



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALEKSI KARJALAINEN
METALLOITUJEN OHUTKALVOKONDENSAATTOREIDEN KEHI-
TYSNÄKYMÄT

Kandidaatintyö

Tarkastaja: tutkijatohtori Ilkka Rytö-
luoto
7.5.2018

TIIVISTELMÄ

Alexi Karjalainen: Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden kehitysnäkymät
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 38 sivua
Toukokuu 2018
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatintutkinto-ohjelma
Pääaine: Sähkövoimatekniikka
Tarkastaja: Tutkijatohtori Ilkka Rytöluoto

Avainsanat: metalloitu ohutkalvokondensaattori, eriste, polymeeri, nanokomposiitti, tuotanto, itseparantuminen

Kondensaattorit ovat erittäin kriittisiä komponentteja monissa eri sähköjärjestelmissä, kuten sähköenergiatekniikan sovelluksissa ja elektroniikkapiireissä. Ohutkalvokondensaattoreiden elektrodien toteuttaminen metalloinnilla mahdollistaa kondensaattoreiden käytön suuremmilla sähkökentillä itseparantumiskyvyn ansiosta. Suuremmilla sähkökentän voimakkuuksilla myös kondensaattorin energiatiheys kasvaa, mikä on suotavaa kaikissa tapauksissa. Itseparantumisen ansiosta metalloidut ohutkalvokondensaattorit ovat myös luotettavampia, sillä ne kykenevät kestämaan useita rakenteessa tapahtuvia läpilyöntejä.

Jatkuva tekniikan kehitys vaatii kondensaattoreilta enemmän esimerkiksi energiatihedden, käyttölämpötilan ja lämmönjohtavuuden kannalta. Metalloiduilla ohutkalvokondensaattoreilla on myös rajoituksia maksimivirrälle sekä ne ovat alttiita erilaisille korroosioprosesseille. Näiden vaatimusten ja rajoitteiden rajoissa ei välttämättä ole mahdollista pysyä perinteisillä eristemateriaaleilla, vaan kondensaattoreihin on kehitelty useita erilaisia uusia eristemateriaaliratkaisuja, esimerkiksi muokkaamalla perinteisiä eristemateriaaleja tai kehittelemällä täysin uusia eristemateriaaleja. Eräs erittäin lupaava ratkaisu on nanokomposiittien hyödyntäminen.

Vaikka metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden kehitys onkin pääosin eristemateriaaleissa, on myös tuotannon ja rakenteen toteutuksessa parantumisen varaa. Uudet eristemateriaalit on pystyttävä tuottamaan tehokkaasti ja taloudellisesti, mikä vaatii tuotantomenetelmien optimointia ja suunnittelua. Elektrodien ja muun rakenteen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon muun muassa itseparantumisilmiö sekä lämpöhäviöt.

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan aluksi eristeiden ja kondensaattoreiden teoreettiseen taustaan, minkä jälkeen perehdytään tarkemmin metalloituihin ohutkalvokondensaattoreihin ja niissä käytettäviin eristemateriaaleihin. Kehitysnäkymiä työssä tarkastellaan pääosin eristemateriaaliratkaisujen kannalta, mutta myös muutamia tuotantoon ja rakenteelliseen toteutukseen liittyviä asioita käydään läpi.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ERISTEET SÄHKÖKENTÄSSÄ.....	3
2.1	Eristeen määrittely elektronivyöteorialla	3
2.2	Polarisaatio	4
2.3	Suskeptibiliteetti ja suhteellinen permittiivisyys.....	5
2.4	Dielektriset häviöt	7
2.5	Läpilyönti-ilmiö eristerakenteissa	8
3.	KONDENSAATTORIT.....	10
3.1	Rakenne ja toimintaperiaate	10
3.2	Kondensaattorit piirianalysissä	14
3.3	Kondensaattorin häviökerroin	15
3.4	Ohutkalvokondensaattorit	16
3.5	Metalloidut ohutkalvokondensaattorit.....	16
3.5.1	Itseparantumisen.....	18
3.5.2	Vioittumismekanismit ja ongelmat	19
3.5.3	Käyttökohteet.....	20
4.	NYKYTILANNE JA KEHITYS MATERIAALIEN, TUOTANNON JA TOTEUTUKSEN KANNALTA.....	22
4.1	Nykyisin käytössä olevat eristemateriaalit ohutkalvokondensaattoreissa....	22
4.1.1	Polymeerit	22
4.1.2	Eristeiden ominaisuudet.....	24
4.2	Uudet eristemateriaaliratkaisut.....	26
4.3	Tuotanto ja toteutus	29
5.	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET.....	33

1. JOHDANTO

Sähkötekniikan jatkuva kehitys ja nopeasti lisääntyvä elektroniikka ovat luoneet kasvavan tarpeen yliaaltosuotimille sekä loistehon kompensoinnille ja sitä kautta kondensaattoreille. Myös tarve nopealle energian varastoinnille on edistänyt kondensaattoreiden kehitystä ajan saatossa. Tehoelektronikkasovellukset ja niiden kehitys vaativat entistä kestävämpiä ja luotettavampia kondensaattoreita paremmalla tehokkuudella ja energiatihedellä. Pitkien etäisyyksien sähkönsiirtoa maiden ja voimalaitosten välillä toteutetaan yhä enemmän perinteisten vaihtovirtajärjestelmien sijaan suurjännitetasavirralla, sillä se on usein parempi ratkaisu teknisistä, taloudellisista sekä ympäristöllisistä syistä [1]. Tasavirtajärjestelmässä käytettävät tasasuuntaajat aiheuttavat jännitesäröä, joten kondensaattoreita tarvitaan stabiloimaan jännite sekä takaamaan komponenttien luotettava toimiminen [2]. Tasavirtajärjestelmät ja muut teollisuus- sekä kuluttajasovellukset, kuten yleistyvät sähköautot ja kuluttajaelektroniikka, ovat tärkeimpiä kehityksen kannustimia kondensaattoreille. Lisäksi armeijalla on erilaisia suuritehoisia pulssisovelluksia, joissa hyödynnetään kondensaattoreita. Armeijan investoinnit kondensaattoriteknologiaan ovat suuri osa kondensaattoreiden kehityksen rahoituksesta. [3]

Korkea jännite sekä vaikeat toimintaolosuhteet vaativat tehoelektronikassa käytettäviltä kondensaattoreilta paljon. Tärkeimmät kehityskohdat kondensaattoreille ja erityisesti niissä käytettäville eristerakenteille ovat maksimikäyttölämpötilan, energiatihedden ja lämmönjohtavuuden kasvattaminen. Moderneissa sovelluskohteissa käytetty tehoelektroniikka vaatii kaikkien näiden ominaisuuksien kehittymistä samanaikaisesti. [3] Huomiota täytyy ottaa myös luotettavuus, sillä esimerkiksi vaativissa suurjännitetasavirtasovelluksissa kondensaattoreiden elinikäodotus voi olla jopa 30–40 vuotta [4].

Ohutkalvokondensaattoreiden ominaisuudet tekevät niistä sopivia erityisesti vaativiin käyttökohteisiin. Ne kestävät suurta jännite- ja virtarasiitusta, niiden kapasitanssi vaihtelee vähemmän jännitteen vaihdellessa ja ne ovat luotettavampia kuin vaihtoehtoiset elektrolyttikondensaattorit. Metalloiduilla ohutkalvokondensaattoreilla on myös ainutlaatuinen kyky itseparantua useista eristerakenteesta tapahtuneista läpilyönneistä, minkä takia ne olivatkin erittäin haluttuja jo 1950-luvulla. [5]

Tässä kandidaatintyössä keskitytään metalloituihin ohutkalvokondensaattoreihin ja niiden kehitysnäkyymiin. Ensiksi luodaan pohjatieto eristeiden teoriaan sekä kondensaattoreiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen yleisellä tasolla. Eristeitä käsitellään teoreettiselta pohjalta luvussa 2. Tämän jälkeen luvussa 3 edetään kondensaattoreiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen sekä syvennyttään metalloituihin ohutkalvokondensaattoreihin. Luvussa 4 keskitytään kondensaattoreissa käytettyihin eristemateriaaleihin ja

niiden dielektristen ominaisuuksien vertailuun sekä esitetään motivaatio uusien eristemateriaalien kehittämiseksi. Luvussa esitellään myös uusia eristemateriaaliratkaisuja, kuten nanokomposiitit. Luvun 4 lopussa käsitellään metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden kehitysnäkymiä tuotannon ja rakenteellisen toteutuksen kannalta. Luvussa 5 on lyhyt yhteenveto työn tärkeimmistä asioista ja metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden kehitysnäkymistä.

2. ERISTEET SÄHKÖKENTÄSSÄ

Ideaalinen eriste on aine, jossa kaikki varaukset ovat sidottuina materiaalin rakenteen myötä jo materiaalin atomeihin ja molekyyliin. Ideaalisella eristeellä ei esiinny lainkaan johtavuutta eli sen resistiivisyys on siis ääretön. Ideaalista eristemateriaalia ei kuitenkaan käytännössä ole olemassa, vaan käytännön eristeillä on aina jonkin verran vapaita varauksenkuljettajia, kuten elektroneja ja ioneja. Eristeiden johtavuus on kuitenkin käytännön eristeissä suhteellisen pieni, sillä vapaat varauksenkuljettajat eivät pääse liikkumaan hyvin eristeen sähköisen rakenteen vuoksi. Eristeiden vapaat varauksenkuljettajat pääsevät kuitenkin liikkumaan vapaasti, jos eristemateriaali on erittäin suuren sähkökentän tai korkean lämpötilan vaikutuksen alaisena. Eristeenä voi toimia kiinteä-, neste- tai kaasumateriaali ja jokaisella eristeellä on sille ominaiset suureet. Tässä luvussa perehdytään näihin eristeiden suureisiin sekä eristeiden käyttäytymiseen sähkökentässä, jotta myöhemmin voidaan ymmärtää kondensaattoreiden toiminta ja niihin liittyvät ominaisuudet ja ilmiöt.

2.1 Eristeen määrittely elektronivyöteorialla

Bohrin atomimallin mukaan vain tietyt energiat ja niitä vastaavat orbitaalit ovat atomin elektroneille mahdollisia. Kun useat atomit kiinnittyvät toisiinsa kovalenttisilla sidoksilla, muodostuu molekyyli, jossa elektronien energiatasot eivät ole samat kuin alkupe- räisissä atomeissa. Aineiden sidokset muodostuvat niiden valenssielektronien avulla, jotka sijaitsevat molekyyliorbitaaleilla. Molekyyliorbitaalit muodostuvat alkuperäisten atomien atomiorbitaalien hajotessa aineen muodostamisen yhteydessä. Molekyyliin voi yhdistyä edelleen uusia atomeita, jolloin yksittäisistä energiatiloista muodostuu energia- vöitä. Energiavyöllä elektronit voivat saada lähes minkä tahansa energiatilan, kun taas vöiden väliin jäävissä tiloissa energiatiloja ei ole. Energiavöiden väliin jääviä tiloja kut- sutaan energia-aukoiksi. Kyseistä energiatilojen ryhmittymistä voidksi kutsutaan elektro- nivyöteoriaksi. Uloimman miehitetyn elektronivyön, valenssivyön, yläpuolella on ensim- mäinen vapaa energiavyö, jota kutsutaan johtavuusvyöksi. Johtavuusvyön elektronit voi- vat liikkua vapaasti systeemissä, kun taas valenssivyöllä olevat elektronit ovat lokaalisti sidottuina lähiympäristön atomeihin. [6][7]

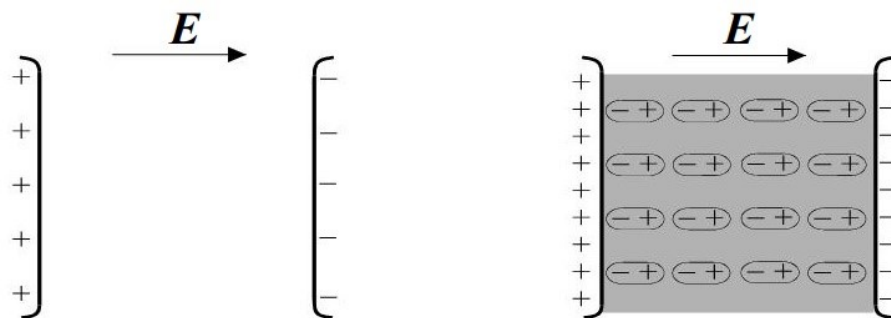
Materiaalit voidaan jakaa sähköisten ominaisuuksien mukaan johteisiin, puolijohteisiin ja eristeisiin. Tämä jako voidaan selittää monella tapaa, mutta tässä työssä jako perustel- laan elektronivyöteorian avulla. Metalleilla, jotka ovat johteita, osa elektroneista pääsee liikkumaan vapaasti rakenteessa, sillä valenssi- ja johtavuusvyöt ovat osittain päällekkäin. Puolijohteilla ja eristeillä puolestaan valenssi- ja johtavuusvöiden väliin jää energia- aukko. Ero puolijohteiden ja eristeiden välille voidaan määrittellä energia-aukon suuruu- den avulla: puolijohteilla energia-aukko on muutaman elektronivoltin luokkaa, kun taas

eristeillä energia-aukon suuruus on suurempi kuin n. 2 eV. Puolijohdeiden johtavuutta voidaan muuttaa nostamalla elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle virittämällä puolijohdetta termisesti, sähkömagneettisesti tai sähkökentän avulla. Eristeillä puolestaan viritys ei välttämättä riitä elektronien nostamiseen eristeiden suuremman energia-aukon takia, jolloin vapaita varauksenkuljettajia on vähän. [7]

2.2 Polarisaatio

Kun eriste tuodaan ulkoisen sähkökentän vaikutusalueelle, sen sanotaan polarisoituvan. Polarisoituminen tarkoittaa sitä, että aineen positiiviset ja negatiiviset osat siirtyvät alkuperäisestä asemastaan kentän aiheuttaman voiman takia. Atomien positiiviset ytimet pyrkivät siirtymään sähkökentän suuntaan ja negatiiviset elektronit puolestaan kenttää vastaan. Polarisoitumisen ansiosta eriste kykenee varastoimaan itsessään enemmän varausta ja sähköistä energiaa. Vaihtojännitteellä molekyylien kääntyminen polarisaation vaikutuksesta aiheuttaa kitkaa ja täten lämmittää eristettä. Vaihtojännitteellä eristemateriaalin polarisaatioon liittyvät dielektriset häviöt tuottavatkin eniten tehohäviöitä eristeissä. [8, s. 50–51][9, s. 68]

Polarisoituminen voi tapahtua neljällä eri tavalla. Elektronipolarisaatiossa elektroniverho liikkuu atomin positiiviseen ytimeen nähden. Atomipolarisaatiossa puolestaan aineen positiiviset ja negatiiviset atomit ja ionit liikkuvat toisiinsa nähden. Dipolipolarisaatio on merkittävin polarisoitumistapa orgaanista alkuperää olevien eristeiden ja useiden polymerien yhteydessä. Dipolipolarisaatiossa aineen molekyylit kääntyvät siten, että niiden dipolimomentit ovat sähkökentän suuntaisesti kuvan 2.1 mukaisesti. [8, s. 50]



Kuva 2.1: Sähkökenttä ilman eristettä (vasemmalla) ja eristeen polarisoituminen sähkökentässä (oikealla) [10].

Kuvan 2.1 molemmissa tapauksissa sähkökentän voimakkuus E on sama, sillä eristeessä olevien dipolien varaukset kumoavat toisensa. Positiiviselle ja negatiiviselle elektrodille kertyy kuitenkin enemmän varausta polarisaation vaikutuksesta. Dipolipolarisaatio ilmenee merkittävimmin aineissa, joissa on suuria ja epäsymmetrisesti rakentuneita molekyylejä.

lejä. Eri aineiden rajapinnoilla heterogeenisissa eristeissä esiintyy avaruusvarauspolarisaatiota, jossa positiiviset ja negatiiviset varauksenkuljettajat kasaantuvat kyseisille rajapinnoille sähkökentän aiheuttaman voiman ansiosta. Avaruusvarauspolarisaatio ilmenee esimerkiksi elektrolyyttikondensaattoreissa, joissa polarisaatio tapahtuu erittäin hitaasti. [8, s. 50–51]

2.3 Suskeptibiliteetti ja suhteellinen permittiivisyys

Sähkökenttää voidaan kuvata sähkövuon tiheydellä \mathbf{D} , joka on verrannollinen sähkökentän voimakkuuteen väliainemateriaalin ominaisuuksien kautta. Sähkövuon tiheyden määritelmä voidaan johtaa Gaussin laista sähkökentälle muotoon

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (2.1)$$

jossa ε_0 on tyhjiön permittiivisyys ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm), \mathbf{P} polarisaatiotiheys ja ε_r eristeen suhteellinen permittiivisyys. Permittiivisyys on jokaiselle aineelle ominainen suure, joka kuvaa aineen kykyä polarisoitua sähkökentässä ja siten lisätä sähkövarausta. [10] Tyypillisesti eristeen absoluuttisen permittiivisyyden sijaan käytetään suhteellista permittiivisyyttä, joka voidaan lausua muodossa

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (2.2)$$

jossa χ_e on eristemateriaalin dimensioton sähköinen susceptibiliteetti, joka kuvaa sen tyhjiöstä poikkeavaa polarisoitumiskykyä. Kuten kaavasta 2.2 huomataan, kaikkien aineiden suhteellinen permittiivisyys ε_r on aina suurempi kuin yksi, sillä $\chi_e > 0$. [8, s. 20] Taulukossa 2.1 on esitetty muutamia yleisiä eristemateriaaleja ja niiden suhteellisia permittiivisyyksiä. Suhteellinen permittiivisyys ja susceptibiliteetti ovat usein määritelty vain tietyille lämpötila- ja taajuusalueelle sekä niiden arvot vaihtelevat myös näyttekappalekohtaisesti esimerkiksi kappaleen iän ja valmistusmenetelmän mukaan [11]. Taulukon 2.1 suhteellisen permittiivisyyden arvosta ilmalle on hyvä huomauttaa, että se ei ole tasan yksi, sillä teoriassa vain tyhjiön suhteellinen permittiivisyys on tasan yksi. Ilman, kuten muidenkin kaasujen suhteellisen permittiivisyyden arvo on paineen funktio, mutta vaihtelu on kuitenkin hyvin pientä, joten käytännössä ilmalle voidaan käyttää suhteellisen permittiivisyyden arvoa $\varepsilon_r = 1$.

Taulukko 2.1: Yleisesti käytössä olevien aineiden suhteellisen permittiivisyyden arvoja [9][11][12, s. 6]

Eristemateriaali	Suhteellinen permittiivisyys (ϵ_r)
ilma (1 atm)	1,0
puu	2,5 – 8,0
muuntajaöljy	2,2
polypropeeni	2,2
polyeteeni	2,3
kuiva paperi	1,8
öljyimpregnoitu paperi	3,6
alumiinioksidi	4,5
tantaalioksidi	27,6
kiille	5 – 7
bariumtitanaatti	> 10 000
lasi	5 – 10
posliini	5.5
epoksihartsi	3.6

Suhteellisen permittiivisyyden arvoon vaikuttaa myös sähkökentän voimakkuus, mutta useiden materiaalien kohdalla vaikutus jää kuitenkin merkittömän pieneksi [12, s. 5–6]. On kuitenkin hyvä huomata, että suurilla sähkökentän voimakkuuksilla suhteellisen permittiivisyyden arvo voi pienentyä merkittävästikin. Esimerkiksi, kun tarkastellaan veden suhteellista permittiivisyyttä sähkökentässä, jonka $E = 1 \cdot 10^9$ V/m, niin suhteellinen permittiivisyys on 50 % pienempi kuin normaalitilanteessa [13, s. 72].

Eristeen suhteellinen permittiivisyys kuvaa siis sen eristyskykyä ja sillä on suuri merkitys käytännön eristerakenteiden suunnittelussa. Vaikka suurempi suhteellinen permittiivisyys pienentää sähkökentän voimakkuutta eristeessä, kuten kaavasta 2.1 nähdään, niin käytännön eristerakenteissa permittiivisyyden vaikutus ei ole niin suoraviivaista. Kerros-

tetuissa eristerakenteissa eriste, jolla on pienempi suhteellinen permittiivisyys, kokee suuremman rasituksen. [8, s. 20–21] Tämä ilmenee esimerkiksi siten, että kiinteisiin eristerakenteisiin jääneet ilmakuplat, joilla on pienempi suhteellinen permittiivisyys, kokevat suuremman sähkökentän voimakkuuden, mikä voi aiheuttaa ongelmia, kuten osittaispurkauksia. Kondensaattoreilla eristemateriaalin permittiivisyyden kasvu kasvattaa kondensaattorin kapasitanssia ja energiatiheyttä, mikä on suotavaa, mutta esimerkiksi kaapelien tapauksessa suuremman permittiivisyyden ansiosta kasvanut kapasitanssi voi olla haitallista sähköverkon toiminnalle. On kuitenkin hyvä ottaa myös huomioon, että materiaalin dielektriset ominaisuudet eivät ole ainoa kriteeri eristemateriaalia valittaessa. Valinnassa on huomioitava monia muitakin tekijöitä, kuten hinta ja saatavuus, koko ja paino, mekaaninen lujuus sekä stabiilisuus ääriämpötiloissa. [14, s. 23]

2.4 Dielektriset häviöt

Käytännön eristeissä syntyy aina tehohäviöitä, joita kutsutaan dielektriseksi häviöiksi. Dielektriset häviöt aiheutuvat jälkivaikutuksen ja molekyylikitkan takia. Molekyylikitkalla tarkoitetaan eristeessä olevien molekyylien liikkeen rajoittumista kitkan vaikutuksesta. Polarisaatiotapahtuma jää aina hieman jälkeen sähkökentästä molekyylikitkan ja molekyylien hitausmomentin takia. Tätä ilmiötä kutsutaan dielektriseksi jälkivaikutukseksi. [8, s. 50]

Kuten aiemmin mainittiin, eristeet eivät ole koskaan ideaalisia, vaan niissä on aina hieman johtavuutta, mikä aiheuttaa resistiivisiä tehohäviöitä. Johtavuuden merkitys tehohäviöihin on erityisesti tasajännitteellä suuri. Eristeiden tehohäviöt kasvavat myös lämpötilan kasvaessa, sillä johtavuus on lämpötilan funktio. [8, s. 51]

Eristeen permittiivisyys voidaan esittää kompleksisena, jolloin permittiivisyys on muotoa

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - \delta, \quad (2.3)$$

jossa ε' on polarisaatiosta määräytyvä osa ja ε'' johtavuudesta määräytyvä, häviöitä aiheuttava osa. Kaavassa 2.3 esiintyvän polaarimuodon kulma δ on eristyksen häviökulma, joka kuvaa eristeiden epäideaalisuutta. Eristeiden häviöitä kuvataan usein häviökertoimella $\tan(\delta)$, jolle pätee

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \approx \frac{\varepsilon''}{\varepsilon}. \quad (2.4)$$

Kaavassa 2.4 tehty approksimointi voidaan usein tehdä, sillä eristeiden johtavuus on usein erittäin vähäistä ($\varepsilon'' \ll \varepsilon'$), jolloin kompleksisen permittiivisyyden reaalin osa voidaan pyöristää kokonaispermittiivisyydeksi $\varepsilon' \approx \varepsilon$. [8, s. 52]

Eristeiden $\tan(\delta)$ -mittauksia käytetään tarkkailemaan eristeiden kuntoa, sillä häviökertoimen suuruus kasvaa eristeiden kunnon heikentyessä [8, s. 53]. Häviökerrointa käytetään

myös kondensaattoreiden yhteydessä kuvaamaan kondensaattorin kapasitiivisten ominaisuuksien suhdetta häviöihin. Kondensaattoreiden häviökertoimeen perehdytään tarkemmin luvussa 3.

2.5 Läpilyönti-ilmiö eristerakenteissa

Kuten aiemmin mainittiin, käytännön eristeet eivät ole koskaan ideaalisia, vaan niiden läpi kulkee hieman vuotovirtaa, kun eristeen yli vaikuttaa jännite. Jos tämä vuotovirta pääsee kasvamaan riittävän suureksi, eristeessä tapahtuu sähköpurkauksia tai eriste on vaurioitumassa. Jos eristeen eristysominaisuudet katoavat täydellisesti, voidaan sanoa sähköpurkauksen olleen täydellinen. Täydellisessä sähköpurkauksessa eristeen läpi kulkeva virta kasvaa suureksi ja sen yli oleva jännite on pienentynyt merkittävästi. Purkaus voidaan havaita eristeessä voimakkaasti ionisoituneena, hyvin kuumana kanavana, jota kutsutaan valokaareksi. [8, s. 59]

Jos täydellinen sähköpurkaus kulkeutuu koko eristerakenteen läpi, voidaan sitä kutsua läpilyöntiksi. Läpilyöntiprosessi on aina samanlainen, mutta purkauskanavan muodostuminen voi johtua eri syistä. Syynä purkauskanavan muodostumiseen voi olla sähköiset, termiset ja sähkömekaaniset ilmiöt. Läpilyönti voi aiheutua myös osittaispurkauksista. Eristemateriaalin kykyä kestää läpilyöntejä mitataan läpilyöntilujuudella, mikä kuvaa sähköisen rasituksen maksimin pituusyksikköä kohti (MV/m, kV/mm, V/ μ m), mitä materiaali pystyy jatkuvasti kestäämään menettämättä eristeominaisuuksiaan. [7][8, s. 59]

Läpilyönneistä aiheutuneet valokaaret vaurioittavat nestemäistä ja kiinteää eristettä ja täten pienentävät pysyvästi niiden jännitelujuutta. Kaasueristeiden tapauksessa valokaari ei yleensä vaurioita eristettä pysyvästi, vaan kaasut toimivat edelleen erinomaisena eristeenä. Kaasujen sanotaankin olevan palautuvia eristeitä. [8, s. 59] Seuraavaksi käsitellään ainoastaan kiinteiden aineiden läpilyöntiä, sillä tässä työssä käsiteltävien kondensaattoreiden eristeinä käytetään pääosin kiinteitä aineita.

Sähköinen läpilyönti tapahtuu, kun voimakas ulkoinen sähkökenttä antaa riittävän määrän energiaa eristeessä oleville varauksenkuljettajille, jotka täten ionisoivat eristeen atomeja ja molekyyliä. Ionisointi puolestaan lisää varauksenkuljettajien määrää entisestään, ja nämä uudet varauksenkuljettajat jatkavat ionisointia edelleen. Näin ollen varauksenkuljettajien määrä kasvaa vyörymäisesti ja vähitellen kasvanut virta vaurioittaa eristettä sekä lopulta johtaa läpilyöntiin. [7][8, s. 125–126]

Termisessä läpilyönissä varauksenkuljettajien määrä kasvaa puolestaan lisääntyvän lämpöenergian takia. Kun lämpöenergia kasvaa riittävän suureksi, se voi aiheuttaa termistä ionisaatiota ja jälleen varauksenkuljettajien määrän vyörymäisen nousun. Eristeessä kulkeva virta kasvaa, kun eristeeseen vaikuttaa ulkoinen sähkökenttä. Virran kasvun myötä myös eristeen lämpötila kasvaa, mikä lopulta johtaa läpilyöntiin. [7][8, s. 127]

Sähkömekaaninen läpilyönti tapahtuu tyypillisesti vain pehmeissä eristeissä. Elektrodeilla olevat vastakkaismerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa Coulombin lain mukaan, jolloin elektrodien välissä oleva eriste kokee mekaanisen paineen ja puristuu kasaan. Coulombin lain mukaan varauksien aiheuttama voima on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön, joten eristeen puristuessa kasaan, varauksien aiheuttama voima kasvaa entisestään. Elektrodien välisen etäisyyden pienentyessä myös sähkökentän voimakkuus eristeessä kasvaa, jolloin lopulta riittävän suuri kentän voimakkuus aiheuttaa läpilyönnin. [8, s. 125][12]

Osittaispurkaus tapahtuu, kun eristeeseen on jäänyt esimerkiksi pieniä ilmataskuja ja läpilyönti tapahtuu näissä taskuissa. Ilmataskuissa esiintyy läpilyöntejä todennäköisemmin kuin muualla eristerakenteessa, sillä ilman suhteellinen permittiivisyys on pienempi kuin itse eristemateriaalin (ks. taulukko 2.1). Ilmataskuissa tapahtuvat läpilyönnit vaurioittavat/vanhentavat taskun ympärillä olevaa eristemateriaalia, mikä voi lopulta johtaa koko eristeen läpilyöntiin. [8, s. 126]

3. KONDENSAATTORIT

Tässä kappaleessa tutustutaan sähkötekniikan yhteen tärkeimpään peruskomponenttiin, kondensaattoriin. Luvun alussa käydään läpi yleisesti kondensaattoreiden rakenne, toimintaperiaate sekä hieman kondensaattoreiden tarkastelua sähköpiireissä. Luvussa esitellään tärkeimmät kondensaattoreiden ominaisuudet sekä esitetään muutamia oleellisia laskukaavoja ominaisuuksien ymmärtämisen sekä yleisen teorian tueksi. Alustavan kondensaattoreiden teorian jälkeen, luvussa tutustutaan metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen sekä niille ominaiseen kykyyn itseparantua. Luvussa pyritään kondensaattoreiden perustietojen avulla tutustumaan metalloituihin ohutkalvokondensaattoreihin, jotta myöhemmin voitaisiin ymmärtää niihin liittyvät kehitysnäkökulmat.

3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Yksinkertaisin kondensaattori koostuu kahdesta sähköä johtavasta elektrodilevystä ja niiden välissä olevasta eristemateriaalista, kuten kuvassa 3.1 on esitetty. Toiminnan edellytyksenä kondensaattorin elektrodit on kytkettävä jännitelähteeseen siten, että toinen elektrodista varautuu positiivisella varauksella $+Q$ ja toinen negatiivisella varauksella $-Q$. Varautuneiden elektrodien väliin eristemateriaaliin syntyy sähkökenttä, joka puolestaan aiheuttaa eristemateriaalin polarisoitumisen. [15][16, s. 810] Polarisoitumisen myötä eristerakenteeseen varastoituu sähköenergiaa, kunnes kondensaattorin varaus puretaan. Varastoituneen energian purkautuessa kondensaattorin elektrodien ja ulkoiseen koteloon kohdistuu mekaanisia voimia ja rasituksia, jotka voivat aiheuttaa kondensaattorin eristemateriaalin murtumista. [17]

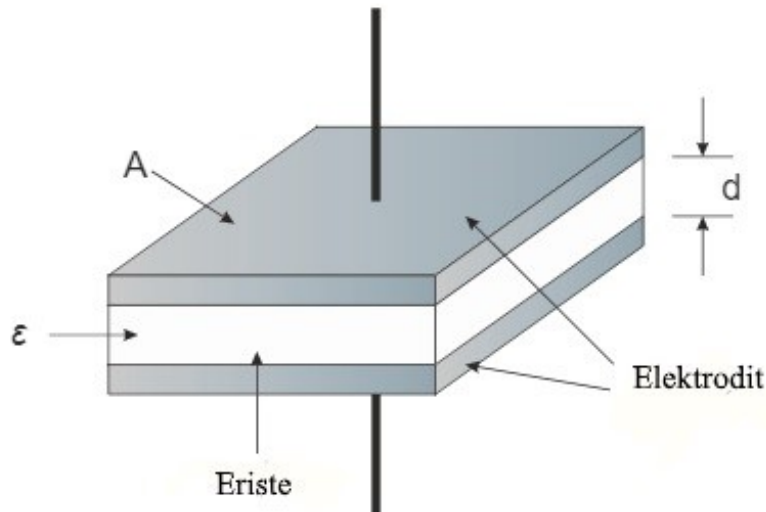
Kondensaattoriin kytketyn jännitelähteen ja sen aiheuttaman varautumisen myötä kondensaattorin yli elektrodien välille muodostuu potentiaaliero U . Elektrodien kokonaisvaraus Q ja kondensaattorin yli oleva jännite U ovat suoraan verrannollisia toisiinsa nähden kondensaattorille ominaisen suureen, kapasitanssin C mukaan. Kapasitanssin yksikkö on F (faradi). Kapasitanssi voidaan määrittellä siis kaavalla

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (3.1)$$

Toinen tapa kapasitanssin laskemiselle voidaan johtaa kondensaattorin geometrian ja eristemateriaalin ominaisuuksien mukaan. Kapasitanssin kaava on nyt muotoa

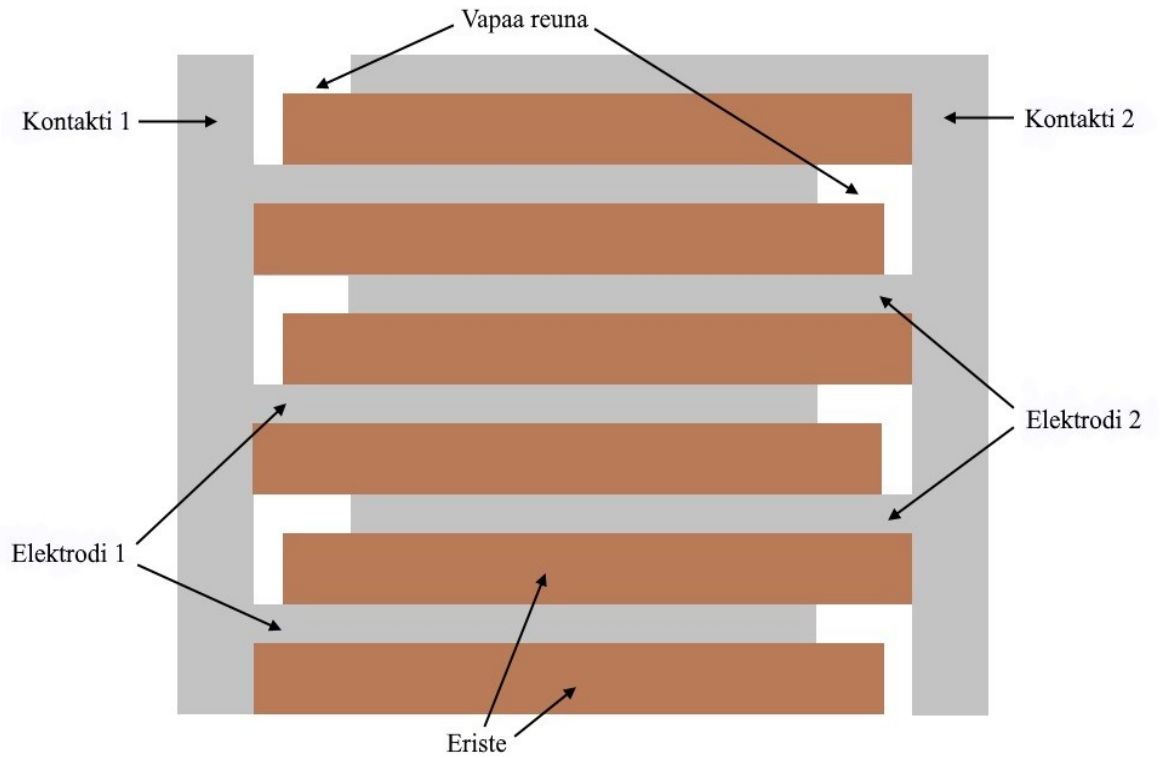
$$C = \frac{A\varepsilon}{d}, \quad (3.2)$$

jossa A on elektrodilevyjen pinta-ala, d elektrodilevyjen välissä olevan eristerakenteen paksuus ja ϵ eristemateriaalin absoluuttinen permittiivisyys. [8, s. 34]

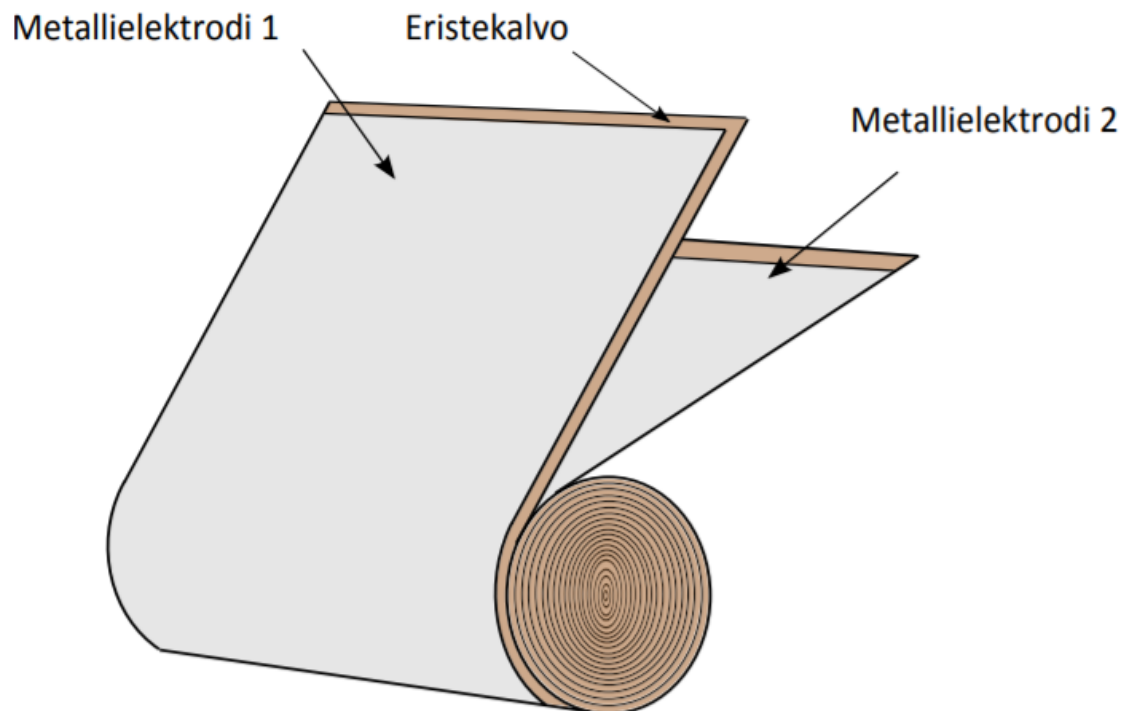


Kuva 3.1: Yksinkertainen kondensaattorirakenne, tasolevykondensaattori, jossa elektrodien välissä on eristemateriaalia. Lähteestä [18] mukailten.

Kaavan 3.2 tavalla kapasitanssia laskettaessa on oletettava eristeessä oleva sähkökenttä homogeeniseksi, vaikka täydellinen homogeeninen sähkökenttä on käytännössä vaikea toteuttaa. Homogeeninen sähkökenttä tarkoittaa sitä, että sähkökentän voimakkuus on kaikissa sen pisteissä vakio eli kenttä on jakautunut tasaisesti rakenteeseen [8, s. 18]. Kaavasta 3.2 huomataan, että jos halutaan suurikapasitanssinen kondensaattori, täytyy myös kondensaattorin elektrodien pinta-alan kasvaa suureksi. Perinteisellä tasolevykondensaattorirakenteella tämä tuottaa ongelmia, sillä kondensaattorin ulkoinen koko kasvaa epäkäytännöllisen suureksi. Usein kondensaattorit rakennetaan siten, että elektrodi- ja eristemateriaaleja laitetaan useampia vuorotellen päällekkäin, jolloin saadaan suurempi kapasitanssi pienemmällä tilavuudella. Kerrostettu elektrodi- ja eristerakenne on esitetty kuvassa 3.2. Kuvasta voidaan myös huomata, että elektrodeja on niiden päissä olevien kontaktien aiheuttamien oikosulkujen estämiseksi siirretty hieman toistensa suhteen, jättäen päihin vapaan reunan. Kondensaattoreiden elektrodi- ja eristerakenne voidaan tilavuuden minimoimiseksi kääriä rullalle kuvan 3.3 mukaisesti. [12, s. 30] Lisäksi, kun kuvan 3.1 mukainen rakenne kääritään rullalle, rakenteen kapasitanssi kaksinkertaistuu, sillä nyt kapasitanssi muodostuu jokaisesta elektrodikierrroksesta nähden sekä ylä- että alapuolelta.



Kuva 3.2: Kerrostettu kondensaattorirakenne vapailla reunoilla, perustuu lähteeseen [12, s. 31].



Kuva 3.3: Kerrostettu kondensaattori, jossa elektrodi- ja eristerakenne on kääritty rullalle [12, s. 31].

Kuten aiemmin mainittiin, kondensaattorilla on kyky varastoida sähköenergiaa rakenteeseensa. Olkoon elektrodien varaus alkutilanteessa q ja elektrodeille tuodaan lisää varausta Δq :n verran, jolloin kondensaattorin varaus lopussa on $Q = q + \Delta q$. Varauksen lisäykseen täytyy tehdä työtä $\Delta W = U(q)\Delta q$ verran, jonka jälkeen kondensaattoriin varastoitunut energia W_{str} on muotoa [16, s. 818]:

$$W_{str} = \int_0^Q U(q) dq = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C}. \quad (3.3)$$

Yhtälö 3.3 voidaan muokata käytännöllisempään muotoon käyttämällä aikaisempia kaavoja 3.1 ja 3.2 hyväksi. Yhtälö on nyt muotoa

$$W_{str} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{A\varepsilon}{2d}U^2. \quad (3.4)$$

Kuten yhtälöstä 3.4 huomataan, kondensaattoriin varastoitunut energia on suoraan sen kapasitanssiin sekä neliöllisesti kondensaattorin yli olevaan jännitteeseen verrannollinen. Varastoituneen energian määrää rajoittaa sekä jo aiemmin mainittu kondensaattorin ulkoisen koon kasvaminen että myös eristerakenteen jännitelujuus. Aiemmin esitetystä yhtälöstä 3.2 huomataan, että kapasitanssi on suoraan verrannollinen eristemateriaalin permittiivisyyteen, joten kondensaattoreiden suunnittelussa eristemateriaalin valinnalla onkin merkittävä vaikutus sen kykyyn varastoida energiaa. On myös hyvä mainita, että joidenkin eristemateriaalien permittiivisyys muuttuu jännitteen funktiona, mikä aiheuttaa jännitteen ja kapasitanssin välille epälineaarisen riippuvuuden [17].

Kondensaattoriin varastoitunut energia on mielenkiintoinen suure, mutta verrattaessa eristemateriaalien soveltuvuutta kondensaattoreihin on hyvä ottaa huomioon kondensaattorin energiatiheys. Energiatiheys u kuvaa kondensaattoriin varastoituneen energian määrää suhteessa kondensaattorin tilavuuteen. Tasolevykondensaattorille energiatiheys voidaan määrittää kaavasta [16, s. 819]

$$u = \frac{\frac{1}{2}CU^2}{Ad}. \quad (3.5)$$

Kapasitanssin kaavan 3.2 ja jännitteen yhteyden sähkökentän voimakkuuteen $U = Ed$ avulla voidaan energiatiheys ilmaista muodossa [16, s. 819]

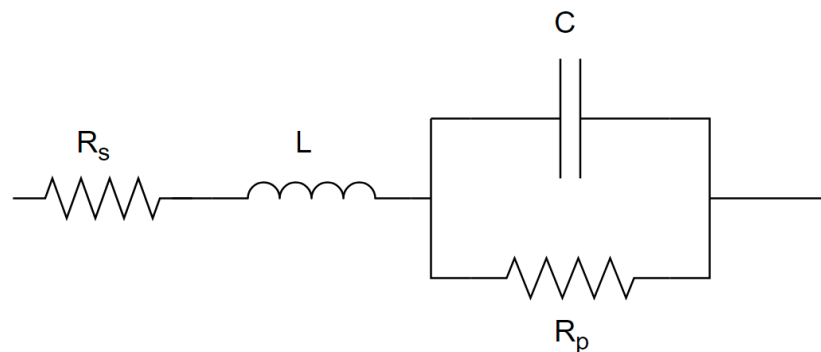
$$u = \frac{1}{2}\varepsilon_r\varepsilon_0E^2. \quad (3.6)$$

Kuten kaavasta 3.6 huomataan, energiatiheys riippuu neliöllisesti sähkökentän voimakkuudesta, joten kondensaattoreille onkin tärkeää pystyä kestämaan mahdollisimman suuria sähkökentän voimakkuuden aiheuttamia rasituksia, sillä jo pienikin sähkökentän voimakkuuden kasvu kasvattaa kondensaattorin energiatihyyttä merkittävästi. Kondensaatt-

torin eristemateriaalin suhteellisella permittiivisyydellä on myös yhteys sen energiatiheuteen. Kaavojen 3.2 ja 3.6 mukaan, käyttämällä eristemateriaaleja, joilla on suurempi suhteellinen permittiivisyys, voidaan kasvattaa siis sekä kondensaattorin kapasitanssia että energiatiheyttä, mutta käytännössä tämä ei ole niin suoraviivaista, sillä suhteellisen permittiivisyyden kasvu voi aiheuttaa kondensaattorissa enemmän dielektrisiä häviöitä.

3.2 Kondensaattorit piirianalysissä

Kondensaattorit piirianalysissä mallinnetaan kapasitanssin lisäksi niiden sisäisillä sarja- ja rinnakkaisresistansseilla R_s ja R_p kuvan 3.4 osoittamalla tavalla. Resistanssit ovat kondensaattorin sisäisistä ominaisuuksista johtuvia parasiittisia suureita, jotka ovat käytännön kannalta haitallisia, sillä ne aiheuttavat häviöitä sekä vähentävät kondensaattorin elinikää lämpenemisen ja paineen kasvun takia. Kondensaattorin elektrodit ja niiden kontaktit sekä navat eli kondensaattorin osat, joilla se kytketään ulkoisesti piiriin, aiheuttavat sarjaresistanssin R_s . Sarjaresistanssin suuruus on riippuvainen taajuudesta sekä virran huippuarvosta, mutta usein se on melko pieni, suuruusluokkaa $R_s < 0,1 \Omega$. Rinnakkaisresistanssi R_p puolestaan aiheutuu kondensaattorin vuotovirrasta, joka muodostuu kondensaattorin eriste- ja kotelorakenteen resistiivisyydestä sekä eristeen dielektrisistä häviöistä. Käytännössä R_p on aina merkittävästi suurempi kuin sarjaresistanssi R_s ja sen suuruus riippuu eristemateriaalin laadusta, muodosta ja paksuudesta.



Kuva 3.4: Kondensaattorin sijaiskytkentä, jossa on erikseen otettu huomioon sarja- ja rinnakkaisresistanssit sekä induktanssi.

Kun tarkastellaan kondensaattoria vaihtovirtajärjestelmässä, kondensaattorin sarja- ja rinnakkaisresistanssit mallinnetaan usein yhtenä taajuusriippuvaisena kokonaissisäresistanssina *ESR* (engl. Equivalent Series Resistance). Tässä tapauksessa kondensaattorin piirianalysimalli yksinkertaistuu siten, että kapasitanssin lisäksi siinä on vain yksi resis-

tanssi, *ESR*, sarjassa. Kuvan 3.4 kondensaattorin sijaiskytkennän mallissa on esitetty resistanssien lisäksi myös induktanssi L . Kondensaattorin induktanssi on lähes täysin vain sen geometriasta riippuva parasiittinen ominaisuus, joka on otettava huomioon varsinkin korkeilla taajuuksilla. Kondensaattorin sijaiskytkentää tarkasteltaessa on otettava huomioon, että sekä *ESR* että kondensaattorin kapasitanssi C ovat määritelty vain tietylle taajuudelle. [12, s. 30][17, s. 9–10]

3.3 Kondensaattorin häviökerroin

Kondensaattorin sijaiskytkennän avulla voidaan kondensaattorille esittää sen häviöitä kuvaava häviökerroin $\tan(\delta)$, joka kuvaa häviöiden suhteen kondensaattorin kapasitiivisiin ominaisuuksiin verrattuna. Häviökerroin voidaan laskea kaavalla

$$\tan(\delta) = \frac{ESR}{X_c} = ESR \cdot \omega C, \quad (3.7)$$

jossa X_c on kapasitiivinen reaktanssi, *ESR* kondensaattorin ekvivalenttinen sarjaresistanssi ja ω kulmataajuus ($\omega = 2\pi f$). [17] Kondensaattorin häviökerroin eroaa hieman aiemmin määrittelystä häviökertoimesta eristeille (ks. kaava 2.4), sillä nyt huomioon otetaan myös sarjaresistanssi R_s . Käytännössä kyseisiä häviökertoimia voidaan kuitenkin pitää samoina. [18]

Tasajännitteellä häviökerroin on äärettömän pieni, sillä kuten aiemmin mainittiin, tasajännitteellä häviöitä aiheuttaa ainoastaan johtavuus. Tämän voi havaita häviökertoimen kaavasta 3.7, jossa tasajännitteellä kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi lähestyy ääretöntä kulmataajuuden lähestyessä nollaa, sillä

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} X_c = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{\omega C} = \infty. \quad (3.8)$$

Häviökertoimen avulla voidaan tasajännitteellä arvioida eristeiden kuntoa kondensaattoreissa, sillä häviökertoimen suuri kasvu viittaa eristeen kunnan huononemiseen [8, s. 53]. Häviökerroin on yksikötön määrittelyn mukaan, mutta kondensaattoreissa, joissa häviökerroin on todella pieni, voidaan käyttää yksikköä [W/kVar], jotta hahmotetaan helpommin kondensaattoreissa ilmenevät tehohäviöt [12, s. 32].

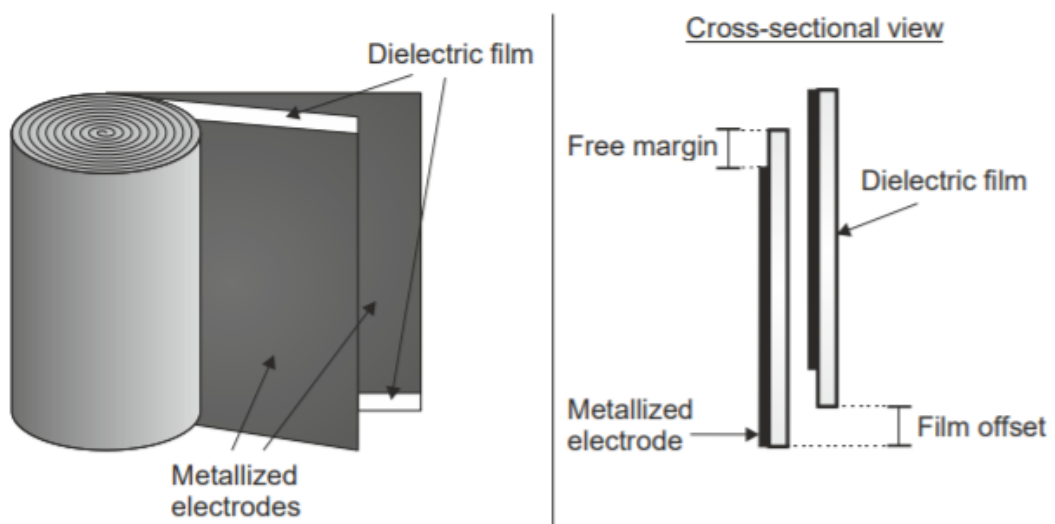
3.4 Ohutkalvokondensaattorit

Kondensaattoreita luokitellaan usein niissä käytettävien eristeiden mukaan. Ohutkalvokondensaattorin tapauksessa eristeenä käytetään nimensä mukaisesti ohutta kalvoa. Eristekalvona voi toimia esimerkiksi paperi, kiille tai nykyään suosittu erilaiset polymeerit. Rakenteeltaan ohutkalvokondensaattorit voivat erota monellakin tapaa, mutta käytännössä niissä kaikissa on ohuet metallielektrodit, joiden välissä on kiinteää eristemateriaalia. Elektrodi- ja eristerakenne on usein kääritty rullalle kuvan 3.3 tapaisesti, sekä asennettu eristenesteellä tai -kaasulla täytettyyn koteloon. Tiiviimmän rakenteen saavuttamiseksi rulla on usein myös puristettu kasaan. [15][17]

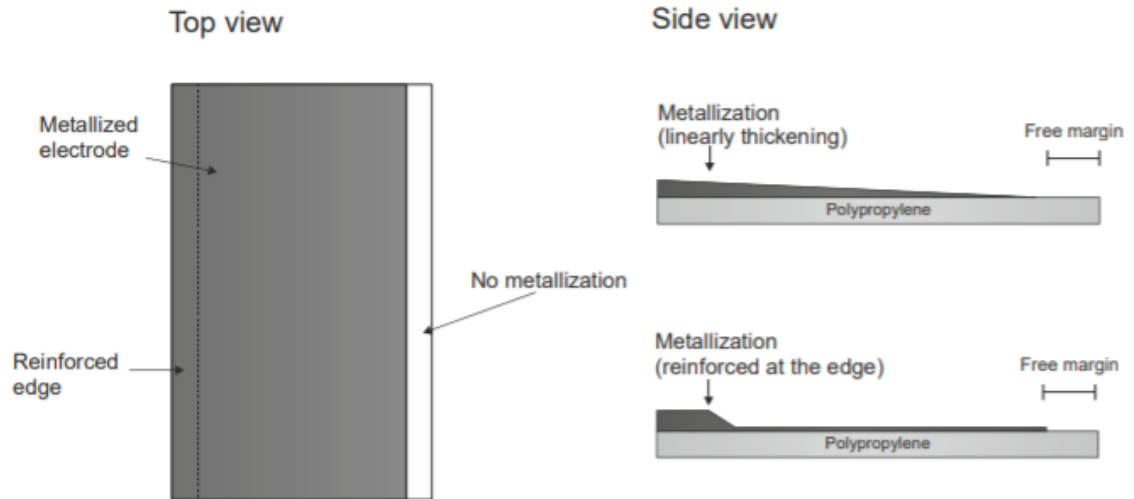
Ohutkalvorakenteella voidaan toteuttaa laajasti skaalautuva energia-alue muutamista nanojouleista satoihin kilojouleihin. Ohutkalvokondensaattoreille on ominaista myös niiden pienet häviöt, täysin bipolaarinen rakenne sekä jännitteestä riippumaton kapasitanssi. [15]

3.5 Metalloidut ohutkalvokondensaattorit

Metalloidut ohutkalvokondensaattorit eroavat perinteisistä ohutkalvokondensaattoreista siten, että elektrodit eivät ole erillisiä kalvoja vaan eristeenä toimivan kalvon pinnalle on höyrytetty muutamien nanometrien (20–100 nm) paksuinen sinkki- tai alumiinipinnoite. Eristeenä käytetään ohutta, noin 6–10 μm paksuista polymeerikalvoa. Eristeenä käytettäviä polymeerejä tarkastellaan tarkemmin luvussa 4. Kytkeä ulkoiseen piiriin varmistetaan suihkuttamalla rullaksi kierretyn kalvorakenteen päihin kontaktit plasmasuihkumenetelmällä. Ohutkalvokondensaattoreiden tapaan rulla upotetaan vielä öljyyn tai hartsiin, jotka toimivat eristeaineena ja estävät kalvon metalloinnin korroosiota. Öljy ja hartsi poistavat myös ilmaa kondensaattorirakenteesta, jolloin vältetään osittaispurkauksilta. [15][19][20]



Kuva 3.5: Metalloidun ohutkalvokondensaattorin perusrakenne [18].



Kuva 3.6: Ohutkalvoon toteutettu metallointirakenne. Vasemmalla puolella metallointiprofiili yläpuolelta kuvattuna ja oikealla puolella kaksi erilaista metallointiprofiilia sivulta kuvattuna. [18]

Polymeerikalvon metallointi ei ole tasaisesti levittynyt koko eristekalvon pinnalle, vaan metallointi on paksumpaa kontaktin puolella. Kalvon toisella reunalla ei ole ollenkaan metallointia, vaan se on niin sanottu vapaa reuna, jonka leveys on tyypillisesti 1,5–5 mm. Kun kondensaattori käämitään, vapaat reunat asetetaan niin, että ne ovat vastakkaisilla puolilla kalvoa käämikiirroksissa. Kontaktin puoleisella paksummalla metalloinnilla saavutetaan parempi kontakti suihkutetun sinkkikontaktin kanssa sekä pienennetään metalloinnin resistanssia kalvon suurempi virtaisista osista. Metallointiprofiili voidaan toteuttaa joko niin, että se ohenee tasaisesti kontaktin paksummalta puolelta tai niin, että metallointi on paksumpaa vain kontaktireunasta. Metallointia havainnollistaa kuva 3.6, josta huomataan nämä kaksi erilaista metallointiprofiilia. [12, s. 35][15][21]

Metalloinnin kiinnittyminen eristekalvoon varmistetaan hapettamalla toinen kalvon puoli koronakäsittelyllä. Koronakäsittely tarkoittaa prosessia, jossa eristekalvo asetetaan maadoitettuun metallikantaan ja kalvon yläpuolelle tuodaan korkeajännitteinen johto, joka ulottuu koko kalvon leveydelle. Johdon läheisyydessä oleva ilma ionisoituu, ja kun johtoa liikutetaan koko kalvon yli, ionit siirtyvät kohti maadoitettua kantaa muodostaen suuremman pintavaraustiheyden kalvolle. Käytännössä teollisuuden koronakäsittely tehdään niin, että kalvo liikkuu maadoitettujen telojen avulla suurjännitteisen koronatelan ohi. Koronakäsittelyä käytetään erityisesti polypropyleenikalvoissa parantamaan niiden pintaominaisuuksia, mutta muissa polymeerikalvoissa se ei usein ole tarpeellista. [18][19]

Käämitykset pyritään tekemään mahdollisimman tiukkaan, jotta rakenteeseen ei jää ilmapuolia. Käämitysrakenne on tehty asettamalla kaksi metalloitua kalvoa päällekkäin ja

käärimällä ne rullaksi kuvan 3.5 tavoin. Uloimmille käämityskierroksille käämitään vielä metalloimatonta pintakalvoa, jonka jälkeen tehdään vielä muutama täydentävä käämitys. Nämä uloimmat käämitykset stabiloivat, kiristävät ja parantavat rullaa mekaanisesti. Lopuksi rakenteen tiivistämiseksi ja ilmakuplien minimoimiseksi kondensaattorielementit lämpökäsitellään sekä mahdollisesti myös kyllästetään eli impregnoidaan. [12, s. 35][18][21]

3.5.1 Itseparantumisen

Perinteisten ohutkalvokondensaattoreiden käämielementit vaurioituvat jo yhdestä läpilyönnistä ja läpilyönnin johdosta vaurioitunut elementti joudutaan kytkemään irti kondensaattoriyksiköstä sisäisen sulakkeen avulla. Irti kytketty käämielementti voi pienentää kondensaattoriyksikön kapasitanssia merkitsevästikin sekä kondensaattoreiden sarjakytkenöissä muiden kondensaattorien osien jänniterasitus voi nousta liian suureksi. Läpilyöntien aiheuttama haitta voidaan välttää metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa, sillä polypropyleenikalvoista valmistetut metalloidut ohutkalvokondensaattorit kykenevät itseparantumiseen, kun niissä tapahtuu läpilyöntejä ja osittaispurkauksia. Itseparantumisen mahdollistaa metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden rakenne, jossa ohut metallointi höyrystyy tai muuttuu eristäväksi metallioksidiksi läpilyöntipisteen kohdalle läpilyönnistä johtuvan suuren lämpötilan nousun johdosta. Korkea lämpötila muuttaa eristekalvon plasmaksi, joka laajenee ja jäähtyy muutamassa mikrosekunnissa lopulta sammuttaen läpilyönnin. Tämän ilmiön ansiosta läpilyöntipiste eristyy muusta piiristä ja kondensaattorin normaali käyttö voi jatkua ilman merkittävää kapasitanssin suuruuden muutosta. Itseparantumisesta aiheutuva kapasitanssin muutos on niin pieni, että läpilyöntejä ja itseparantumisia voi tapahtua jopa tuhansia, ennen kuin kondensaattorin efektiivinen pinta-ala, ja sen seurauksesta kapasitanssi, pienenee merkittävästi. Käytännössä kondensaattori on elinikänsä lopussa vasta sitten, kun sen kapasitanssi on laskenut 2–5 %. Itseparantumisen ansiosta, kondensaattoreiden käyttöjännite voidaan mitoittaa lähes eristeen keskimääräiselle läpilyöntijännitteelle. [12, s. 38][15][18, s. 56][20]

Alkujaan itseparantumisessa vapautuvan energian riippuvuutta itseparantumispinta-alasta tutki Kammermaier ja Heywang, joiden tuloksista Shaw *et al.* johti kokeellisen lausekkeen yhden itseparantumisen aikana vapautuvalle energialle W muotoon

$$W = \frac{k \cdot U^{4,7} \cdot C}{R_s^{1,8} \cdot \alpha(P)}, \quad (3.9)$$

jossa R_s on pintaresistanssi (yksikkö Ω/sq), $\alpha(P)$ funktio, joka kuvaa käämityn kondensaattorin välikerroksen paineen suhteen itseparantumisenergiaan ja k kokeellisesti määriteltävä vakiokerroin [22][23][24]. Kondensaattorin itseparantumisessa vapautuvaa energiaa voidaan myös arvioida yhtälön

$$W \propto C t^{1,8} U^{4,7} \quad (3.10)$$

avulla, jossa t on metalloinnin paksuus. Elektrodien höyrystyminen vaatii tarpeeksi suuren energian, mutta vapautuva energia ei kuitenkaan saa olla liian suuri, jotta kondensaattori ei tuhoutuisi liian hitaan läpilyönnin sammumisen takia. [25]

3.5.2 Vioittumismekanismit ja ongelmat

Metalloidut ohutkalvokondensaattorit ovat käytännössä luotettavampia kuin perinteiset ohutkalvokondensaattorit, mutta myös nekin voivat vioittua monella tapaa. Kuten yhtälöistä 3.9 ja 3.10 mainittiin, itseparantumisesta vapautuva energia ei saa olla liian suuri, jotta kondensaattori ei tuhoutuisi. Yhtälöjen 3.9 ja 3.10 mukaan, itseparantumisessa vapautuva energia voidaan minimoida valitsemalla riittävän suuri pintaresistanssi ja välikerroksen paine sekä riittävän pieni käyttöjännite, kapasitanssi ja elektrodivälin paksuus. Tämä ei ole kuitenkaan käytännössä aina mahdollista, sillä käyttöjännite, kapasitanssi ja pintaresistanssi riippuvat käyttökohteesta. Itseparantumisessa vapautuvan energian määrä siis välikerrosten paine. [18][26] Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että korkeammalla välikerrosten paineella saavutetaan pienempi purkausenergia ja höyrystynyt alue sekä lyhyempi purkautumisaika [19]. Vakio välikerrosten paine on kuitenkin käämityissä kondensaattoreissa vaikea toteuttaa, sillä sisemmät kerrokset kokevat korkeamman paineen johtuen ulompien kerrosten tuottamasta puristavasta säteittäisestä voimasta. Tästä johtuen itseparantuminen tapahtuukin useammin kondensaattorin uloimmilla kerroksilla. Kasvattamalla siis kondensaattorin sisempien kerrosten painetta, voidaan pienentää itseparantumisenergiaa ja kapasitanssihäviöitä, mikä puolestaan pidentää kondensaattorin käyttöikää. [18][26]

Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden vioittuminen voi johtua myös elektrodien korroosiosta, sillä niissä käytetyt materiaalit ja erittäin ohuet metalloinnit ovat hyvin alttiita korroosiolle. Korrosio syövyttää elektrodeja ja näin ollen pienentää niiden pinta-alaa. Kuten yhtälöstä 3.2 huomataan, pienempi elektrodien pinta-ala tarkoittaa myös pienempää kondensaattorin kapasitanssia. Pienemmän kapasitanssin lisäksi, myös latausvirran reitti pitenee, kondensaattorin virrantiheydet kasvavat metalloinnin terveissä osissa ja *ESR* sekä täten myös häviöt kasvavat. Korrosio voi lopulta johtaa myös koko kondensaattorin toimintakyvyttömyyteen. [18]

Metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa esiintyy kahdenlaista korroosiota, ilmakorroosiota ja sähkökemiallista korroosiota. Ilmakorroosio saa alkunsa siitä, kun kondensaattorin rakenteeseen pääsee kosteutta kondensaattorin ulkopuolelta. Tyypillisesti kosteus tunkeutuu päätykontaktien kohdilta rakenteen sisään, mikä voi aloittaa elektrodien korroosion. Sähkökemiallisessa korroosiossa osa alumiinimetalloinnista muuttuu oksideiksi vaihtovirralla. Korroosioprosessiin vaikuttaa esimerkiksi:

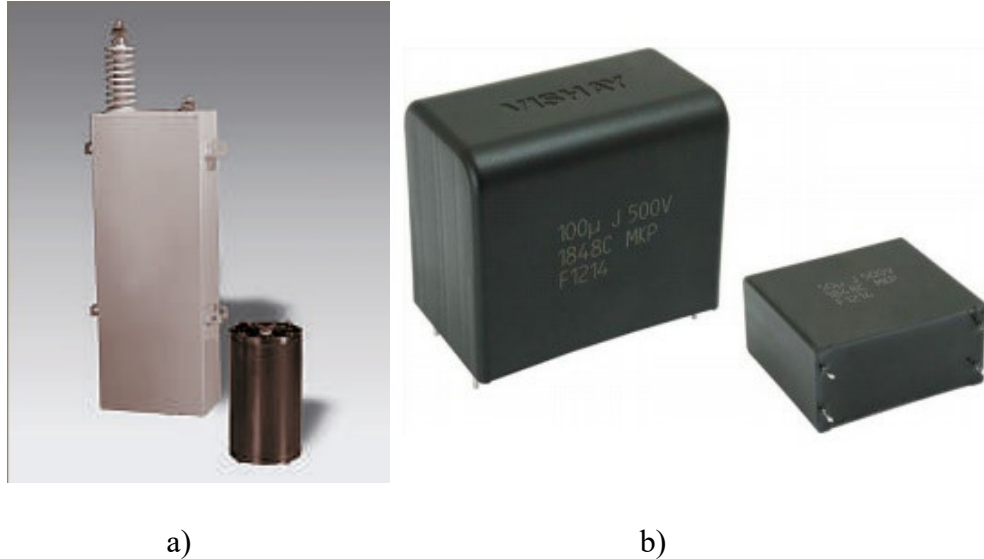
- kondensaattorin tiivisteet,
- metalloinnin paksuus,
- eristekalvon pintaominaisuudet,
- lämpötila,
- kosteus ja
- impregnointiaineen käyttö.

Sähkökemiallista korroosiota voidaan myös estää käyttämällä elektrodina alumiinin sijasta alumiini-sinkki -seosta. Sinkin käyttöä voi kuitenkin joissain tapauksissa rajoittaa sinkin pienempi sähkönjohtavuus sekä alttius ilmakorroosiolle. [19][27, s. 16–22]

Metalloitu ohutkalvokondensaattori voi vioittua myös siten, että plasmasuihkumenetelmällä toteutettu päätykontakti irtaantuu, sillä päätykontaktit muodostuvat tyypillisesti vain satunnaisista kohdista, joihin kohdistuu suuri virrantiheys. Tämä ilmiö on erityisesti kriittinen suurivirtaisissa pulssisovelluksissa, sillä niissä on havaittu osittaista kontaktien irtaantumista, mikä aiheuttaa terveiden osien virrantiheyden kasvua. Tämäkin voi lopulta johtaa kondensaattorin toimintakyvyttömyyteen. [19]

3.5.3 Käyttökohteet

Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden häviöt ja kokonaissisäresistanssi ovat pieniä ($\tan \delta \ll 1 \%$, $ESR < 1 \%$) sekä niiden energiatheydet ovat tyypillisesti kohtuullisen suuria. Näiden ominaisuuksien lisäksi metalloidut ohutkalvokondensaattorit ovat luotettavia itseparantuvan rakenteensa ansiosta, joten voisi ajatella, että metalloidut ohutkalvokondensaattorit sopisivat lähes kaikkiin kondensaattorisovelluksiin. Käyttömahdollisuuksia kuitenkin rajoittaa alaluvussa 3.5.2 mainittu päätykontaktien irtaantuminen suurilla virroilla, joten käytännössä metalloituja ohutkalvokondensaattoreita voidaan käyttää vain sovelluksissa, joissa virta on alle 200 kA ja jännite alle 30 kV. Lisäksi metalloidun elektrodin lämmönjohtavuus on huono verrattuna esimerkiksi perinteiseen ohutkalvorakenteeseen, mikä rajoittaa maksimivirtoja yhä enemmän. [15][28][29] Maksimikäyttäjännitteet ovat kuitenkin kondensaattoritekniikan kehittyessä kasvaneet, ja esimerkiksi ABB:lla on ”kuiva” metalloitu kondensaattorityyppi, joka soveltuu jopa 150 kV tasajännitteille (ks. kuva 3.7a) [30].



Kuva 3.7: a) ABB:n kuiva metalloitu ohutkalvokondensaattori, maksimissaan 150 kV DC-jännitteille (oikeanpuoleinen) [30]. b) Metalloitu polypropyleenikalvokondensaattori, maksimissaan 1200 V DC-jännitteille [31].

Metalloituja ohutkalvokondensattoreita käytetään pääosin sähköenergiatekniikan soveluksissa esimerkiksi suodattamaan yliaaltoja ja kompensoimaan loistehoa kulutuksen lähellä [12][15]. Yhä enemmän käytetty tasajännite sähkönsiirrossa HVDC-/VSC-soveluksissa on myös yleistänyt kondensattorien käyttöä suodatuksessa suuntaajilla sekä tasa- että vaihtojännitepuolella [32]. Kondensattoreita käytetään myös tehonlähteinä esimerkiksi verkossa tapahtuvien transienttien aikana, mutta kehityksen myötä kondensattoreita on alettu käyttää myös puhtaina energiavarastoina. Energiavarastoina metalloidut ohutkalvokondensattorit eroavat akuista ja paristoista niiden nopean purkautumiskyvyn avulla, minkä takia niitä on käytetty esimerkiksi aseteollisuudessa sähkömagneettisissa panssareissa ja sähkötermiskemiallisissa aseissa. [29] Metalloituja ohutkalvokondensattoreita käytetään myös rytminsiirtolaitteissa eli defibrillaattoreissa tuottamaan virtapulssin [15].

4. NYKYTILANNE JA KEHITYS MATERIAALIEN, TUOTANNON JA TOTEUTUKSEN KANNALTA

Tässä luvussa tutustutaan metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden nykytilanteeseen ja kehitysnäkymiin eristemateriaaliratkaisujen ja tuotannon sekä toteutuksen kannalta. Luvussa perehdytään nykyisin käytössä oleviin eristemateriaaleihin ja verrataan niiden ominaisuuksia toisiinsa. Luvussa esitetään myös motivaatio uusien eristemateriaaliratkaisujen käytölle, jonka jälkeen perehdytään näihin uusiin eristemateriaaleihin ja niihin liittyviin tutkimuksiin. Lopuksi käydään läpi kondensaattoreiden tuotantoa ja rakenteellista toteutusta.

4.1 Nykyisin käytössä olevat eristemateriaalit ohutkalvokondensaattoreissa

Tärkeimmät kondensaattoreissa käytetyt eristemateriaalit ovat kiinteitä polymeerieristeitä. Kiinteiden eristeiden tehtävänä on sähköisen eristämisen lisäksi tukea jännitteisiä osia myös mekaanisesti. Paperin ja prespaanin käyttö eristeinä on nykyään harvinaista, sillä polymeeripohjaiset eristemateriaalit ovat huomattavasti parempia monella eri tapaa. Jos kuitenkin kondensaattorissa on paperieriste, niin se on imeytetty (impregnoitu) öljyyn, jolloin sen läpilyöntilujuus ja lämmönkesto kasvavat. [8, s. 121–122] Kyllästysöljynä käytettiin ennen palamatonta PCB:tä (polykloorattu bifenyylä), joka kuitenkin havaittiin ympäristölle haitalliseksi ja sen käyttö kiellettiin sähkölaitteissa. Kondensaattoriteknologian kehitys on johtanut parempiin eristemateriaaliratkaisuihin ja kyllästeisiin, mikä on pienentänyt muun muassa kondensaattoreiden häviöitä ja tilantarvetta. [8, s. 161]

4.1.1 Polymeerit

Orgaanisten aineiden kuten paperin työstettävyys on hyvä, mutta niiden ominaisuudet muuttuvat merkittävästi käytön ja erityisesti lämpötilan nousun aikana [8, s. 122]. Paperieristeet syrjäyttäneet polymeerieristeet ovat erinomaisten sähköisten ominaisuuksien lisäksi mekaanisesti ja termisesti kestäviä sekä niitä on helppo työstää [14, s. 95]. Polymeeri tarkoittaa suurta, ketjumaista molekyyliä, mikä muodostuu monesta pienestä toisiinsa sidotusta kemikaalisesta yksiköstä. Polymeerien pääkomponentti on monomeeri, joka tarkoittaa mitä tahansa molekyyliä, josta voidaan muodostaa polymeeri yhdistämällä niitä toisiin, joko samanlaisiin tai erilaisiin molekyyliin. Tätä monomeerien yhdistämisprosessia kutsutaan polymeroinniksi. Usein polymerointi vaatii aineen elektronien uudelleenjärjestämistä sopivien kemikaalisten sidoksien muodostamiseksi, joten usein polymeerin toistuva yksikkö ei ole kemikaaliselta rakenteeltaan täysin samanlainen kuin alkuperäisen monomeerin. [33, luku II]

Polymeerejä voidaan luokitella esimerkiksi niiden ominaisuuksien tai valmistusprosessin mukaan. Yleisimmin luokittelu kuitenkin tehdään kolmeen ryhmään: luonnolliset polymeerit (biopolymeerit), puolisynteettiset polymeerit ja synteettiset polymeerit. Luonnollisia polymeerejä ovat esimerkiksi tärkkelys ja selluloosa. Puolisynteettiset polymeerit ovat polymeerejä, jotka ovat valmistettu luonnollisista polymeereistä kemikaalisella käsitteilyllä. Synteettiset polymeerit ovat puolestaan valmistettu kemian teollisuudella täysin keinotekoisesti pienistä monomeereista. Synteettiset polymeerit voidaan jakaa vielä useisiin eri kategorioihin, kuten muoveihin, elastomeereihin ja kuituaineisiin. [33, luku III][34] Kaikki polymeerit voidaan myös luokitella kahteen ryhmään: kestopuoveihin ja kertamuoveihin. Kestomuovit kestävät nimensä mukaisesti niiden muokkausta sopivassa lämpötilassa ja paineessa, eli kestopuovit ovat kierrätettäviä. Kestomuoveja käytetään monen muun käyttökohteen lisäksi myös eristeenä kondensaattoreissa. Kertamuovit ovat polymeerejä, jotka kestävät korkeita lämpötiloja, mutta riittävän korkeissa lämpötiloissa kertamuovin rakenne hajoaa, eikä sitä voida enää palauttaa ennalleen. Muun muassa eristeiden tiivistäineenä käytetty epoksi on esimerkki kertamuovista. [35]

Polymeereillä elektronivöiden välisten energia-aukkojen suuruus on tyypillisesti suurempi kuin 7 eV, joten polymeerit ovat erinomaisia eristeitä. Elektronivyöteoriaa ei kuitenkaan ole kovin helppoa soveltaa polymeereihin, sillä niissä ei ole yhteneviä vyörakenteita epäsäännönmukaisen rakenteen takia. Polymeerien johtavuuteen vaikuttaa suuren energia-aukon lisäksi myös epäpuhtauksista johtuvat loukut, joihin johtavuusvyöllä olevat elektronit saattavat jäädä. Polymeereissä on elektronijohtavuuden lisäksi havaittavissa myös ionijohtavuutta eli ionien, protonien ja aukkojen liikettä. Ionijohtavuus on lähes olematonta niin sanotun lasittumislämpötilan alapuolella, mutta kasvaa lämpötilan funktiona. [7][12, s. 23–24][18, s. 26]

Polymeereihin kertyy avaruusvarauksia, jotka tarkoittavat eristeitä tarkasteltaessa eristeen sisälle kertynyttä kompensoimatonta varausta. Avaruusvarausta siis kertyy materiaaliin, kun varausta kertyy nopeammin kuin sitä poistuu. Varaus voi aiheutua useista eri lähteistä kuten elektrodeille tuoduista varauksista, epäpuhtauksista tai valmistusprosessissa rakenteeseen jääneistä varauksista. Myös luvussa 2 esitetty avaruusvarauspolarisaatio voi kerryttää avaruusvarausta materiaaliin. Materiaalin avaruusvarauksen aiheuttama lokaali sähkökenttä vääristää materiaaliin tuotua ulkoista sähkökenttää, joko vahvistamalla tai heikentämällä sitä, riippuen avaruusvarauksen polariteetista suhteessa ulkoisen kentän polariteettiin. [12, s. 24][13][18, s. 27] Avaruusvarauksien vaikutus erityisesti uusien polymeerieristeratkaisujen sähköisiin ominaisuuksiin on vielä hieman epäselvää, mutta esimerkiksi joidenkin nanokomposiittieristeiden avaruusvarausominaisuuksia on kokeellisesti tutkittu [36].

4.1.2 Eristeiden ominaisuudet

Kestomuovi polypropeeni (PP) on yksi tärkeimmistä polymeereistä, jota käytetään paljon esimerkiksi eristeenä kondensaattoreissa. Puhallus- tai tasokalvomenetelmällä valmistetut biaksiaalisesti orientoidut polypropeenikalvot (BOPP-kalvot) ovatkin kaupallisissa kondensaattoreissa käytetyimpiä polymeerikalvoja. Metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa eristeenä käytetään myös esimerkiksi polykarbonaattia (PC), polyeteenitereftalaattia (PET), polyvinyylideeni-*fluoridia* (PVDF), polyeteeninaftalaattia (PEN) ja polyfenyleenisulfidia (PPS). [37]

Seuraavaksi tarkastellaan metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa käytettyjen eristeiden tärkeimpiä ominaisuuksia. Taulukossa 4.1 on esitetty yleisimpiä metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa käytettyjä eristemateriaaleja sekä muutamia uusia eristemateriaaliratkaisuja ja näiden ominaisuuksia.

Taulukko 4.1: *Yleisimpien metalloiduissa ohutkalvokondensaattoreissa käytettyjen polymeerieristeiden ominaisuuksia. [12][21][29][38][39][40][41].*

Materiaali	Suhteellinen permittiivisyys (ϵ_r)	Lämpötilajuus ($V/\mu\text{m}$)	Energiatiheys (J/cm^3)	Maksimikäyttö- lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Häviö- kerroin 1 kHz (%)
Polypropeeni (BOPP)	2,2	700	1–2	105	< 0,02
Polykarbonaatti (PC)	2,8	528	0,5–1	125	< 0,15
Polyeteenitereftalaatti (PET)	3,3	570	1–1,5	125	< 0,5
Polyvinyylideeni- <i>fluoridi</i> (PVDF)	12,0	590	2,4	125	< 1,8
Polyeteeninaftalaatti (PEN)	3,2	550	1–1,5	125	< 0,15
Polyfenyleenisulfidi (PPS)	3,0	550	1–1,5	200	< 0,03
Polyurea (ArPU)	4,2	800	9–12*	200	< 0,5
Polytiourea (ArPTU)	4,5	800	22*	150	< 0,06

* Energiatiheyden maksimiarvo laskennallisesti tai mittauksista.

Taulukon 4.1 polymeerieristeiden ominaisuuksista huomataan, että PP:n läpilyöntilujuus on suurin. Tämä onkin suurin syy sille, miksi PP, tarkemmin BOPP, on vallitseva eristemateriaaliratkaisu. PP:n yleisyyteen vaikuttaa myös sen hyvä saatavuus. Läpilyöntilujuuden lisäksi, PP:llä on vähäiset dielektriset häviöt, sillä häviökerroin on vain $< 0,02$ %. PP on myös hyvä eristemateriaali metalloituihin ohutkalvokondensaattoreihin sen erinomaisen itseparantumiskyvyn ansiosta, minkä avulla kondensaattoreita voidaan käyttää suuremmilla sähkökentillä. Taulukosta nähdään kuitenkin myös se, että PP:n, kuten myös muidenkin polymeerieristeiden, suhteellinen permittiivisyys on tyypillisesti melko pieni, minkä seurauksena myös sen energiatiheys on pieni. PP-kalvoille on kuitenkin uusia typologioita, joiden tavoitteena on saavuttaa jopa $2-2,5 \text{ J/cm}^3$:n energiatiheys. [21][37]

PET on PP:n jälkeen toiseksi yleisin polymeerieriste suuritehoisissa kondensaattorisovelluksissa. PP:iin verrattuna, sen läpilyöntilujuus ei ole niin korkea, mutta hieman suuremman suhteellisen permittiivisyyden ansiosta, PET:n energiatiheys on hieman suurempi kuin PP:n. Tämä johtaa kuitenkin suurempiin dielektrisiin häviöihin, mikä huomataan myös PET:n suuremmasta häviökertoimesta. PET kestää suurempia lämpötiloja, mutta lämpötilan ja taajuuden kasvaessa myös häviökertoimen suuruus kasvaa. Korkean toistotaajuuden tapauksessa, PET ei sovellu suuritehoisiin pulssisovelluksiin. [37]

PC-kalvot olivat 1960-luvulta lähtien useita vuosikymmeniä erittäin suosittuja elektronikkakondensaattoreissa, joiden käyttölämpötila pysyi alle $125 \text{ }^\circ\text{C}$. PC-kalvojen käyttö on kuitenkin vähentynyt merkittävästi, sillä tilalle on kehitetty parempia ratkaisuja sekä PC:n tuotanto on suurimmilta osin lopetettu. Eräs vaihtoehtoinen materiaali PC:n tilalle on PPS, jonka ominaisuudet ovat taulukon 4.1 mukaisesti melko hyvät. [37]

PVDF on polymeeri, jolla on polymeeriksi poikkeuksellisen suuri suhteellinen permittiivisyys. Kuten aiemmin mainittiin, tämä on energiatheyden kannalta hyvä asia, mutta suuren häviökertoimen ansiosta, PVDF:n häviöt ovat myös suuret. Alkujaan PVDF vaikutti olevan lupaava useisiin eri sovelluksiin, mutta sen ongelmiksi havaittiin epälineaarinen kapasitanssin ja jännitteen riippuvuus, huono eristysresistanssi, suuri vuotovirta ja huonot mekaaniset ominaisuudet. [21][37]

4.2 Uudet eristemateriaaliratkaisut

Vaikka nykyaikaiset polymeeripohjaiset eristeratkaisut ovat monella tapaa hyödyllisiä, uusien vaativien sovelluskohteiden, kuten sähkönsiirron ja -jakeluverkon tehon kompensoinnin, joustavien vaihtovirtasysteemien ja lisääntyvien maakaapeleiden ansiosta vaaditaan eristeiltä yhä enemmän. Kondensaattoreille on asetettu yhä korkeammat energia- ja tehotiheysvaatimukset, joihin ei välttämättä päästäisi perinteisillä polymeeriratkaisulla. Kondensaattoreiden suurella energiatheydellä voitaisiin kehittää pienempiä, kevyempiä ja halvempia energian varastointijärjestelmiä. Myös korkeat käyttölämpötilat sekä pitkät elinikäodotukset tuovat haasteita kondensaattoreissa käytettäville eristemateriaaleille. Huomioon on tuotava myös esimerkiksi armeijan käyttämät suuritehoiset pulssisovellukset, joihin perinteinen PP-eriste ei välttämättä ole paras vaihtoehto, mutta sopivilla ratkaisulla voidaan saavuttaa hyviäkin tuloksia. Viimeaikaiset PP-kalvojen tutkimukset ovat keskittyneet parantamaan kalvon permittiivisyyttä, läpilyöntilujuutta, termistä kestävyyttä ja -johtavuutta valmistamalla kopolymeerejä. Jotkin tutkimustulokset väittävät, että jopa kaksinkertaisesti suurempia energiatheyksiä voidaan saavuttaa verrattuna kaupallisiin PP-kalvoihin. Ongelmiksi on kuitenkin havaittu, että dielektrisiä häviöitä ei pystytä ylläpitämään tarpeeksi alhaisina. [37][42]

Kehityksessä on viime aikoina myös keskitytty nanokomposiittien hyödyntämiseen eristeinä, mikä on useiden tutkimuksien mukaan osoittautunut lupaavaksi mahdollisuudeksi. Nanoteknologian avulla voi olla mahdollista parantaa eristeen sähköisiä ominaisuuksia, kuten permittiivisyyttä ja läpilyöntilujuutta, sekä vähentää eristeessä ilmeneviä dielektrisiä häviöitä, mikä olisi suotavaa kondensaattorisovelluksille. Sähköisten ominaisuuksien lisäksi, materiaalin fyysiset, kemikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet ovat osoittautuneet muuttuvan syvästi. [43][44]

PP:n suhteellisen permittiivisyyden kasvattamiseksi voidaan siitä syntentisoida erilaisia kopolymeerejä. Eräs tällainen kopolymeeri on poly(propylene-co-undecen-11-ol), jonka suhteellinen permittiivisyys on noin 4,6. PP:sta on myös syntentisoitu ryhmä kopolymeerejä (propylene-co-p-(3-butenyl)styrene), joista valmistetuilla ohutkalvoilla ilmeni noin 3:n suhteellinen permittiivisyys. Kyseinen suhteellinen permittiivisyys on riippumaton lämpötilasta 20–100 °C:n ja taajuudesta 100 Hz – 1 MHz:n alueilla. Lisäksi syntentisoidujen ohutkalvojen läpilyöntilujuus kasvoi arvoon 645 V/μm ja energiatheys kaksinkertaistui parhaimpiin BOPP-kondensaattoreihin verrattuna arvoon > 5 J/cm³. [37, ks. 4 ja 6] PVDF:n kopolymeeristä (P(VDF-TrFE)) voidaan muokata tietynlaisia ferrosähköisiä aineita, joiden suhteelliset permittiivisyydet ovat erittäin suuria, mikä on kiinnostavaa esimerkiksi energiavarastoinnissa käytettäville kondensaattoreille. Kyseiset materiaalit pystyvät myös purkamaan varauksensa hyvin nopeasti, joten ne ovat käytännöllisiä pulssisovelluksille, kuten kirurgisille lasereille ja energia-aseille. [45][46] Zhang *et al.* tutkimuksessa havaittiin, että näiden muokkausten avulla P(VDF-TrFE):stä voitiin valmistaa terpolymeeri, jonka vapauttama energia on jopa 10 J/cm³, mikä on yli 100 % suurempi

kuin alkuperäisen kopolymeerin [45, ks. 20]. Terpolymeerien suurien suhteellisten permittiivisyyksien ongelmana on kuitenkin se, että niiden polarisaatio kasvaa ja saturoituu nopeasti jo pienillä sähkökentillä. Tähän ongelmaan Chu *et al.* kuitenkin löysivät ratkaisun tutkimalla erästä PVDF:n kopolymeeriä, jonka suhteellinen permittiivisyys on pienempi. Tämän avulla välttyttiin polarisaation saturoitumisesta pienillä sähkökentillä ja 600 V/ μm :n sähkökentällä saavutettiin erittäin suuri energiatiheys (25 J/cm³). [46] Myös eräässä toisessa PVDF:n kopolymeerissä havaittiin samanlaisia ominaisuuksia [47]. Jotta näin suuria energiatiheyksiä saavutettaisiin, vaaditaan eristeiltä myös suuria läpilyöntilujuuksia. Edellä mainituissa tutkimuksissa suuret läpilyöntilujuudet saavutettiin käyttämällä korkealaatuisia ohutkalvoja, mikä herättää kysymyksen siitä, että onko kyseinen teknologia taloudellisesti kannattavaa kaupallisiin sovelluksiin. PVDF:n kopolymeerejen kustannukset ovat kuitenkin alhaiset, joten kyseinen teknologia on erittäin lupaavaa. [45]

Energiatiheyden lisäksi huomioon on otettava kondensaattorin häviöt, jotta voidaan kasvattaa hyötysuhdetta ja estää ylimääräinen lämpeneminen. PVDF:n kopolymeereissä häviöt ovat melko suuret, noin 30 % varastoidusta energiatiheydestä. Häviöitä voidaan kuitenkin vähentää muokkaamalla kopolymeerin rakenneosien suhteita ja lisäämällä rakenteeseen erilaisia monomeereja tai sekoittamalla kopolymeeriin pienihäviöisiä polymeereja. [45] PVDF-pohjaisissa kopolymeeriratkaisuissa on kehitytty myös läpilyöntilujuuden osalta. Eräs kiinnostava menetelmä on kehittää korkealaatuisia monikerroksisia ohutkalvoja koekstruusiolla siten, että rakenteen kerroksina vuorottelee polymeerejä, joissa toisessa on suuri energiatiheys, ja toisessa erittäin suuri läpilyöntilujuus. [45, ks. 34] On myös havaittu, että virheettömät ja ohuet kalvot ovat läpilyöntilujuudeltaan parempia kuin paksummat kalvot [48]. Myös monikerroksisten rakenteiden rajapinnat parantavat läpilyöntilujuutta, joten kalvorakenteessa olisi suotuisaa pyrkiä suuriin määriin yksittäisiä kerroksia [45].

Kopolymeerejen syntentisoinnin lisäksi, PP-pohjaan on suoraan yritetty sekoittaa toisia polymeerejä, joista esimerkkeinä on polyetyleni (LDPE), polyvinyylikloridi (PVC), etyleenipropeenikumi (EPR) ja etyleenivinyyliaetaatti (EVA). Näitä seoksia on helppo prosessoida ja ne ovat erinomaisia eristeitä. [37][49] Myös PVDF:n ja PP:n seoksia on tutkittu. Dang *et al.* valmistivat kyseisiä seoksia, joiden suhteellisen permittiivisyyksien havaittiin olevan suuria laajalla taajuusalueella. Suhteellinen permittiivisyys kasvoi lämpötilan ja PVDF:n määrän kasvaessa ja esimerkiksi huoneenlämpötilassa 50 V-%:n seoksella suhteellinen permittiivisyys oli 5,4. [37, ks. 8]

Eristekalvoja voidaan tehdä myös laminaateista, joilla pyritään saamaan suuri energiatiheys ja läpilyöntilujuus. Monikerroksinen rakenne toteutetaan yhdistämällä kaksi tai useampi kondensaattorikäyttöön tarkoitettu kaupallisesti saatava eristemateriaali. [37] Erään tutkimuksen mukaan, monikerroksiselle eristekalvolle mitattiin parhaimmillaan jopa 14 J/cm³:n energiatiheys, mikä on noin 60 % suurempi kuin alkuperäisen puhtaan PVDF:n ja lähes kaksinkertainen kuin puhtaan PC:n [37, ks. 29].

PET-kalvoilla on käytetty niin sanottuja hybridipinnoitteita, jotka perustuvat polyetyleenioksideihin tai polykaprolaktoneihin ja piioksideihin. Hybridipinnoitteiden avulla kalvojen sähköinen lujuus kasvoi jopa 10–15 %, mutta erityisesti pienillä taajuuksilla kalvojen häviötkin kasvoivat. [37, ks. 32]

Polymeerieristeissä suuriin energiatiheyksiin voidaan päästä myös hyödyntämällä suuri-polaarisia lineaarisia polymeerejä, kuten aromaattista polyureaa (ArPU). Kuten taulukosta 4.1 nähdään, ArPU:lla on polymeeriksi suuri suhteellinen permittiivisyys, minkä takia ArPU:sta valmistetuilla ohutkalvoilla on havaittu myös suuria energiatiheyksiä. Polyurea on myös termisesti hyvin stabiili, joten se on kiinnostava eristeratkaisu suuren lämpötilan käyttökohteille. Taulukossa 4.1 on esitetty myös eräs toinen lineaarinen polymeeri, aromaattinen polytiourea (ArPTU). Sillä on hieman suurempi suhteellinen permittiivisyys kuin ArPU:lla, mutta sen läpilyöntilujuus on samaa suuruusluokkaa kuin polyurean. ArPTU:sta valmistetuilla ohutkalvoilla on kuitenkin havaittu suurempiakin läpilyöntilujuuksia, jopa $< 1100 \text{ V}/\mu\text{m}$. ArPTU:n lataus-purkaushyötysuhde pysyy erittäin korkeana (92,5 %) suurillakin sähkökentillä (jopa $1000 \text{ V}/\mu\text{m}$), kun taas esimerkiksi joidenkin kaupallisten BOPP-kalvojen hyötysuhde laskee 82 %:iin jo $620 \text{ V}/\mu\text{m}$:n sähkökentillä vahvasti kenttäriippuvan johtavuuden vuoksi. ArPTU-kalvojen, kuten myös muidenkin polymeerikalvojen, suureen läpilyöntilujuuteen vaikuttaa merkittävästi kalvojen erittäin tasainen pinta. [45][40] Myös Wu *et al.* tutkimassa meta-polyurea on ominaisuuksiltaan lupaava, sillä sen suhteellinen permittiivisyys ja läpilyöntilujuus ovat suuret sekä häviöt pysyvät melko vähäisinä [41]. ArPU:n ja ArPTU:n sähköiset ominaisuudet tekevät niistä kosteudesta riippumattomia eristeitä, kun taas jotkin toiset aineet, joiden suhteellinen permittiivisyys on suuri, muuttuvat erittäin häviöllisiksi kosteassa ympäristössä [45].

Polymeerien kehityksen mukana on tehty useita merkittäviä tutkimuksia nanokomposiiteista parempien sähköisten ominaisuuksien saavuttamiseksi [50][51][52][53][54][55]. Useiden eri polymeerien, kuten polyeteenin, PP:n, polystyreenin, PVDF:n ja epoksimuovin kanssa on käytetty nanotäyteaineita, kuten piioksidi (SiO_2), kalsiumkarbonaatti (CaCO_3), bariumtitaani (BaTiO₃), kerroksittainen silikaatti, titaani(di)oksidi (TiO_2), alumiinioksidi (Al_2O_3) ja magnesiumoksidi (MgO). Näiden täyteaineiden avulla on voitu parantaa monia haluttuja ominaisuuksia, kuten läpilyöntilujuutta, jännitteen kestoa, osittaispurkausresistanssia ja avaruusvarausominaisuuksia [56][57][58][59]. Näiden lupaavien tutkimustuloksien pohjalta nanokomposiittitutkimuksia on tehty myös keskittyen suuren energiatiheyden kondensaattoreiden eristeisiin [54][55].

Kaavan 3.6 mukaan energiatiheys riippuu aineen suhteellisesta permittiivisyydestä ja sähkökentän voimakkuudesta eli käytännössä läpilyöntilujuudesta, sillä mitä suurempi aineen läpilyöntilujuus on, niin sitä suuremmilla sähkökentän voimakkuuksilla sitä voidaan hyödyntää. Hyödyntämällä polymeerejä (suuri läpilyöntilujuus) ja epäorgaanisia nanotäyteaineita (suuri suhteellinen permittiivisyys) voidaan tuottaa eristeitä, joilla on suurempi energiatiheys kuin alkuperäisillä yksittäisillä aineilla. Ideaalilanteessa, nanotäyte-

aineet kasvattavat eristeen suhteellista permittiivisyyttä vaarantamatta sen läpilyöntilujuutta. Lisäksi, suhteellisen permittiivisyyden kasvattaminen täytyy toteutua niin, että eristeen häviöt eivät kasva liian suuriksi. Käytännössä suhteellisen permittiivisyyden kasvattaminen ylläpitämällä suuri läpilyöntilujuus ja pienet häviöt ei ole mahdollista, vaan niiden väliltä täytyy löytää sopiva kompromissi. [55]

Nanokomposiiteilla on valtava määrä rajapintoja polymeerin ja nanotäyteaineiden välillä, mikä onkin syy nanokomposiittien kiinnostaville ja uniikeille ominaisuuksille. Rajapintojen tilavuuksien ja ominaisuuksien avulla voidaan materiaali muokata halutuksi valitsemalla sopivat pohja-ainekset ja suunnittelemalla rajapinta niiden välille. Kehityksen suunta on läpilyöntiominaisuuksien parantamisessa polymeereissä, sillä mitään merkittävää muutosta polymeerinanokomposiittien permittiivisyydessä ei ole odotettavissa. [38, s. 10–12] Käytettäessä nanopartikkeleita, joiden suhteellinen permittiivisyys on lähellä polymeerimatriisin permittiivisyyttä, nanokomposiittien dielektriset häviöt ovat samaa luokkaa kuin alkuperäisen polymeerin, mutta häviökertoimen $\tan(\delta)$ pienentäminen on kuitenkin mahdollista pienillä määrillä nanotäyteainetta [43].

Polymeerinanokomposiitit ovat erittäin herkkiä rakenteellisille virheille, joilla on merkittäviä vaikutuksia nanokomposiitin läpilyöntilujuuteen. Virheet vaarantavat systeemin energian varastointisuorituskyvyn tai estävät kaikki nanokomposiittirakenteesta saadut hyödyt. Tästä syystä nanokomposiittien prosessointiolosuhteiden tarkka hallitseminen on erittäin tärkeä osa nanokomposiittien hyödyntämisessä. [45]

4.3 Tuotanto ja toteutus

Uusien eristemateriaaliratkaisujen kehittyessä, on myös tuotantomenetelmien kehitettävä. Usein uusien polymeerieristeiden suorituskykyä testataan aluksi laboratorio-olosuhteissa vain pienillä koekappaleilla (kalvon pinta-ala $< 1 \text{ cm}^2$, kapasitanssi $< 10 \text{ nF}$), kun taas kaupallisissa kondensaattoreissa kalvon pinta-ala voi olla useita satoja neliömetrejä ja kapasitanssi useita tuhansia mikrofaradeja. Näin isoissa yksiköissä ohutkalvojen paksuutta ei saada täysin tasaiseksi kohtuullisella hinnalla. Kaupallisten kondensaattorien tuotannon laatu on kuitenkin erittäin tarkkaan valvottua. Esimerkiksi $3 \mu\text{m}$:n BOPP-kalvoilla paksuuden vaihtelu täytyy olla $\pm 5 \%$:n sisällä läpilyöntien estämiseksi. Myös laatuvirheiden, kuten reikien ja pienhiukkasten määrä täytyy kaupallisissa $3 \mu\text{m}$:n BOPP-kalvoissa olla pienempi kuin $1,0/\text{m}^2$. Tämän lisäksi myös nanokomposiittien herkkyys laatuvirheille vie kondensaattorien kehitystä tuotantomenetelmien suuntaan. Moderni ohutkalvotuotanto on kehittynyt tuotantokoneiston kehittyessä, ja tällä hetkellä ohutkalvojen valmistaminen on erittäin nopeaa ($500\text{--}1000 \text{ m/min}$, 200 kg/h). Kehittyneen tuotannon ansiosta ohutkalvojen hinta on alhainen: $5 \mu\text{m}$:n BOPP- ja PET-kalvoille tyypillisesti vähemmän kuin $\$10/\text{kg}$. Edistyneiden tuotantomenetelmien myötä on mahdollista valmistaa myös entistä ohuempia kalvoja, ja esimerkiksi erästä uutta polymeerikalvoa, P(VDF-HFP)-kalvoa, voidaan valmistaa suurissa määrissä jopa $2 \mu\text{m}$:n paksuisena. [45]

Jatkuvien eristekalvojen ja kondensaattoreiden valmistusprosessien hienosäädön myötä odotetaan myös kondensaattoreiden pystyvän toimimaan luotettavasti suuremmilla rasituksilla ja energiatiheyksillä, mutta esimerkiksi uusilla PP-ratkaisuilla voidaan luotettavuuden riippuvuutta vähentää raakamateriaalista ja tuotannosta [21]. Viime vuosikymmenellä tehty tutkimus ohutkalvokondensaattoreiden tuotantoon liittyen on enemmänkin ollut suunnittelun iterointia ja optimointia, kuin pelkän materiaalin tutkimusta. Tämä johtuu siitä, että uusien energiatiheämpien materiaalien käyttäminen vaatii myös mahdollisuuden niiden taloudelliseen massatuotantoon. [60]

Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden luotettavuuteen vaikuttaa niiden itseparantumiskyky. Itseparantumisen ansiosta voidaan myös parantaa kondensaattoreiden energiatiheyksiä, sillä kondensaattoreita voidaan käyttää suuremmilla sähkökentillä. Polymeerieristeiden kemikaaliset ja fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi itseparantumisen tehokkuuteen, joten kondensaattorin eristeratkaisu on myös tältä kannalta tärkeä [19]. Jow *et al.* ehdottaa, että itseparantuvaa elektrodia ja polymeerikalvoa tulisi pitää yhtenä systeeminä ja optimoida rinnakkaisesti. Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden polymeerikalvojen tuotannon kehitystä on vienyt eteenpäin myös itseparantumisenäkökulma, sillä itseparantumiseen vaikuttaa polymeerikalvon paksuus. Uusien polymeerieristeiden tehokkuuden kannalta on tärkeää ymmärtää myös niiden itseparantumisfyysiikkaa ja -kemialla. [60]

Itseparantumisprosessiin ja sitä kautta kondensaattorin luotettavuuteen vaikuttaa rakenteen välikerroksissa oleva ilma. Välikerrosten ilman aiheuttaman vaikutuksen minimointiin on kolme eri menetelmää: käärinnän vahvistus (engl. wrap strengthening), lämpökäsittelyn optimointi (engl. heat treatment optimization) ja päätyjen tiivistäminen tyhjiön jälkeen (engl. end-sealing after vacuum). Käärinnän vahvistuksen tarkoituksena on kasvattaa käämityksen painetta asettamalla yksi ei-metalloitu eristekalvo kondensaattorin käämitysten loppuun, jolloin välikerroksissa oleva ilma voidaan poistaa. Lämpökäsittelyllä pyritään minimoimaan välikerrosten ilma kutistamalla eristekalvoja. Lämpökäsittely vaatii kuitenkin tarkkaa lämpötilan ja käsittelyajan optimointia, jotta vaikutukset eivät ole negatiiviset. Päätyjen tiivistäminen tapahtuu siten, että kondensaattorielementti viedään aluksi tyhjiöön useiksi tunneiksi, jonka jälkeen päätykontaktit tiivistetään vedenkestävillä materiaaleilla, kuten epokseilla. Näiden menetelmien avulla Chen *et al.* testasivat muutamien metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden elinikää pulssivirroilla. Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että käärinnän vahvistamisella elinikä kasvoi 61 %, lämpökäsittelyn optimoinnilla 22 % ja päätykontaktien tiivistämisellä 65 % käsittelemättömiin kondensaattoreihin verrattuna. [61]

Ohuiden metalloitujen elektrodien ongelmana on usein se, että ne rajoittavat kondensaattorin purkausvirran huippuarvoa, sillä kuten alaluvussa 3.5.2 esiteltiin, päätykontaktit voivat irrota suurien virtojen vaikutuksesta, esimerkiksi suurilla pulssivirroilla. Päätykontaktien suunnittelu ja toteutus vaatiikin paranteluja, jotta kondensaattoreita voidaan käyt-

tää suuremmilla virroilla, esimerkiksi pulssisovelluksissa. Elektrodiin suunnittelussa täytyy tehdä kompromissi itseparantumisominaisuuksien parantamisen ja kondensaattorin kuumentamisen minimoimisen väliltä. Myös kondensaattoreiden lämpöhäviöiden optimointi on tärkeä suunnittelunäkökulma. [60]

5. YHTEENVETO

Sähkötekniikan jatkuva kehitys ja elektroniikan määrän valtava kasvu on luonut tarpeen entistä energiatiheämmille ja luotettavammille kondensaattoreille. Sähköenergiateknikassa käytetyin kondensaattori pienillä ja suuremmilla jännitteillä on polypropeenikalvosta valmistettu metalloitu ohutkalvokondensaattori, jonka tuottaminen on nykyään erittäin halpaa ja tehokasta. Kehityksen jatkuessa kondensaattoreilta vaaditaan kuitenkin aina vain enemmän, mikä koituu ongelmaksi perinteisillä kondensaattoriteknologioilla.

Nopean kehityksen asettamiin vaatimuksiin on vastattu pääosin uudennlaisilla eristemateriaaliratkaisuilla, joko kehittämällä täysin uusia materiaaleja tai muokkaamalla perinteisistä eristemateriaaleista parempia. Polypropeenikalvojen ominaisuuksia on pyritty parantamaan permittiivisyyden, läpilyöntilujuuden, termisen kestävyuden ja -johtavuuden kannalta kopolymeerejä valmistamalla. Myös polyvinyylideenifluoridista on valmistettu erilaisia kopolymeerejä, joilla on lupaavia ominaisuuksia.

Kopolymeerien lisäksi myös erilaisia polymeerisekoituksia, laminaattiratkaisuja ja korkean polaarisuuden omaavia polymeerejä on tutkittu ja testattu lupaavin tuloksin. Viime aikoina metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden kehityksessä on kuitenkin keskitytty hyvin paljolti nanokomposiittieristeiden hyödyntämiseen. Nanotäyteaineiden avulla eristemateriaalin ominaisuuksia voidaan muokata erittäin laajasti.

Kehitysnäkymiä on eristemateriaalien lisäksi myös tuotannon ja rakenteellisen toteutuksen puolella. Eristemateriaaleja täytyy pystyä tuottamaan tehokkaasti ja taloudellisesti sekä elektrodien osalta huomioon on otettava metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden itseparantuva rakenne.

Tässä kandidaatintyössä perehdyttiin eristeiden ja kondensaattoreiden teoriaan, jotta ymmärrettäisiin kehitysnäkymien kannalta tärkeimmät asiat, kuten kondensaattoreiden ja eristeiden ominaisuudet, vioittumiset ja rakenteelliset ominaisuudet. Työssä esitettiin metalloituissa ohutkalvokondensaattoreissa käytetyt nykyiset eristemateriaalit, joiden ominaisuuksien tutkimisen avulla voitaisiin ymmärtää motivaatio uusien eristemateriaalien käytölle.

LÄHTEET

- [1] Why HVDC? ABB, web page, available (accessed 25.3.2018): <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc>
- [2] R. P. Stratford, Rectifier Harmonics in Power Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-16, no. 2, March 1980, pp. 271–276
- [3] T.D. Huan, S. Boggs, G. Teysse, C. Laurent, M. Cakmak, S. Kumar, R. Ramprasad, Advanced polymeric dielectrics for high energy density applications, Prog. Mater. Sci., vol. 83, no. 1, Oct. 2016, pp. 236–269.
- [4] High Voltage Direct Current (HVDC) – Fleet Strategy, Transpower, Issue 1, Oct. 2013.
- [5] M. Makdessi, A. Sari, P. Venet, Improved Model of Metalized Film Capacitors, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 2, April 2014, pp. 582–593.
- [6] H. Myers, Introductory Solid State Physics, CRC Press, 2nd ed., 1997, 522 p.
- [7] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, Electrical degradation and breakdown in polymers. United Kingdom: Peter Peregrinus Ltd., 1992.
- [8] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, Helsinki, Suomi: Otatieto, 2. painos, 2003, 520 s.
- [9] J. R. Reitz, F. J. Milford, Foundations of Electromagnetic Theory, 1st ed. Addison-Wesley, USA, 1960, 387 p.
- [10] K. Nousiainen, Suurjännitetekniikka, Opintojakso, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, luentokalvot.
- [11] National Physical Laboratory, Kaye & Laby, Tables of Physical & Chemical Constants, available (accessed 15.3.2018): http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_5.html
- [12] T. Rinne, Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden ominaisuudet tasajännitteellä, Tampereen teknillinen yliopisto, sähköenergiatekniikan laitos, Tampere, diplomityö, kesäkuu 2011, 83 s.
- [13] G. G. Raju, Dielectrics in Electric Fields, Boca Raton: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2nd ed., 2016, 775 p.
- [14] J. B. Birks, Modern Dielectric Materials, Heywood & Company Ltd, London, UK, 1960, 253 p.

- [15] W. J. Sarjaent, J. Zirnheld, F. W. MacDougall, Capacitors, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 26, no. 5, Oct. 1998, pp. 1368–1392
- [16] H. D. Young, R. Freedman, University Physics with Modern Physics, 14th ed. Pearson, 2016, 1593 p.
- [17] W. J. Sarjaent, Capacitor Fundamentals, in Proceedings of the 19th Electrical Electronics Insulation Conference – '89 EEIC/ICWA Exposition, Chicago, USA, Sept. 1989
- [18] I. Rytöluoto, Application of Polypropylene Nanocomposites in Metallized Film Capacitors Under DC Voltage, Tampere University of Technology, Department of Electrical Energy Engineering, Master of Science Thesis, Tampere, Nov. 2011, 90 p.
- [19] C. W. Reed, S. W. Cichanowski, The fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 1, no. 5, 1994, 1, 904-922.
- [20] S.A. Boggs, J. Ho, T.R. Jow, "Overview of laminar dielectric capacitors," vol. 26, no. 2, 2010, pp. 7–13.
- [21] M. Rabuffi, G. Picci, Status Quo and Future Prospects for Metallized Polypropylene Energy Storage Capacitors, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 30, no. 5, October 2002, pp. 1939–1942.
- [22] J. Kammermaier, Physical and chemical conditions for self-healing in metallized capacitors, in Proceedings of the Symposium on High-energy-density Capacitors and Dielectric Materials, Washington, USA, 1981, p. 78.
- [23] H. Heywang, Physikalische und chemische Vorgänge in selbstheilenden Kunststoff-Kondensatoren, Colloid & Polymer Science, vol. 254, no. 2, 1976, pp. 138–147.
- [24] D.G. Shaw, S.W. Cichanowski, and A. Yializis, A Changing Capacitor Technology - Failure Mechanisms and Design Innovations, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, no. 5, 1981.
- [25] L. Hua, L. Fuchang, Z. Heqing, D. Ling, H. Yongxia, K. Zhonghua, Study on Metalized Film Capacitor and Its Voltage Maintaining Performance, in 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2008.
- [26] B. Peng, F. Lin, H. Li, Y. Chen, M. Zhang, F. Lv, Calculation and measurement of metalized film capacitor's inner pressure and its influence on self-healing characteristics, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 5, 2010, pp. 1612–1618.

- [27] R. W. Brown, "Electrical and Thermal Modelling of Low Power Metallised Polypropylene Capacitors," RMIT University, Melbourne, PhD Thesis 2007.
- [28] J. B. Ennis, R. Hartsock, A. J. McPhee, Recent Development in High Energy Density Metallised Electrode Capacitor Technology, IEEE Colloquium on Pulsed Power, 1997, pp. 33/1–33/3.
- [29] E. J. Barshaw, J. White, M. J. Chait, J. B. Cornette, J. Bustamante, F. Folli, D. Biltchick, G. Borelli, G. Picci, M. Rabuffi, High Energy Density (HED) Biaxially-Oriented Poly-Propylene (BOPP) Capacitors For Pulse Power Applications, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, 2007, pp. 223–225.
- [30] B. Drugge, M. Carlen, S. Laihonon, L. Spronck, Cut and dried! - A new dry capacitor for high-voltage DC applications, ABB Review, 2003, pp. 15–20.
- [31] Metallized Polypropylene Film Capacitor DC-Link Capacitor, MKP1848C DC-Link, Vishay Roederstein, 2013, Available: http://www.farnell.com/datasheets/1812503.pdf?_ga=2.65613038.1327220684.1525004574-679328079.1525004574
- [32] C. Du, VSC-HVDC for industrial Power Systems, Chalmers university of technology, PhD thesis, 2017.
- [33] R. O. Ebewele, Polymer Science and Technology, Vol. 24, no. 2, Florida, USA: CRC Press, 2000, 544 p.
- [34] J. Seppälä, Polymeeritekniikan perusteet, 5. tark. ja korj. p., Helsinki, Suomi: Otatieto, 2005, 346 s.
- [35] J. R. Fried, Polymer Science and Technology, 3rd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2014, 663 p.
- [36] A. Thabet, Experimental Study of Space Charge Characteristics in Thin Films of Polyvinyl Chloride Nanocomposites, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 7, no. 1, 2015.
- [37] L. Qi, L. Petersson, T. Liu, Review of Recent Activities on Dielectric Films for Capacitor Applications, Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 4, no. 1, 2014, pp. 1–6
- [38] I. Rytöluoto, Large-Area Multi-Breakdown Characterization of Polymer Films: A New Approach for Establishing Structure-Processing-Breakdown Relationships in Capacitor Dielectrics, Tampere University of Technology, Publication; Vol. 1356.
- [39] Y. Wang, X. Zhou, Q. Chen, B. Chu, Q. Zhang, Recent Development of High Energy Density Polymers for Dielectric Capacitors, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 4, 2010, pp. 1036–1042.

- [40] S. Wu, W. Li, M. Lin, Q. Burlingame, Q. Chen, A. Payzant, K. Xiao, Q. M. Zhang, Aromatic Polythiourea Dielectrics with Ultrahigh Breakdown Field Strength, Low Dielectric Loss, and High Electric Energy Density, *Advanced Materials*, Vol. 25, 2013, pp. 1734–1738.
- [41] S. Wu, M. Lin, Q. Burlingame, Q. M Zhang, Meta-aromatic polyurea with high dipole moment and dipole density for energy storage capacitors, *Applied Physics Letters*, Vol. 104, 2014, 072903-1–072903-4.
- [42] M. Ritamäki, Effects of Thermal Aging on Polymer Thin Film Insulations for Capacitor Applications, Tampere University of Technology, Master of Science Thesis, Tampere, 2014, 117 p.
- [43] M. Takala, Electrical Insulation Materials towards Nanodielectrics, Tampere University of Technology, Department of Electrical Energy Engineering, PhD Thesis, Tampere, 2010
- [44] T. Tanaka, G. C. Montanari, R. Mulhaupt, Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 5, October 2004, pp. 763–784
- [45] Q. Chen, Y. Shen, S. Zhang, Q. M. Zhang, Polymer-Based Dielectrics with High Energy Storage Density, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 44, 2015, pp. 433–458.
- [46] B. Chu, X. Zhou, R. Kailiang, B. Neese, M. Lin, Q. Wang, F. Bauer, Q. Zhang, A Dielectric Polymer with High Electric Energy Density and Fast Discharge Speed, *Science magazine*, Vol. 313, no. 5785, August 2006, pp. 334–336.
- [47] X. Zhou, X. Zhao, Z. Suo, C. Zou, J. Runt, S. Liu, S. Zhang, Q. Zhang, Electrical Breakdown and Ultrahigh Electrical Energy Density in Poly(Vinylidene Fluoride-Hexafluoropropylene) Copolymer, *Applied Physics Letters*, Vol. 94, no. 16, April 2009, 162901–162901-3
- [48] S. J. Laihonen, U. Gäfvert, T. Schütte, U. W. Gedde, DC Breakdown Strength of Polypropylene Films: Area Dependence and Statistical Behavior, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, no. 2, April 2007, pp. 275–286
- [49] I. L. Hosier, A. S. Vaughan, S. G. Swingler, An investigation of the potential of polypropylene and its blends for use in recyclable high voltage cable insulation systems, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, no. 11, June 2011, pp. 4058–4070.
- [50] Z-M. Dang, J-K. Yuan, S-H. Yao, R-J. Liao, Flexible Nanodielectric Materials with High Permittivity for Power Energy Storage, *Advanced Materials*, Vol. 25, 2013, pp. 6334–6365.

- [51] R. C. Smith, J. K. Nelson, L. S. Schadler, Electrical behavior of particle-filled polymer nanocomposites, in *Physical Properties and Applications of Polymer Nanocomposites* (S. Tjong and Y.-W. Mai, eds.), Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010, pp. 70–107
- [52] E. Davi, M. Fréchet, Polymer nanocomposites - major conclusions and achievements reached so far, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol.29, no.6, 2013, pp.29–36.
- [53] K. Y. Lau, A. S. Vaughan, G. Chen, Nanodielectrics: Opportunities and Challenges, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 4, 2015, pp. 45–54.
- [54] Q. Wang, L. Zhu, Polymer nanocomposites for electrical energy storage, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, vol. 49, 2011, pp. 1421–1429.
- [55] P. Barber, S. Balasubramanian, Y. Anguchamy, S. Gong, A. Wibowo, H. Gao, H. J. Ploehn, H. C. Z. Loye, Polymer composite and nanocomposite dielectric materials for pulse power energy storage, *Materials*, vol. 2, 2009, pp. 1697–1733.
- [56] S. Virtanen, T. Krentz, J. Nelson, L. Schadler, M. Bell, B. Benicewicz, H. Hillborg, S. Zhao, Dielectric breakdown strength of epoxy bimodal-polymer-brush-grafted core functionalized silica nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 2, 2014, pp. 563–570.
- [57] M. Roy, J. K. Nelson, R. K. MacCrone, L. S. Schadler, Candidate mechanisms controlling the electrical characteristics of silica/XLPE nanodielectrics, *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 11, 2007, pp. 3789–3799.
- [58] M. Takala, H. Ranta, P. Nevalainen, P. Pakonen, J. Pelto, M. Karttunen, S. Virtanen, V. Koivu, M. Pettersson, B. Sonerud, K. Kannus, Dielectric properties and partial discharge endurance of polypropylene-silica nanocomposite, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 4, 2010, pp. 1259–1267.
- [59] R. C. Smith, C. Liang, M. Landry, J. K. Nelson, L. S. Schadler, The mechanisms leading to the useful electrical properties of polymer nanodielectrics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 1, 2008, pp. 187–196.
- [60] T. R. Jow, F. W. MacDougall, J. B. Ennis, X. H. Yang, M. A. Schneider, C. J. Scozzie, J. D. White, J. R. MacDonald, M. C. Schalnat, R. A. Cooper, S. P. S. Yen, Pulsed Power Capacitor Development and Outlook, *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, 2015.

- [61] Y. Chen, H. Li, F. Lin, F. Lv, Z. Li, M. Zhang, Effect of Interlayer Air on Performance of Dry-type Metalized Film Capacitor in DC, AC and Pulsed Applications, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, no. 4, 2011, pp. 1301–1306.