittaria käytetään ylikuormittumisen suojaukseen siten, että valitaan kosketinlämpömittari, jonka toinen kosketin (80–90 °C) käytetään lämpötilahälytykseen. Lämpötilan hälytys voi johtaa kuorman ohjaukseen, jolloin muuntajan kuormaa kevennetään. Lämpömittarin toinen vapaa kosketin (90–100 °C) kytketään varokekuormaerottimen laukaisukelalle. (ST53.13. 2018, 9.)

4.2 Muuntajan valinta

Kun kohteen tarvitsema muuntajan tyyppi ja teho on tiedossa, voidaan laitetoimittajilta pyytää tarjouksia kohteeseen soveltuvista muuntajista. Laitetoimittaja esittää muuntajan ominaisuuksista kertovan datalehden, josta voidaan tarkastella tarjotun muuntajan ominaisuuksia. Kuvassa 13. olevassa muuntajan datalehdestä löytyy tietoa esimerkiksi muuntajan tyypistä (sisä- ja ulkokäyttöön soveltuva muuntaja), nimellistehosta (500 kVA), nimellisjännitteestä ja niiden muuntosuhteesta (20,5/0,41 kV), taajuudesta (50 Hz) ja kytkentäryhmästä (Dyn 11). Lisäksi datalehdestä löytyy tietoa toimintaympäristön lämpötilasta (40 °C), muuntajan jäähtytyksestä (ONAN), massasta (nesteen massa 380 kg) ja kokonaismassasta (2090 kg).

ULUSOY electric An Eaton Brand		Technical Specifications			YT1217-500 20,5-0,41-AL-AL-Dyn 11-4-0
		UE-PRJ-FR-14	Date:		27.12.2021
Characteristic Specifications					
1.	Product Type	Indoor/Outdoor, Hermetically Sealed Liquid Immersed Transformer			
2.	Rated Power	kVA	500		
3.	Rated Voltages	kV	20,5 / 0,41		
4.	Tapping Range & No of Taps (HV, Off-Load Tap Changer)	5 Taps +2x%2,5 / -2x%2,5 19,475-19,988-20,5-21,013-21,525- kV			
5.	Number of Phases	3			
6.	Frequency	Hz	50		
7.	Connection Group	Dyn 11			
8.	Insulation Class	Class A			
9.	HV Insulation Level (Um/AC/LI)	kV	24 / 50 / 125		
	LV Insulation Level (Um/AC/LI)	kV	1,1 / 3 / -		
10.	Altitude	m	1000		
11.	Max. Ambient Temperature	°C	40		
12.	Temperature Rise				
	i)Windings	K	65		
	ii)Oil		60		
13.	Short Circuit Withstand Duration	sec	2		
Performance Specifications					
14.	Manufacturing Standart	IEC 60076-1			
15.	No-Load Losses	Watt	459	+	0% Tolerance
16.	Load Losses (@75 °C @nom. pos.)	Watt	3900	+	0% Tolerance
17.	Total Losses (@75 °C @nom. pos.)	Watt	4359	+	0% Tolerance
18.	Uk (@75 °C @nom. pos.)	%	4	+/-	10% Tolerance
19.	Efficiency	Load(%)	100	75	50 25
		Cos Φ= 1.0	0,9914	0,9930	0,9943 0,9944
		Cos Φ=0.8	0,9912	0,9912	0,9929 0,9930
20.	Peak Efficiency Index (PEI)	%	99,465%		
Design Specifications					
21.	Cooling Method	ONAN(with corrugated walls)			
22.	Liquid Type	Mineral Oil as per IEC 60296			
23.	HV/LV Winding Materials	Aluminium / Aluminium			
24.	Core Steel Type	Core - Cold Rolled Grain Oriented			
25.	Tank Cover	Bolted			
26.	Corrosion Category	C2 / Total Thickness: 105 micron			
27.	Paint	RAL:7033(without galvanising)			
28.	LV Bushings	1 kV 1250 A EN (AP) 5038f	Creepage: 75 mm	4 NOS	Porcelain On top cover
29.	HV Bushings	24 kV 250 A DIN42531	Creepage: 480 mm	3 NOS	Porcelain On top cover
Weight & Dimensions					
30.	Transformer Dimensions	Width	Length	Height	
	Width x Length x Height	mm	861	1257	1586
	Roller Distance	mm	670		
31.	Transformer Weights				
	i)Liquid	kg	380	(437 lt)	
	ii)Active Part	kg	1450		
	iii)Total	kg	2090		
Accessories					
	Lifting Lugs , Earthing Terminals , Rating Plate , Oil Filling Valve , Oil Sampling&Drain Valve , 2xThermometer Pocket , Vertical Oil Level Indicator ,				
Notes					
	Weights have +/-10 % tolerances				

KUVA 13. Dyn11 muuntajan datalehti (Eaton 2022)

Kuvan 13. datalehdessä toiseksi viimeisen otsikon alla on nähtävissä maininta muuntajan mukana tulevista lisävarusteista (Accessories).

Nostolenkit (Lifting Lugs), maadoituksen liitännäspaikat (Earthing Terminals), tyyppikilpi (Rating Plate), öljyn täyttöventtiili (Oil Filling Valve), öljyn näyte- ja tyhjennysventtiili (Oils Sampling&Drain Valve), 2 lämpömittaritaskua (2xThermometer Pocket) ja pystysuora öljyn määrän indikaattori (Vertical Oil Level Indicator). (Eaton 2022.)

Nestetäytteisien muuntajien jäähdytys voidaan tunnistaa nelikirjaimisella koodilla (ONAN), jossa ensimmäinen kirjain on sisäinen jäähdytysväliaine:

O tarkoittaa mineraali- tai synteettistä öljyä, jonka syttymislämpötila on $\leq 300^{\circ}\text{C}$.

K tarkoittaa eristävää nestettä, jonka syttymislämpötila on $> 300^{\circ}\text{C}$.

L tarkoittaa eristävää nestettä, jolla ei ole mitattavaa syttymislämpötilaa.

Toinen kirjain on jäähdytysväliaineen kiertomekanismi ja jos toinen kirjain on:

N tarkoittaa se luonnollista lämpötilaan perustuvaa sisäistä nesteen kiertoa käämien ja jäähdytyslaitteiston läpi.

F tarkoittaa pakotettua nesteen kiertoa jäähdytyslaitteiston läpi, käämien jäähdytys perustuu lämpötilaerojen luomaan luonnolliseen nesteen kiertoon.

D tarkoittaa pakotettua nesteen kiertoa jäähdytyslaitteiston läpi ja ohjattua jäähdytyslaitteiston toteuttamaa nesteen kiertoa käämien läpi.

Kolmas kirjain on ulkopuolinen jäähdytysväliaine:

A on ilma ja **W** on vesi

Neljäs kirjain on kiertomekanismi ulkoiselle jäähdytysväliaineelle:

N luonnollinen konvektio ja **F** on pakotettu kierto (tuulettimet, pumput). (IEC 60076-2. Power Transformers 2011, 8–9.)

Tässä tapauksessa (ONAN) muuntajassa:

(O) on mineraaliöljyä, jonka syttymislämpötila on alle 300°C .

(N) Nesteen kierto muuntajan sisällä tapahtuu lämpötilaan, eikä sitä liikuta mikään muu kuin nesteen sisäinen lämpötilaerosta tapahtuva kierto.

(A) Muuntajan ulkopuolinen jäähdytys perustuu ilmaan

(N) Ulkoisen jäähdytysväliaineen kierto on luonnollinen konvektio

4.3 Toimittajan ehdottama muuntajan suojausrele (DMCR)

DMCR tulee sanoista: **D**etection, **M**easurement and **C**ontrol **R**elay. Suomennettuna se voisi olla tunnistin-, mittaus- ja kontrollointirele. DMCR releessä on useita toimintoja ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi lämpötilan mittaamiseen; laitteessa on kaksi säädettävää termostaattikytkintä, jotka toimivat vaihtokoskettimella. Kytkimien toiminta on jaettu siten, että ensimmäinen kytkin aktivoituessaan ilmoittaa hälytyksestä, kun asetettu lämpötila ylittyy. Toinen termostaattikytkin tekee irtikytkennän (*trip*), kun lämpötila kohoaa yli irtikytkentä lämpötilarajan. Molemmille kytkimille on kynnyslämpötilan säätö, jotka voi asettaa toimimaan 30 °C ja 120 °C välillä. Lämpöä voi seurata myös laitteen lämpötilaosoittimesta, josta saa visuaalisen tiedon muuntajan nesteen lämpötilasta.

DMCR-rele soveltuu myös paineen tarkkailuun säädettävän painekytkimen johdosta, joka toimii vaihtokoskettimella. Muuntajan paineen noustessa yli hälytysrajan, rele lähettää tiedon ylipainetilanteesta. Hälytysrajan kynnyspaine voidaan säätää 0,1–0,5 bar:in väliltä. Lisäksi dielektrisyden tason tarkkailu onnistuu ja dielektrisyden laskiessa alle 170 cm³ laitteen vaihtokosketin kytkee hälytyksen.

Kaasun muodostumisen tarkkailu suoritetaan siten, että nesteen (öljyn) kaasuuntuminen aiheuttaa laitteen läpinäkyvässä osassa (liitteen 1 kuvassa vasemmalla) kelluvan indikaattorin tason laskun, josta voidaan päätellä muuntajan nesteen kaasuuntumista. Laitteesta saa otettua näytteen muuntajanesteestä sekä dielektrisyydestä, näyte voidaan tarvittaessa lähettää tutkittavaksi. Muuntajan vikatyypin selvittäminen onnistuu näytteitä tutkimalla. Lisätietoja DMCR releestä, katso liite 1. (IDEF Systemes. DMCR 2023.)

5 POHDINTA

Tätä opinnäytetyötä varten sulakkeista oli haastavaa löytää tietoa, koska sulakkeista ei ole kirjoitettu muuntajan suojaukseen niin paljon oppaita mitä relesuojaukseen. Ensiksi piti ottaa selvää, millaisia sulakkeita muuntajan suojauksessa käytetään (virtaa rajoittavat sulakkeet). Seuraavaksi täytyi selvittää mihin sulakkeet tulee ja millaisille jännitteille sulakkeita on saatavilla. Yleisesti sulakkeista saatava tieto oli kovan työn tuloksena. Yhteydenotot valmistajiin johtivat usein siihen, että yhteyshenkilö vaihtui ja seuraava yhteyshenkilön vastauksia sai odottaa. Etsiessäni oppaita muuntajan sulakesuojaukseen johti usein lähteisiin, joissa käsiteltiin enemmän releitä, joten releistä saatavaa tietoa olisi ollut helpommin saatavilla. General Electric Grid Solutions reletuntemus on vahvalla pohjalla, joten painotin sulakkeiden käyttöä niiden edullisuuden ja sopivuuden omakäyttömuuntajan suojauksen suhteen.

Omakäyttömuuntajan suojaaminen vaihtelee olosuhteiden ja kohteen mukaan. Yhtä varmaa keinoa suojata muuntaja ei ole, jokainen kohde sisältää omat muuttajat, jotka vaikuttavat suojauskeinojen valintaan. Muuntajan suojausmenetelmät ovat laaja käsite, jos asiaa haluaisi tarkastella perinpohjaisesti, lähes jokainen käytetty suojausmenetelmä ansaitsisi omat opinnäytetyöt. Aineistoa muuntajan suojaamiseen on hyvin saatavilla (englanniksi) ja asioiden läpikäymiseen täytyy käyttää reilusti aikaa. Tästä syystä täytyi lukea laajalti aineistoa, jotta muodostui käsitys erilaisista muuntajan suojauskeinoista.

Moni ohje suosittelee liian hyviä suojausmenetelmiä silloin, jos kyseessä on omakäyttömuuntajan suojaaminen. Paras keino löytää ratkaisu omakäyttömuuntajan suojaamiseen on, kun tiedetään tarvittavan muuntajan teho, keskijännitekiskon jännite, muuntajalle tuleva kuorma sekä toimintaolosuhteet. Joissakin tapauksissa käytetään kahta omakäyttömuuntajaa, toinen on varalla, jos sattuu, ettei ensisijainen omakäyttömuuntaja ole toiminnassa vian tai muun katkon vuoksi. Toiselle omakäyttömuuntajalle voi olla voimanlähteeksi järjestetty generaattori tai erillinen syöttöyhteys, joka ei ole aseman keskijännitekisko.

Mikäli keskijännitekiskon jännite on yli 36 kV ei markkinoilta löydy vaihtoehtoja sulakkeilla toteutettuun suojaukseen. Silloin käytetään numeerisia releitä, katkaisijan ja lämpömittarin yhdistelmää. Tämän opinnäytetyön tuloksena on syntynyt vahva käsitys millainen omakäyttömuuntajan suojaus olisi, jos keskijännitekiskon jännite omakäyttömuuntajalle on alle 36 kV. Tällaisessa tapauksessa käytettäisiin varokekuormanerotinta (sulakkeita) ja muuntajan lämpötilan seurantaa. Sulakkeet valittaisiin yhteistyössä muuntajan toimittajan tai sulaketoimittajan kanssa. Jos omakäyttömuuntajassa on paisuntasäiliö, käytettäisiin kaasurelettä (Buchholzin rele). Asiakkaan tarpeen mukaan lisäsuojana käytettäisiin numeerisia releitä.

Pienjännitekeskus, jota omakäyttömuuntaja suojaa, sisältää oman sähkökeskuksen, jossa on oma pääkatkaisija ja sulakkeita sekä vikavirtasuojaus eri lähdöille. Tästä syystä keskitytään suojaamaan muuntajaa siihen kohdistuneilta muuntajavioilta, jotka harvoin johtuvat pienjännitekeskuksen suojauksen pettämisestä. Muuntajavikoja voi aiheuttaa yllämpötilan vaikutuksesta johtuva eristyksen vanheneminen, muuntaja öljyn ominaisuuksien muuttuminen, osittaispurkaukset eristyksessä, ilmastolliset ja kytkentäyllijännitteet verkossa sekä ulkoisten vikojen aiheuttamien oikosulkuvirtojen voimavaikutukset käämeissä. Näitä seikkoja olen ottanut huomioon, kun määrittelin hintalaatusuhteeltaan sopivan suojaustason omakäyttömuuntajan suojaamiselle.

Tämän opinnäytetyön tuloksena General Electric Grid Solutions saa selvityksen, jonka perusteella voidaan arvioida omakäyttömuuntajan suojaamisen kustannuksia STATCOM- ja SVC-aseman tarjouslaskennassa. Omakäyttömuuntaja ja sen suojaaminen osana tarjouslaskentaa, voi osaltaan vaikuttaa kilpailukyvyn parantumiseen.

LÄHTEET

ABB. MV Switching devices selection for application and purpose (1VGA671056). Luettu 18.3.2023 Osoitteesta:

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwifq8yf4OX9AhWHqlsKHUGnDIsQFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Flibrary.e.abb.com%2Fpublic%2Fffb092e09750442abc266c2d9167d1ea%2F1VGA671056%2520-%2520MV%2520Switching%2520devices%2520selection%2520for%2520application%2520and%2520purpose.pdf%3Fx-sign%3DLiHiTWCr3C4ikxmuZon7Y2KFU5PjqxaRKQNjpb6w3ZWGoYiiSdfucZQvyl8zEEMP&usq=AOvVaw1o1KwqGeIWXG3uh8t-z-CP>

ABB. Study Committee B5 Collouim.2009. Halonen, M. Thorvaldsson, B. Wikström, K. ABB AB, FACTS. Protection of static var compensator (SVC). Kappale 6. Auxiliary Transformer Protection. Luettu 15.10.22. Osoitteesta:

[Microsoft Word - B5.PS2.04-SE-Halonen.doc \(abb.com\)](#)

ABB TTT käsikirja. 2000. Vaasa, Ykkös-Offset Oy

ABB 615 Series Technical manual. 2019. Residual overvoltage protection ROVPTOV. Luettu 26.4.2023. Osoitteesta:

[615 seriesCN tech 1YHT530004D05 ENe.pdf \(abb.com\)](#)

Acharya, N. Nadarajah, M. Sode-Yome, A. 2005. Facts about flexible AC transmission systems (FACTS). Controllers: Practical installations and benefits. Luettu 28.2.2023. Osoitteesta:

https://www.researchgate.net/publication/43516579_Facts_about_flexible_AC_transmission_systems_FACTS_controllers_Practical_installations_and_benefits

Aura, L. Tonteri, A. 2002. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki, WSOY

Beyhan, Elif & Akpınar, Eyup. (2020). Analysis and Control of Single Phase Grid Connected Modular Multilevel Converter in Per Unit. 4. 179-184. 10.26701/ems.622397. Luettu 31.03.23 Osoitteesta:

https://www.researchgate.net/publication/346109229_Analysis_and_Control_of_Single_Phase_Grid_Connected_Modular_Multilevel_Converter_in_Per_Unit

Bulac C. Diadoconu C. Eremia M. Otomega B. Pop I. Toma L. Tristiu I. 2009. Power Transfer Capacity Enhancement using SVC. Luettu 28.2.2023. Osoitteesta:

https://www.researchgate.net/publication/251901471_Power_transfer_capacity_enhancement_using_SVC

Bussmann MV fuse links. 2017. Medium voltage fuse links full line catalogue-Introduction to medium voltage fuse link technology. Luettu 17.12.2022. Osoitteesta:

[Medium voltage fuses catalogue ca132062en \(eaton.com\)](https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/circuit-breakers/medium-voltage-fuses-catalogue-ca132062en.pdf)

Eaton 2022. Myynti. Oma yhteyshenkilö.

Elovaara, J. Haarla, L.2011. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Elovaara J, Haarla L.2011 Sähköverkot 2. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto

General Electric. Grid Solutions. 2018. Static Synchronous Compensator (STATCOM) Solutions. S.6. Luettu. 28.2.2023. Osoitteesta:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiayIPXILj9AhXMAxAIHcrRD8YQFnoECC4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gegridsolutions.com%2Fproducts%2Fbrochures%2Fpowerd_vtf%2Fstatcom_gea31986_hr.pdf&usq=AOvVaw1fPErflzSsr5VQdRsBZ5_r

General Electric. Grid Solutions, Power Electronics Tampere (PET). Ninfield Statcom Main equipment study 84-1-2010 Revision C (Yrityksen oma tutkimus, ei lähdettä saatavilla)

General Electric. Grid Solutions. Power electronics Tampere. Protection specification. E4040 Rev A. Smoothsine residual overvoltage protection 59N (Yrityksen oma tutkimus, ei lähdettä saatavilla)

IDEF Systemes. DMCR 2023. Luettu 18.1.2023. Osoitteesta:

<https://idefsystemes.com/products-gb/dmcr-gb/>

IEC 60076-2 Power transformers – Part 2 Temperature rise for liquid-immersed transformers. 2011. Part 4 Cooling methods (Vaatii kirjautumisen)

IEC 60076-77 Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral oil immersed power transformers – Edition. 2017. 2.0 part exponential equations solution (vaatii kirjautumisen)

IEEE Guide for Specification of Transmission Static Synchronous Compensator (STATCOM) Systems. Annex F. F1 ja F1.1 (Vaatii kirjautumisen)

IEEE 242. Recommended practice for protection for coordination and of industrial and commercial power systems- IEEE buff book. Osa 11.9.1 Overload protection (Vaatii kirjautumisen)

IEEE C5.100 – Test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid immersed distribution and power transformers Osa 3.1 Industry-proven insulation system (Vaatii kirjautumisen)

MathWorks. 2022. Static Synchronous Compensator (Phasor Type). Luettu 28.2.2023. Osoitteesta:
<https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/staticsynchronouscompensatorphasortype.html;jsessionid=7d6d47ce8f29d2c51797f6e6a910>

Messko & Betech. Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. 2023. Thermometer with bellow-type technology. Luettu 2.6.2023. Osoitteesta:
<https://www.reinhausen.com/productdetail/thermometer/messko-betech>

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna. Otatieto Oy

Ndlela, N.W. Davidson, I.E. 2022. Network Coordination between High-Voltage DC and High-Voltage AC Transmission Systems Using Flexible Transmission System Controllers. Luettu 6.5.2023. Osoitteesta:
https://www.researchgate.net/publication/364284230_Network_Coordination_between_High-Voltage_DC_and_High-Voltage_AC_Transmission_Systems_Using_Flexible_AC_Transmission_System_Controllers.

ST53.13 2018. Kuluttaja muuntamot. Luettu 5.1.2023. (Vaatii kirjautumisen)

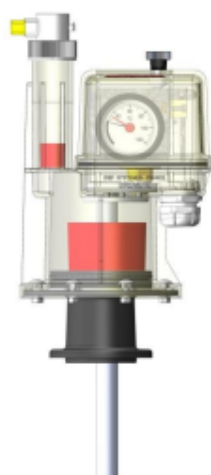
LIITTEET

Liite 1. DMCR Muuntajan suojausrele.

Liite 1 (2)



THE DMCR 3.0 PROTECTION RELAY



DMCR 3.0
Protection Relay

The Detection, Measurement and Control Relay (DMCR®) is a protection relay for oil-filled distribution transformers. The DMCR 3.0 is designed and manufactured in France by IDEF Systèmes® in accordance with Standard EN 50216-3. The DMCR 3.0 is a complete safety solution for hermetically-sealed oil-filled transformers which combines 4 different safety functions into a single, compact and solid device.

TEMPERATURE	PRESSURE
<ul style="list-style-type: none"> Two Adjustable Thermostat Switches with changeover contact for over temperature detection. Both the primary and secondary temperature thresholds are factory set at customer requirements within a 30°C to 120°C range One Thermometer with maximum temperature indicator provides visual temperature information 	<ul style="list-style-type: none"> One Adjustable Pressure Switch with changeover contact. The tripping overpressure threshold of the pressure switch is factory set at customer requirement within a 0,1 – 0,5 bar range
DIELECTRIC LEVEL	PRESENCE OF GAS
<ul style="list-style-type: none"> Reed Magnetic Switch with changeover contact is triggered when a dielectric-level decrease of over 170 cm³ is achieved An integrated magnetic protection shields the Reed Switch from any magnetic field interference (patented design) 	<ul style="list-style-type: none"> Gassing and dielectric-level decrease is initially visible through the lowering of a small float inside the upper part of the DMCR This is followed by the lowering of the main float visible all-round at 360° (patented design)

TECHNICAL FEATURES

Designed and Manufactured in accordance with	EN 50216-3
EN 60529 Protection	IP56
EN 50102 Shock Resistance	IK07
ENVIRONMENTAL CONDITIONS EN 60721-3-4	
Climatic Conditions	4K2
Special Climatic Conditions	4Z2+4Z4+4Z7
Biological Conditions	4B1
Chemically Active Substances	4C2
Mechanically Active Substances	4S3
Mechanical Conditions	4M4
ISO 9227 Salt Spray Test	C5M
Maximum Relative Pressure	+3 Bar
Ambient Temperature Range	-40°C < T < +60°C
Maximum Temperature	+120°C
PRESSURE Adjustment Scale	100 to 500 mbar
ALARM Temperature Adjustment Scale	30°C to 120°C
TRIPPING Temperature adjustment Scale	30°C to 120°C
DIELECTRIC LEVEL Tripping Threshold	170cm ³ fixed oil-level decrease