

**Elektrolyyttikondensaattorien ikääntyminen ja sen  
havaitseminen**

**The aging of electrolytic capacitors and detection of  
thereof**

Matti Jokinen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Matti Jokinen

### **Elektrolyyttikondensaattorien ikääntyminen ja sen havaitseminen**

2022

Kandidaatintyö.

21 sivua, 7 kuvaa.

Tarkastaja: Tommi Kärkkäinen

Tässä kandidaatintyössä tutustuttiin elektrolyyttikondensaattorien ikääntymiseen sekä kahteen eri metodiin, jolla ikääntyminen voidaan havaita laitteistossa käytön aikana. Työn tavoitteena oli tutkia, mitkä tekijät vaikuttavat elektrolyyttikondensaattorien ikääntymiseen, miten tämä vaikuttaa kondensaattorien ominaisuuksiin ja miten näitä voidaan havaita. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Elektrolyyttikondensaattorit ovat yleisiä etenkin tehoelektronikassa jossa ne ovat usein laitteiden nopeiten ikääntyvä komponentti. Tämä johtuu usein kondensaattorien elektrolyytin kuivumisesta ja haihtumisesta, joka johtaa sen sisäisen resistanssin nousuun. Tämä johtaa komponentin lämpenemiseen, joka kiihdyttää ikääntymistä entisestään.

Tutkittiin myös kahta metodia kondensaattorien kunnon selvittämiseen käytön aikana. Ensimmäinen perustui taajuusmuuttajaan kytketyn moottorin vakio-DC-magnetointiin. Toinen metodi taas perustui hakkuriteholähteen LC-suotimen jänniteväreen analysointiin. Taajuusmuuttajan DC-välipiirin kondensaattoripankin kapasitanssi ja sisäinen resistanssi saatiin laskettua, joskin se vaati paljon manuaalista työtä. LC-suotimen kondensaattorien kunto taas pystyttiin määrittämään automaattisesti, joskin kyseisellä metodilla ei voida selvittää kondensaattoripankin tarkkaa kapasitanssia tai sisäistä resistanssia.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Matti Jokinen

### **The aging of electrolytic capacitors and detection of thereof**

2022

Bachelor's Thesis.

21 pages, 7 pictures.

Examiner: Tommi Kärkkäinen

In this thesis the aging of electrolytic capacitors was investigated, along with two methods, that can be used to detect aging in online circuits. The objective of the thesis was to research different causes of capacitor aging, how this affects its properties and how this can be detected. Research was carried out as a literature review.

Electrolytic capacitors are common especially in power electronics, where they often are the most short-lived component. This is often because of drying or evaporation of the electrolyte, which leads to the components equivalent series resistance (ESR) increasing. This leads to the capacitor heating up, which in turn accelerates the aging.

Two different methods for measuring capacitor condition during operation were investigated. The first one was based on the constant DC-magnetization of a motor. The second one was based on analyzing the ripple voltage of an LC-filter in a switching-mode power converter. In the first method the exact capacitance and ESR of the capacitor bank were calculated, but it took a lot of manual labor. On the other hand, the second method was automated, but it could not give exact values for the capacitance or ESR.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Menetelmät .....	7
3.	Kondensaattorien vikaantuminen .....	8
3.1	Sijaiskytkentä ja rakenne .....	8
3.2	Ikääntyminen .....	10
3.3	Lämpötila.....	12
3.4	Jännite- ja virtaväre .....	13
4.	Vikaantumistilanteiden havaitseminen ja ennakointi .....	14
4.1	Huollon suunnittelu .....	14
4.2	DC-välipiirin kondensaattori moottorikytkennässä.....	16
4.3	LC-suotimella varustettu hakkuriteholähde.....	17
5.	Yhteenveto/johtopäätökset .....	18
	Lähdeluettelo .....	20

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	Alternating current, vaihtovirta
C	Kapasitanssi
D	Pulssisuhde
ESR	Equivalent Series Resistance, sisäinen resistanssi
ESL	Equivalent Series Inductance, sisäinen induktanssi
$f_{res}$	Resonanssitaajuus
$i_c$	Kondensaattorin syöttämä virta
$i_d$	Latausvirta
$i_s$	Staattorivirta
L	Induktanssi
$L_o$	Valmistajan ilmoittama elinikä
$L_x$	Odotettu elinikä
R	Resistanssi
t	Aika
$T_o$	Nimellislämpötila
$T_{op}$	Käyttölämpötila
$T_s$	Jaksonaika
$u_c$	Kondensaattorin jännite
$u_d$	Välipiirin jännite

## 1. JOHDANTO

Kondensaattori on yksi kolmesta yleisimmästä sähkötekniikan komponentista vastuksen sekä kelan kanssa ja niitä löytyy lähes jokaisesta modernista sähkölaitteesta. Niitä käytetään mm. varastoimaan energiaa, poistamaan häiriöitä jännitteestä ja suodattamaan signaaleja. Tavallisimpia kondensaattorityyppejä ovat elektrolyyttiset, keraamiset ja muoviset kondensaattorit. Näistä jokaisella on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Esimerkiksi elektrolyyttikondensaattorien kapasitanssi on huomattavasti korkeampi verrattuna muihin tyyppeihin, mutta niiden nimellisjännitteet ovat pieniä eikä niitä voida rakenteellisten ominaisuuksiensa vuoksi käyttää AC-piireissä, kun taas keraamisten kondensaattorien kapasitanssi on pienempi, mutta niiden nimellisjännitteet ovat paljon korkeammat. (Basic Electronics Tutorials, 2013)

Kondensaattori voi vikaantua monin eri tavoin. Ylijännite, oikosulku ja kotelon rikkoutuminen voivat tehdä komponentista käyttökeltottoman välittömästi, mutta myös esimerkiksi olosuhteet, jossa komponenttia säilytetään, voivat aiheuttaa komponentin toiminnan heikkenemistä, joka saattaa johtaa sitä käyttävän laitteen vikaantumiseen. Etenkin elektrolyyttikondensaattoreilla komponentin sisäinen resistanssi kasvaa huomattavasti ajan myötä, joka aiheuttaa komponentin lämpenemistä sekä heikentää sen kykyä ladata ja purkaa itsensä riittävän nopeasti, jolloin niitä sisältävä laite saattaa hajota.

Koska kondensaattorit ovat niin olennainen osa nykypäivän elektroniikkaa, on niiden toimintakyvyn valvomista tutkittu jo paljon. Koska elektrolyyttikondensaattorien elinikä on usein lyhyempi kuin muiden kondensaattorityyppien, niiden tutkimiseen on käytetty eniten aikaa. Etenkin tehoelektronikassa on tärkeää osata ennakoida kondensaattorien toimintakyvyn heikkenemistä, sillä esimerkiksi laitteen teholahteessa olevan kondensaattorin vikaantuminen saattaa estää koko laitteen toiminnan. Suuritehoisissa laitteissa vikatilanne saattaa myös aiheuttaa suuremmissa prosesseissa suuria tappioita tuotannon keskeytyessä, tai pahimmassa tapauksessa vaaratilanteita, esimerkiksi tulipalon.

Työssä tutustutaan tarkemmin elektrolyyttikondensaattorien rakenteeseen sekä niiden vikaantumismekanismeihin ja niiden havaitsemiseen seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

- Mitä ovat elektrolyyttikondensaattorien tavallisimmat ikääntymismekanismit?
- Miten ne voidaan havaita?
- Miten kondensaattorin elinikä vaikuttaa sen toimintaan?
- Millaisen eliniän elektrolyyttikondensaattorit voivat saavuttaa?

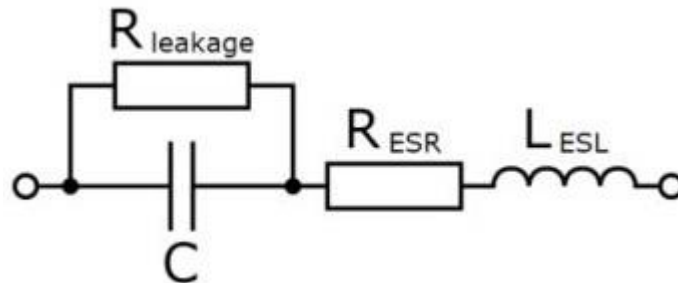
## **2. MENETELMÄT**

Työssä tutkitaan elektrolyyttikondensaattorien ikääntymistä, sen aiheuttamia ongelmia ja niiden havaitsemista kirjallisen tutkimuksen kautta. Lähdetään liikkeelle kondensaattorin rakenteesta ja sen sijaiskytkennästä. Oikeassa elämässä kondensaattori ei ole puhtaan kapasitiivinen komponentti, vaan siinä on myös induktiivisia ja resistiivisiä osia, jotka vaikuttavat kondensaattorissa käytön aikana. Tutkitaan, mistä nämä osat johtuvat, ja niiden vaikutuksesta kondensaattorin toimintaan. Tutustutaan myös kondensaattorien vikaantumiseen eri ajanhetkillä käyttöönotosta ja kyseisten vikaantumisten syistä.

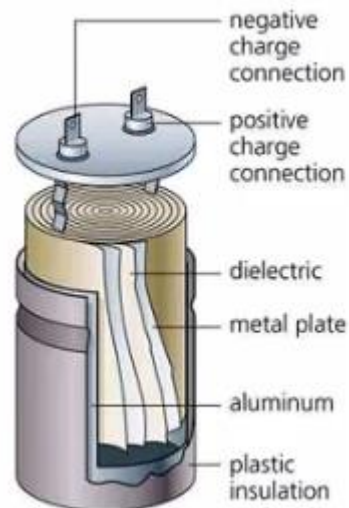
Toinen osa tutkimusta on kondensaattorien ikääntymisen havaitseminen, johon tutustuaan siitä tehtyjen tutkimusten kautta. Tutkitaan kahta erilaista metodia selvittää kondensaattorin tila. Toisella metodilla voidaan selvittää kondensaattorin tarkka kapasitanssi ja sisäinen resistanssi, kun taas toisella voidaan arvioida sen tämänhetkistä kuntoa ilman tarkkaa tietoa senhetkisistä arvoista.

### 3. KONDENSAATTORIEN VIKAANTUMINEN

#### 3.1 Sijaiskytkentä ja rakenne



Kuva 1. Kondensaattorin sijaiskytkentä



Kuva 2. Elektrolyyttikondensaattorin rakenne

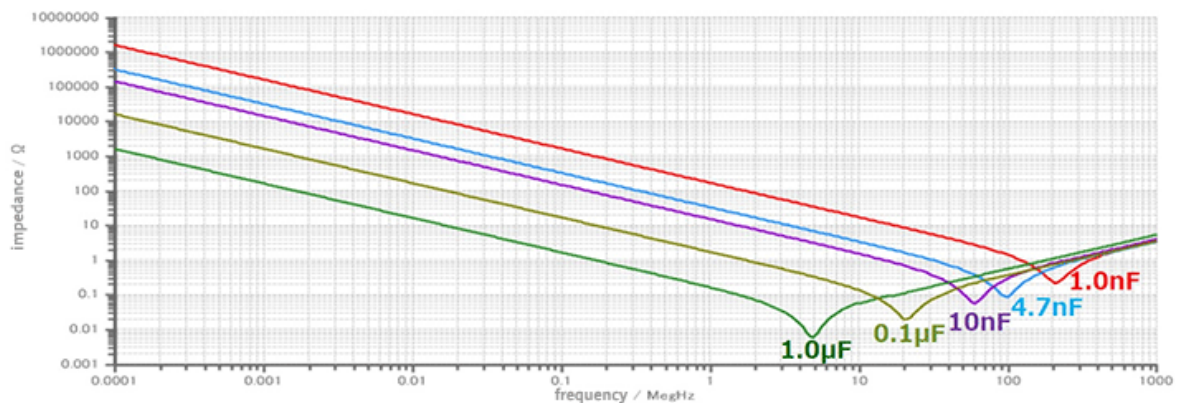
Piirikaavioissa kondensaattori merkitään yhdellä ideaalista kondensaattoria merkitsevällä symbolilla, mutta todellisuudessa kondensaattori, kuten mikä tahansa muukin komponentti, on epäideaalinen. Kuvassa 1 nähdään kondensaattorin muodostuvan neljästä eri komponentista: Ideaalisesta kapasitanssista  $C$ , sisäisestä vastuksesta  $R_{ESR}$ , induktanssista  $L_{ESL}$  sekä eristemateriaalin muodostamasta vastuksesta  $R_{leakage}$ .

Elektrolyyttikondensaattorien energiatiheys on kondensaattorityypeistä suurin, poislukien superkondensaattorit, joiden käyttö ei ole vielä kovin yleistä. Toisin sanoen elektrolyyttikondensaattorien kapasitanssi on huomattavasti korkeampi kuin muille yleisessä käytössä olevilla kondensaattorityypeillä. Tällä on kuitenkin hintansa; koska elektrolyyttikondensaattorit sisältävät enemmän materiaalia, ovat ne huomattavasti epäideaalisempia muihin tyypeihin verrattuna.



Elektrolyyttikondensaattorin sisäinen resistanssi muodostuu sen sisäisistä kontakteista, elektrolyytistä sekä sen elektrodeista. Elektrolyyttikondensaattorien sisäinen vastus on suurempi kuin muissa komponenttityypeissä, johtuen mm. elektrodien suuremmasta pinta-alasta. Kuten tavallinen vastus, se aiheuttaa komponentissa tehohäviöitä hukkalämmön muodossa. Tämä lämpö voi kiihdyttää elektrolyytin haihtumista, joka lyhentää komponentin elinikää. Koska sisäisen resistanssin nousu heikentää kondensaattorin ominaisuuksia, se voi kasvattaa jännitteen värettä esim. tasasuuntaajissa. Koska kaikki tähän resistanssiin kuluva teho on hukkaan heitettyä, heikkenee elektrolyyttikondensaattoreita sisältävien laitteiden toiminta ajan myötä. Elektrolyyttikondensaattorien sisäinen vastus kasvaa ajan myötä ja elinikänsä päässä vastus on noin kaksinkertainen. (Williams, 2004).

ESL eli kondensaattorin sisäinen induktanssi kasvattaa korkeilla taajuuksilla komponentin induktiivista reaktanssia ja sitä kautta sen impedanssia. Mitä suurempi kondensaattorin ESL on, sitä pienempi on sen resonanssitaajuus. Resonanssitaajuudella kondensaattorin kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi kumoavat toisensa, jolloin sen impedanssi muodostuu ainoastaan sen sisäisestä resistanssista. Resonanssitaajuuden ylittyessä, alkaa komponentin impedanssi olla induktiivista, mikä voi tuottaa ongelmia laitteen toiminnassa, mikäli tätä ei ole suunnitelmassa huomioitu. Kuvasta 3 voidaan havaita myös kapasitanssin vaikutus resonanssitaajuuteen. (Maniktala, 2008).



Kuva 3. Kondensaattorin impedanssi eri taajuuden funktiona (Tech Web, 2018)

Resonanssitaajuus voidaan laskea yhtälön 1 avulla:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C * L_{ESL}}} \quad (1)$$

Jossa  $f_{res}$  on resonanssitaajuus,  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi ja  $L_{ESL}$  on kondensaattorin sisäinen induktanssi. Myös tästä yhtälöstä voidaan havaita resonanssitaajuuden laskevan kapasitanssin ja induktanssin noustessa.

Induktanssi voi vaihdella reilustikin, kymmenistä satoihin nanohenryihin, riippuen mm. komponentin rakennusmallista. Aksiaalisen kondensaattorin, jonka kontaktit ovat komponentin molemmissa päässä, induktanssi voi olla kymmenkertainen tavallisempaan, radiaaliseen kondensaattoriin verrattuna (Dubilier, 2016).

Komponentin sisällä oleva eriste ei ole ideaalinen, vaan se muodostaa kapasitanssin rinnalle resistanssin  $R_{leakage}$ . Tämä vastus on toimivassa komponentissa suuri, jolloin vuotovirta on hyvin pieni, vain muutamia mikroampeereja. Vuotovirralla tarkoitetaan virtaa, jonka mukaisesti kondensaattori purkaa itseään, kun se ei syötä energiaa kuormaan, esimerkiksi laitteen ollessa pois päältä. Ideaalisessa kondensaattorissa ei olisi vuotovirtaa, vaan se säilyttäisi varausta ikuisesti. Elektrolyyttikondensaattorin vuotovirta on hyvin suuri verrattuna muihin kondensaattorityyppeihin, joten se ei sovi pidempiaikaiseen energian säilyttämiseen.

### 3.2 Ikääntyminen

Elektrolyyttikondensaattorien elinikä on lyhyempi verrattuna muihin komponentteihin, mukaan lukien eri kondensaattorityyppeihin. Suurimmassa osassa laitteita niiden elinikä on kiinni nimenomaan niissä olevista elektrolyyttikondensaattoreista.

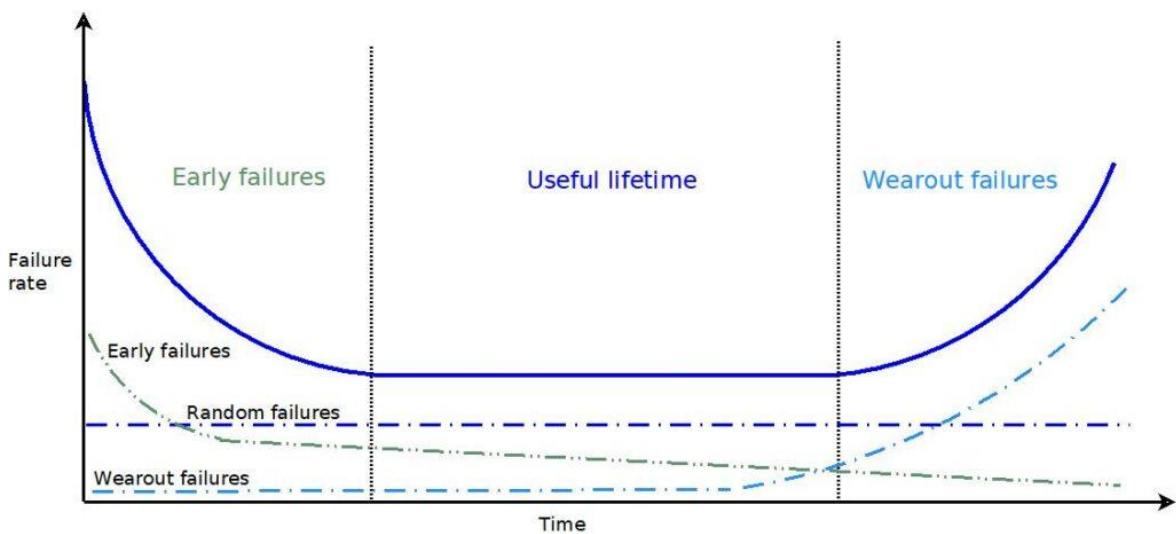
Jos elektrolyyttikondensaattoria ei käytetä pitkään aikaan, esimerkiksi pitkän varastoinnin vuoksi, sen sisällä oleva elektrolyytti kuivuu. Kuivuminen estää kunnollisen eristävän oksidikerroksen muodostumisen elektrodien väliin kun komponentti kytketään jännitelähteeseen. Jos elektrolyytti ei ole vielä täysin kuivunut, pystyy se vielä ”eheyttämään” itsensä. Tämä tapahtuu kytkemällä kondensaattori sarjaan vastuksen kanssa ja syöttämällä sitä nimellijännitteellä. Kytkennässä oleva vastus rajoittaa kytkennän virtaa, jolloin kondensaattoriin muodostuvat heikentyneen oksidikerroksen aiheuttamat lämpöhäviöt pienenevät sillä aikaa kun se eheyttää itseään. Jos tällaisen, kuivuneen kondensaattorin kytkisi laitteeseen ilman eheyttämistä, ei elektrodien pinnalle syntyisi tarvittavaa oksidikerrosta ja kytkentä olisi oikosulussa.

Suurin osa elektrolyyttikondensaattoreista ei ole hermeettisesti sinetöityjä, joten niissä oleva elektrolyytti pääsee ajan myötä haihtumaan. Elektrolyytin väheneminen johtaa kondensaattorin kapasitanssin laskuun ja sisäisen resistanssin nousuun (Gasperi 1996). Sisäisen resistanssin kasvaminen nostaa komponentin sisäistä lämpötilaa, joka kiihdyttää haihtumista entisestään. Yleisesti kondensaattorin pidetään olevan elinkaarensa lopussa kun

sen kapasitanssi on pudonnut noin 20-30 % alkuperäisestä arvosta, elektrolyytistä on haihtunut 40 % tai sen sisäinen resistanssi on kaksinkertaistunut (Laadjal et al, 2018).

Kuvassa 4 kuvataan kondensaattorien vikaantumista ns. kylpyammekäyrän muodossa. Kylpyammekäyrää käytetään usein luotettavuusanalyysissä laitteen vikaantumisen todennäköisyyttä arvioidessa. Käyrä koostuu kolmesta osasta: sisäänajo-, satunnais- ja kulumisvikaantumiskäyristä. Näiden avulla laitteiden ja komponenttien toiminta voidaan jakaa kolmeen ajanjaksoon: sisäänajo-, käyttö- ja kulumiskauteen (Opetushallitus).

Komponenttien vikaantuminen on yleisintä joko heti sen käyttöönoton jälkeen sekä jonkin aikaa käyttöönoton jälkeen tai valmistajan määrittämän eliniän lopussa. Alkupään viat voivat johtua ongelmista komponentin tuotannossa, laitteen kokoonpanossa tai sen suunnittelussa. On myös mahdollista, että komponentteja on säilytetty käyttämättömänä liian pitkään jolloin elektrolyytti on päässyt kuivumaan tai pahimmassa tapauksessa haihtumaan. Jos tällainen kondensaattori otetaan käyttöön, voi se johtaa komponentin tai koko laitteen rikkoutumiseen.



Kuva 4. Kondensaattorien vikaantuminen ajan funktiona (Trelic, 2020)

2000-luvun alkupuolella alkupään rikkoutumiset olivat todella yleisiä ”capacitor plague”, eli ns. kondensaattoriruton aiheuttaman tilanteen takia. Vuonna 2001 tunnetulla komponenttivalmistaja Rubyconilla materiaalitekniikan parissa työskennellyt henkilö vaihtoi työpaikkansa Kiinaan, vieden mukanaan Rubyconilla kehitetyn elektrolyytin kaavan. Myöhemmin sama henkilö muutti Taiwaniin perustaakseen oman yrityksensä, vieden kaavan jälleen mukanaan. Kaavasta jäi kuitenkin puuttumaan osa, jonka takia kondensaattorit olivat

viallisia ja hajosivat pahimmillaan vain muutamia tunteja laitteen käyttöönoton jälkeen. Taiwanissa tuotetaan valtavia määriä komponentteja, joten viallisia komponentteja levisi ympäri maailmaa suurten teknologiayritysten kuten Dellin, IBM:n ja Applen laitteisiin ennen kuin ongelma ehdittiin havaita. Näiden kyseisten komponenttien ja niitä sisältävien laitteiden pitäisi olla jo poissa kierrosta, mutta ei ole mahdotonta että samankaltainen tilanne pääsisi toistumaan tulevaisuudessa. (The Guardian, 2010).

Käyrän keskiosa kuvaa sen odotettua elinikää. Tänä aikana vikatilanteet ovat harvinaisia ja johtuvat useimmiten ulkopuolisista tekijöistä. Nämä vikaantumiset voivat johtua laitteen putoamisesta tai muusta iskusta, jonkinlaisesta jännite- tai virtapiikistä, esimerkiksi salamaniskusta, tai laitteen jonkin muun komponentin vikaantumisesta. Komponentin lähetessä sen eliniän loppua alkavat vikaantumiset taas yleistyä. Elektrolyyttikondensaattoreilla yleisin ajan kanssa yleistyvä vikaantumismekanismi on sen sisällä olevan elektrolyytinesteen haihtuminen tai sen kuivuminen.

### 3.3 Lämpötila

Elektrolyyttikondensaattorin sisäinen resistanssi on riippuvainen lämpötilasta. Jos lämpötila on liian alhainen, elektrolyytin viskositeetti kasvaa, jolloin ionien kulku sen läpi heikkenee, joka taas johtaa komponentin sisäisen resistanssin kasvamiseen. Vaikka sisäisen resistanssin putoaminen on yleisesti ottaen positiivinen asia, korkeampi lämpötila kiihdyttää kondensaattorin sisällä olevan nestemäisen elektrolyytin haihtumista. Tämä taas johtaa sen resistanssin nousuun, näin ollen lyhentäen sen käyttöikää.

Elektrolyyttikondensaattoreille annetaan valmistajasta riippuen eliniäksi noin 1000-10000 tuntia eli noin 40-400 vuorokautta yhtäjaksoista käyttöä nimelliskuormituksella ja -lämpötilalla. Tämä aika ei ole kovin paljon etenkin teollisuudessa, jossa laitteet saattavat olla käytössä kellon ympäri. Mutta jos kondensaattoria käytetään nimellistä pienemmässä lämpötilassa, siinä olevan elektrolyytin haihtuminen hidastuu merkittävästi. Tällöin voidaan sen eliniän arviointiin hyödyntää Arrheniuksen yhtälöä

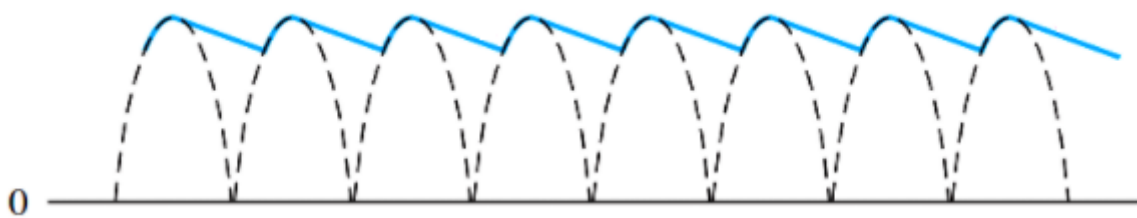
$$L_x = L_o * 2 \left( \frac{T_o - T_{op}}{10} \right) \quad (1)$$

jossa  $L_x$  on kondensaattorin odotettu elinikä lämpötilassa  $T_{op}$  ja  $L_o$  valmistajan ilmoittama elinikä nimellislämpötilassa  $T_o$ . Yhtälön mukaan kondensaattorin elinikä tuplaantuu

käyttölämpötilan pudotessa kymmenellä asteella. Sopivalla jäädytyksellä kondensaattorin elinikä on siis mahdollista moninkertaistaa valmistajan ilmoittamasta.

### 3.4 Jännite- ja virtaväre

Tehoelektronikassa elektrolyyttikondensaattoreita käytetään usein erinäisten jänniteväreiden tasaamiseen. Kuvassa 5 on esitetty katkoviivalla ilman suodatinkondensaattoria toteutetun tasasuuntaajan jännitekäyrä. Sinisellä viivalla on esitetty saman kytkennän jännitekäyrä, johon on lisätty suodatinkondensaattori. Käyrien huipun ja pohjan väliin jäävä alue on kytkennän kapasitanssista riippuva jänniteväre, joka halutaan minimoida.



Kuva 5. AC-DC konvertterin jännitekäyrä. (Engineering Tutorial, 2016)

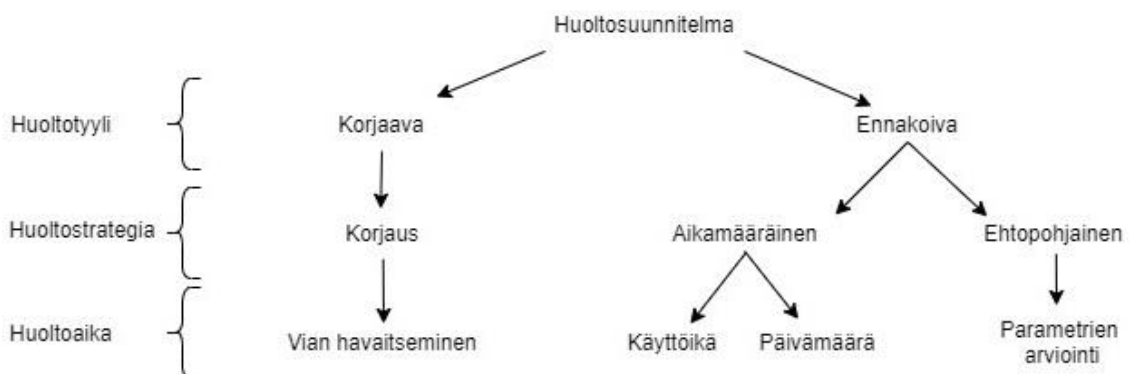
Kun tasasuuntaajan jännite putoaa huippuarvostaan, alkaa kytkennässä oleva kondensaattori purkaa varaustaan jännitetason ylläpitämiseksi. Kuten aiemmin havaittiin, kondensaattorissa on pieni sisäinen vastus, joka johtaa purkutilanteessa siihen, että kondensaattorin läpi kulkee hieman virtaa. Tämä johtaa siihen, että jänniteväreen aikana kondensaattoriin vaikuttaa samalla virtaväre. Kyseinen virran kulku kondensaattorin sisäisen resistanssin läpi aiheuttaa lämpöhäviöitä, samoin kuin minkä tahansa vastuksen kanssa. Lämpöhäviöt nostavat kondensaattorin sisäistä lämpötilaa ja kiihdyttävät elektrolyytin haihtumista, näin ollen lyhentäen sen elinikää. Laitetta suunniteltaessa pitää ottaa huomioon tarvittavan kondensaattorin virtaväreen sietokyky ja sen sisäinen resistanssi. On myös tärkeää ottaa huomioon kondensaattorin sisäisen resistanssin kasvu. Resistanssi voi käytön aikana tuplaantua, mikä voi nostaa virtavärettä huomattavasti. Resistanssin kasvaessa myös kondensaattorin lämpöhäviöt kasvavat, joka nopeuttaa sen ikääntymistä. Virtaväreen ja sisäisen resistanssin nouseminen johtaa tietenkin myös jänniteväreen nousuun, joka heikentää suotimen kykyä tuottaa mahdollisimman tasaista tasajännitettä. Tämä näkyy myös laitteen hyötysuhteen heikkenemisenä.

## 4. VIKAANTUMISTILANTEIDEN HAVAITSEMINEN JA ENNAKOINTI

Koska kondensaattorit ovat etenkin tehoelektroniikan laitteissa lyhytikäisimpiä komponentteja, on niiden vikaantumisen havaitsemista teollisuudessa tutkittu paljon. Suurin osa tutkituista metodeista eivät kuitenkaan ole päätyneet teolliseen käyttöön asti. Tämä selittyy usein metodien monimutkaisuudella tai niiden tuomilla lisäkustannuksilla, niin suunnittelussa kuin käytönkin aikana. Tässä luvussa tutustutaan kahteen metodiin, joissa olisi potentiaalia teollisiin käyttötarkoituksiin ja keskustellaan niiden hyödyistä ja haitoista.

### 4.1 Huollon suunnittelu

Yksinkertaisin tapa selvittää kondensaattorin kunto olisi irroittaa se laitteesta ja mitata sen kapasitanssi tai sisäinen resistanssi LCR-mittarilla. Tämä ei tietenkään ole yleisesti ottaen kovin käytännöllistä. Kondensaattorit saattavat olla juotettu kiinni piirikorttiin, jolloin ne pitäisi ensin juottaa irti, mitata ja juottaa takaisin kiinni. Niitä voi olla myös niin monta kappaletta, että jokaisen irroittaminen ei olisi kannattavaa. Laitteiden voi myös olla tarkoitus olla jatkuvassa käytössä, poislukien vika- tai huoltotilanteet. Tällöin yksittäistä komponenttia ei voi noin vain irroittaa mittausta varten ilman, että siitä muodostuu liian suurta haittaa muun järjestelmän toiminnalle. Tämän takia teollisuudessa luodaan laitteille huoltosuunnitelma, jonka mukaan laite huolletaan.



Kuva 6. Vuokaavio huoltosuunnitelmalle (Peyghami et. al. 2020)

Kuvassa 6 on esitelty vuokaavio, jonka mukaan voidaan luoda huoltosuunnitelma halutulle laitteelle. Ensinnäkin päätetään missä tilanteessa laite halutaan huoltaa. Korjaavassa huollossa laitetta huolletaan vain kun jokin sen osista vikaantuu ja laite ei enää toimi,

esimerkiksi kun kondensaattori on elinkaarensa päässä ja mahdollisesti aiheuttanut laitteessa oikosulun. Pienemmissä laitteissa, jossa helposti vikaantuvan osan hajoaminen ei aiheuta vaaratilannetta tai riko muuta laitteistoa, tämä on kelvollinen menettelytapa. Suuremmissa laitteistoissa, esimerkiksi teollisuudessa, jossa yhen osan vikaantuminen voi pysäyttää koko prosessin tai aiheuttaa vaaratilanteen, tämä ei ole kannattavaa niin taloudellisen kuin turvallisuudenkaan näkökulmasta. Tällöin turvaudutaan ennakoivaan huoltomenetelmään.

Ennakoivalla huollolla pyritään korvaamaan lyhytikäiset osat ennen kuin ne pääsevät vikaantumaan. Kuvassa tähän on esitetty kolme erilaista huoltostrategiaa. Laite voidaan huoltaa tietyn ajan välein, laitteen varsinaisesta käyttöajasta piittaamatta, esimerkiksi tehtaan seisokin aikana. Saman ennalta suunnitellun huollon aikana voidaan vaihtaa tai huoltaa muita laitteen osia, jolloin laitetta ei tarvitse erikseen pysäyttää näiden osien takia, mikä ei olisi yhtä kustannustehokasta (Davoodi et. al. 2020). Laite voidaan myös huoltaa silloin kun sitä on käytetty tietyn aikaa. Nämä huoltotavat ovat jo parempia ehkäisemään vikatilanteita, mutta nekin eivät ole täydellisiä. Jotkin komponentit saattavat päästä elinikänsä päähän jo ennen määräaikaishuoltoa, jolloin laite saattaa vikaantua, vaikkei sen pitäisi siihen asti päästä. Päinvastaisesti voidaan myös miettiä vielä toimivan komponentin ennaikaisen vaihtamisen ympäristöystävällisyyttä tai sen taloudellista kannattavuutta.

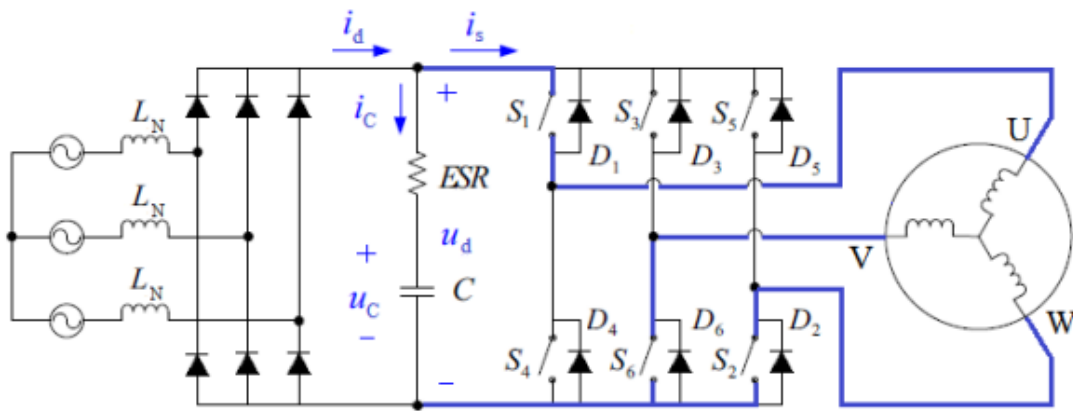
Kolmas ennakoiva huoltostrategia on ehtopohjainen huolto. Tällöin tietyn, usein huoltoa taikka korvausta vaativan komponentin kuntoa valvotaan esimerkiksi käyttötarkoitukseen sopivilla mittauksilla. Mittaustuloksista lasketaan komponentin parametrit tai niitä verrataan olemassaolevaan dataan. Parametrin alittaessa tai ylittäessä tietty ohjearvo, komponentti huolletaan tai vaihdetaan. Tämä on haastavin huoltostrategia toteuttaa, sillä silloin laitteeseen on suunniteltava rinnalle ylimääräinen valvontalaitteisto, joka mittaa vikaantumisalttiin osan toimintakykyä. Tämä tuottaa ylimääräisiä kustannuksia laitteiston suunnitteluun ja käytönaikaiseen valvomiseen, mutta on kannattava sijoitus jos laitteiston tai prosessin äkillinen pysähtyminen aiheuttaisi siihen verrattuna kohtuuttomia kustannuksia (Hyland, Arnljot, Rausand, 2009).

Kuten aiemmin mainittiin, komponenttien ehtopohjainen huoltaminen on usein monimutkaista ja kalliimpaa kuin määräaikaishuolto. Tämän takia suuri osa tutkituista menetelmistä ei loppujen lopuksi päädy käyttöön. Tässä tutkimuksessa perehdytään tapoihin, joiden avulla kondensaattorin kuntoa laitteessa voidaan tarkkailla ja jotka olisivat hyödynnettävissä kustannustehokkaasti teollisuudessa. Tällaisia metodeja ovat ne, jotka vaativat mahdollisimman vähän ylimääräistä instrumentointia ja hyödyntävät esimerkiksi

laitteen jo itsestään antamaa mittaustietoa, vaikkapa sen tulo- ja lähtöjännitteestä. Tätä tietoa voidaan hyödyntää kondensaattorin kapasitanssin ja sisäisen resistanssin määrittelyyn.

## 4.2 DC-välipiirin kondensaattori moottorikytkennässä

LUT-Yliopistolla tehdyssä diplomityössä on tutkittu taajuusmuuttajan välipiirissä olevan elektrolyyttikondensaattoripankin kunnan arviointia hyödyntämällä siihen kytketyn moottorin vakio-DC-magnetointia. Tarvittava mittaustieto saatiin mittaamalla DC-välipiirissä olevan kondensaattorin jännitettä sekä taajuusmuuttajalla ajettavan moottorin staattorivirtaa oskilloskoopilla.



Kuva 7. Tutkimuksessa käytetyn taajuusmuuttajan piirikaavio

Kuvassa 7 on esitelty kyseisessä tutkimuksessa tutkitun kytkennän piirikaavio. Välipiirin kondensaattorien latausvirran  $i_d$  ollessa nolla, on kondensaattorien syöttämä virta  $i_c$  saman suuruinen, mutta erisuuntainen moottorin staattorivirran  $i_s$  kanssa, jolloin

$$i_c = -i_s \quad (2)$$

Kaaviossa kondensaattoripankin sisäinen resistanssi  $ESR$  on esitetty erillisenä vastuksena. Kondensaattorien jännitteen muutosta  $u_c$  sekä välipiiristä mitattua jännitettä  $u_d$  voidaan tällöin merkitä yhtälöillä 3 ja 4

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} * i_c = -\frac{1}{C} * i_s \quad (3)$$

$$u_d = u_c + ESR * i_c = u_c - ESR * i_s \quad (4)$$

Kondensaattoripankin kapasitanssi ja sisäinen resistanssi voidaan siis näiden yhtälöiden avulla selvittää yhtälöillä 5 ja 6.



$$ESR = \frac{\Delta u_d}{i_s} \quad (5)$$

$$C = \frac{D * T_s * i_s}{\Delta u_c} \quad (6)$$

Jossa  $D$  on taajuusmuuttajan pulssisuhde ja  $T_s$  on jaksonaika. Näistä muodostuu kondensaattorin purkuaika, jota tarvitaan sen purkautumiskyvyn määrittelyyn.

Tutkimuksessa jännite ja virta mitattiin oskilloskoopilla, jolloin mittauslaitteisto olisi laitteiden omistajalle melko pieni investointi. Vaikka mittaus on teoriassa yksinkertainen, on sen automatisointi kuitenkin haasteellista. Testissä jännitteiden arvot luettiin suoraan oskilloskoopin ruudulta, jossa on havaittavissa paljon kytkinten aiheuttamaa häiriötä. Tämänhetkinen versio vaatisi siis ylimääräisiä työtunteja siihen, että laitteen tarkastajan pitäisi tehdä kyseinen mittauskytkentä, tulkita arvot oskilloskoopista ja tämän jälkeen laskea kondensaattorin kunto. Ainoa automatisoitava osa tästä on kapasitanssin ja sisäisen resistanssin laskeminen, jolloin kaikki tarvittavat tiedot voidaan vain syöttää jonkinlaiseen laskentaohjelmaan, joka antaa arvion kondensaattorin tilasta. Koska mittausta ei voida automatisoida kunnolla, ei se välttämättä ole yksinkertaisuudestaan huolimatta kannattavaa jos testattavia laitteita on liian paljon. ( Karhumäki, J.).

Yksinkertaisuudestaan ja edullisuudestaan huolimatta mittaus ei kuitenkaan ole täydellinen. Kytkennällä voidaan mitata ainoastaan koko välipiirin kapasitanssi sekä sisäinen resistanssi. Toisinsanoen jos välipiirissä on useita kondensaattoreita, jokaista yksittäistä kondensaattoria ei voida testata. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin kondensaattorien ikääntymisessä olevan vain pieniä eroja, joten yleisesti ottaen tämä ei ole ongelma. Ainoa tilanne milloin tämä aiheuttaa ongelmia on se, jos yksi kondensaattoreista syystä tai toisesta kuluu nopeammin tai vikaantuu yllättäen. Mittalaitteista johtuva epävarmuus voi myös vääristää tuloksia jonkin verran. Epävarmuuteen vaikuttaa myös aiemmin mainittu kytkimistä aiheutuva häiriö.

### 4.3 LC-suotimella varustettu hakkuriteholähde

Hakkuriteholähteet ovat erittäin yleisiä teholähteitä korkean hyötysuhteensa ja pienen kokonsa ansiosta. Niiden suurin ongelma kuitenkin on niiden ulostulojännitteeseen aiheuttamat korkeataajuiset häiriöt. Näitä häiriöitä suodatetaan pois erinäisillä suotimilla. Chung Chengin yliopistolla Taiwanissa tutkittiin hakkuriteholähteen LC-suotimessa olevan kondensaattorin kunnan tarkkailua sen yli mitatun jännitteen perusteella. (Chen, et. al. 2008)

Tutkimuksessa mitattiin kondensaattorin jännitettä käytön aikana. Tästä jännitteestä suodatettiin kaistanpäästösuotimella siinä oleva tasajännitekomponentti ja korkeataajuinen kohina, jolloin jäljelle jäi vain sen vaihtojännitekomponentti, eli kondensaattorin jänniteväre. Tämä jänniteväre tasasuunnattiin ja siihen jäljellejäänyt väre poistettiin alipäästösuotimella. Tästä saatiin kondensaattorin kuntoa merkitsevä tasajännitearvo, jota voitiin vertailla aiemmin määritettyyn ohjearvoon komparaattorilla. Kondensaattorin vanhetessa sen sisäinen resistanssi kasvaa, jolloin sen jänniteväre kasvaa. Tämä johtaa yllä kuvatun jännitearvon nousuun. Piiriin lisättiin myös kahden sekunnin viive, jotta systeemi ei hälyttäisi laitetta käynnistäessä johtuvista transienteista.

Teollisia käyttökohteita ajatellen tämä metodi olisi erittäin hyvä kandidaatti jatkokehitykselle. Se on jo prototyypivaiheessa suunniteltu automaattiseksi järjestelmäksi, joka antaa tiedon siitä, kun kondensaattori alkaa olla elinkaarensa päässä. Se on tutkijan mukaan mahdollista sisällyttää hakkuriteholähteeseen jo suunnitteluvaiheessa, joten se ei vaatisi ylimääräisiä laitteita tai mittauksia. Se ei myöskään ole kovin monimutkainen kytkentä. Systeemi sisältää ainoastaan kaksi suodinta, tasasuuntaajan, komparaattorin ja viiveen. Yksinkertaisuus johtaa myös pienempiin investointikustannuksiin, niin suunnittelun kuin komponenttienkin suhteen.

Yksinkertaisuus tuo kuitenkin aina mukanaan varjopuolia. Systeemi tarkkailee ainoastaan kondensaattorin jänniteväreestä johdettua jännitearvoa, jota verrataan kokeellisesti määritettyyn ohjearvoon. Tämä johtaa siihen ettei kondensaattorin tarkkaa kapasitanssia tai sisäistä resistanssia voida mitata (Zhao, et. al. 2020). Näitä arvoja ei tosin ole välttämätöntä tietää teollisessa käytössä, vaan tärkeintä on laitteen toimintakyvyn määrittäminen, mihin systeemin antaman jännitearvon riittää. Tämä systeemi, kuten aiemminkin esitelty, ei myöskään kykene selvittämään yksittäisen komponentin kuntoa useamman kondensaattorin kytkennässä.

## **5. YHTEENVETO/JOHTOPÄÄTÖKSET**

Elektrolyyttikondensaattorit ovat pitkään olleet tärkeä komponentti elektroniikassa ja tulevat sellaisena myös toistaiseksi pysymään. Niiden lyhytikäisyys luo kuitenkin haasteita etenkin teollisuudessa. Ajan myötä elektrolyyttikondensaattorin kapasitanssi laskee huomattavasti enemmän kuin muista materiaaleista valmistetuissa kondensaattoreissa. Kondensaattorin rakenteeseen ja sijaiskytkentään tutustuessa havaittiin elektrolyyttikondensaattorin huomattavasti suurempien elektrodien pinta-alan olevan suurempi kuin muissa

kondensaattorityypeissä. Tämä johtaa niiden huomattavasti suurempaan sisäiseen resistanssiin, mikä aiheuttaa kondensaattorissa suurempia häviöitä. Elektrolyyttikondensaattoreissa on myös havaittavaissa myös eristeen epäideaalisesta johtuva vuotovastus, jonka vuoksi ne eivät säilytä varaustaan kovin pitkään.

Elektrolyyttikondensaattorien vikaantuminen on yleisintä niiden käyttöönoton alussa ja annetun eliniän lopussa. Alkupään ongelmat saattavat johtua esimerkiksi komponenttien suunnittelu- tai valmistusongelmista. Lopussa ongelmat johtuvat komponentin ikääntymisestä, minkä yleisin syy on kondensaattorin elektrolyytin kuivuminen. Näiden tilanteiden välissä vikaantumistilanteet ovat huomattavasti harvinaisempia, ja johtuvat usein ulkopuolisista ongelmista, esimerkiksi jännitepiikeistä.

Lämpötila, jossa kondensaattori toimii, vaikuttaa vahvasti sen elinikään. Mitä kuumemmissa olosuhteissa kondensaattoria käytetään tai säilytetään, sitä nopeammin sen elektrolyytti kuivuu. Kondensaattoreille annetaan tietty eliniän arvio niiden nimellislämpötilassa. Arrheniuksen yhtälön mukaan tämän eliniän pitäisi tuplaantua aina kun käyttölämpötila laskee kymmenellä asteella.

Elektrolyyttikondensaattoreiden lyhytikäisyyden ja niiden yleisyyden takia niiden kunnan arvioimista on tutkittu paljon. Useat näistä ratkaisuista liittyvät tehoelektronikassa oleviin kondensaattoreihin. Jotkin näistä ratkaisusta sallivat ainoastaan kondensaattorin kunnan arvioinnin, joka perustuu jonkinlaisiin aiemmin mitattuihin ohjearvoihin. Toiset ratkaisut taas antavat mahdollisuuden selvittää kondensaattorin tarkat parametrit. Useat näistä metodeista eivät kuitenkaan päädy käyttöön monimutkaisuutensa tai huonon kustannustehokkuutensa vuoksi vaan päädytään esimerkiksi vaihtamaan kondensaattorit tietyn ajan välein.

## LÄHDELUETTELO

- Basic Electronics Tutorials. "Introduction to Capacitors, Capacitance and Charge," July 26, 2013. [https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap\\_1.html](https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap_1.html).
- ROHM TECH WEB: Technical Information Site of Power Supply Design. "Understanding the Frequency Characteristics of Capacitors, Relative to ESR and ESL | Basic Knowledge | ROHM TECH WEB.". 2018. Accessed August 4, 2021. <https://techweb.rohm.com/knowledge/emc/s-emc/03-s-emc/7549>.
- Williams, T. "*The Circuit Designer's Companion*." (pp. 92-93). (2004). Kidlington: Elsevier Science & Technology.
- Maniktala, Sanjaya. "Troubleshooting Switching Power Converters - A Hands-on Guide - 4.2.6 Vibration Test Casualties." (pp. 83-84). (2008). Elsevier.
- C. Dubilier, "Aluminum electrolytic capacitor application guide," 2016, available at <http://www.cde.com/resources/catalogs/AEappGUIDE.pdf> 5.8.2021
- Gasperi, M.L. "Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors." In *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, 3:1347–51 vol.3, 1996. <https://doi.org/10.1109/IAS.1996.559241>.
- Laadjal, Khaled, Mohamed Sahraoui, Antonio J. Marques Cardoso, and Acácio Manuel Raposo Amaral. "Online Estimation of Aluminum Electrolytic-Capacitor Parameters Using a Modified Prony's Method." *IEEE Transactions on Industry Applications* 54, no. 5 (September 2018): 4764–74. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2836923>.
- The Guardian. "How a Stolen Capacitor Formula Ended up Costing Dell \$300m," June 29, 2010. <http://www.theguardian.com/technology/blog/2010/jun/29/dell-problems-capacitors>.
- Trelic. "Bathtub Curve – a Useful Tool to Understand Failure Rates." Accessed August 16, 2021. <https://www.trelic.fi/blog/bathtub-curve/>.
- Opetushallitus. "6.2 Johdanto Luotettavuustekniikkaan." Accessed August 16, 2021. [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_6-2\\_johdanto\\_luotettavuustekniikkaan.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_6-2_johdanto_luotettavuustekniikkaan.html).

Engineering Tutorial. "Ripple Voltage in Rectifiers," July 7, 2016.

<https://engineeringtutorial.com/ripple-voltage-rectifiers/>.

Peyghami, Saeed, Frede Blaabjerg, Jose Rueda Torres, and Peter Palensky. "Maintenance Scheduling in Power Electronic Converters Considering Wear-out Failures." In *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, P.1-P.10, 2020. <https://doi.org/10.23919/EPE20ECCEEurope43536.2020.9215657>.

Davoodi, A., Peyghami, S., Yang, Y., Dragičević, T. and Blaabjerg, F., 2020, November. A Preventive Maintenance Planning Approach for Wind Converters. In *2020 5th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)* (pp. 1-8). IEEE.

Hyland, Arnljot, and Marvin Rausand. *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*. Wiley-Blackwell, 2009. Print.

Karhumäki, Jukka. "On Site Measurements of DC Link Electrolytic Capacitor Bank of Frequency Converter Using Constant DC Magnetization of the Motor," 2015. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015120121409>

Chen, Yaow-Ming, Hsu-Chin Wu, Ming-Wei Chou, and Kung-Yen Lee. "Online Failure Prediction of the Electrolytic Capacitor for LC Filter of Switching-Mode Power Converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55, no. 1 (January 2008): 400–406. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.903975>.

Zhao, Zhaoyang & Davari, Pooya & Lu, Wei & Wang, Huai & Blaabjerg, Frede. (2020). An Overview of Condition Monitoring Techniques for Capacitors in DC-Link Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 10.1109/TPEL.2020.3023469.