

Erno Paananen

MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINNIN PERINTEISET JA UUDET SÄÄTÖMENETELMÄT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: TkT Ari Nikander
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Erno Paananen: Maasulkuvirran kompensoinnin perinteiset ja uudet säätömenetelmät
Engl. Traditional and new methods of earth fault current compensating
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Maasulut ovat Suomen jakeluverkon yleisimpiä vikatilanteita, jotka johtuvat yhteydestä yhden tai useamman vaihejohtimen ja maan välillä. Maasulkuvirta on vaihejohtimien maakapasitansseista johtuvaa varausvirtaa ja aiheuttaa vikapaikassa vaarallisia kosketusjännitteitä. Maasulkuvirran kompensointi tarkoittaa induktiivisen virran syöttämistä verkon nollapiiriin maasulun aikana kapasitiivisen maasulkuvirran kumoamiseksi.

Tässä työssä tarkastellaan erilaisia perinteisiä ja uusia menetelmiä induktiivisen virran syöttämiseksi nollapiiriin maasulkuvirran kompensoimiseksi sekä menetelmiä verkon resonanssitaajuuden selvittämiseksi. Työn tarkoituksena on esitellä ja vertailla maasulkuvirran kompensointiin tarkoitettuja menetelmiä laitteistokohtaisesti sisällyttäen pohdintaa laitteistoratkaisuista. Vertailussa tarkastellaan automaattisesti säädettäviä laitteistoja, koska manuaalisesti säädettävät laitteistot ovat vanhentunutta tekniikkaa. Pääpainopisteiksi vertailuun on valittu virtainjektioilaitteiston ja muiden laitteistojen ominaisuudet, koska virtainjektioilaitteistolla on hyödyllisiä lisäominaisuuksia verrattuna muihin moderneihin maasulkuvirran kompensointilaitteistoihin.

Jakeluverkon saattamiseksi säävarmaksi jakeluverkkoyhtiöt turvautuvat paljon maakaapelointiin. Maakaapelointi kasvattaa maasulkuvirtaa hyvin runsaasti verrattuna avojohtoverkkoon. Näin olleen osan sähköaseman lähdeistä ollessa vielä avojohtoverkkoa, vikatilanteita syntyy vielä useasti, mutta osan lähdeistä ollessa jo kaapeloituja, maakaapelointi kasvattaa galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maasulkuvirtaa. Jakeluverkon topologian muuttuessa jatkuvasti tarvitaan maasulkuvirran kompensointiin nopeasti muuttuvaan tilanteeseen sopeutuvia laitteistoja turvallisuuden takaamiseksi.

Perinteisesti säätö on tapahtunut fyysisesti sammutuskuristimen kierroslukumäärää tai rautasydämen paikkaa muuttamalla, mutta modernit laitteistot suorittavat säädön automaattisesti kehittyneiden tehoelektronikan komponenttien ja säätöalgoritmien avulla. Modernit laitteistot jakautuvat tyristoriohjauksella passiivisia komponentteja kytkeviin ja virtasignaaleja käyttäviin laitteistoihin. Tarkka automaattinen säätö vaatii tarkat mittaukset tarpeellisista verkon suureista ja monimutkaisen algoritmin ohjaamaan tehoelektronikkaa.

Avainsanat: maasulkuvirta, sammutuskuristin, Petersenin kela, virtainjektio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MAASULKU ILMIÖNÄ.....	2
2.1 Sammutettu verkko	3
2.2 Maasulut ja turvallisuus	4
3. MAASULKUVIRRAN KOMPENSOINTI JA SÄÄTÖMENETELMÄT.....	6
3.1 Perinteiset säätömenetelmät.....	8
3.2 Uudet säätömenetelmät	10
3.2.1 Vaihekulmamenetelmä.....	10
3.2.2 Lisälähdemenetelmät.....	11
3.2.3 Epäsuoran mittauksen menetelmä.....	14
3.3 Uudet sammutuskuristimen rakenteet	14
3.3.1 Sektionaalinen tyristoriohjattu kuristin	15
3.3.2 Virtainjektio invertterillä	18
3.3.3 Sammutuskuristimen induktanssin säätö magneettisesti.....	19
4. MENETELMIEN VERTAILU.....	22
4.1 Maasulkuvirran harmoniset komponentit	22
4.2 Laitteistojen vaatimukset.....	23
5. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ω	kulmataajuus
L	induktanssi
C	kapasitanssi
I_f	vikavirta
f	taajuus
R_f	vikaresistanssi
X_L	induktiivinen reaktanssi
X_C	kapasitiivinen reaktanssi
U_0	nollajännite

TSC	Engl. Thyristor Controlled Capacitor, tyristoriohjattu kondensaattori
ASC	Engl. Arc Suppression Coil, sammutuskuristin
TCR	Engl. Thyristor Controlled Reactor, tyristoriohjattu kela
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MCR	Engl. Magnetic Controlled Reactor, Magneettisesti säädetty reaktori
SPWM	Engl. Sinusoidal Pulse-Width Modulation, siniaaltopulssinleveysmodulaatio

1. JOHDANTO

Yhteiskunta on yhä riippuvaisempi katkeamattomasta sähkönsaannista, joten kaikki asiakkaalle näkyvät katkokset ovat hyvin haitallisia. Maasulut ovat Suomen jakelusähköverkon yleisimpiä vikatilanteita, jotka muodostavat noin 80 % kaikista jakeluverkon vioista. Maasulkuvirran kompensoinnilla saadaan parannettua vikapaikan turvallisuutta sekä suuri osa katkoksista avojohtoverkoissa eliminoitua, jolloin asiakastyytyvyisyys paranee. Maasulkuvirran kompensoinnissa vaikeuksina ovat verkon muuttuva kytkentätila ja alati lisääntyvä kaapelointi säävarmaa verkkoa tavoitellessa. Kaapeloinnin lisäämät haasteet koostuvat siirtymävaiheesta, kun samasta kiskostosta lähtee avojohtoja ja kaapeleita, jolloin avojohdot ovat vielä alltiita maasuluille ja kaapelit lisäävät maasulkuvirtaa runsaasti.

Tässä työssä tarkastellaan maasulkuja sekä maasulkuvirran kompensointiin käytettyjä perinteisiä ja uusia ratkaisuja ja vertaillaan niiden toiminnallisuuksia. Maasulkuvirran kompensointiin on viime aikoina keksitty monia uusia menetelmiä, joiden vertaileminen ja tarkasteleminen on tärkeää oikean ratkaisun tekemiseksi. Työssä tarkastelu rajataan koskemaan keskijännitteistä jakeluverkkoa ja tehoelektroniikan ohjaamiseen tarvittavat systeemitekniikan ja tietotekniikan osa-alueet jätetään työn ulkopuolelle.

Ensimmäiseksi työssä perehdytään maasulkuun ja verkon rakenteeseen maasulun kannalta luvussa 2, jonka jälkeen luvussa 3 siirrytään tarkastelemaan maasulkuvirran kompensointia koskevia asioita tarkemmin. Kolmas luku sisältää tarkastelua menetelmistä verkon resonanssin selvittämiseksi ja sammutuskuristimen induktanssin säätämiseksi. Luvussa 4 tarkastellaan lähemmin eri menetelmien hyviä ja huonoja puolia sekä vertaillaan tarkasteltuja menetelmiä käyttöön liittyen. Lopuksi luvussa 5 käydään läpi, mitä asioita on tullut ilmi, kootaan pääasiat menetelmistä ja pohditaan, mitkä ratkaisuista sopisivat parhaiten juuri Suomen jakeluverkkoon.

2. MAASULKU ILMIÖNÄ

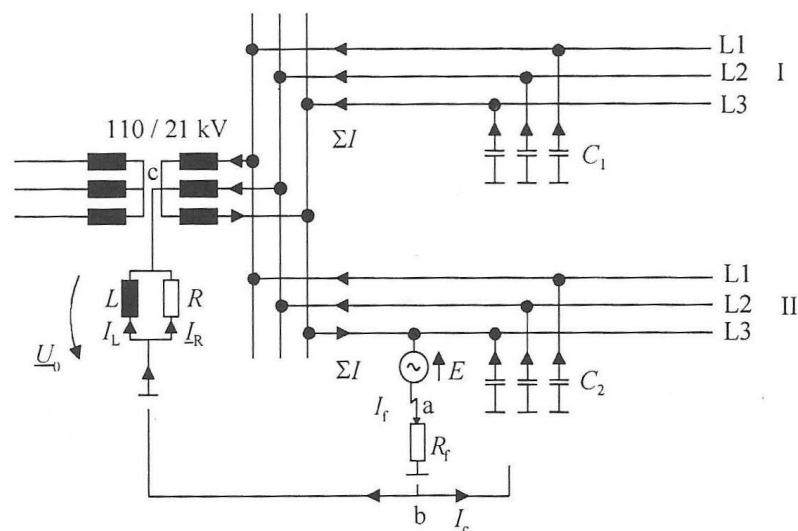
Maasulku on sähköverkon vikatilanne, jossa yksi tai useampi vaihejohtimista on yhteydessä maahan. Maasulkuvirta on lähes kokonaan kapasitiivista virtaa, minkä aiheuttavat verkon vaihejohtimien maakapasitanssit. Normaalisissa toimintatilassa verkon vaihejohtimien maakapasitanssien aiheuttamat varausvirrat kumoavat toisensa, mutta vikatilanteissa viallisen vaiheen varausvirta pienenee ja terveiden vaiheiden varausvirrat kasvavat. Yksivaiheisen maasulun tapauksessa viallisen vaihejohtimen vaihejännite ja varausvirta pienenevät, mutta vaiheiden väliset pääjännitteet eivät muutu. [1]

Suomessa keskijänniteverkkoa käytetään kahdella eri tavalla maadoitettuna. Eräs tapa on käyttää verkkoa maasta kokonaan irrallisena ja toinen tapa on käyttää verkkoa suuren impedanssin kautta maadoitettuna. Suomen huonojen maadoitusolosuhteiden takia jakeluverkoja on perinteisesti käytetty maasta erotettuna, mutta nykyään jakeluverkko on suurimmaksi osaksi sammutettua [2]. Maasta erotetussa verkossa maasulut on vaikea huomata varsinkin, jos vikaresistanssi on suuri, jolloin ne aiheuttavat suuremman riskin ihmisten ja omaisuuden vahingoittamiseen vikatilanteen kestäessä pidempään. Sammutetuissa verkoissa maasulkuvirta on pienempi kuin maasta erotetuissa verkoissa ja täten vaikeammin havaittavissa. Maasulun havaitsemiseen käytetään releitä, jotka mittaavat nollajännitettä, nollapisteestä maahan menevää virtaa, summavirtaa ja virtojen suuntaa. [1]

Yleisimmät maasulkuja aiheuttavat tilanteet ovat ukkosen ja eläinten aiheuttamat valokaaret vaihejohtimien ja suojamaan välille sekä johtimeen nojaavat puut avojohtoverkossa. Valokaaren aiheuttamat maasulut avojohtoverkossa ovat yleensä todella tilapäisiä ja ne saadaan poistettua pikajälleenkytkennällä tai kompensoimalla maasulkuvirta. Kaapeliverkossa maasulku on aina pysyvä vika kaapelin rakenteen tuhoutumisen takia. Niin sanottu PAS-johto eli päällystetty avojohto suojaa jännitteisiä johtimia eläimiltä ja muilta fyysisiltä kosketuksilta ja näin ollen vähentää osaltaan vikoja, mutta pysyvissä vioissa, esimerkiksi puun nojatessa johtimeen, on vikaa todella vaikea havaita korkean vikaresistanssin takia. PAS-johdon osalta vika voi olla pitkään huomaamaton, mutta lopulta pitkittynyt pieni vika johtaa suurempaan maasulkuvirtaan tai jopa läpilyöntiin ja vika huomataan. [3]

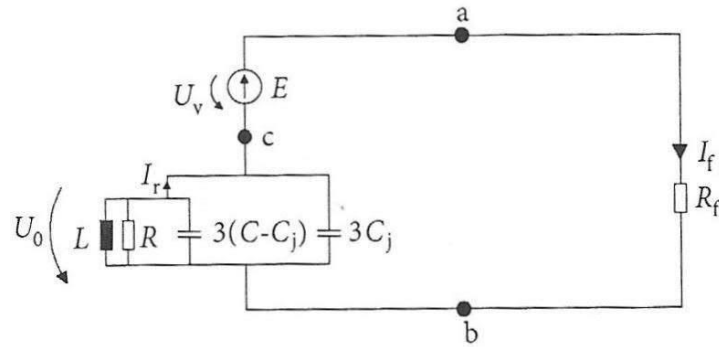
2.1 Sammutettu verkko

Impedanssin kautta maadoitetussa verkossa kytketään kela, vastus tai molemmat verkossa valmiiksi olevan muuntajan tähtipisteen ja maan välille. Tähtipisteen puuttuessa voidaan sellaisen muodostamiseen käyttää maadoitusmuuntajaa. [3] Tähtipisteen ja maan välille kytkettyä kela voidaan kutsua Petersenin kelaksi tai sammutuskuristimeksi. Selkeyden takia työssä käytetään perinteisten säätömenetelmien osalta nimitystä Petersenin kela ja uusien säätömenetelmien osalta sammutuskuristin. Induktanssin kautta maadoitettua verkkoa kutsutaan sammutetuksi verkoksi, jonka nimitys voidaan tulkita tulleen sammutuskuristimen vaikutuksesta valokaarien sammutukseen.



Kuva 1. Yksivaiheisen maasulun esitys sammutetussa verkossa [3].

Kuvassa 1 on esitetty yksivaiheinen maasulku kaikkien kolmen vaiheen kannalta, kun muuntajan tähtipisteeseen on kytketty impedanssi. I_R kuvaa kelan sisäisen vastuksen tai kelan sisäisen vastuksen ja kelan rinnalle kytketyn vastuksen aiheuttamaa resistiivistä virtaa. Induktanssin rinnalla olevan vastuksen R avulla voidaan muuttaa maasulkuvirran pätökomponenttia, jolloin maasulun havaitseminen ja maasulkuvirran mittaaminen helpottuvat. [1] Elenian verkossa käytetään maasulkuvirtaa kompensoivien induktanssien rinnalla vastuksia, jotka ovat vanhoilla kompensointilaitteistoilla 2,5 Ω tai 4 Ω ja uusilla laitteistoilla vaihdettavissa 2,5 Ω ja 5 Ω välillä [4].



Kuva 2. Sammutetussa verkossa olevan yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä [3].

Laskennan helpottamiseksi ja tilanteen hahmottamiseksi on luotu yksivaiheinen sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 2. Kuvasta voidaan huomata, että kelan induktanssin ja verkon kapasitanssin välille syntyy rinnakkaisresonanssipiiri. Tätä resonanssipiiriä voidaan käyttää hyväksi maasulkuvirran kompensoinnin säädössä [5].

Maasulkuvirran kapasitiivisen luonteen takia sitä voi kompensoida asettamalla muuntajan tähtipisteeseen induktanssi, joka tuottaa vikatilanteessa induktiivista virtaa. Yleisesti kompensoidun verkon maasulkuvirta on yhtälön

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R_0}{1 + jR_0(3\omega C - \frac{1}{j\omega L})}} \quad (4)$$

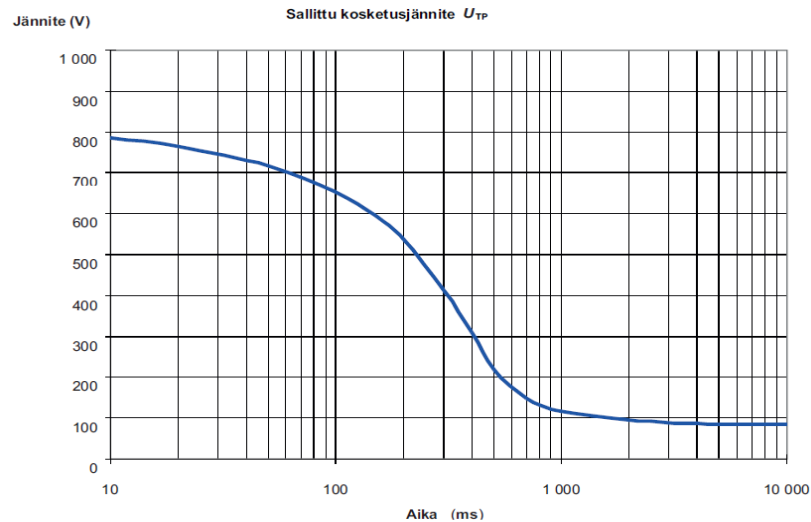
mukainen. Jos verkko saadaan täysin kompensoitua, eli $3\omega C = 1/(\omega L)$, joka tarkoittaa sitä, että kun galvaanisesti yhteen kytketyn verkon kokonaismaakapasitanssin itseisarvo on yhtä suuri kuin kompensointiin käytetyn induktanssin itseisarvo, vikavirran muodostavat vain vian ja verkon omat resistanssit ja yhtälö (4) saa muodon

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + R_0}. \quad [1] \quad (5)$$

Kompensoidussa verkossa maasulun aikaista vikavirtaa kutsutaan jäännösvirraksi, joka saadaan laskettua yhtälöstä (5). Jäännösvirtaa on käytännössä aina, koska kelalla on tietty ominaisresistanssi ja kelaa on vaikea saada viritettyä täydellisesti, mutta toisaalta Suomessa yleinen käytäntö on käyttää maasulkuvirran kompensointia hieman alikompensoituna haitallisten resonanssien välttämiseksi, joten jäännösvirta sisältää kapasitiivistakin komponenttia [6].

2.2 Maasulut ja turvallisuus

Maasulku on aina vikatilanne, joten se pitää ennemmin tai myöhemmin huomata ja korjata. Vikatilanteessa ilmaantuvalla maadoitusjännitteelle on annettu sähköturvallisuusmääräyksissä maksimiarvot ajan funktiona, kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Sallittu kosketusjännite ajan funktiona [7].

Kuvasta 3 huomataan, että mitä pidemmän ajan jännite on kosketeltavissa, sen pienempi kosketusjännite saa olla. Maasulkuvirta aiheuttaa maadoitusjännitteen vikaimpedanssiin ja sen lähistölle maahan, jolloin vaarallinen jännite on ihmisten ja eläinten koskettavissa. Ihmisen koskettaessa jännitteistä osaa, kulkee osa maasulkuvirrasta ihmisen läpi kädestä jalkojen kautta maahan. Maasulkuvirran kompensoinnilla pyritäänkin pienentämään kosketusjännitettä, jolloin vikaa ei tarvitse kytkeä välittömästi pois. Kosketusjännitevaatimukset perustuvat vaarallisen sydänkammiovärinän riskin pienentämiseen sydämen läpi kulkevan virran takia [7].

Kaksivaiheinen maasulku on vikatilanne, jossa kaksi eri vaihetta koskevat maahan samaan aikaan. Kaksoismaasulussa vikavirran reittinä toimii maa kahden viallisen vaiheen välillä, jolloin vikavirta on paljon suurempi kuin yksivaiheisessa maasulussa, jopa oikosulun suuruusluokkaa. Suomen maaperän huonon johtavuuden takia kaksivaiheisissa maasuluissa vikavirta suosii hyvin johtavia vesi- ja viemäröintiputkia sekä tele- ja sähkökaapeleita aiheuttaen niissä vahinkoa ja häiriöitä viestinnälle. Kaksoismaasulku on siten vaarallinen ja vakava vika sähköverkossa. Tällainen vakava vika syntyy yleisimmin yksivaiheisesta maasulusta, kun terveiden vaiheiden jännitteet nousevat, ja jokin komponentti vioittuu tai valokaari syttyy muodostaen virralle kulkureitin maahan toisestakin vaiheesta. Vikavirta kaksoismaasulussa on yleensä suuri, joten vian huomaa oikosulkureleistys. [3]

3. MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI JA SÄÄTÖMENETELMÄT

Maasulkuvirran kompensoinnissa käytettävää induktanssia, sammutuskuristinta, käytetään kompensoimaan lähes kaikki kapasitiivinen maasulkuvirta, jolloin jäljelle jää vain pieni osittain resistiivinen ja kapasitiivinen osa alkuperäisestä maasulkuvirrasta. Jäljelle jääneen remanenssivirran arvo on noin 5-10 % kompensoimattomasta maasulkuvirrasta [1, 6]. Kompensoinnilla pyritään saamaan vikavirta vikakohdassa mahdollisimman pieneksi, jotta välttyttäisiin vaarallisilta kosketus- ja askeljännitteiltä vikapaikan luona sekä turhilta jälleenkytkennöiltä verkossa. Maasulun synnyttämät valokaaret sammuvat hyvin usein itsestään kompensoidussa verkossa, mikä onkin eräs tärkeimmistä syistä käyttää kompensointia [1, 8]. Valokaarien itsestään sammuminen tarkoittaa verkon kannalta sitä, ettei jälleenkytkentöjä tarvitse tehdä valokaarien sammuttamiseksi. Tarpeeksi tarkkaa kompensointia käytettäessä sähköjakelua voidaan jatkaa hetkellisesti maasulun ilmaantuessa, eikä verkkoa tarvitse kytkeä välittömästi jännitteettömäksi. Jakelun jatkuvuus ei kuitenkaan ole toteutettavissa huonojen maadoitusolosuhteiden aiheuttaman korkean maadoitusjännitteen takia. [3]

Valokaarien sammumisen lisäksi toinen suuri hyöty maasulkuvirran kompensoinnissa on palaavan jännitteen ja vikatransienttien loivempi nousu. Nopeasti nouseva palaava jännite valokaaren jäljiltä aiheuttaa helpommin uuden valokaaren ionisoituneessa ilmassa, mutta sammutuskuristinta käyttämällä tätä palaavan jännitteen nousua voidaan rajoittaa, jolloin ionisoituminen kerkeää haihtumaan. [9, 10] Näin ollen sammutuskuristin ei vain sammuta valokaaria, vaan ikään kuin ehkäisee niiden syntymistä.

Kompensointia suunnitellessa kompensointiaste on eräs tärkeä suunnittelukriteeri. Kompensointiaste kuvaa kompensoivan induktanssin tuottaman induktiivisen virran suhdetta maasulun aiheuttamaan kapasitiiviseen virtaan. Alikompensointi tarkoittaa, että kompensointiaste on alle yksi, täysin kompensoituna kompensointiaste on tasan yksi ja ylikompensoituna kompensointiaste on yli yksi. Kompensointiaste K saadaan yhtälöstä

$$K = \frac{I_L}{I_C}, \quad (6)$$

jossa I_L on induktiivinen kompensointivirta ja I_C on kapasitiivinen maasulkuvirta. [6] Suomessa käytännöksi on muodostunut käyttää kompensointia hieman alikompensoituna, jolloin vältetään haitalliset resonanssit, joita syntyy kompensointiasteen ollessa yksi. Toinen tapa välttää haitalliset resonanssit olisi käyttää kompensointia hieman ylikompen-

soivana, kuten esimerkiksi Ruotsissa yleisesti tehdään. [6] Kompensointikertoimen lisäksi vinoviritysastetta v (resonance deviation) käytetään kuvaamaan virtojen suhdetta ja sitä, kuinka lähellä systeemi on resonanssipistettä. Vinoviritysaste v saadaan yhtälöstä

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_L} = \frac{X_L - X_C}{X_L} = 1 - K. \quad [5, 11] \quad (7)$$

Muita maasulkuvirran kompensointiin ja sen laskuihin tarvittavia termejä ovat vaimennuskerroin d ja epäsymmetriakerroin K_C . Vaimennuskerroin d saadaan yhtälöstä

$$d = \frac{G_g + G_L}{\omega C}, \quad [5] \quad (8)$$

jossa G_g on vaiheen ja maan välinen konduktanssi ja G_L sammutuskuristimen konduktanssi. Epäsymmetriakerroin määritetään vaiheiden oikeista maakapasitansseista ja niiden kulmaerosta, jolloin tätä kerrointa käytettäessä saadaan realistisempia tuloksia, kuin olettamalla vaiheiden maakapasitanssit samoiksi, kuten sijaiskytkennässä oletetaan. [5]

Säätömenetelmillä tarkoitetaan sammutuskuristimen viritysmenetelmiä. Verkon muuttuvat kytkennät ja lisääntyvä kaapelointi muuttavat verkon kokonaismaakapasitanssia, jolloin kompensointilaitteisto pitää virittää sopivaksi uudelle verkon tilanteelle, jotta verkolle asetetut vaatimukset ja tavoitteet pysyvät täytettyinä. Kompensointia voidaan tehdä galvanisesti yhteen kytketyn verkon kaikissa tähtipisteissä ja tähtipisteen puuttuessa maadoitusmuuntajalla, useimmiten se kuitenkin tehdään 110/20 kV muuntoasemalla. Esimerkiksi Elenian verkossa ei ole käytettävissä tähtipisteitä, joten jokainen laitteisto kytketään verkkoon maadoitusmuuntajalla [4]. Jakelumuuntajilla toteutettu kompensointi on hajautettua kompensointia, jossa ei yleensä käytetä aktiivista säätöä, vaan induktanssilla on vakioarvo, jolla se tuottaa vikatilanteessa vakiovirran kumoamaan kapasitiivista maasulkuvirtaa.

Hajautetulla kompensoinnilla on kuitenkin etunsa, sillä verkon pituutta voidaan kasvattaa käyttämällä hajautettua kompensointia vielä sen jälkeen, kun keskitetyllä kompensoinnilla ei enää saataisi kaikkea maasulkuvirtaa kompensoitua kannattavilla kustannuksilla. Verkon vikatilanteissa tapahtuu jännitteettömäksi kytkemistä pitkin verkkoa, jolloin hajautettu kompensointi voidaan suunnitella tietyille verkon osalle kerrallaan ja silloin irtikytkennän tapauksessa verkosta irtoaa myös irronneen osan kompensointi, ja siten kokonaiskompensointi pysyy kunnossa. [12] Keskitetyllä kompensoinnilla irtikytketytymiset ovat ongelma, koska maakapasitanssi muuttuu kytkentätilan muuttuessa, jolloin induktanssi pitäisi säätää uudestaan kyseiselle tilanteelle.

Nykyään käytetäänkin keskitettyä ja hajautettua kompensointia yhdessä parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Tällöin hajautettu kompensointi suunnitellaan hieman alikompensoimaan oma osansa verkosta, hajautetut yksiköt kompensoivat esimerkiksi 5-15 A maasulkuvirtaa ja keskitetty kompensointi viritetään kompensoimaan hajautetulta kompensoinnilta jäänyt maasulkuvirta [2]. Korkean kompensointiasteen myötä releiden voi olla hankala havaita pientä maasulkuvirtaa, joten joissakin tilanteissa sammutuskuristimen rinnalle laitetaan vastus, joka kasvattaa resistiivistä maasulkuvirtaa. Rinnan kytketyllä vastuksella voidaan varmistaa vian havaitseminen, viallinen johdin ja suojauksen selektiivisyys. Esimerkiksi Elenian verkossa käytetään aina yhdessä keskitettyä ja hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Hajautetun kompensoinnin laitteistoja Elenian verkossa on noin 1600 kappaletta ja niiden tuottamaa kompensointivirtaa pystytään säätämään tarvittaessa välillä 5–15 A, jotta tavoitteena oleva 90 % kompensointiaste kaukokäytävällä toteutuisi. Hajautetun kompensoinnin säätö vaatii aina jännitteettömyyden kelan väliottokytkimen asennon vaihtamisen takia. [4]

Sammutuskuristimen säätäminen perustuu verkon rinnakkaisresonanssiin, jonka muodostaa tähtipisteeseen kytketty induktiivinen reaktanssi, verkon johtojen impedanssi ja maakapasitanssin aiheuttama kapasitiivinen reaktanssi. Eri vaiheiden maakapasitanssien epätasapainon takia tähtipisteeseen aiheutuu normaalitilassakin pieni nollajännite. [3] Kelaa säätäessä etsitään suurin kelan läpi kulkeva virta induktanssia muuttamalla verkon normaalitilassa ja kun suurin virta kelan läpi löytyy, on resonanssipiste löydetty ja kelan viritys tiedossa. Verkon resonanssin voi selvittää moderneilla menetelmillä ilman kelan säätämistä mittausten välissä.

Impedanssin muutos sammutuskuristimessa voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla: muuttamalla kelan kierroksien määrää käämikytkimellä, esimerkiksi muuttamalla kelan magneettisia ominaisuuksia säätämällä saturaatiota, lisäämällä piirin kapasitanssia tyristoriohjatusti, ohjaamalla kelan toision kuormaa tyristoreilla tai ohjaamalla montaa rinnan olevaa pienempää kelaa tyristoreilla [13, 14]. Seuraavissa luvuissa käsitellään eri menetelmiä, joilla Petersenin kelaa on perinteisesti säädetty ja miten säätöön voidaan hyödyntää moderneja välineitä.

3.1 Perinteiset säätömenetelmät

Perinteisissä säätömenetelmissä ei ollut käytössä elektroniikkaan perustuvia mittausräjälineitä tai simulointityökaluja, joten säätö tapahtui vikatilanteita hallitusti verkkoon tekemällä ja mittaamalla halutut suureet vian aikana. Testejä tehtiin monia ja testien välissä kelan induktanssia säädettiin esimerkiksi käämikytkimen avulla [8]. Maasulkuvirran kompensointia on tehty jo 1900-luvun alkupuolella, joten se ei ole konseptina uusi. Nimitys

Petersenin kela juontaa juurensa Waldemar Peterseniin, joka keksi ensimmäisenä käyttää sammutuskuristinta vuonna 1916 [15].

Yhdysvalloissa 1930 -luvulla tehdyn säädön [8] tarkoituksena oli minimoida keskeytykset erittäin salamapitoisessa ympäristössä. Tehtävään valittiin käytettäväksi Petersenin kela, jonka kustannukset tulivat halvemmiksi, kuin vaihtoehtoiset katkaisuja vähentävät keinot, koska verkon rakennetta ei tarvinnut merkittävästi muuttaa olemassa olevasta.

Petersenin kelan käämikytkimen optimaalisen asennon löytämiseksi tehtiin kaksi erilaista koetta: ensimmäisessä kokeessa kela oli asennettu, eikä johtimilla ollut maadoituksia ja toisessa kokeessa tehtiin yhteen vaihejohtimeen maadoitus ja koe toistettiin vaihtamalla maadoituksen paikkaa verkossa. Ensimmäisessä kokeessa haettiin käämikytkimen asento, jossa kelan läpi kulkisi suurin virta, jolloin sen yli on suurin jännite. Tässä tilanteessa kelan yli oleva jännite, eli nollajännite, muodostuu vaihejohtimien epäsymmetrisien maakapasitanssien takia. [8] Resonanssi löytyy helposti, koska virta kasvaa hyvin terävästi kelan induktiivisen reaktanssin itseisarvon lähestyessä verkon kapasitiivisen reaktanssin itseisarvoa. Resonanssitilan yli mentäessä virta laskee terävästi eli resonanssin kohdalle muodostuu piikki.

Toinen koe järjestettiin tekemällä hallittu maasulku yhteen verkon vaiheista kauas kelan sijoituspaikasta. Koe toistettiin kaksi kertaa maasulun ollessa eri paikassa verkkoa. Käämikytkimen asentoa muutettiin jälleen testien välissä ja virta vikapaikassa mitattiin. Optimaalisin käämikytkimen asento tässä tapauksessa on se, jolla vikapaikassa on pienin virta. Tässä pitää huomata, että vikapaikan pienin virta ei ole sama kuin Petersenin kelan pienin tai suurin virta. [8]

Kokeiden välillä mahdollinen ero käämikytkimien asennossa johtuu siitä, että todellisessa vikatilanteessa tarvitaan suurempi virta kompensoimaan kapasitiivinen virta, koska verkon korona aiheuttaa lievää kapasitanssin kasvua sekä vikatilanteessa ilmaantuvat harmoniset komponentit lisäävät vikavirtaa. Vaikka verkko tässä tapauksessa olikin 100 kV, eikä 20 kV niin kuin Suomen keskijännitteisissä jakeluverkoissa, voidaan samoja viritysmenetelmiä soveltaa keskijänniteverkkoon periaatteen ollessa kuitenkin sama.

Tässä esimerkissä Petersenin kelan viritukseen käytettiin resonanssimenetelmää. Menetelmän tarkoituksena on löytää maksiminollajännite, kun verkossa ei ole maasulkua. Nollajännitteen maksimin löytäminen tarkoittaa, että Petersenin kelan induktiivinen ja verkon kapasitiivinen reaktanssi ovat itseisarvoltaan samansuuruiset ja näin ollen systeemin kokonaisreaktanssi on minimissään. [5] Itse kelan säätö hoidettiin muuttamalla

kelan kierroslukumäärää käämikytkimellä. Käämikytkimen säätö vaati kelan irti kytkemisen ja ihmisen vaihtamaan fyysisesti asennon toiseen, eikä induktanssin säätö tällöin ollut portaattonta.

Petersenin kelan reaktanssia säädettiin ennen myös kelan sydämen ilmväliä muuttamalla. Kyseisellä tyyllillä induktanssia voidaan säätää portaattomasti ja ilman kelan irti kytkemistä. [16] Tämä menetelmä oli kahdesta historiallisesta tyylistä harvinaisempi, koska vaati moottorin tai ihmisen liikuttamaan sydäntä, eivätkä nopeus ja säätötarkkuus olleet tälläkään menetelmällä tyydyttäviä.

3.2 Uudet säätömenetelmät

Tehoelektronikan ja mittauslaitteiden kehittyessä Petersenin kelan virittämiseen on tullut uusia menetelmiä. Tehoelektronikkaan perustuvalla säädöllä verkon resonanssin selvittäminen on suoraviivaista ja nopeaa. Myös kelan säätö on itsessään muuttunut reaaliaikaisemmaksi ja luotettavammaksi. Sammutuskuristimen impedanssia voidaan säätää tekemällä sammutuskuristimen rakenne muuntajan tyyliseksi, jolloin reaktorissa on myös toisio [13, 17, 18]. Toisiolla voidaan myös syöttää verkkoon erilaisia signaaleja ja muuttaa sammutuskuristimen ominaisuuksia ilman laitteiston kytkemistä verkosta irti [13].

Toisioon voidaan kytkeä laitteistoja, jotka esimerkiksi saturoivat kompensointiin käytettävän kelan sydämen, jolloin kelan induktanssi muuttuu tai toisioon voidaan kytkeä tyris-toriorhjattuja kuormia, jotka muuttavat sammutuskuristimen kuormitusta ja täten saavat induktanssin arvon muuttumaan [17, 18]. Nykyaikaisilla laitteistoilla maasulkuvirran kompensointi onnistuu käytännössä reaaliaikaisesti ja ilman ihmisen toimintaa kehittyneiden tehoelektronikka- ja mittauslaitteiden sekä ohjausalgoritmien ansiosta.

3.2.1 Vaihekulmamenetelmä

Vaihekulmamenetelmässä tutkitaan nollajännitteen ja jonkin vaihejännitteen kulmaeroa. Otetaan tarkasteluun vaihe A, jolloin kulmaeron yhtälöksi saadaan

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d}{K_C - v} \right). \quad [5] \quad (9)$$

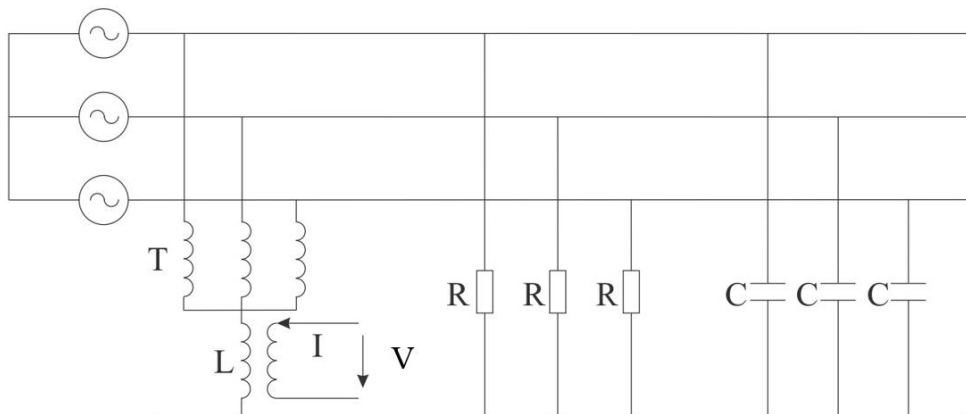
Kun resonanssin poikkeama v on nolla, eli kun systeemi on resonanssissa, jää arkustangentin sisälle vain vaimennuskertoimen d ja epäsymmetriakertoimen K_C suhde. Säädettäessä pitää olla tiedossa täysin kompensoidun systeemin nollajännitteen ja vaihejännitteen välinen kulma θ_1 , johon jatkuvan tilan kulmaeroa verrataan. Alikompensoidussa systeemissä kulmaero θ on pienempi kuin θ_1 ja ylikompensoidussa systeemissä θ on suurempi kuin θ_1 . [5]

Tämä menetelmä vaatii modernien mittalaitteiden käyttöä, jotta vaihekulmat saadaan mitattua luotettavasti ja nopeasti. Käytännössä kyseisen menetelmän ongelmia ovat kulman θ muutokset verkon epäsymmetrian muuttumisen takia, jolloin kapasitiivisen maasulkuvirran pysyessä samana kela vaatisi säätöä. Viritys olisi mahdollista suorittaa tarkemmin asentamalla verkkoon sen ominaisuuksien mukainen kondensaattori, mutta tämä aiheuttaisi kuitenkin lisäystä epäsymmetriaan, joten menetelmän käytännöllisyys on kyseenalaista. [5]

3.2.2 Lisälähdemenetelmät

Petersenin kela voidaan tehdä muuntajatyypiseksi, jolloin sen ensiöön voidaan injektoida toisista signaaleja. Tällaista rakennetta voidaan käyttää hyödyksi lisäjännite- ja lisävirtamenetelmissä. Lisälähteen voi kytkeä myös sarjaan sammutuskuristimen kanssa, mutta silloin lisälähdelaiteiston on kestävä vian aikaiset rasitteet ja mahdolliset resonanssitilan aiheuttamat rasitteet verkon normaalitilassa. [5] Pienempien kustannuksien ja komponenttien kesto vaatimuksien takia lisälähdemenetelmissä kannattaisi käyttää muuntajatyypistä rakennetta, eli virtainjektiota.

Lisäjännitemenetelmässä luodaan verkkoon nollajännite keinotekoisesti sammutuskuristimen toisista syöttämällä. Tällöin keinotekoisien nollajännitteen U' ja maasulkuvirran I_0 vaihekulmat saadaan mitattua ja sitä kautta verkon resonanssi selvitettyä.

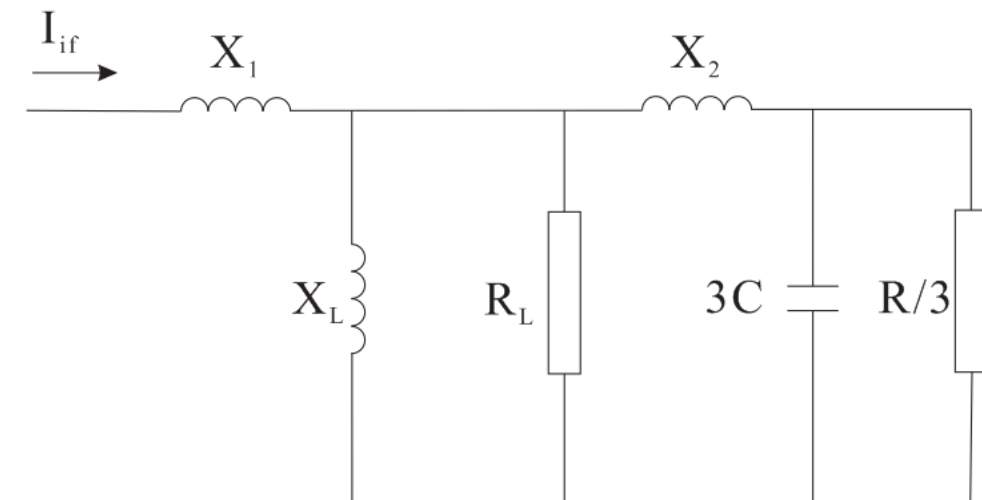


Kuva 4. Lisäjännitemenetelmän esitys [5].

Kuvassa 4 on käytetty erillisen maadoitusmuuntajan tähtipistettä kompensoinnin toteutukseen. Yksivaiheinen sijaiskytkentä muodostamalla saadaan verkolle tilanne, joka kuvaa rinnakkaisresonanssia. Rinnakkaisresonanssitilanteesta saadaan vaihekulmaerolle ehto, josta vaihekulman ollessa nolla saadaan yhtälö $\omega L = 1/(3\omega C)$. Ylikompensoinnin ta-

pauksessa $\omega L < 1/(3\omega C)$ ja keinotekoinen maasulkuvirta I_0 on jäljessä keinotekoista nol-lajännitettä. Alikompensoinnin tapauksessa taas $\omega L > 1/(3\omega C)$ ja keinotekoinen maasul-kuvirta I_0 on edellä nolajännitettä U' . Tässäkin menetelmässä vaaditaan tarkkaa mit-tausta vaihekulmista, johon tarvitaan moderneja mittauslaitteita. [5]

Lisävirta-, eli virtainjektiomenetelmässä sammutuskuristimen toisiosta injektoidaan eri taajuisia virtakomponentteja verkon nolapiiriin. Syötetyt virtasignaalit mitataan verkosta sammutuskuristimen säätö- ja mittauslaitteistolla ja säädön muutokset tehdään niiden mukaan. Kun resonanssi löydetään jollain injektoidulla taajuudella, voidaan sen avulla selvittää vinoviritysaste v ja verkon kapasitiivinen maasulkuvirta. [5]



Kuva 5. Virtainjektiomenetelmän sijaiskytkentä [5].

Kuvassa 5 olevat X_1 ja X_2 kuvaavat injektioon käytettävän muuntajan hajareaktansseja ja ovat pieniä verrattuna muihin suureisiin, joten ne voidaan jättää huomiotta. Kun ne jätetään huomiotta ja huomataan, että Petersenin kelan resistanssi R_L ja verkon yhden vaiheen resistanssi $R/3$ vain vaimentavat värähtelyä, voidaan tilanne esittää rinnakkais-resonanssipiirinä, jossa rinnakkain ovat sammutuskuristimen reaktanssi X_L ja verkon kokonaiskapasitanssi $3C$.

Verkon ominaisresonanssitaajuus f_0 saadaan selville injektoimalla jatkuvasti muuttuva-taajuisia virtaa. Syötetyn virran taajuus ja kelan induktanssin ollessa tiedossa verkon kokonaiskapasitanssi saadaan selvitettyä yhtälön

$$3C = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad (10)$$

mukaisesti, jossa ω_0 on ominaisresonanssitaajuuden kulmataajuus. Kapasitiivinen maa-sulkuvirta saadaan laskettua yhtälöstä

$$I_C = 3V_A \omega C = \frac{\omega}{\omega_0^2 L} U_A, \quad (11)$$

jossa ω on syötetyn signaalin kulmataajuus ja U_A on vaihejännite. Yhdistämällä yhtälöt (11) ja (7) saadaan vinoviritysasteen yhtälöksi

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{\frac{\omega}{\omega_0^2 L} \frac{1}{\omega L}}{\frac{\omega}{\omega_0^2 L}} = 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = 1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2. \quad [5] \quad (12)$$

Resonanssitaajuuden löytyessä myös verkon kokonaismaakapasitanssi voidaan laskea, jos tiedetään sammutuskuristimen ominais- ja hajainduktanssi ja verkon resonanssitaajuus, yhtälön

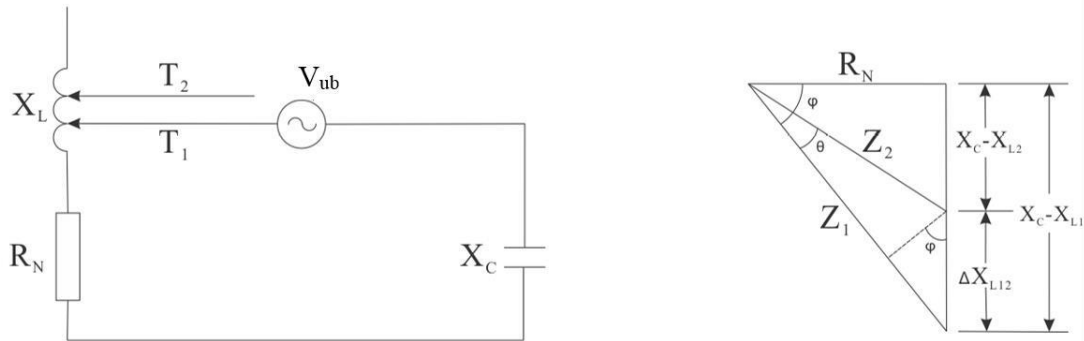
$$C_\Sigma = \frac{1}{4\pi^2 f_{res}^2 (L_m + L_{s1})} \quad [19] \quad (13)$$

mukaisesti, jossa C_Σ on verkon kokonaismaakapasitanssi, L_m on sammutuskuristimen ominaisinduktanssi, L_{s1} on sammutuskuristimen hajainduktanssi ja f_{res} on verkon resonanssitaajuus, joka on selvitetty injektoimalla eri taajuisia virtasignaaleja nollapiiriin. Injektoidun signaalin taajuuden pitää kuitenkin olla riittävän lähellä verkon perustaajuutta, koska suuremmilla taajuuksilla verkon impedanssit väärentävät signaalia ja vaikeuttavat sen lukemista. Injektoidun signaalin taajuutta muutetaan sammutuskuristimen toisioon kytketyn invertterin avulla, jolloin toisista voidaan syöttää mielivaltaisia taajuuksia ohjaamalla invertterin tehoelektroniikkaa esimerkiksi siniaaltopulssinleveysmoduloinnilla eli SPWM:llä [13]. Perustaajuutta korkeammilla taajuuksilla induktiivinen reaktanssi kasvaa ja kapasitiivinen reaktanssi pienenee, jolloin verkko näyttää erilaiselta, kuin perustaajuudella. Injektoitu signaali ei voi olla liian lähellä samaa verkon perustaajuutta, koska silloin perustaajuus aiheuttaisi injektoituun signaaliin häiriöitä ja vaikeuttaisi sen mittaamista. Nollapiiriin injektoitu signaali voi olla esimerkiksi 10–43 Hz, jolloin se on riittävän kaukana verkon perustaajuudesta. [19]

Tässä menetelmässä tarvitaan tarkkoja tehoelektronikkalaitteita injektoimaan haluttu virtasignaali ja mittalaitteistolta vaaditaan korkeaa tarkkuutta tunnistaa nämä signaalit. Virtainjektiomenetelmä ei sovi verkoille, joissa on korkea epäsymmetriakerroin, koska injektoitu signaali vääristyy eri vaiheissa, eikä sitä pysty mittaamaan järkevästi. Muita vaikeuksia ovat sammutuskuristimen viritys tarkasti, kun injektoidun signaalin taajuus on lähellä verkon ominaisresonanssitaajuutta ja olemassa olevan nollajännitteen vaikutus selektiiviseen vian tunnistamiseen. [5, 19]

3.2.3 Epäsuoran mittauksen menetelmä

Epäsuoran mittauksen menetelmässä nimensä mukaisesti lasketaan verkon kapasitiivinen maasulkuvirta epäsuorasti. Menetelmässä tutkitaan sammutuskuristimen reaktanssin ja sen kanssa sarjaan kytketyn maadoitusresistanssin impedanssin avulla vinovirityssastetta.



Kuva 6. Systemin sijaiskytkentä ja impedanssikulmio [5].

Sammutuskuristimen reaktanssia kokeillaan kahden eri kierrosluvun välillä, jolloin maadoitusresistanssin R_N ja kelan reaktanssin X_L muodostamat impedanssit näyttävät impedanssikolmion kaltaisilta. Impedanssikolmioon trigonometrian kaavoja soveltaen saadaan vinovirityssasteeksi

$$v = \frac{X_L - X_C}{X_L} = -\frac{R_N}{X_{L1}} \tan \varphi. \quad [5] \quad (14)$$

Vertaamalla vinovirityssasteita haluttuun virhearvoon ε , voidaan selvittää, pitääkö kelan induktanssia säätää. Kela ei tarvitse säätämistä, jos vinovirityssasteiden erotusten itseisarvo on pienempi tai yhtä suuri kuin ε , eli $|v_1 - v_0| \leq \varepsilon$, jossa v_1 on vinovirityssaste kelan asennon ollessa T_1 ja v_0 on alkuperäinen asetusarvo. Jos taas $|v_1 - v_0| > \varepsilon$, kelan asentoa pitää vaihtaa. Asennon vaihtaminen pitää tehdä erotuksen etumerkin mukaisesti. [5]

3.3 Uudet sammutuskuristimen rakenteet

Edellä käytyjä menetelmiä resonanssin selvittämiseksi voidaan soveltaa yhdessä uusien sammutuskuristimen rakenteiden kanssa tarkimman ja nopeimman maasulkuvirran kompensoinnin aikaansaamiseksi. Sammutuskuristimesta ei näiden tarkastelujen aikana käytetä nimitystä Petersenin kela, koska rakenne on merkittävästi muuttunut alkuperäisestä. Suurimman muutoksen on tuonut sammutuskuristimen rakenteen mahdollinen muuntajatyypinen rakenne, jolloin kuristimen toisioon voidaan kytkeä laitteistoja, jotka muuttavat muuntajan ekvivalenttista reaktanssia. Muita suuria muutoksia ovat te-

hoelektroniikan nopea kehittyminen, digitaalisen laskentatehon lisääntyminen ja algoritmien kehittyminen sekä laitteistojen fyysisen koon pienentyminen, jotka mahdollistavat sammutuskuristimen säädön ilman ihmisen toimintaa.

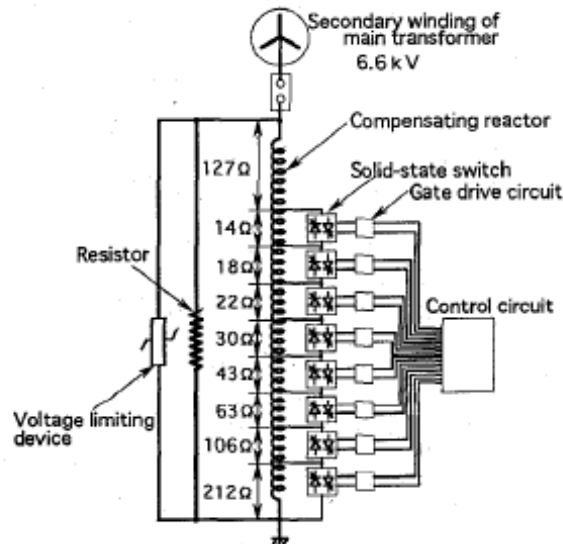
Sammutuskuristimen säätötoiminta voidaan jakaa kahteen osaan: esiasetettuun tyyppiin ja seurantatyyppiin. Esiasetetussa tyyppissä sammutuskuristin toimii koko ajan resonanssitilassa ja sen rinnalle on kytketty vaimennusresistanssi verkon toimiessa normaalitilassa. Vaimennusresistanssi tarvitaan, koska kuristimen ollessa verkon kanssa resonanssitilassa, nollajännite voi olla suuri ja vastus rajoittaa sitä. Vikatilanteen sattuessa vastus pitää poistaa välittömästi, jotta se ei haittaa kuristimen toimintaa. Sammutuskuristin on siis viritetty toimimaan kyseiselle verkon tilalle ja on valmiina toimimaan heti vian tapahtuessa. Esiasetetun säädön huonoja puolia ovat sen hitaus, monimutkaisuus ja laitteiston vikaantumisen herkkyyks, koska resonanssi pitää välillä varmistaa kytkemällä laitteisto päälle. [14, 20] Suuri epäsymmetria verkossa voi aiheuttaa laitteistoon suuria nollajännitteitä verkon normaalitilassakin, jolloin laitteisto on altis suurille rasitteille.

Seurantatyyppisesti toimivalla säädöllä jää suuri vinoviritysaste verkon normaalitilassa, mutta vikatilanteen sattuessa säätö toimii nopeasti tarkan kompensointivirran aikaansaamiseksi. Normaalitilan suureen vinoviritysasteeseen vaikuttaa vaimennusresistanssin puutos, mutta joissain tapauksissa vaimennusresistanssi on asennettu, jolloin normaalitilan seuranta on tarkempaa. [14]

3.3.1 Sektionaalinen tyristoriohjattu kuristin

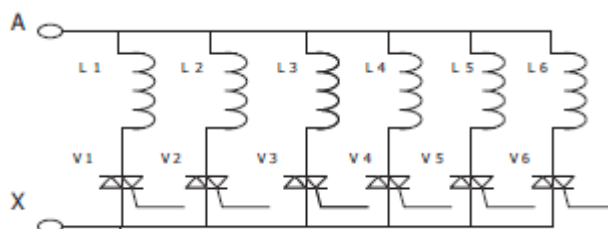
Kuristimen induktanssi voidaan jakaa pienemmiksi osiksi, joita ohjataan tyristoreilla resonanssimittauksen perusteella. Muuntajarakenteella voidaan säätää sammutuskuristimen ekvivalenttista reaktanssia myös toisiossa olevilla tyristoriohjatuilla kondensaattoreilla. [14, 17, 21]

Sammutuskuristimen rakenne voi olla muuntajatyypinen tai reaktorityypinen. Reaktorityypisessä rakenteessa säädettävä induktanssi voi muodostua rinnan kytketyistä tyristoriohjatuista pienemmistä keloista tai yhden kelan osittamisesta tyristoreilla. Tyristoriohjattua kelaa kutsutaan nimellä TCR (Thyristor Controlled Reactor). [14, 21]



Kuva 7. Sammutuskuristimen impedanssin osittaminen tyristoreilla [21].

Kuvassa 7 on esitetty eräs ratkaisu, jolla voidaan toteuttaa reaktorityyppisen sammutuskuristimen impedanssin säätö yhden kelan avulla. Tyristoreilla ohjataan tässä tapauksessa periaatteessa kelan kierroslukumäärää, aivan kuten käänikytkimellä, mutta muutos voidaan tehdä ilman kelan irti kytkemistä. Eri osiot on jaettu tyypillisesti kahteen eri tasoon tuotetun induktiivisen kompensointivirran mukaan, esimerkiksi 3 A ja 30 A osioihin [21]. Kuvassa 7 esitetyssä ratkaisussa on sammutuskuristimen rinnalle kytketty ylijännitteeltä suojaava metallioksidivastus ja tavallinen vastus lisäämään remanenssivirtaa selektiivisen suojauksen toimimiseksi. Vastus tarvitaan myös resonanssitilan suuren nollajännitteen rajoittamiseksi, koska ratkaisua käytetään esiasetetusti, jolloin säädin ennustaa verkon kapasitanssia ja selvittää resonanssin testaamalla. [21] Tällaisen järjestelmän rajoittavia tekijöitä ovat muun muassa suhteellisen epätarkka säätö, koska impedanssin arvoja säädetään portaittain ja vaaditun tehon kestävät tehoelektronikkalaitteet ovat yleensä verrattain hitaita toimimaan. Toisaalta tyristoriohjauksella saadaan kuitenkin aikaan puolijakson luokkaa oleva vasteaika [21].



Kuva 8. Sammutuskuristimen rinnakkaisrakenteinen tyristoriohjatusti [14].

Kuvassa 8 on esitetty reaktorityyppisen sammutuskuristimen impedanssin säätö rinnakkainkytketyillä tyristoriohjatetuilla kelaparistoilla. Rinnakkaisrakenteinen sammutuskuristin

koostuu N kappaleesta rinnakkainkytkettyjä kelaparistoja, joista jokainen voi tuottaa tietyn määrän, esimerkiksi 5 A, induktiivista kompensointivirtaa. Rinnakkainkytketyillä kelaparistoilla voidaan kompensoida maasulkuvirtaa kahdella tavalla: joko kytkemällä tietty määrä paristoja kokonaan päälle tai kytkemällä tietty määrä paristoja kokonaan päälle ja säätämällä yhden tai useamman pariston tyristorihjauksen liipaisukulmaa. [14]

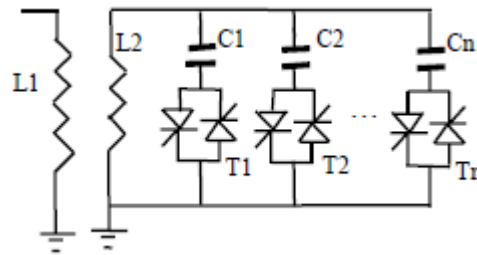
Kaikkien kelaparistojen on kestettävä nollajännitteen maksimiarvo, joten komponenttien kestävyys takia hintakin on verrattain suuri. Ohjaamalla tiettyä määrää kelaparistoja liipaisukulmalla 0° , saadaan kompensointivirraksi yhden pariston tuottama kompensointivirta toiminnassa olevien paristojen lukumäärällä kerrottuna. Tällainen säätö on epätarkkaa, mutta nollapiiriin syötettävien virran harmonisten komponenttien syntyminen on vähäistä. Tarkemmin kompensointivirtaa pystytään säätämään ohjaamalla tietty määrä paristoja liipaisukulmalla 0° ja lisäksi ohjaamalla joitain paristoja suuremmalla kulmalla, jolloin ne tuottavat alle maksimimäärän kompensointivirrastaan. Liipaisukulman kasvattaminen paristoissa lisää virran harmonisten komponenttien määrää nollapiirissä, mutta kapasitiivinen osa maasulkuvirrasta saadaan kompensoitua täysin. [14]

Tyristorihjattuja paristoja käytetään myös muuntajatyypisissä sammutuskuristimissa toision puolella, jolloin sammutuskuristimen ekvivalenttista impedanssia voidaan ohjata. Toision kuormana muuntajatyypisissä sammutuskuristimissa voidaan käyttää muitakin laitteistoja, kuin kelaparistoja. Sammutuskuristimen ekvivalenttista impedanssia voidaan ohjata kytkemällä toisiota kokonaisuudessaan päälle ja pois, ohjaamalla tyristoreilla kondensaattoriparistoja toisiossa ja ohjaamalla tyristoreilla kondensaattorin ja kelan yhteisparistoja toisiossa. [17]

Tyristorihjattu kondensaattori, eli TSC (Thyristor Switched Capacitor) on eräs laitteisto sammutuskuristimen toisioon lisättäväksi. Kondensaattoreita laitetaan N kappaletta rinnakkain, jolloin kapasitanssien väliset suhteet valitaan yhtälön

$$C_n = \frac{C_1}{2^{n-1}} \quad (15)$$

mukaisesti. Tällöin sopiva määrä kondensaattoreita valitsemalla voidaan kompensointivirtaa säätää tarkasti. [22] Tyristorien ohjatessa kondensaattoreita kokoaikaisesti päälle voidaan sammutuskuristimen ekvivalenttinen reaktanssi maksimoida. Verkon normaali-tilassa kaikki kondensaattorit on ohjattu kokoaikaisesti päälle ja tällöin sammutuskuristimen reaktanssin ollessa maksimissaan, ei synny resonanssitilan aiheuttamaa nollajännitteen kasvua. Vikatilanteen sattuessa säädin toimii ennustetun maasulkuvirran mukaan ja mittaa, miten hyvin säätö onnistuu tilanteessa. Kondensaattoreita irrotetaan sitä mukaa, kun reaktanssia pitää pienentää sopivan induktiivisen kompensointivirran aikaansaamiseksi. [17]

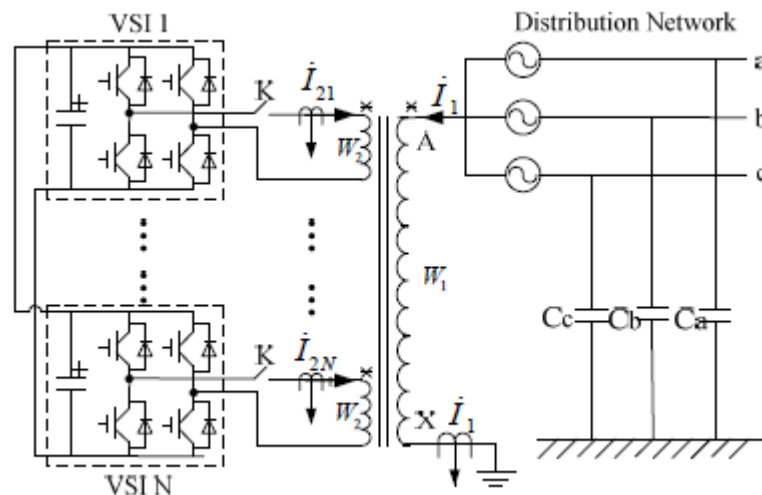


Kuva 9. Tylristoriohjattuja kondensaattoreita sammutuskuristimen toisiossa [17].

Eräs tapa toteuttaa TSC on esitetty kuvassa 9, jossa L1 on sammutuskuristimen ensiömaan ja verkon tähtipisteen välissä ja L2 on toisio, johon on kytketty rinnan N kappaletta TSC:tä. Pelkkien kondensaattorien lisäksi TSC:hen pitää lisätä suojalaitteita suojamaan kondensaattoreita liian suurelta sysäysvirralta ja ylijännitteiltä. Ohjaus oikein toteuttamalla tyristoriohjauksella saadaan harmonisten tuotto hyvin pieneksi ja sammutuskuristimen reaktanssi lineaarisesti säätäväksi. [17] TCR ja TSC ovat tyypillisiä käytössä olevia ratkaisuja ja saatavilla markkinoilla, mutta niitä tutkitaan ja kehitetään paljon [19]. Ohjausalgoritmit ja tehoelektronikkakomponentit kehittyvät jatkuvasti, joten jatkuva tutkimus on aiheellista.

3.3.2 Virtainjektio invertterillä

Virtainjektio tarkoittaa virtasignaalin syöttämistä nollapiiriin. Sammutuskuristimen induktanssin säädössä virtainjektio tarkoittaa sammutuskuristimen toisioon kytkettäviä inverttereitä, joilla mallinnetaan muuttuvaa kuormaa muuntajatyypisessä sammutuskuristimessa ja näin muutetaan kuristimen ekvivalenttista reaktanssia.



Kuva 10. Muuntajatyypisen sammutuskuristimen virtainjektio [13].

Kuvassa 10 on esitetty eräs virtainjektiota hyödyntävä laitteisto. Toisiossa olevia inverttereitä ohjataan IGBT-moduuleilla, jolloin kytkentätaajuus saadaan suuremmaksi ja

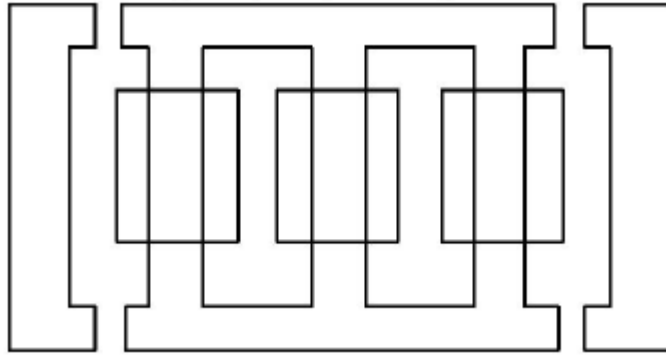
säätö tarkemmaksi, jolloin harmonisten syöttö verkkoon vähenee. IGBT-moduulien heikkous on pienempi virran kesto kuin tyrystoreilla, mutta tämä heikkous voidaan kiertää asettamalla useita IGBT-moduuleilla ohjattuja inverttereitä toisiokäämityksiksi. Invertterien määrää lisäämällä voidaan laskea vaatimuksia komponenttien kestoisuudelle, koska silloin yhden invertterin tuottaman virran ei tarvitse olla niin suuri. [19] Sopivan laitteiston suunnitteleminen on siis kustannusten optimointia invertterien määrän ja komponenttien kestoisuuden välillä.

Virtainjektio menetelmää voidaan käyttää myös verkon resonanssin selvittämiseksi ja laitteistolla tehdään usein molemmat tehtävät automaattisen säädön aikaansaamiseksi. Lisälähdemenetelmää on vaivatonta käyttää virtainjektio laitteiston kanssa saman laitteiston rakenteen takia. Tehoelektronikkalaitteiden nopean kytkentätaajuuden ja monipuolisten säätötapojen sekä toisiokäämityksen virtaa tasoittavien ominaisuuksien ansiosta virtainjektio toisiokäämityksiin toteutettuna ei tuota verkon nollapiiriin haitallisia harmonisia. [19] Virtainjektio on yleisesti käytetty menetelmä maasulkuvirran kompensoinnissa sen monipuolisuuden takia.

Kuvassa 10 esitetty virtainjektio menetelmä ei täysin vastaa Suomessa nykyisin käytettyä virtainjektiota. Verkkoyhtiöiden uusissa laitteistoissa virtainjektiota käytetään verkon resonanssin selvittämiseksi, mutta sammutuskuristimen induktanssin säätäminen tapahtuu muulla tavalla. Suomalaisissa verkkoyhtiöissä virtainjektiosäädin on kytketty sammutuskuristimen rinnalle ja kompensointivirran säätö tapahtuu tyypillisesti säädettäväsydämisellä sammutuskuristimella. [16, 23]

3.3.3 Sammutuskuristimen induktanssin säätö magneettisesti

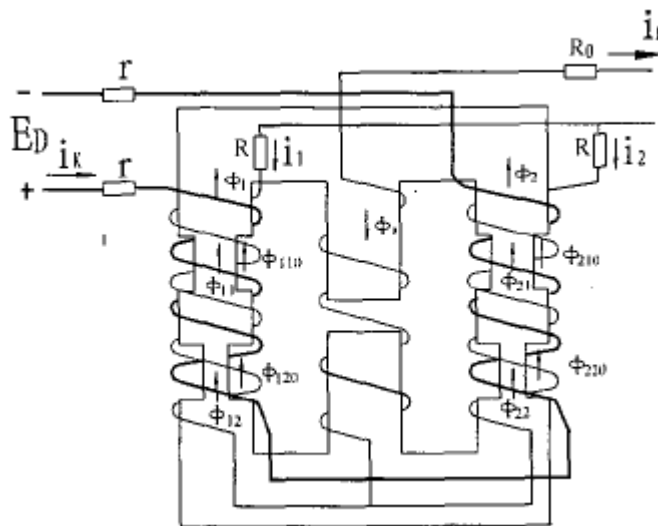
Magneettisesti sammutuskuristimen induktanssia voidaan säätää joko mekaanisesti muuttamalla sydämen ilmavälejä tai kyllästämällä kuristimen sydäntä tasavirralla. Sydämen ilmaväliä muuttamalla saadaan aikaan karkea induktanssin säätö, jota voidaan tarkentaa lisäämällä sammutuskuristimeen muiden induktanssin säätömenetelmien ratkaisuja. [18, 24]



Kuva 11. Viisipylväinen ratkaisu kolmivaiheiseen muuntajaan [24].

Sammutuskuristimen muuntajatyypin rakenne voidaan toteuttaa suoraan maadoitusmuuntajan kolmivaihekäämitykseen. Tällöin toision käämitys kytketään avokolmioon ensiön tähtikytkennän kanssa. Kuvan 11 muuntajarakenteessa reunimmaisista pylväistä voidaan mekaanisesti liikuttaa, jolloin rautasydämen magneettiset ominaisuudet muuttuvat, josta seuraa muuntajan ekvivalenttisen induktanssin muutos. Muuntajarakenteen muutos voidaan tehdä jännitteisenä, mutta säätö on verrattain hidasta ja epätarkkaa. [24] Avokolmioon kytkettyyn toisioon voidaan toteuttaa esimerkiksi TCR:ään perustuva ratkaisu tarkan säädön aikaansaamiseksi. Rautasydämen liikuttaminen tapahtuu moottoreilla tai muuten mekaanisesti, jolloin liikuttamiseen tarvittavat laitteistot ovat rasittavissa ja kuluvat.

Sammutuskuristimen induktanssia pystytään säätämään myös rautasydämen kyllästymistä muuttamalla. Tällöin sammutuskuristimen rakenteeseen lisätään tasavirtakäämitys, jolla voidaan säätää rautasydämen magneettisia ominaisuuksia. [18]



Kuva 12. Muuntajarakenteen tasavirtakäämityksen kanssa [18].

Magnetoinnilla säädettävän sammutuskuristimen rakenne voi olla esimerkiksi kuvan 12 mukainen. Verkon tähtipisteen ja maan välillä oleva käämitys koostuu reunimmaisten

pylväiden rinnankytketyistä käämityksistä ja niiden kanssa sarjassa olevasta keskipylvään käämityksestä. Nollapiirin virta on kuvassa i_L , joka jakautuu reunimmaisten pylväiden virroiksi i_1 ja i_2 . Keskimmäisessä pylväässä on ilmaväli, jolla säädetään kuristimen pienintä mahdollista kompensointivirtaa. Tasavirtakäämitykset ovat sarjaan kytketty ja ne on sijoitettu reunimmaisiiin pylväisiin nollapiirin käämitysten sisälle, jotta nollapiirissä kulkeva vaihtovirta ei vaikuttaisi niin paljoa tasavirtapiiriin. [18]

Tämän säätömenetelmän heikkouksia ovat pieni säätövara induktanssissa, harmonisten runsas lisääntyminen nollapiirissä kuristimen epälinearisuuden kasvaessa kyllästymisen takia ja tasavirran syötön häiriintyminen indusoituvasta vaihtovirrasta vikatilanteessa. Menetelmä on vielä prototyyppivaiheessa, eikä laajasti markkinoilla, joten siihen voi tulla vielä parannuksia. [18]

4. MENETELMIEN VERTAILU

Suurin ero perinteisten ja modernien maasulkuvirran kompensointilaitteistojen välillä on lisääntynyt tehoelektronikan sisällyttäminen, mikä mahdollistaa nopean ja tarkan säädön. Modernien menetelmien soveltaminen käytäntöön ei kuitenkaan ole aivan ongelmattonta, vaan uusillakin menetelmillä on omat huonot puolensa. Seuraavaksi käydään läpi menetelmien hyviä ja huonoja puolia toisiinsa verrattuna. Vertailussa käydään ensin lyhyesti vanha käsin säädettävä Petersenin kela verrattuna nykyisiin automaattisiin menetelmiin, koska se on suurilta osin vanhentunutta tekniikkaa, eikä sitä ole relevanttia käsitellä nykyisten automaattisesti säätävien maasulkuvirran kompensointilaitteistojen rinnalla.

Modernit automaattisesti säätävät tehoelektronikalla ohjatut maasulkuvirran säätömenetelmät ovat historiallisia mekaanisia säätömenetelmiä paljon edistyneempiä. Mekaanisen kulumisen takia perinteisissä laitteistoissa on lyhyempi käyttöikä kuin moderneissa laitteistoissa ja mekaanisesti säädettäviin laitteistoihin tarvitaan ihminen muuttamaan säätöä. Moderneissa säätömenetelmissä säätö tapahtuu nopeasti ja automaattisesti ilman jakelun keskeytystä, eikä niissä vaadita mekaanista liikettä, joka kuluttaisi osia. Ihmisten tarve säädön kannalta on vähentynyt merkittävästi, joka voidaan tulkita vaikuttavan alentavasti laitteiston elinkaarikustannuksiin työtuntien osalta.

4.1 Maasulkuvirran harmoniset komponentit

Eräs maasulkuvirran kompensointilaitteistossa sovellettavien tehoelektronikkakomponenttien myötä ilmenevä ongelma on nollapiiriin ja sitä kautta vaihesuureisiin vaikuttava virran harmonisten komponenttien kasvu. Tämä ongelma ilmenee, kun kytkiminä käytettyjä puolijohdekomponentteja ohjataan kytkemään kompensointilaitteistoja päälle ja pois epätahdissa vaihtovirtaisen maasulkuvirran peruskomponenttiin, joka on Suomen sähköverkoissa 50 Hz. Harmoniset virran komponentit ovat perustaajuuden monikertoja ja yleensä parittomia sellaisia. Korkeampitaajuiset virtakomponentit käyttäytyvät eri tavoin verkon reaktanssien kanssa kuin perustaajuinen komponentti, jolloin suojaus saattaa toimia epätoivotusti.

Harmonisia virtakomponentteja nollapiiriin aiheuttavat magneettisesti säädettävät laitteistot, joissa laitteisto on magneettisesti saturoitunut sekä laitteistot, joissa ohjataan reaktanssin osia päälle ja pois kesken nollavirran perustaajuuden jakson. Tyristoriohjatut laitteistot ovat esimerkiksi sektionaalinen tyristoriohjattu kuristin ja tyristoriohjattu

kondensaattori. Tällaisia laitteistoja voidaan tosin ohjata pitämällä tietyt reaktanssin osat kokonaan päällä ja loput osat pois päältä, jolloin reaktansseja ei tarvitse kytkeä päälle ja pois kesken perustajuisen virran jakson. Tällainen säätö on kuitenkin epätarkempaa rajatun pienien reaktanssien määrän takia, mutta nollapiirin virtaan ei synny harmonisia komponentteja. Reaktanssien osien lukumäärää kasvattamalla voitaisiin välttyä harmonisten komponenttien synnyltä, koska kaikki tarvittavat osat voitaisiin kytkeä tarvittaessa kokonaan päälle, mutta tällöin laitteiston hinta kasvaisi merkittävästi.

Harmonisten komponenttien syntyminen voidaan välttää käyttämällä sellaisia maasulkuvirran kompensointilaitteistoja, joissa reaktanssia ei säädetä kytkemällä pienempiä osia ja laitteiston magneettinen saturaatio vältetään. Tällaisia moderneja laitteistoja ovat esimerkiksi virtainjektioilaitteistot ja magneettista säätöä käyttävät laitteistot lineaarisella toiminta-alueella sekä perinteisenä laitteistona väliottokytkimellä säädettävä kuristin. Virtainjektioilaitteistolla voidaan myös kompensoida maasulkuvirran harmoniset komponentit ja kasvattaa maasulkuvirran resistiivistä komponenttia, koska nollapiiriin voidaan syöttää virtaa, jolla sammutuskuristimen ekvivalenttinen resistanssi saadaan muuttumaan [13].

4.2 Laitteistojen vaatimukset

Verkon normaalitilassa resonanssisäätäjän säädön testaaminen aiheuttaa nollajännitteen nousua, joka rasittaa laitteistoa ja verkkoa, varsinkin kaapeleita, joissa jänniterasitus kohdistuu ohuisiin eristyskerroksiin. Tällaisessa resonanssin testaamisessa on vaarana suuri nollajännite, jos induktiivinen reaktanssi on säädetty resonanssitilaan tai lähelle sitä. Suuren nollajännitteen vaara on vain esiasetetuissa säädöissä, jossa induktanssin virittäminen tapahtuu verkon tilaa ennustaen ja induktanssi pidetään viritetyssä arvossaan. Verkon tilaa seuraavassa säädöissä viritys tapahtuu vian ilmaantumisen jälkeen hyvin nopeasti, jopa alle kolmen perustajuisen syklin nopeudella [25]. Vian ilmaantuessa säätölaitteisto tekee tarvittavan säädön mittauksiin perustuen, mutta maasulkuvirta on maksimissaan tätä ennen aiheuttaen hyvin lyhyen ja verkon kapasitanssien mukaisen transienttipurkauksen, joka voi laajan verkon tapauksessa aiheuttaa suurenkin virtatransientin. Tarvittavia mittauksia ovat esimerkiksi verkon admittanssien mittaus, maasulkuvirran kompensointilaitteiston läpi kulkeva virran mittaus ja nollajännitteen mittaus.

Vanhemman tyylinen automaattinen resonanssiin perustuva maasulkuvirran kompensointilaitteisto toimii esiasetetusti, joten verkon normaalitilassa laitteiston täytyy kestää jatkuvasti suurtakin jännitettä, joka kasvattaa laitteiston kustannuksia ja lyhentää kom-

ponenttien käyttöikä. Esiasetetun virittämisen heikkouksia verrattuna verkon tilaa seuraavaan viritykseen ovat sen hitaus, säädön monimutkaisuus, herkempi vikaantuminen ja lyhempi käyttöikä [14]. Esiasetetuksi säädöksi voidaan sisällyttää joiltain osin myös virtainjektio, koska sillä saadaan määritettyä induktiivisen reaktanssin arvoa ennen kuin vika ilmaantuu, mutta normaalitilassa sammutuskuristin ei syötä nollapiiriin induktiivista virtaa. Virtainjektioilaitteiston esiasetettu toiminta on hidasta sen takia, koska syötettäviä signaaleja ei voida syöttää samanaikaisesti, vaan signaalit täytyy syöttää verkon nollapiiriin yksitellen. Yksi virtasignaali vie tietyn ajan, jotta se voidaan tulkita luotettavasti. Tarkan säädön saavuttamiseksi joudutaan verkon nollapiiriin syöttämään virtasignaaleja, joiden taajuus kasvaa vain hieman verrattuna edelliseen syötettyyn signaaliin, jolloin säädön pituus luonnollisesti kasvaa testattavien signaalien määrän kasvaessa. Verkon tilaa seuraavan laitteiston ei tarvitse normaalitilassa kestää jännitettä, mutta vikatilanteessa komponenttien on kestävä nollajännitteen ja maasulkuvirran maksimiarvo.

Kuvista 10 ja 12 nähdään, että virtainjektioilaitteisto ja magneettisesti säädettävä kuristin vaativat toimiakseen tasajännitelähteen. Tasajännitteen luominen on oma haasteensa, koska laitteiston asennuspaikassa on oltava erillinen syöttö kyseisten laitteistojen tasajännitepuolen ylläpitämiseksi. Vaihtovirran tasasuuntaaminen ja akuston käyttäminen kasvattavat kustannuksia tarvittavien komponenttien lisääntyessä. Virtainjektioilaitteissa tasajännitelähteen jännitteen on oltava suurempi kuin injektioimiseen tarvittavan vaihtojännitesignaalin jännitteen, koska tehoelektroniikkakomponentit aiheuttavat häviöitä. Tästä syystä tasajännitteen suuruus on oltava riittävä kaikkiin laitteiston mahdollisiin kompensointitilanteisiin, joka kasvattaa akuston kustannuksia.

Uudet ratkaisut olisivatkin mielestäni hyvä toteuttaa laitteistoilla, joilla saadaan seurattua verkon suureita normaalitilassa ja jotka seuraavat verkon tilaa vian ilmaantumisen jälkeen. Tällaisia laitteistoja ovat esimerkiksi virtainjektioilaitteistot, joilla saadaan verkon normaalitilassa resonanssitaajuus selville ja muita tarpeellisia suureita verkonhaltijan käytettäväksi. Resonanssitaajuuden selvittäminen verkon normaalitilassa johtaa siihen, että vian ilmaantuessa olisi maasulkuvirran kompensoinnin taso on määritetty verkon normaalitilan perusteella ainakin karkeasti ja verkon tilan seuranta käyttämällä kompensoinnin taso saadaan tarkasti haluttuun arvoon. Virtainjektioilaitteiston hinta on monimutkaisemman rakenteen ja säätöalgoritmien takia korkeampi.

Kalliita virtainjektioilaitteistoja ei kuitenkaan tarvitsisi asentaa kuin yksi kappale yhtä 110/20 kV pääasemaa kohden käytettäessä hajautettua maasulkuvirran kompensointia yhdessä keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin kanssa. Hajautettu maasulkuvirran

kompensointi voitaisiin toteuttaa verrattain halvemmilla yksiköillä, joiden ansiosta pääasemalle asennettavan virtainjektioilaitteiston vaatimukset laskisivat, josta seuraisi yhteiskustannuksien pienentyminen.

5. YHTEENVETO

Maasulut muodostavat Suomessa hyvin suuren osan jakeluverkon vioista. Vikatilanteissa jännitteinen johdin on kosketuksissa maahan, jolloin maasulkuvirta kulkee johtimen ja maan yhdistävää objektia pitkin. Maasulun aikana vikapaikassa vaaraksi muodostuu kosketusjännite, joka pystyy aiheuttamaan ihmisen tai eläimen sisällä tarpeeksi suuren virran sydänkammiovärinän aikaansaamiseksi. Maasulkuvirran kompensoinnilla voidaan kosketusjännitteitä rajoittaa sekä vähentää verkon jälleenkytkentöjä tietyn tyyppisten maasulkujen sammussa itsestään. Jakeluverkon turvallisuus ja jakelun varmuus siis parantuvat kunnollisen maasulkuvirran kompensoinnin myötä.

Suomen jakeluverkko on murroksessa, koska sähkömarkkinalain vuonna 2013 uudistamisen myötä jakeluverkkoyhtiöille tuli uudet vaatimukset säävarmasta sähkönjakelusta. Alati lisääntyvä maakaapelointi kasvattaa maasulkuvirtaa runsaasti ja osan saman kiskoston verkosta ollessa vielä avojohtoverkkoa jakeluverkkojen vikaherkkyys ei ole täysin poistunut. Näin ollen avojohtoverkossa tapahtuvan maasulun maasulkuvirta on suurempi kuin kaikkien kiskoston lähtöjen ollessa pelkkää avojohtoverkkoa. Jatkuva verkkotopologian ja kytkentätilanteen muuttuminen vaikeuttavat maasulkuvirran selvittämistä, jolloin automaattisesti säätyvät maasulkuvirran kompensointilaitteistot ovat tarpeellisia.

Maasulkuvirran kompensointi ei ole käsitteenä uusi vaan ensimmäisiä maasulkuvirran kompensointilaitteita on asennettu käyttöön jo 1900-luvun alussa. Aluksi maasulkuvirran kompensointiin käytetyt laitteistot olivat manuaalisesti käänkimykimellä säädettäviä keloja ja niiden säätö suoritettiin tekemällä verkkoon hallittuja maasulkuja. Tietotekniikan ja tehoelektronikan kehittyessä maasulkuvirran kompensointiin käytettävät laitteistot ovat kehittyneet huomasti ja vanhat manuaalisesti säädettävät kompensointilaitteistot ovat jääneet kehityksestä jälkeen ja poistuneet markkinoilta lähes kokonaan nykyaikaisen automaattisesti säätyvien kompensointilaitteistojen tultua markkinoille. Manuaalisesti säädettäviä kompensointilaitteistoja käytetään yhä hajautetussa maasulkuvirran kompensoinnissa, missä kuristimen induktanssia tarvitsee säätää vain harvoin asennuksen jälkeen, jolloin heikko säädettävyys on oikeutettua, mutta keskitetyssä kompensoinnissa manuaalisesti säädettävät kuristimet ovat vanhentunutta tekniikkaa.

Modernit maasulkuvirran kompensointilaitteistot voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään: niihin, joissa säädetään passiivisia komponentteja, kuten keloja ja kondensattoreita tyristoriohjatuksi ja niihin, jotka syöttävät laitteistolla nollapiiriin erisuuruisia virta-signaaleja. Tyristoriohjattuja laitteistoja ovat muun muassa sektionaalinen tyristoriohjattu

kuristin ja tyristoriohjattu kondensaattori ja virtasignaaleja säätäviä laitteistoja ovat muun muassa virtainjektiolaitteistot ja eräät magneettisesti säädettävät laitteistot. Tietyn tyyppisellä tyristoriohjauksella nolapiirin virtaan syntyy harmonisia komponentteja, mutta harmonisten komponenttien syöttämisen voi välttää käyttämällä muun tyyppistä ohjausta tyristoreille tai käyttämällä muun tyyppistä laitteistoa maasulkuvirran kompensointiin.

Maasulkuvirran kompensointilaitteistojen vielä kehittyessä laitteistot voivat sisältää muitakin mittauksia ja toiminnallisuuksia, kuin pelkän maasulkuvirran kompensoinnin. Nykyisin esimerkiksi virtainjektiomenetelmällä saadaan selville verkon admittanssit, joista voidaan selvittää muun muassa osittaispurkausten suuruus. Loistehon kompensointia voi yhdistää maasulkuvirran kompensoinnin kanssa, mutta tällaisten ratkaisujen elinkaarikustannukset ovat korkeammat kuin erikseen toteutettaessa. Mielestäni älykkään sähköverkon kehittyessä maasulkuvirran kompensointilaitteistot voisivat hyödyntää verkon topologiaa suoraan tietojärjestelmästä, jolloin kompensointiaste olisi karkeasti tiedossa ilman, että laitteiston pitää itse mitata verkon suureita.

LÄHTEET

- [1] J. Mörsky, Relesuojaustekniikka, Otatieto, 1992.
- [2] V. Hälvä, Verkko-omaisuuden hallinta Elenia Oy:ssa, vierailuluento 17.2.2020, Sähköverkko-omaisuuden hallinta -kurssi, Tampereen yliopisto, Tampere, 2020.
- [3] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, 2.p., Gaudeamus Helsinki University Press, 2009.
- [4] H. Aalto, sähköpostihaastattelu, Elenia Oy, huhtikuu 2020.
- [5] Y. Zhang, ACTIVE CURRENT INJECTION METHOD FOR LIMITING GROUND FAULT CURRENT HARMONICS IN UNDERGROUND COAL MINES, opinnäyte-työ, Kentuckyn yliopisto, 1 Jan. 2014, https://uknowledge.uky.edu/mng_etds/15, viitattu 7.3.2020
- [6] P. Kangasluoma, Medium voltage network residual earth fault current estimation methods, Diplomityö, Tampereen yliopisto, 2019, <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/118092>, viitattu 13.3.2020
- [7] SFS 6001:2018, Suurjänniteasennukset, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2018.
- [8] W. D. Hardaway and W. W. Lewis, Test and operation of Petersen coil on 100-kv system of public service company of Colorado, Electrical Engineering, vol. 57, no. 6., June 1938, pp. 295-306, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6431322>, viitattu 8.3.2020
- [9] A. Nikander, E. Lakervi, J. Suontausta, Applications of transient phenomena during earth-faults in electricity distribution networks, *Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95*, Singapore, 1995, pp. 234-239 vol.1, doi: 10.1109/EMPD.1995.500731, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/500731>, viitattu 16.5.2020
- [10] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, 4. korj. ja täydennetty, Otatieto, 2015.
- [11] L. Hua, Y. Likui, L. Lingling, H. Shanshan, H. Pengju, The research of a new arc suppression coil, 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, 2011, pp. 319-322, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6122998>, viitattu 14.3.2020

- [12] M. Lehtonen, E. Saarijärvi, K. Nurminen, Kevyt kaapelijärjestelmä haja-asutusalueiden tarpeisiin - KAPELI-projektin loppuraportti, Aalto-yliopisto, Espoo, 2010, 50 s. + liitteet. 2 s., https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/10/kapeli_loppuraportti_286.pdf, viitattu 17.5.2020
- [13] C. Lu, C. Qiaofu, Z. Yu, Design principle of a novel automatic tuning arc suppression coil system, 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 4483-4488, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4771589>, viitattu 14.3.2020
- [14] C. Zhongren, Z. Bo, M. Ni, Study on the arc-suppression coil based on sectional TCR, 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, pp. 2566-2569, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5157837>, viitattu 16.3.2020
- [15] M.J. Heathcote, J & P Transformer Book, Newnes, 13th ed., 2007, https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpJPTBAPT1/viewer-Type:toc//root_slug:viewerType%3AtoC/url_slug:root_slug%3Aj-p-transformer-book?kpromoter=federation, viitattu 14.3.2020
- [16] Multirel Oy, www-sivut, <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>, viitattu 17.5.2020
- [17] X. Yuqin, W. Zengping, Z. Hai, The Automatic Following Control of Arc Suppression Coil with Thyristor Switched Capacitors, 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2006, pp. 1-5, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4025792>, viitattu 20.3.2020
- [18] Caixu, A new arc-suppression coil with magnetic bias and its characteristics analysis, Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003 /CEMS, vol.2, 2003, pp. 903-906, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1274196>, viitattu 22.3.2020
- [19] J. Tian, Q. Chen, L. Cheng, Y. Zhang, Arc-suppression coil based on transformer with controlled load, IET Electric Power Applications, vol. 5, no. 8, September 2011, pp. 644-653, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6019080>, viitattu 21.3.2020
- [20] Z. Chen, H. Wang, F. Chen, Research on Damping Ratio and Off-Resonant Degree of Compensation Network, 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering

- Conference, 2011, pp. 1-4, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5748380>, viitattu 16.3.2020
- [21] S. Sugimoto, S. Neo, H. Arita, J. Kida, Y. Matsui, T. Yamagiwa, Thyristor controlled ground fault current limiting system for ungrounded power distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, pp. 940-945, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/489355>, viitattu 18.3.2020
- [22] L. Yancun, F. Chuang, Application of thyristor in auto-tuning arc suppression coils, Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 3, APEC 2005, 2005, pp. 1811-1816, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1453295>, viitattu 20.3.2020
- [23] Maviko Oy, www-sivut, <https://www.maviko.fi/tuotteet-ja-palvelut-maasulkuvirran-kompensointi-efc60m/>, viitattu 17.5.2020
- [24] W. Chonglin, L. Rui, L. Jianhua, Z. Dongliang, X. Xue, Analysis on principle of operation of arc-suppression coil based on thyristor controlled reactor, 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 2, 2005, pp. 1305-1308, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1574991>, viitattu 22.3.2020
- [25] K. M. Winter, "The RCC Ground Fault Neutralizer — A novel scheme for fast earth-fault protection," *CIREN 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2005, pp. 1-4, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5427849>, viitattu 16.4.2020