

Roottorin lämpötilan määrittäminen
Rotor temperature determination
Joonas Vähätiitto

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Joona Vähätiitto

Roottorin lämpötilan määrittäminen

2021

Kandidaatintyö.

24 s.

Tarkastaja: Tutkijatohtori Pekko Jaatinen

Sähkömoottoreiden yleistyttyä maailmalla huomattavan paljon, niiden lämpötilan seuranta on yhä tärkeämmässä asemassa. Sähkökone menettää suorituskykyään ylikuumentessa, kuten kestopagneetti tahtikoneen kestopagneettien demagnetoituminen tai sähkökoneiden laakereiden epämuodostuminen. Roottorin lämpötilan määrittäminen on aktiivinen tutkimusalue, mihin liittyen uusia menetelmiä kehitetään jatkuvasti.

Tässä kandidaatintyössä tehdään kirjallisuuskatsaus erilaisiin menetelmiin, joita käytetään tai voi käyttää sähkökoneen roottorin lämpötilan määrittämisessä. Kandidaatintyössä käytetään aineistoja ja tutkimuksia, sekä perehdytään kaupallisten antureiden käytettävyyteen roottorin lämpötilan määrittämisessä.

Kandidaatintyössä selvitettiin, että sähkökoneen roottorin lämpötila on suosittu tutkimuksen aihe ja sitä varten on myös kehitetty omia langattomia lämpöantureita. Kandidaatintyössä tarkasteltiin myös eri estimointimenetelmiä lämpötilan määrittämiseen induktio- ja kestopagneettisähkökoneille.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Joona Vähätiitto

Rotor temperature determination

2021

Bachelor's Thesis.

24 p.

Examiner: Postdoctoral researcher Pekko Jaatinen

As electric machines become substantially more popular around the world, tracking their temperatures are becoming a more important topic. An electric machine loses its performance when it overheats, like permanent magnet synchronous machines permanent magnets demagnetizing or an electric machine's bearings deforming. Determining rotor temperature has been researched a lot, and new methods are being researched to this day.

This bachelor's thesis is a literature review to discover different methods, which are being used or are usable to estimate the temperature of an electric machine's rotor. Research papers and literature are being used, and commercial sensors usability are being reviewed as usable methods for estimating rotor temperature.

In the bachelor's thesis it was discovered that the rotor of an electric machine is a popular subject for research and commercial wireless sensors have been designed precisely for this purpose. In the bachelor's thesis a few different methods to estimate rotor temperature mathematically for induction- and permanent magnet machines were examined.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Sähkökoneen roottori.....	7
3.	Roottorin lämpenemä	9
4.	Anturit ja mittarit.....	11
4.1	Langalliset	11
4.1.1	PT100 ja PT1000.....	11
4.1.2	Termistorit	12
4.1.3	Termopari	12
4.2	Langattomat	12
4.3	Infrapunälämpömittari eli lämpökamera	14
5.	Matemaattiset mallit	16
5.1	Kestomagneetti tahtikoneen, PMSM, roottori.....	16
5.2	Induktiokoneen, IM, roottori	18
6.	Muut	20
7.	Johtopäätökset	21
8.	Yhteenveto.....	22
	Lähteet	23

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

BEMF	Back electromotive force, vastejännite
EMF	Electromotive force, lähdejännite
IM	Induction machine, induktioakone
MRFAC	Model reference fuzzy adaptive control, referenssimalli sumeasäätöohjaus
PMSM	Permanent magnet synchronous motor, kestopagneettitahtikone

1. JOHDANTO

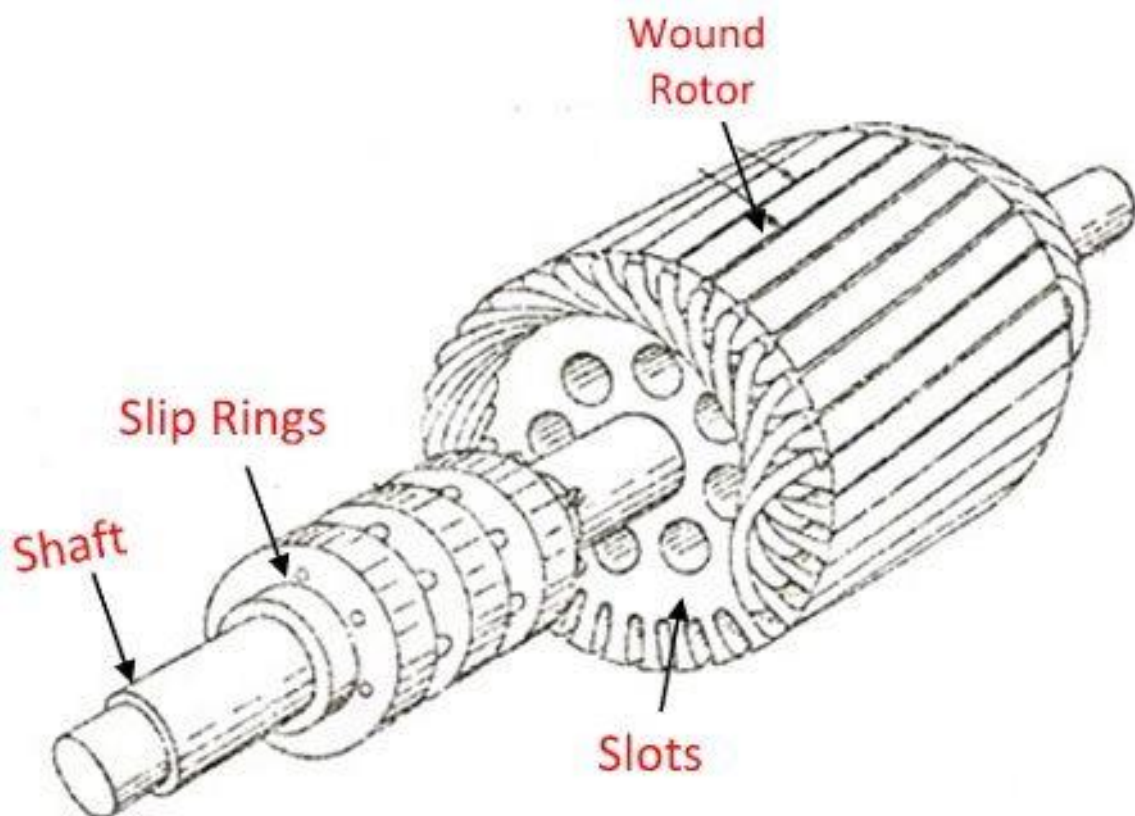
Sähkökoneiden käyttö yleistyy maailmalla, niiden käyttöä seurataan ja varsinkin käyttölämpötiloja. Käyttölämpötilan määrittäminen, mittaamalla tai estimoimalla matemaattisella mallilla, on oleellinen osa sähkökoneen suunnittelua ja kehitysprosessia. Siihen kuuluu sähkökoneen eri komponenttien, kuten laakereiden, käämityksen, rungon tai roottorin lämpötilan määrittäminen. Lämpötila on yleisin syy sähkökoneen toimimattomuuteen. Tässä kandidaatintyössä selvitetään eri tapoja määrittää sähkökoneen roottorin lämpötilaa. Aihealueen rajaamiseksi tässä kandidaatintyössä ei oteta huomioon standardeja, vaikka ovat oleellinen osa sähkökoneiden suunnittelu- ja kehitystyötä.

Sähkökoneen lämpötilaan vaikuttaa moni asia. Tärkeimpinä ovat koneen pyörimisnopeus ja sitä vastaan asetettu vääntömomentti. Molemmat ovat päävaikutteita myös roottorin lämpötilaan. Sähkökoneen lämpötilojen määrittämiseen löytyy monia tapoja, mutta roottorin lämpötilan määrittämisestä löytyy suurimpana ongelmana se, että roottori on sähkökoneen suurin liikkuva osa. Tämä vaikeuttaa fyysisten antureiden kuten PT100-antureiden käyttöä. Helppoin tapa määrittää lämpötila on soveltaa matemaattisia malleja. Kuitenkin tämä on vain teoreettinen tapa ja on myös hyvä selvittää tapoja määrittää lämpötila fyysisesti. Erilaisia tapoja on tutkittu paljon.

Kandidaatintyön aluksi selvitetään sähkökoneen roottorin toimintaa ja sen lämpömittauksen tarvetta ja esitellään kaupallisiin antureihin liittyviä menetelmiä roottorin lämpötilan mittaamiseen, selvitetään niiden toiminta ja pohditaan niiden luotettavuutta. Kaupallisia antureita on monia erilaisia ja niiden käyttö on yleistä sähkökoneiden kanssa. Kandidaatintyössä pohditaan myös sähkökoneen roottorista tehtyjä tutkimuksia. Tässä työssä ei perehdytä syventävästi tutkimuksiin.

2. SÄHKÖKONEEN ROOTTORI

Sähkökoneen roottori on sähkökoneen pyörivä osa. Se sijoitetaan staattorin sisäpuolelle ja on suoraan kiinni akselissa. Roottorin osia ovat roottorikäänitys ja roottorin ydin. Kuvassa 1. on esitetty induktio-koneen vaihekäämiroottorin rakenne. Kuvasta näkee roottorin perusrakenteen



Kuva 1. Induktiokoneen roottorin rakenne (Circuit Globe 2021)

Roottori pyörii staattorin sisällä sen generoimassa pyörivässä magneettikentässä, jolloin staattorin ja roottorin välille indusoituu lähdejännite EMF (Circuit Globe 2021). Roottoreita on erilaisia, mutta niiden selvitys ei kuulu tähän työhön. Roottoriin ovat kiinnitettynä kaksi sähkökoneen tärkeää osaa: laakerit ja akseli. Laakerit ovat sähkökoneen kuluva osa, joka myös auttaa roottorin pyörimistä. Kuvasta 2 näkee esimerkin sähkökoneissa yleisesti käytetystä syväuraisesta kuulalaakerista.

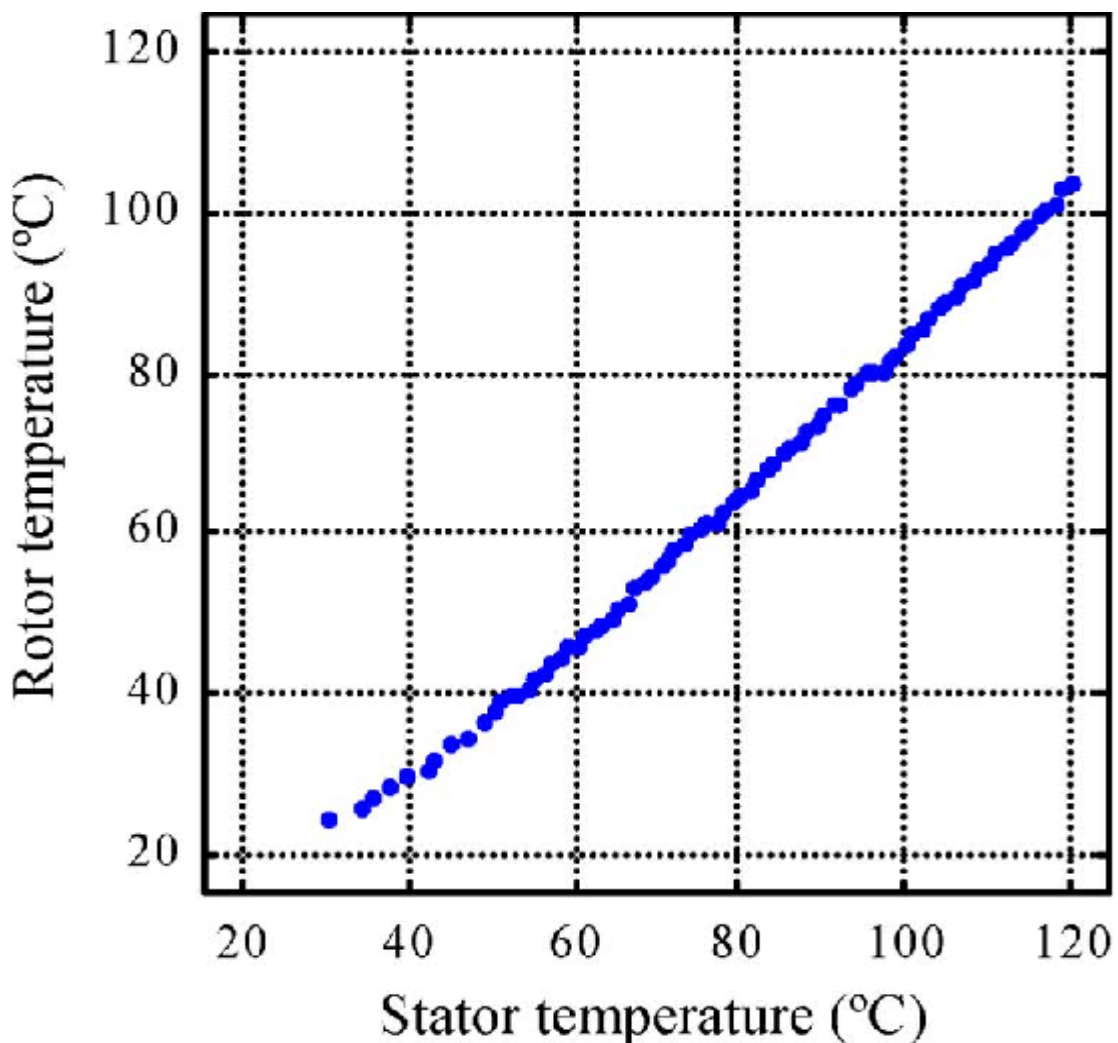


Kuva 2. Syväurainen kuulalaakeri (RS Components 2020)

3. ROOTTORIN LÄMPENEMÄ

Roottori lämpenee sähkökoneen lämmitessä. Lämpötilaan vaikuttaa laakereiden kunto ja niiden lämpenemä, staattorin vyyhdin lämpötila ja sähkökoneen käyttämä teho. Laakerit ovat silti usein alemmalla lämpötilalla toimivia ja hitaammin lämpeneviä, kuin itse roottori, johtuen laakereissa käytettävästä laakerirasvasta. Sähkökone lämpenee kuormituksessa. Kuorman määrä vaikuttaa lämpötilaan ja ylikuormituksessa sähkökone myös ylikuumenee. Lämpenemään vaikuttaa myös jäähdytysteho, ympäristön vaikutukset ja jatkuva sähkökoneen käynnistäminen ja sammuttaminen.

Roottorin lämpötilaa voidaan vertailla staattorin tai käämityksen lämpötilaan lähes lineaarisesti. Kuvassa 3 näkee kuinka Briz et. al. 2008 tekemässä testissä roottorin lämpötila kasvaa staattorin lämpötilaan nähden. (Briz et. al. 2008)



Kuva 3. Roottorin ja staattorin lämpötilan vertailu (Briz et. al. 2008)

Kuvasta 3 on nähtävissä, että roottori toimii hieman alemmalla lämpötilalla kuin staattori, mutta lämmön nousu on hyvin lähellä staattorilla ja roottorilla.

Sähkökoneen lämpötila nousee tasaisesti ja lämpenemä hidastuu lähestyessä käyttölämpötilaa olettaen, että kone toimii normaalisti. Eri mittapisteistä katsottuna lämpötila voi olla erilainen. Mittapiste voi olla sähkökoneen jäähdytyskanavaa lähempänä, jolloin lämpötila voi näkyä pienempänä kuin mittapisteen, joka on kauempana jäähdytyskanavasta. Roottori on jatkuvassa liikkeessä, jolloin mittapiste pyörii mukana olettaen, että roottorissa on lämpötilanmittaus. Roottori on yleensä yhtä kaukana jäähdytyskanavasta kaikista pisteistä katsottuna, jolloin roottorin lämpötila on sama koko roottorin pinnalla. Roottorin rakenteesta riippuen roottorissa voi olla kuumempia pisteitä. Edellä mainituista syistä johtuen sähkökone on yleensä varustettu usealla lämpöanturilla.

4. ANTURIT JA MITTARIT

Lämpötilan mittaukseen olevia antureita on kaupallisesti monia. Yleisin käytetty on PT100 ja PT1000 langalliset anturit. Muita langallisia antureita ovat termoparit ja termistorit, joihin tässä kandidaatintyössä keskitytään. Langattomissa lämpötila-antureissa voi käyttää myös aiemmin mainittuja langallisia antureita. Langattomuus tulee lähinnä lähettimistä ja vastaanottimista.

4.1 Langalliset

4.1.1 PT100 ja PT1000

PT100- ja PT1000-anturit ovat päivittäisessä käytössä olevia lämpötila-antureita. PT100-anturit ovat RTD-antureita, eli resistance temperature detectors tai vastuslämpömittaus. Antureissa käytetty materiaali on platina, josta tulee nimitys PT. Sen vastusarvo on $100\ \Omega$ tai $1000\ \Omega$, kun lämpötila on $0\ ^\circ\text{C}$. Niitä on saatavilla kaksi tai useampi johtimisina. Tarkimman lämpötilan saa mitattua 4-johtimisella anturilla (Lapp Automaatio 2020). Kuvassa 4 on esitettyä perus 2-johtin PT-100 anturin kytkentä.



Kuva 4. 2-johtiminen PT-100 anturi. (Omega 2019a)

PT-antureiden käyttö on helppoa, kun sen voi kiinnittää mitattavaan alustaan ja kytkeä esimerkiksi Arduinoon, joka on ohjelmoitavissa näyttämään oikea lämpötila. PT-anturien käyttö roottorin lämpötilan määrittämisessä on ongelmallista. Roottori on pyörivä osa ja vaarana näiden anturien käytössä on johdinten takertuminen. Anturia on vaikea saada roottoriin

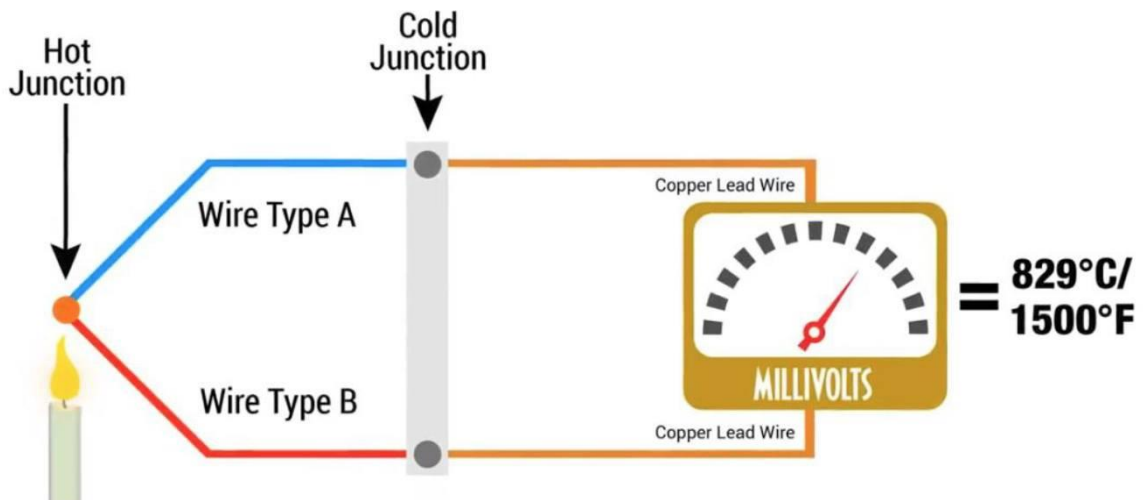
kiinni, ilman johdinten liikkumista. PT100 ja PT1000 antureita ei voi suositella roottorin lämpötilan määrittämiseen pelkkänä anturina.

4.1.2 Termistorit

Termistorit ovat hyvin samankaltaisia, mutta termistorien lämpömittausalue on noin puolet pienempi kuin PT-antureilla. Termistorit toimivat myös resistanssimittauksella, mutta toisin kuin PT-antureissa, resistanssi pienenee, kun lämpötila kasvaa. Termistorit ovat myös usein halvempia kuin PT-anturit. Termistorien käyttö roottorin lämpötilan määrittämiseen on samassa tilanteessa kuin PT-anturit.

4.1.3 Termopari

Termopari on langallinen anturi, jonka sisällä on kahta eri metallia hitsattuna yhdessä päässä yhteen. Tätä päätä kutsutaan kuumapääksi. Termopari toimii lämpösähköisellä ilmiöllä, eli kun kuumapään ja vertailupisteen välillä on eri lämpötila, syntyy jännite. Kuvassa 5 on esitetty perus termoparianturin kytkentä.

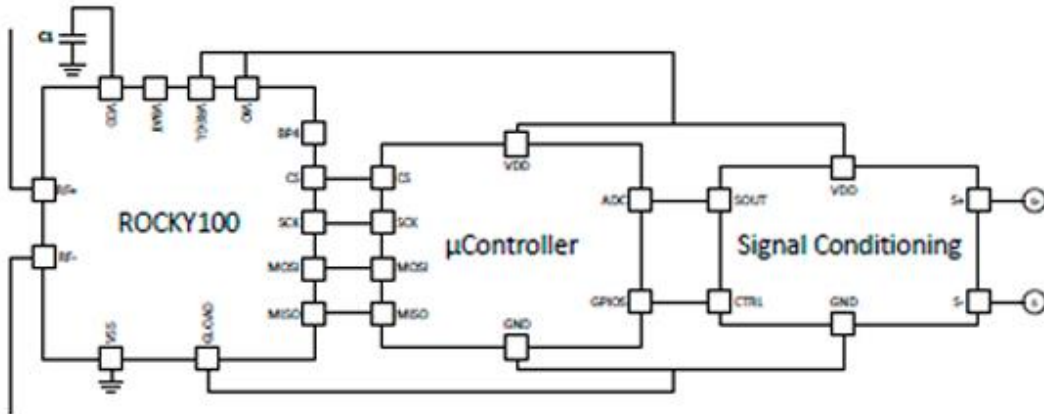


Kuva 5. Termoparianturin kytkentä (Omega 2019a)

4.2 Langattomat

Langattomat anturit perustuvat langallisten anturien käyttöön. Kaupallisesta tuotannosta löydytty langattomia antureita, jotka ovat juuri sähkökonekäyttöön suunniteltu. Tällaisissa antureissa käytetään usein UHF eli ultra korkeataajuista RFID-lukijaa ja lähetintä, sekä sen antenniä. Anturina näissä voi olla termistori. Termistorit voidaan asettaa suoraan roottorin pinnalle kuumiin pisteisiin ja RFID-lukijalla saadaan tietoa ulos. (Choperena 2016) Kuvassa

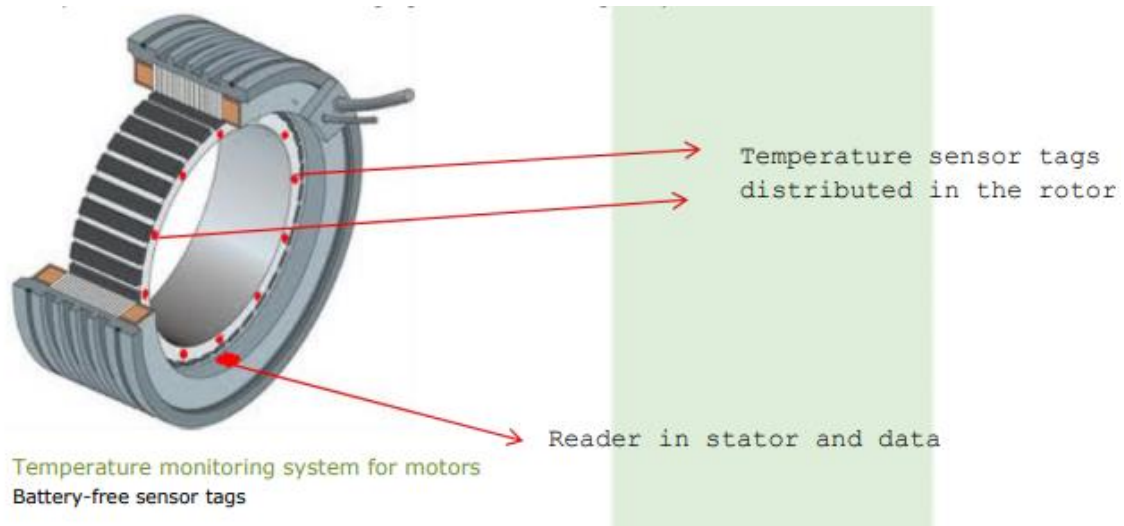
6 näkee esimerkin paristottoman langattoman RFID-lämpötilalukijan kytkennästä. Kyseinen lukija käyttää NTC-termistoria lämpöanturina ja on suunniteltu sähkökoneen roottorin lämpötilan seurantaan.



Kuva 6. UHF RFID-lukija lämpötilan mittaamista varten (Farsens 2019)

Langattomat anturit ovat saatavilla sekä paristokäyttöisenä, että ilman paristoa. Paristottomat ovat yleisempiä, niiden paremman käytettävyyden vuoksi. Paristoton anturi on siitä käytännöllisempi, että sillä pystyy mittaamaan pidempiä lämpöajoja, joita sähkökoneille usein ajetaan.

Langattomien anturien käyttö on helppoa. Staattoriin asetetaan lukija ja roottoriin voi asettaa useita termistoreja, jotka kaikki lähettävät tietoa staattorin lukijaan. Kuvassa 7 on anturit ja lukija asetettuna roottoriin ja staattoriin. Antennista tulee RF-kenttä eli radiotaajuuskenttä ja anturit ottavat siitä energiaa mittausten tekemiseen (Choperena 2016). Antureista tulevan signaalin käsittelyyn on muut laitteistot.



Kuva 7. Esimerkki miten lämpöanturit ja RFID-lukija voidaan asettaa sähkökoneen staattoriin ja roottoriin. (Choperena 2016)

4.3 Infrapunalämpömittari eli lämpökamera

Infrapunalämpömittari on yksi kasvava menetelmä mitata lämpötilaa pinnoilta. Infrapunalämpömittari voi toimia lämpökamerana, joten lämpötilaa voi saada talletettua kuvaksi helposti. Lämpökamera on soveltuva roottorin lämpötilan määrittämiseen, koska lämpökameralla voi kuvata vaikeasti saavutettavia paikkoja, kunhan kameralla on suora näköyhteys sinne. Lämpökameran käyttö on kuitenkin ollut pientä liikkuvissa paikoissa, juuri suoran näköyhteyden puutteen vuoksi. Lämpökameroita käytetään enemmän paikallaan pysyviin objekteihin. (Stipetic et. al. 2012)

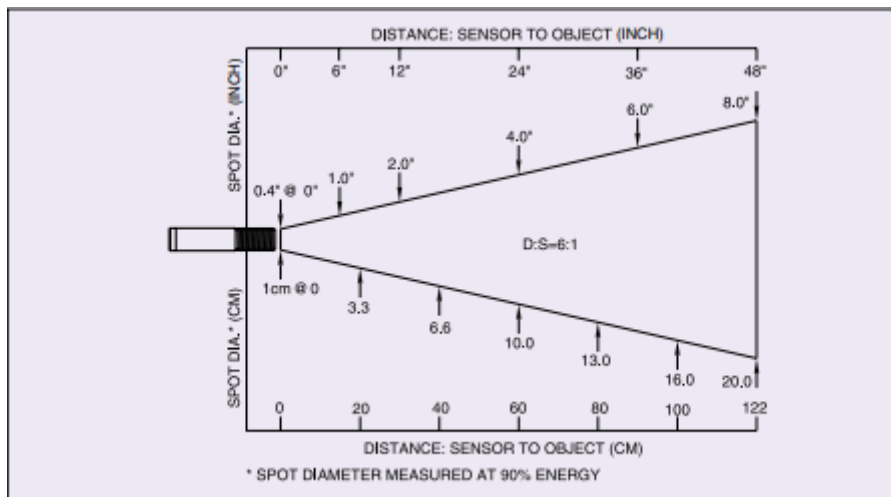
Lämpökameralla on mahdollista mitata roottorin lämpötilaa, mikäli sähkökoneen runkoon suunnittelee mahdollisuuden suoraan näköyhteyteen roottoriin. Nopeasti liikkuvan pinnan lämpötilan mittaus onnistuu nopealla, eli lyhyen integraatioajan omaavalla lämpökameralla (Flir 2016). Liian hidaskamera ei saa kiinni roottorista lähtevää lämpösäteilyä, jolloin mittauksesta ei saa tarkkaa. Lämpökamera on kuitenkin käytettävissä oleva menetelmä tähän, mikäli roottori voi olla pysähtyneenä, kun lämpötilaa mitataan.

Infrapunalämpömittareita on myös suunniteltu käytettäväksi vaikeammissa olosuhteissa, kuten roottorin lämpötilan mittauksessa. Tällaiset mittarit ovat suunniteltu niin, että ne sijoitetaan koneen runkoon ja siitä lähettävät infrapunasäteensä roottoriin, josta lämpötila mitataan. Kuvassa 8 on esitetty Omegan valmistama infrapunalämpömittari, jossa on myös lähetin.



Kuva 8. Infrapunälämpömittari ja lähetin (Farnell 2021)

Tällaiset lämpömittarit vaativat staattoriin reiän, jotta infrapunäsäde pääsee roottoriin. Reiän on oltava tarpeeksi suuri, jotta säde pääsee siitä läpi, koska mittauspisteen halkaisija kasvaa, mitä kauempana mitattava pinta on. Kuvassa 9 on esitetty infrapunamittarin datalehdessä mittauspisteen kasvaminen. (Farnell 2021)



Kuva 9. Infrapunälämpömittarin mittauspisteen kasvaminen etäisyyden funktiona

5. MATEMAATTISET MALLIT

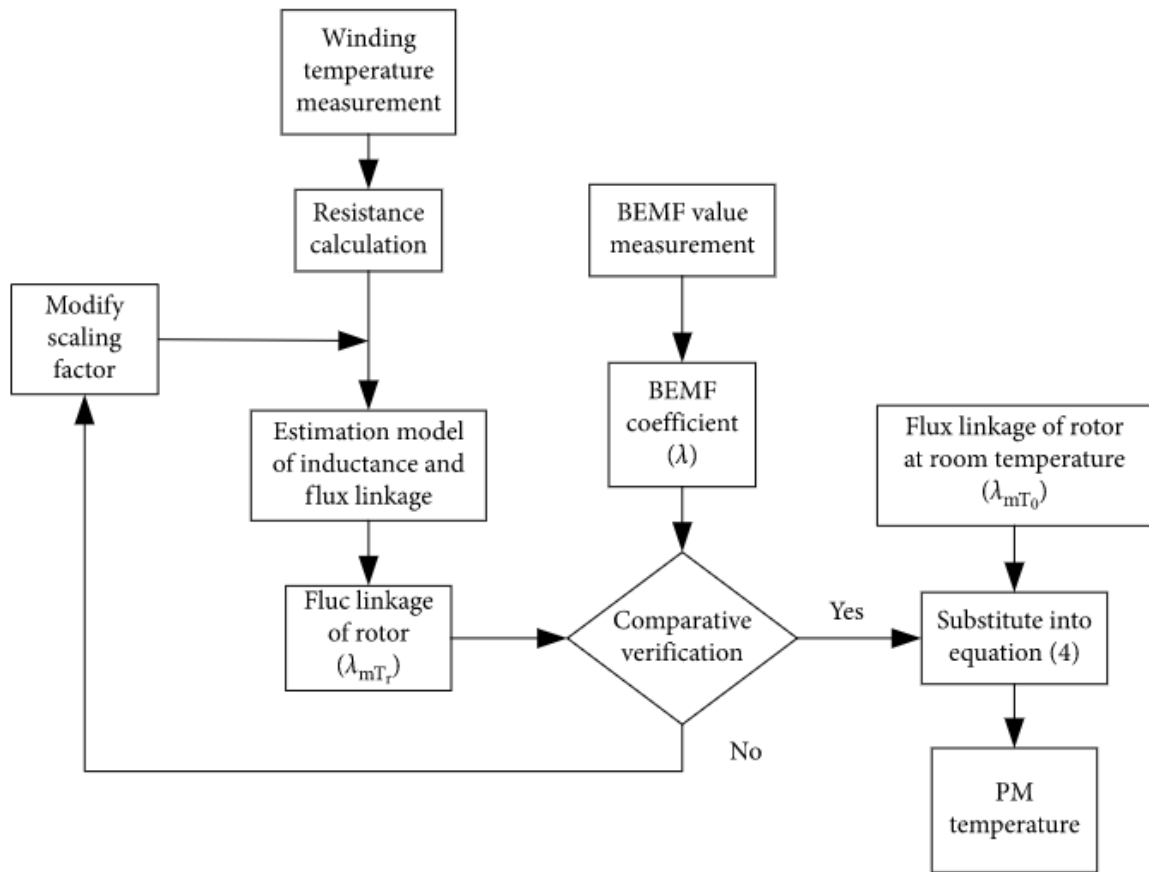
Sähkökoneen roottorin lämpötilan voi myös teoreettisesti määrittää matemaattisilla malleilla. Matemaattisten mallien käyttö on epäsuora tapa määrittää roottorin lämpötila. Eri sähkökonetyypeille on useita eri tapoja määrittää laskemalla roottorin lämpötila, mutta se liittyy lähes aina sähkökoneen parametreihin.

5.1 Kestomagneetti tahtikoneen, PMSM, roottori

PMSM-koneiden lämmitessä niiden magneetit menettävät magnetoitumiskykyään, mitä kuumemmaksi roottori, ja koko sähkökone menee. Demagnetoituneet magneetit eivät voi palautua takaisin normaaliin, vaan ne on vaihdettava uusiin, mikäli magneetit pääsevät demagnetoituneeseen tilaan. Demagnetoinnin vuoksi on tärkeää tälle sähkökonetyypille määrittää roottorin lämpötilaa (Hongchang et. al. 2020). PMSM-koneiden roottorin lämpötila määritetään yleensä laskemalla sen kestopagneettien lämpötila, olettaen että magneetit ovat roottoriin sijoitetut eikä staattoriin.

PMSM-koneen lämpötilan estimoimiselle on kolme epäsuoraa päämenetelmää: lämpömallin laskeminen, korkeataajuisen signaalin injektointi, ja koneen vastejännitteen, BEMF, laskeminen. Lämpömallilla pyritään tekemään sähkökoneen lämpötilakäyttäytyminen yksinkertaiseksi. Tämän voi tehdä kahdella tapaa: luomalla mallin, joka mukautuu lämmön liikkumiseen, jolloin parametrit identifioituvat mittausdatalla tai derivoidaan analyttisesti pelkistettyä mallia, jolloin lämpöparametrit lasketaan. Signaalin injektoinnissa roottorin lämpötila on derivoitavissa, kun arvioidaan askelvasteita virrasta jännitteen suhteen. (Böcker et. al. 2014)

Hongchang et.al. ovat vuonna 2020 tutkineet uutta tapaa määrittää roottorin lämpötilaa PMSM-koneelle, kun perinteisiä tapoja määrittää roottorin lämpötilaa on vähän. Roottorin lämpötilaa voi Hongchang et.al. 2020 mukaan määrittää sumeasäätötekniikkaa referenssimallina, model reference fuzzy adaptive control (MRFAC). Kuvassa 10 on esitetty lohko-kaavio tälle uudelle tavalle estimoida roottorin kestopagneettien lämpötilaa.



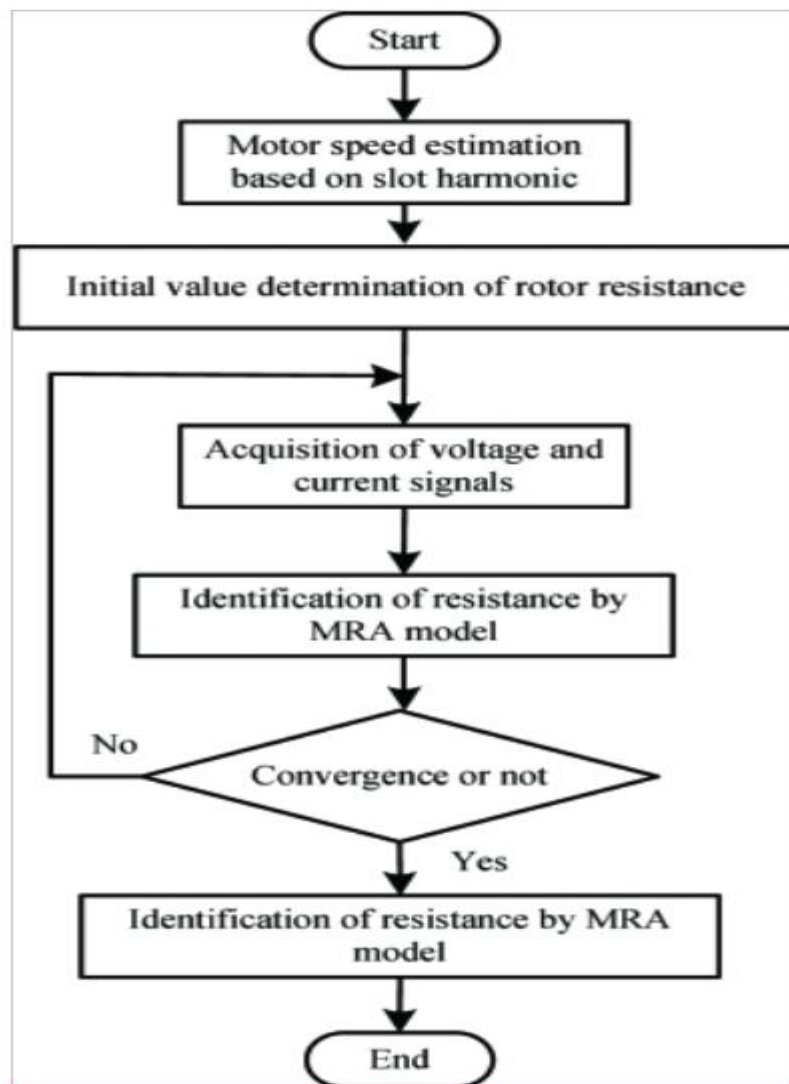
Kuva 10. PMSM-koneen roottorin lämpötilan määrittäminen referenssimalli sumeasätötekniikalla. (Hongchang et. al. 2020)

MRFAC-menetelmässä käytetään adaptiivista osaa PMSM-koneen kestopagneettien käämivuon estimointiin, ja sillä kestopagneettien lämpötilaan. Menetelmässä käytetään sumeasätöä estimoinnin ja sopivan nopeusalueen tarkentamiseen. Tutkimuksessa mitattiin ja laskettiin estimaatti käämivuolle, josta pystyttiin estimoimaan lämpötila. Kestopagneettien tai roottorin lämpötilaa itsessään ei mitattu. Tutkimuksessa Hongchang et. al. 2020 saivat määrittämällä käämivuon hyvin lähelle mitattua käämivuota. Tutkimuksen mukaan myös estimoitu lämpötila on hyvin lähellä oikeaa. Käämivuo estimoititiin eri menetelmillä ja niiden virhemarginaalia verrattiin toisiinsa. Hongchang et. al. 2020 ovat todenneet kyseisen menetelmän toimivaksi PMSM-koneiden kestopagneettien lämpötilan estimoimiseksi sähkökoneen roottorissa, koska se yksinkertaistaa roottorin lämpötilan määrittämisen (Hongchang et. al. 2020).

5.2 Induktiokoneen, IM, roottori

Induktiokoneen roottorin lämpenemä aiheuttaa sähkökoneelle ongelmia, kuten käämityksen eliniän pieneneminen ja käytössä voi rikkoa koko sähkökoneen. Induktiokoneet ovat suuressa käytössä maailmalla ja on tärkeää seurata myös liikkuvien osien lämpötiloja. Varsinkin suurjännitteisissä ja suurtehoisissa sähkökoneissa, sillä siten saa turvallisuutta ja koneen hyvää käyttöä edistettyä. (Zhao et. al. 2019)

Kuten PMSM-koneissa, induktiokoneissa epäsuoria menetelmiä on kolme päämenetelmää: lämpömalli, parametrien estimointi ja näiden yhdistelmä. Parametrien estimoinnissa haetaan suoraa yhteyttä roottorin lämpötilan ja roottoriresistanssin kanssa. Zhao et.al 2019. mukaan induktiokoneiden roottorin lämpötilan määrittäminen perustuu roottoriresistanssin estimointiin. Kuvassa 11 on esitetty induktiokoneiden roottorin lämpötilan määrittämisen peruseriaate lohkokaaviona.



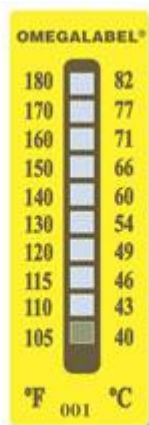
Kuva 11. Induktiokoneen roottorin lämpötilan määrittämisen peruseriaate (Zhao et. al. 2019)

Vuonna 2009, Kyung-Rae Cho ja Jul-Ki Seok tutkivat injektiolla induktiokoneen roottorin lämpötilan estimointia. Tutkimuksessa injektoitiin staattorikäämeihin korkeataajuinen herätesignaali, jonka avulla saadaan identifioitua roottorin resistanssi. Tätä resistanssia hyödynnettiin roottorin lämpötilan estimoimiseen. Resistanssin identifiointiin tarvittiin vain hajainduktanssi. Tutkimuksessa tehty estimaatti perustuu korkeataajuiseen malliin roottoritan-goista, high frequency rotor bar. Työn tuloksena Cho ja Seok totesivat roottorin lämpötilan vaikuttavan hajainduktanssiin. Tämä helpottaa lämpötilan määrittämistä, kun roottorin resistanssin määrittämiseen tarvitsee vain roottorin hajainduktanssin. (Cho K-R., Seok, J-K. 2009)

Täten voidaan todeta matemaattisten mallien luotettavuus ja toimivuus roottorin lämpötilan määrittämiseen. Esitetyillä tutkimuksilla saatiin hyviä tuloksia estimoinnin ja mittauksen välille. Hongchang et. al. 2020 vertailivat omassa tutkimuksessaan heidän malliansa erilaisiin tapoihin selvittää roottorin lämpötila vuon kautta. Matemaattisilla malleilla on saatavilla roottorin lämpötila pienellä virhemarginaalilla, kuitenkin maksimissaan 5 °C (Hongchang et. al. 2020). Cho et. al. 2009 tutkimuksen tulos jää epävarmaksi, mutta kyseisellä menetelmällä on mahdollista saada roottorin lämpötila, joka on lähellä oikeaa. Roottorin lämpötila on vertailtavissa staattorin lämpötilaan. (Cho et. al. 2009)

6. MUUT

Muita tapoja määrittää roottorin lämpötilaa ovat muun muassa lämpötarrojen avulla tai lämpömittarin avulla. Lämpötarroja voi asettaa roottoriin tai akselin päähän. Lämpötarroja on kerta käyttöisiä tai uudelleen käytettäviä. Lämpömittarin voi asettaa roottoriin, kunhan sähkökoneen runkoa avaa sopivasti, että roottori tulee näkyviin. Sähköturvallisuuden vuoksi nämä muut tavat vaativat sähkökoneen pysäyttämisen, ja jännitteettömän tilan, jotta roottoriin tai akseliin pääsee käsiksi. Sähkökoneen runko voi olla suunniteltu niin, että sen roottoriin on mahdollista päästä mittaamaan. Kuvassa 12 on esitetty kertakäyttöinen lämpötarra, jonka voi asettaa roottoriin tai akseliin.



Kuva 12. Lämpötarra (Omega 2019b)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Joidenkin sähkökoneiden roottorin lämpötilan määrittämiseen suorat menetelmät eivät ole järkeviä, lisäkustannusten ja suunnittelun vuoksi (Böcker, J. et.al. 2014). Tämä pätee esimerkiksi PMSM-koneisiin. Roottorin lämpötilan määrittämistä on tutkittu hyvin paljon, ja siihen on myös suunniteltu suoraa käyttöä varten olevia laitteita. Roottorin lämpötilan määrittämisen päämenetelmistä epäsuorat eli matemaattiset mallit ovat helppoja, halpoja ja luotettavia tapoja määrittää lämpötila. Tarkkuus ei ole kuitenkaan samalla tasolla, kuin suoraan mittaamalla. Ne ei vaadi erikseen asennettavia antureita, jotka lisäävät kustannuksia ja liikkuvia osia sähkökoneeseen.

Antureihin erikoistuneet kaupalliset yhtiöt, kuten Farsens, on perehtynyt langattomiin antureihin ja niiden liityntäelektroniikkaan. Farsens on myös suunnitellut markkinoille sähkökoneen roottorin lämpötilan määrittämiseen soveltuvat anturit (Choperena 2016). Tämä helpottaa suoraa lämpömittausta roottorista, mutta on otettava huomioon muu elektroniikka, jonka kyseiset anturit vaativat.

Langalliset anturit ovat poissuljettuja täysin roottorin lämpötilan määrittämisessä, niiden fyysisten ominaisuuksien vuoksi. Anturit yksinkertaisesti hajoavat pyörivän roottorin käsittelyssä ja täten on ryhdyttävä muihin menetelmiin. Mittarit, eli lämpökamera ja käsikäyttöinen lämpömittari, ovat molemmat käytettävyydeltään sopivia roottorin lämpötilan mittaamiseen. Lämpökameran on oltava nopealla integraatioajalla, mikäli liikkuvan roottorin lämpötilaa halutaan mitata. Mikäli roottori on pysähdyksissä, kumpikin mittari on täysin pätevä.

8. YHTEENVETO

Kandidaatintyössä selvitettiin eri menetelmiä roottorin lämpötilan määrittämiseen. Työssä lähdettiin ensin lähestymään mikä on roottori ja sen tärkeimmät lähimmät komponentit, jotka voivat vaikuttaa lämpötilaan. Selvitetiin anturityyppejä, jotka soveltuvat tällaiseen ja todettiin niiden toimivuus. Työssä selvitettiin joitakin uusia tapoja määrittää laskemalla roottorin tai PMSM-koneen magneettien lämpötilaa. Matemaattiset päämenetelmät estimoida roottorin lämpötilaa ovat PMSM-koneille vastejännitteen vertailu, lämpömallin laskeminen ja korkeataajuisen signaalin injektointi. Induktiokoneille matemaattiset päämenetelmät ovat lämpömallin laskeminen, parametrien estimointi ja näiden yhdistelmä. Roottorin lämpötilan määrittäminen matemaattisesti on aktiivinen tutkimusala missä kehitetään jatkuvasti uusia menetelmiä. Sähkökoneen lämpötilan seuranta on tärkeää, koska sillä pystytään pidentämään koneiden elinikää.

LÄHTEET

Briz F., Degner M. W., Diez A. B., Guerrero J.M., 2008 Temperature Estimation in Inverter-Fed Machines Using High-Frequency Carrier Signal Injection [viitattu 10.11.2019]

Böcker, J., Specht, A. & Wallscheid O. 2014 Determination of Rotor Temperature for an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Using a Precise Flux Observer. Conference: International Power Electronics Conference (IPEC), Hiroshima, Japan, May [viitattu 27.3.2021]

Cho K., Seok J., 2009 Induction Motor Rotor Temperature Estimation Based on a High-Frequency Model of a Rotor Bar [viitattu 27.3.2021]

Choperena M. 2016 Rotor temperature monitoring with wireless battery-free sensors, Farsens [viitattu 27.3.2021]

Circuit Globe, 2021 Difference Between Stator & Rotor, [viitattu 13.3.2021] Saatavissa: <https://circuitglobe.com/difference-between-stator-and-rotor.html>

Farnell, 2021 Infrapunamittarin datalehti [viitattu 10.4.2021] Saatavissa: <http://www.farnell.com/datasheets/2339809.pdf>

Fernandes J. D., Manicoba G. G. C., de Paiva J. A., Salazar A. O. & Souza F. E. C. 2017 Wireless Monitoring of Induction Machine Rotor Physical Variables [viitattu 27.3.2021]

Flir, 2016 High Speed Thermal Cameras – the Need for Speed [viitattu 20.4.2021] Saatavissa: <https://www.flir.eu/discover/rd-science/high-speed-thermal-cameras--the-need-for-speed/>

Hongchang D., Xiaobin G., Yuchun G. 2020 Estimation of Rotor Temperature of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Reference Fuzzy Adaptive Control [viitattu 27.3.2021]

Izadfar, H., Jazaeri, M., Nikbakhsh, A. 2019 Classification and comparison of rotor temperature estimation methods of squirrel cage induction motors [viitattu 27.3.2021]

Omega, 2019b 10 Point Non-Reversible Temperature Label [viitattu 27.3.2021] Saatavissa: <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/temperature-labels-lacquers-and-markers/nonreversible-temperature-labels/p/TL-10>

Lapp Automaatio, 2020 Miten toimii Pt100-anturi [viitattu 13.3.2021] Saatavissa: <https://www.epicsensors.fi/faq/miten-pt100-anturi-toimii/>

Omega, 2019a RTD sensors [viitattu 13.3.2021] Saatavissa: <https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-hub>

RS Components, 2020, Deep groove ball bearing [viitattu 13.3.2021] Saatavissa: <https://fi.rsdelivers.com/product/skf/6022-2z/dgbb-deep-groove-ball-bearing/2076913>

RFMicron 2019, Wireless Temperature Sensors [viitattu 27.3.2021] Saatavissa: <http://rfmicron.com/temp-sensor/>

Stipetic S., Kovacic M., Hanic Z., Vrazic M. 2012 Measurement of Excitation Winding Temperature on Synchronous Generator in Rotation Using Infrared Thermography [viitattu 27.3.2021]

Zhao H., Eldeeb H.H., Wang J., Zhan Y., Xu G., Mohammed O.A. 2019 Online Estimation of Rotor Temperature in Induction Motors Based on Parameter Identification, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA [viitattu 27.3.2021]