



Muuntajan jäähdytysyksiköiden puhallinmoottoreiden optimointi

Tony Sandell

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2020

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Automaatiotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Automaatiotekniikka

SANDELL, TONY:

Muuntajan jäähdytysyksiköiden puhallinmoottoreiden optimointi

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Kesäkuu 2020

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi induktiivisten komponenttien suunnitteluun ja valmistukseen erikoistunut yritys, AQ Trafotek Oy. Työn tarkoituksena oli mitoittaa tehomuuntajien jäähdytysyksiköiden puhallinmoottorit niin, että tulevaisuudessa ne täyttäsivät IE3-hyötysuhdeluokan kaikilla yleisesti käytössä olevilla verkkosovelluksilla.

Moottorit on hyötysuhteensa perusteella jaettu eritasoisiin hyötysuhdeluokkiin, jotka on määritelty EU-direktiivillä. Moottoreiden mitoitus oli tarkastettu aiemmin vuonna 2016. Kaikki aikaisemmassa mitoituksessa valitut moottorit eivät täyttäneet IE3-hyötysuhdeluokkaa, eikä asiakkaiden kasvavaan kysyntään IE3-luokan moottoreista voitu vastata kustannustehokkaasti. Suuremman hyötysuhteen moottorit ovat yleisesti kalliimpia kuin pienemmän hyötysuhteen moottorit. Hyötysuhdeluokan korotuksen kustannuksia pyrittiin alentamaan mitoittamalla moottorit suuremmalle kuormitusasteelle.

Moottoreiden tehontarve kartoitettiin puhallinsiipien tietojen perusteella ja varmennettiin mittaamalla. Laskettujen tehontarpeiden pohjalta voitiin määrittää kullekin puhaltimelle sopivan tehoinen moottori. Moottoreiden määrittämiseen käytettiin apuna ABB:n Motosize-ohjelmistoa, jonka avulla saatiin valittua kuhunkin käyttösovellukseen IE3-Luokan moottorit.

Työn ansiosta AQ Trafotek pystyy jatkossa tarjoamaan lisävarusteena jäähdytysyksiköitä, joissa on vakiovarusteena aina IE3-hyötysuhdeluokan moottorit. Moottoreiden tehojen optimoinnin ansiosta hyötysuhdeluokan korotus ei lisännyt moottoreiden hankinnasta aiheutuvia kustannuksia vuositasolla.

Asiasanat: muuntaja, moottori, hyötysuhde

ABSTRACT

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

SANDELL, TONY:

Optimization of Fan motors for Transformer Cooling Units

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 7 pages
June 2020

This thesis was commissioned by AQ Trafotek Oy, a company that specializes in designing and manufacturing of inductive components. The purpose of the thesis was to redesign the fan motors used in the cooling units of the transformer, in a way that all the motors in the future would reach IE3 efficiency class for every generally used voltage system.

Based on electrical motors efficiency, motors are divided into different efficiency classes, which are defined by European Union's directives. Motor dimensioning was previously inspected in 2016. All the formerly designated motors did not meet the requirement for IE3 efficiency class. Growing customer demand for the IE3-class could not be satisfied cost effectively. Motors with higher efficiency are generally more expensive than motors with lower efficiency. The aim was to reduce the cost from increasing the efficiency class by sizing the motors to a higher load factor.

The power demand for the motors was surveyed based on fan blade data and verified by measurement. Based on the calculated power requirements, it was possible to determine the appropriate power for each fan. ABB's Motosize software was used to select IE3-class motors for each application.

As a result of the work AQ Trafotek will be able to offer cooling units for the transformers, with integrated IE3 efficiency motors as a standard. Due to the optimization of motor powers the increase in efficiency class did not increase the cost of purchasing motors on an annual basis.

Key words: transformer, electrical motor, efficiency

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖKONEIDEN JA MUUNTAJIEN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHTEET	7
	2.1 Kiertokenttäkoneet	7
	2.1.1 Kiertokenttäkoneiden käämirakenne	7
	2.1.2 Napaparit.....	9
	2.2 Epätahtikone	10
	2.3 Epätahtikoneen häviöt ja hyötysuhde.....	11
	2.4 EU MEPS.....	13
	2.5 Muuntaja	14
	2.6 Muuntajan toiminta.....	14
	2.7 Muuntajan häviöt.....	16
	2.7.1 Hystereesihäviöt.....	16
	2.7.2 Pyörrevirtahäviöt.....	17
	2.7.3 Kuormituslämpöhäviöt.....	18
	2.8 Ekosuunnitteluvaatimukset	19
	2.9 Tehomuuntajan rakenne	20
3	JÄÄHDYTYSYKSIKKÖ JA PUHALLINYKSIKKÖ.....	23
	3.1 Käyttökohteet ja olosuheet.....	23
	3.2 Muuntajan jäähdytys tavat	24
	3.3 Nestejäähdytysyksikön rakenne.....	25
	3.3.1 Lauhdutin.....	26
	3.3.2 Puhaltimet	26
	3.3.3 Moottorit	27
	3.4 Puhallinmoottorimitoituksen lähtötiedot.....	27
4	MOOTTOREIDEN MITOITUS	30
	4.1 Puhaltimien tehon tarve	30
	4.2 Moottoreiden mitoittaminen puhaltimille	34
5	MOOTTOREIDEN VALINTA JA KUSTANNUSVAIKUTUKSET.....	37
	5.1 Moottoreiden valinta.....	37
	5.2 Kustannusvaikutukset	41
6	POHDINTA	42
	LÄHTEET.....	43
	LIITTEET	44
	Liite 1. ABB moottorilista 2016 (1/3).....	44
	Liite 2. ABB moottorilista 2020 (1/3).....	47
	Liite 3. ABB Process performance motors katalogi luokituslaitokset... 50	

LYHENTEET JA TERMIT

Φ	magneettivuo
I	virta
i	virta
t	aika
n_s	kierrosta / sekunti
f	taajuus
p	napapari
P_{mek}	mekaaniset häviöt
R	resistanssi
P_r	rautahäviöt
P_0	tyhjäkäyntihäviöt
P_k	virtalämpöhäviöt
H	kentän voimakkuus
l	(magneettivuon) pituus
N	käämikierrosten määrä
μ	muuntosuhde
E	lähdejännite
V	tilavuus
ρ	resistiivisyys
B	magneettivuon tiheys
E	jännitteen tehollisarvo
k_r	resistiivisyyden lämpötilakerroin
Hz	Hertsi

1 JOHDANTO

AQ Trafotek valmistaa muuntajia ja kuristimia, joita käytetään lukuisissa eri käyttökohteissa ympäri maailmaa. Suuri osa valmistetuista muuntajista menee erityin haastaviin marine- ja offshore-ympäristöihin laivoille ja öljynporausaluksille. Aluksilla on yleisesti suuret tehontarpeet ja pienet tilat. Muuntajavalmistajat vastaavat näihin vaateisiin yleisesti lisäämällä muuntajan jäähdytystä erilaisilla jäähdytysjärjestelmillä. Jäähdytysjärjestelmissä on yleisesti käytetty puhaltimia, joita pyöritetään moottoreilla.

Muuntajassa ja sen jäähdytysyksikön moottoreissa syntyy käynnin aikana häviöitä, jotka kuluttavat energiaa. Energian kulutusta pystytään rajoittamaan hankkimalla paremman hyötysuhteen omaavia laitteita. Parempi hyötysuhde saadaan lisäämällä laitteeseen materiaalia, joka vuorostaan kasvattaa laitteen massaa. Itsenäisissä jakeluverkoissa kuten laivoissa tämä aiheuttaa ristiriidan. Häviöissä voitettu energia menetetään lisäpainon tuoman energiatarpeen takia.

Asiakkaat ovat kuitenkin kasvavissa määrin alkaneet vaatia aluksiltaan ja niihin lisättäviltä komponenteilta parempaa hyötysuhdetta. Opinnäytetyön tavoitteena on vastata asiakkaiden toiveisiin ja mahdollistaa paremman hyötysuhdeluokan moottoreiden saatavuus kaikkiin käyttökohteisiin. Opinnäytetyössä tutustutaan moottoreiden, muuntajien ja jäähdytysyksiköiden toimintaan, sekä mitoitetaan kaikki jatkossa käytettävät puhallinmoottorit IE3 hyötysuhdeluokkaan.

2 SÄHKÖKONEIDEN JA MUUNTAJIEN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHTEET

Tässä luvussa käsitellään yleisellä tasolla kiertokenttäkoneita ja muuntajia. Luvussa keskitytään erityisesti epätahtikoneiden ja kuivamuuntajien toimintaan sekä rakenteisiin. Lisäksi käsitellään laitteissa syntyviä häviöitä ja niiden vaikutusta hyötysuhteeseen.

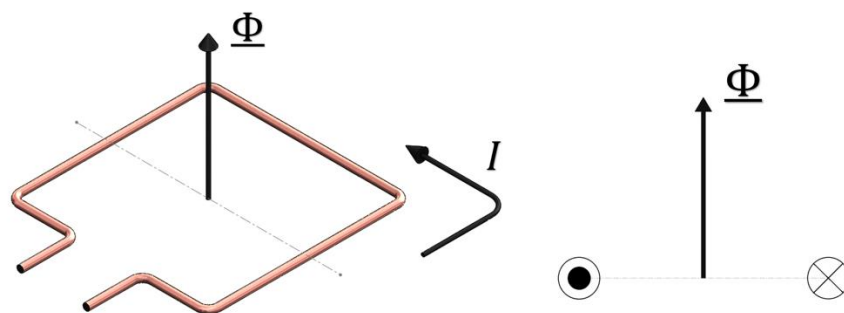
2.1 Kiertokenttäkoneet

Epätahti- ja tahtikoneet ovat kiertokenttäkoneita, joissa staattorikäimityksellä luodaan koneen ilmapäliin kiertokenttä. Kiertokenttäkoneiden staattorissa on symmetrinen kolmivaiheinen urakäämitys. synnyttää koneen sisälle pyörivän magneettikentän. (Hietalahti 2013, 132), (Korpinen 10, 5)

Kiertokenttäkoneet ovat yleisimpiä sähköverkkoon kytkettäviä sähkökoneita, joita käytetään erilaisissa toimilaitteissa moottoreina. Erityisesti niitä käytetään teollisuuskohteissa sekä generaattoreina sähköenergian tuotannossa. (Hietalahti 2013, 132)

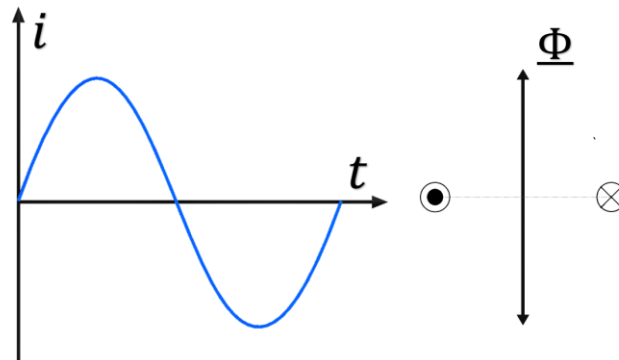
2.1.1 Kiertokenttäkoneiden käämirakenne

Tasokäämin läpi menevä virta synnyttää käämin tasopintaan nähden kohtisuoran magneettivuon (Kuva 1). (Hietalahti 2013, 132)



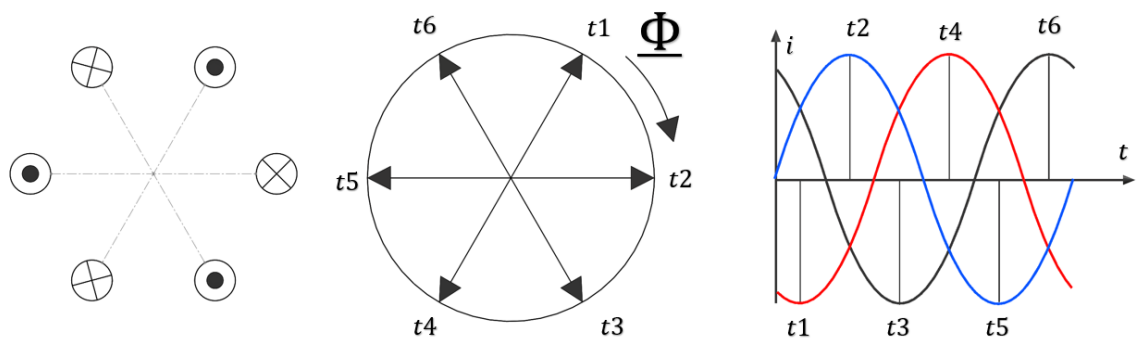
KUVA 1. Tasokäämin synnyttämä magneettivuon.

Syöttämällä tasokämiin sinimuotoista virtaa saadaan magneettivuon suunta ja sen voimakkuus vaihtelevaan pystyakselin suuntaisesti. Tällöin syntyy sykkivä magneettikenttä, jota hyödynnetään muuntajissa ja kuristimissa (Kuva 2). (Hietalahti 2013, 132)



KUVA 2. Sinimuotoisen virran synnyttämä vaihteleva magneettivuo tasokäämissä.

Sijoittamalla kolme toisiinsa nähden 120° kulmassa olevaa käämiä sekä syöttämällä näihin käämeihin kolmivaiheista sinivirtaa, saadaan aikaiseksi kolmivaiheinen käämitys, joka synnyttää kiertokentän (Kuva 3). (Hietalahti 2013, 133)



KUVA 3. Kolmivaiheisen sinimuotoisen vaihtovirran synnyttämä likimääräinen magneettivuon vaihtelu kolmessa 120° vaihesiirtoon sijoitetussa käämissä.

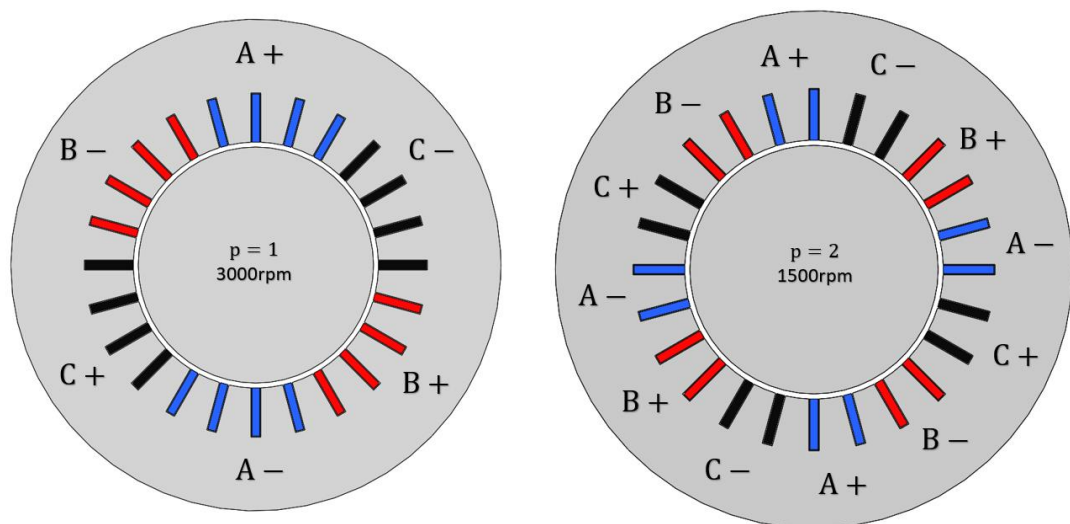
Käämien keskelle sijoitettu roottori kohtaa kiertävän kentän ja lähtee pyörimään kentän mukana. Periaatteellinen käämien sijoittelu uriin noudattaa edellä esitettyä tasokäämien ideaa kuitenkin niin, että kentän voimakkuutta vahvistetaan

käyttämällä monikerroksisia käämityksiä ja niiden sijoittamista useaan staattorin sisäkehällä olevaan uraan. (Hietalahti 2013, 134)

2.1.2 Napaparit

Sähkökoneen käämityksillä muodostetaan moottorin ilmväliin magneettikenttä, jolla on parillinen napaluku. Yksi pohjois- (N) ja yksi etelänapa (S) muodostavat napaparin. Kolmivaiheinen käämitys, jossa käämien vastaparit ovat sijoitettu 180° päähän toisistaan synnyttää magneettikentän, jolla on yksi napapari. Tällaista käämistä kutsutaan kaksinapaiseksi. Kaksinapaisessa käämityksessä staattorin pyörivä magneettikenttä pyörähtää yhden kierroksen jakson aikana. 50Hz vaihtovirralla kenttä pyörii siis 50 r/s eli 3000 r/min. (Hietalahti 2013, 135) (Korpinen 10, 2)

Jos käämitys sijoitetaan staattoriin siten, että käämien vastaparit ovat sijoitettu 180° sijasta 90° päähän toisistaan, saadaan nelinapainen käämitys, 60° sijoitella kuusi napaa ja niin edelleen (Kuva 4). (Hietalahti 2013, 136)



KUVA 4. vasemmalla kaksinapaisen ja oikealla nelinapaisen kiertokenttäkoneen staattori ja sen käämitys.

Nelinapaisella käämityksellä magneettikenttä pyörähtää vain puolikierrosta jaksoa, 50 Hz vaihtovirralla kentän pyörimisnopeus on 1500 r/min. Asettamalla

useita staattorikäämyksiä samalla periaatteella peräkkäin saadaan napaluku miten suureksi hyvänsä. Kentän pyörimisnopeus pienenee vastaavasti. (Hietalahti 2013, 136)

Magneetti kentän pyörähdyksien määrä yhden sekunnin aikana voidaan laskea kaavan (1) avulla.

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ kierrosta} \quad (1)$$

Jossa f on taajuus ja p on napaparien määrä.

2.2 Epätahtikone

Täysin suljettu epätahtikone on yksinkertaisuutensa ja kestävyytensä takia yleisin sähkökonetyyppi. Suurista valmistuseristä ja yksinkertaisesta rakenteesta johtuen se on myös edullinen. Epätahtikoneista käytetään myös nimitystä induktiokone ja oikosulkumoottori. (Hietalahti 2013, 137)

Kolmivaiheista epätahtikonetta käytetään enimmäkseen moottorina, vaikka se voi toimia myös generaattorina. Tyypillistä epätahtikoneelle on, että sähköteho viedään koneen pyörivään osaan eli roottoriin sähkömagneettisen induktion avulla. (Hietalahti 2013, 137)

Kuvassa (Kuva 5) on esitetty kolmivaiheisen epätahtikoneen läpileikkaus, jossa näkyvät sen pääosat:

- Rautalevystä tehty staattori, jonka urissa on staattorikäämitys ja
- staattorin sisällä oleva pyörivä osa, jota kutsutaan roottoriksi.

Myös roottorin urissa on käämitys.



KUVA 5. Oikosulkumoottorin läpileikkaus. (ABB.com)

2.3 Epätahtikoneen häviöt ja hyötysuhde

Epätahtimoottorissa syntyy erilaisia häviöitä, jotka voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään:

- mekaanisiin häviöihin
- rautahäviöihin
- virtalämpöhäviöihin.

Mekaaniset häviöt aiheutuvat kitka- ja tuuletushäviöistä. Ne ovat vakiotaajuudessa verkossa likimain kuormituksesta riippumattomia, kun jännite pidetään vakiona. Rautahäviöt syntyvät pääosin staattorissa. Nekin ovat likimain riippumattomia kuormituksesta, kun syöttöjännite pidetään suuruudeltaan ja taajuudeltaan vakiona. Rautahäviöiden ja mekaanisten häviöiden summaa kutsutaan tyhjäkäyntihäviöksi. Ne saadaan selville mittaamalla tyhjäkäyvän moottorin ottama teho. Virtalämpöhäviöt ovat verrannollisia moottorin ottaman virran neliöön. Virtalämpöhäviöt syntyvät staattori ja roottorikäymysten resistansseissa. (Hieta-lahti 2013, 155)

Kun tiedetään vaihekohtaiset staattori- ja roottorikäymien resistanssit sekä vaihevirrät. Voidaan virtalämpöhäviöt laskea kaavalla (2).

$$P_k = 3 \cdot R_1 I_{1V}^2 + 3 \cdot R_2 I_{2V}^2 \quad (2)$$

Jossa R_1 on staattorikäänin resistanssi, I_1 on staattori käämissä kulkeva virta, R_2 on roottorikäänin resistanssi ja I_2 on roottorikäänissä kulkeva virta.

Moottorien arvokilpeen leimattu teho tarkoittaa aina moottorin akselilta saatavaa mekaanista nimellistehoa. Moottorin nimelliskuormaa vastaava pätöteho pystytään laskemaan kaavalla (3), kun tiedetään sen nimellisjännite, nimellisvirta ja nimellistehokerroin. (Hietalahti 2013, 155)

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

Jossa U_1 on moottorin nimellisjännite, I_1 on moottorin nimellisvirta ja $\cos\varphi$ on moottorin tehokerroin.

Vähentämällä sähköisestä tehosta häviöt. Saadaan selville moottorin antama mekaaninen teho kaavan (4) mukaisesti. (Hietalahti 2013, 155)

$$P_2 = P_1 - P_0 - P_k \quad (4)$$

Jossa P_1 on syöttöteho, P_0 on tyhjäkäyntihäviöt ja P_k virtalämpöhäviöt.

Moottorin hyötysuhde ilmoitetaan prosentteina ja voidaan laskea kaavalla (5).

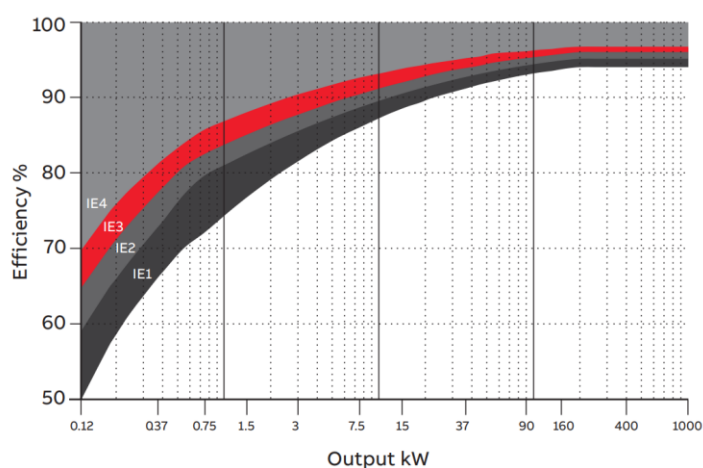
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_0 - P_k}{P_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

Kun moottoria kuormitetaan sen pyöriessä lähellä sen nimellistä tahtinopeutta, epätahtikoneiden hyötysuhde η ja tehokerroin $\cos\varphi$ arvot riippuvat kuormitustilasta. (Hietalahti 2013, 156)

2.4 EU MEPS

”Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY mukaisten ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamisesta sähkömoottoreille ja taajuusmuuttajille, asetuksen (EY) N:o 641/2009 muuttamisesta erillisten ja tuotteisiin integroitujen akselitiivisteettömien kiertovesipumppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta sekä komission asetuksen (EY) N:o 640/2009 kumoamisesta”. (EU 1781/2019)

EU MEPS on lyhenne sanoista (European Minimum Energy Performance standard). Asetuksessa määritellään markkinoille saatettujen ja käyttöön otettavien sähkömoottoreiden vähimmäistä hyötysuhdetta. Kuvassa (Kuva 6) on kuvattu moottoreiden hyötysuhdeluokka vaatimukset.



KUVA 6. EU MEPS määrittelemät sähkömoottorien hyötysuhdeluokat. (ABB)

Vuonna 2019 voimaan tulleen asetuksen mukaisesti lähes kaikkien tehoalueellaan (0,75–1000) kW ja suoraan verkkoon kytkettyjen sähkömoottoreiden on täytettävä vähintään IE3 hyötysuhdeluokka.

Säännökset eivät koske moottoreita, jotka ovat esimerkiksi:

- täysin integroitua toiseen laitteeseen
- ohjattu taajuusmuuntajalla
- suunniteltu toimimaan vaativissa ympäristöissä,
- upotettuna nesteeseen
- sähköajoneuvoissa.

2.5 Muuntaja

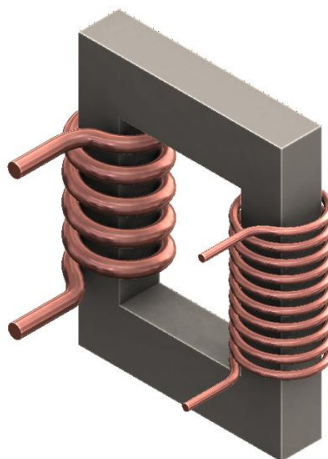
Muuntajalla tarkoitetaan staattista laitetta, jossa on yksi tai useampia käämejä, jotka sähkömagneettisen induktion välityksellä muuntavat tietyn järjestelmän mukaisen vaihtojännitteen ja vaihtovirran toisen järjestelmän mukaiseen, yleensä arvoltaan erisuuruiseen ja saman taajuiseen vaihtojännitteeseen ja vaihtovirtaan sähkövirran siirtämistä varten. (IEC60076-1)

Muuntajia käytetään lukuisiin eri tarkoituksiin, energian siirrossa ja jakelussa, mitalaitteissa, sähköisissä suodattimissa, jakelun muuttamiseksi kolmivaiheisesta yksivaiheiseksi ja sähköverkkojen erottamiseksi toisistaan galvaanisesti. Muuntajat voivat olla yksi- tai monivaiheisia, joista jälkimmäisestä on eniten käytössä kolmivaihemuuntajat. (Hietalahti 2011, 4–5)

Energian siirrossa käytettyjä muuntajia kutsutaan tehomuuntajiksi. Tehomuuntajien avulla sovitetaan jännitetaso kulloistakin tarvetta varten sopivaksi. (Hietalahti 2011, 4)

2.6 Muuntajan toiminta

Muuntaja rakenne koostuu vähintään kahdesta johtimesta, jotka ovat taivuteltu yhteisen rautasydämen ympärille kierroksiksi. Johdinkierroksia kutsutaan käämitykseksi. Kuvassa (Kuva 7) on mallinnettu yksinkertaisen muuntajan rakenne. (Hietalahti 2011, 4)

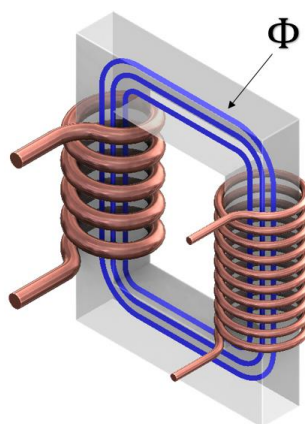


KUVA 7. Yksinkertaisen muuntajan rakenne.

Toiseen käämiin syötetty vaihtovirta synnyttää rautasydämeen magneettivuon (Kuva 8). Amperen lain mukaisesti vuon kentänvoimakkuus on verrannollinen käämin läpi kulkevasta virrasta ja kierrosmäärästä. Kuten kaavasta (6) ilmenee. (Hietalahti 2011, 5)

$$\oint_S H \cdot ds = N \cdot I \Rightarrow H \cdot l = N \cdot I \quad (6)$$

Jossa H on kentän voimakkuus, l on vuon kulkureitin pituus, N on kierrosten määrä ja I virran voimakkuus.



KUVA 8. Magneettivuon likimääräinen sulkeutumisreitti rautasydämessä.

Muuttuva magneettivuo lävistää toisiokäämin ja siihen indusoituu Faradayn induktiolain mukainen jännite. Toisiokäämiin indusoitunut jännite on riippuvainen syöttöjännitteestä ja muuntajan muuntosuhteesta. Muuntosuhde taas on riippuvainen ensiö- ja toisiokäämin kierroslukujen suhteesta kaavan (7) mukaisesti. (Hietalahti 2011, 13)

$$\mu = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

Jossa E_1 on lähdejännite ensiökäämissä, E_2 lähdejännite toisiokäämissä, N_1 on ensiökäämin kierrosmäärä ja N_2 on toisiokäämin kierrosmäärä.

muuntaja alentaa jännitettä muuntosuhteen mukaisesti, jos syöttävän käämin kierrosmäärä on suurempi kuin toisiokäämin. Jos saman muuntajan syöttösuunta vaihdetaan toiseen käämiin, muuntaja nostaa jännitettä muuntosuhteen mukaisesti. (Hietalahti 2011, 13)

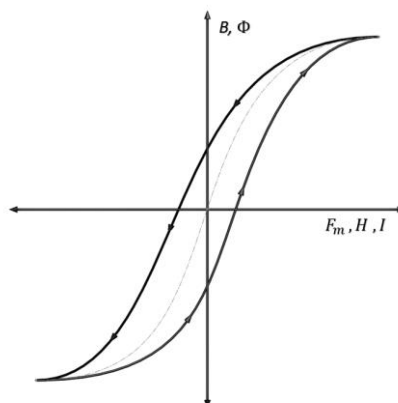
2.7 Muuntajan häviöt

Todellisessa muuntajassa syntyy käytön aikana aina häviöitä. Muuntajassa syntyvät häviöt lämmittävät sen rautasydäntä ja käämityksiä. Muuntajan häviöt voidaan jakaa kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöihin.

Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt (P_0) muodostuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Tyhjäkäyntihäviöt ovat riippuvaisia jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten niiden suuruus pysyy jatkuvasti vakiona. (Korpinen 9)

2.7.1 Hystereesihäviöt

Hystereesihäviöt johtuvat raudan magneettisista ominaisuuksista eli materiaalille ominaisesta hystereesisilmukasta. Kun kentän suunta tai voimakkuus muuttuu, kääntyy raudan magneettiset partikkelit eri asentoihin. Tämä vaatii energiaa ja työtä, jota voidaan kuvata hystereesi silmukan pinta-alalla. Raudan hystereesisilmukka on kuvattu kuviossa (Kuvio 1), jossa hystereesisilmukka on kuvattu yhteisellä viivalla.



KUVIO 1. Raudan magnetoitumiskäyrä vaihtokentässä.

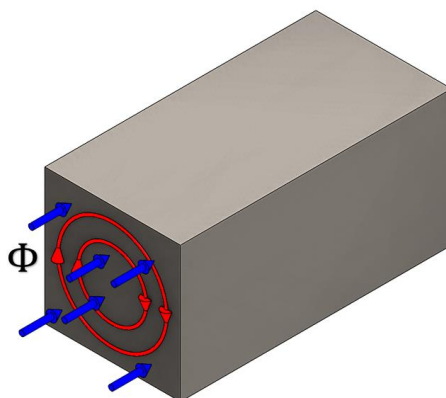
Käytännön laitteissa, kuten muuntajissa, tehty työ on muuntajan häviöitä. Hystereesihäviöt ovat suoraan verrannollisia magneettivuon vaihtelun taajuuteen kaavan (8) mukaisesti. (Hietalahti 2011, 10–11)

$$P_{hy} = \eta \cdot V \cdot f \cdot B_{max}^n \quad (8)$$

Jossa η on hyötysuhde, V on raudan tilavuus, f on vuon taajuus, n on kokemuspäriäinen eksponentti (1,5...2,5) ja η on kokemuspäriäinen vakio.

2.7.2 Pyörrevirtahäviöt

Pyörrevirtahäviöt johtuvat muuttuvan vuon rautaa indusoimista pyörrevirroista. Jos rauta on valmistettu massiivisesta materiaalista, kasvavat pyörrevirtahäviöt suhteettoman suuriksi vaihtokentässä (Kuva 9). (Hietalahti 2011, 11)



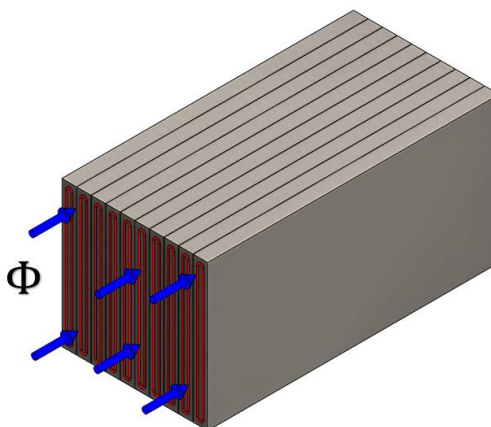
KUVA 9. Massiivinen rautasydän ja siihen magneettivuon indusoimat pyörrevirrat.

Tämä johtuu siitä, että indusoitunut jännite ja sitä kautta syntyvä pyörrevirta on verrannollinen vuon läpäisemään pinta-alaan. (Hietalahti 2011, 11) Kuten kaava (9) osoittaa.

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB \cdot A}{dt} = A \frac{dB}{dt} \quad (9)$$

Jossa Φ on magneettivuo, B on magneettivuon tiheys ja A on pinta-ala.

Tämän takia on edullista pienentää raudan pinta-alaa jakamalla rautaa osiin. Tämä tapahtuu käyttämällä levyrakennetta. Tällöin sydänosissa käytetään toisistaan eristettyjä rautalevyjä. Eristyksellä katkaistaan pyörrevirtojen kulkureittejä ja pienennetään vuon läpäisemää pinta-alaa. Kuvassa (Kuva 10) on kuvattu levymaisessa sydänrakenteessa syntyvät pyörrevirrat. (Hietalahti 2011, 11)



KUVA 10. Levyrakenteinen rautasydän, joka rajoittaa pyörrevirtojen suuruutta.

Pyörrevirtahäviöt laminoiduissa levyrakenteisessa raudassa riippuvat taajuudesta ja vuon tiheydestä kaavan (10) mukaisesti. (Hietalahti 2011, 12)

$$P_{fh} = \frac{V \cdot \pi^2 f^2 d^2 \hat{B}_m^2}{6 \cdot \rho} \quad (10)$$

Jossa V on tilavuus, f on taajuus, d levyjen paksuus, B_m magneettivuon tiheys ja ρ on raudan johtavuus.

2.7.3 Kuormituslämpöhäviöt

Kuormitus- eli virtalämpöhäviöt (P_k) syntyvät käämien vastuksissa virran vaikutuksesta. Käämien vastus muuntaa tehoa lämmöksi. Tyhjäkäyntihäviöiden (P_0) pysyessä vakiona kuormitushäviöt ovat yleisesti neliöllisesti riippuvaisia muuntajan kuormasta. (Korpinen 9)

Yksittäisten käämien resistanssi saadaan joko mittaamalla tai laskemalla kaavan (11) mukaisesti. (Hietalahti 2011, 15)

$$R_1 = k_r \cdot \rho \frac{l_1}{A_1} \quad (11)$$

Jossa k_r on virrat ja käämirakenteen huomioiva suhteellinen kerroin, ρ on resistiivisyys, l on pituus ja A on pinta-ala.

Käämin resistanssi on riippuvainen johtimen lämpötilasta, johtimen resistanssi muuttuu lämpötilakertoimen mukaisesti. Käämivirran kasvaessa johtimen lämpötila kasvaa. Käämin lämpötilan kasvaessa kasvavat myös käämin vastusarvo ja virtalämpöhäviöt. Käämin virtalämpöhäviöitä voi pienentää lisäämällä johtimen pinta-alaa.

Muuntajan valmistajat ilmoittavat muuntajan arvokilvessä muuntajan nimelliset kuormitushäviöt, josta käy ilmi muuntajan kuormitushäviöiden määrää muuntajan käydessä nimellisellä teholla. Kun tiedetään muuntajan nimelliset kuormitushäviöt, voidaan laskea kuormitushäviöt kuormalle kaavan (12) avulla. (Korpinen 10)

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 P_{kn} \quad (12)$$

Jossa S on teho, S_n nimellinen teho ja P_{kn} on kuormahäviöt nimellisellä teholla.

2.8 Ekosuunnitteluvaatimukset

Muuntajilla on yleisesti erittäin korkea hyötysuhde. Muuntajien häviöihin pystytään vaikuttamaan materiaalivalinnoilla ja materiaalien määrillä. Muuntajavalmistajien ei ole taloudellisesti järkevää pyrkiä minimoimaan häviöitä, vaan mitoittaa ne alle vaaditun tason.

Muuntajien tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden enimmäismäärät on säädetty EU:n komission asetuksessa N:o 548/214. Heinäkuun ensimmäisenä päivänä vuonna

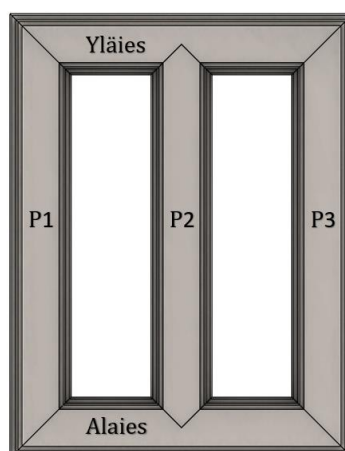
2021, muuntajien ekosuunnitteluvaatimukset tulevat tiukentumaan. Tiukentuvien säädöksiä takia muuntajavalmistajien on löydettävä uusia keinoja muuntajan häviöiden pienentämiseksi ja hyötysuhteen kasvattamiseksi.

2.9 Tehomuuntajan rakenne

Muuntajan rakenne on suhteellisen yksinkertainen, johtuen siitä, että siinä ei ole liikkuvia osia. Muuntajan aktiivisia osia ovat sen käämit ja rautasydän. Jotka suorittavat muuntajan varsinaisen tehtävän. Passiivisia osia ovat tukirakenteet, eristimet, muuntaja öljy ja jäähdytyslaitteet.

Muuntajat jaetaan rautasydämen rakenteen mukaan joko vaippa- tai sydänmuuntajiksi. Suurin osa kolmivaihemuuntajista on sydänmuuntajia johtuen siitä, että sydänmuuntajan rakenne on yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta edullisempi kuin vaippamuuntajan. (Korpinen 9)

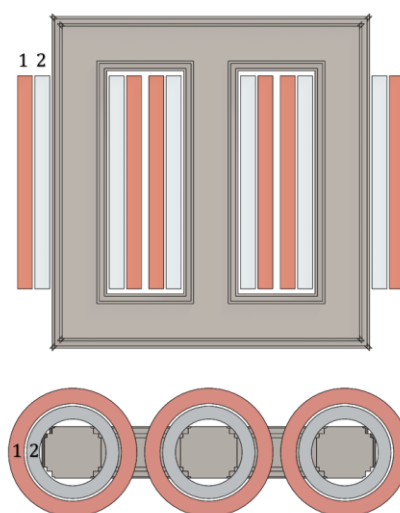
Sydänmuuntajan sydän koostuu vaihekohtaisista pystysuuntaisista pylväistä, jotka on yhdistetty toisiinsa ikeillä. Pylväiden ja ikeiden väliin jäävää aukkoa kutsutaan ikkunaksi (Kuva 11). Pylväät ja ikeet muodostavat yhtenäisen suljetun magneettipiirin. Sydän rakennetaan useista laminoiduista levyistä. Levymäisellä rakenteella saadaan minimoitua vaihtokentän synnyttämät pyörrevitahäviöt. (Korpinen 9)



KUVA 11. Sydänmuuntajan rautasydämen rakenne.

Kunkin pylvään ympärille sijoitetaan vähintään kaksi käämiä, joita kutsutaan tehon kulkusuunnan mukaisesti ensiö- ja toisiokäämitykseksi. Käämien pylväskoh-
taisen lukumäärän ollessa enemmän kuin kaksi, toisiokäämitykset numeroidaan
juoksevalla luvulla. Saman vaiheen käämit sijoitetaan samalle pylväälle hajavuon
ja hajareaktanssin minimoimiseksi. Yleensä käämit ovat käämitty lieriömäisesti
kuvan (Kuva 12) mukaisesti. (Hietalahti 2011 & Korpinen 9)

Käämin johdinmateriaalina käytetään yleisesti kuparia tai alumiinia. Johdin mate-
riaali voi olla emaloitua muotolankaa tai foliota, jossa on kierrosten välissä eris-
tepaperia.



KUVA 12. Sydänmuuntajan ja lieriömäisen käämityksen sijoittelu.

Tehomuuntajissa yleisin muuntajarakennetyyppi on kolmivaiheinen sydänmuun-
taja, jossa ensiö- ja toisiokäämitys on toteutettu lieriömäisesti. Suuremman ni-
mellisjännitteen omaava käämitys sijoitetaan yleisesti ulommas kauemmaksi sy-
däimestä.

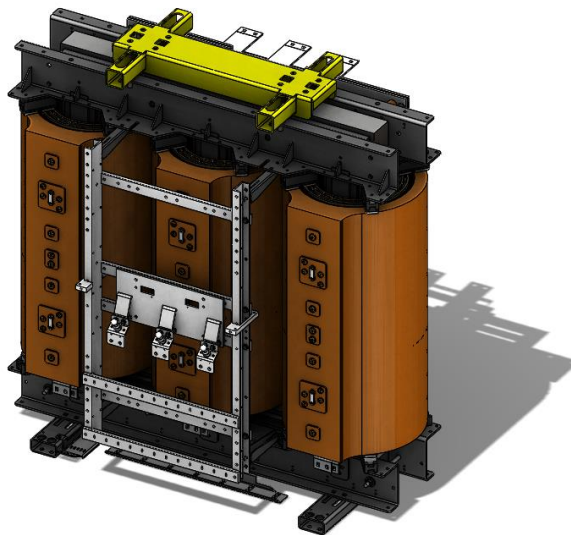
Muuntajien passiivisiin osiin lukeutuvat erilaiset tukirakenteet jäähdytyslaitteet.
Tukirakenteisiin kuuluvat erinäiset sideraudat, pystytuet, ja käämituet. Tukiraken-
teilla varmistetaan muuntajan sydämen ja käämien paikallaan pysyminen.

Jäähdytyslaitteilla siirretään muuntajan häviöiden synnyttämä lämpö pois muun-
tajasta. Suurissa muuntajissa on käytettävä tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä

kuin pienissä, sillä muuntajan häviöt ovat verrannollisia muuntajan geometristen pituusmittojen kuutioon jäähdytyspinnan ollessa verrannollinen vain mittojen neliöön. Muuntajissa käytetään jäähdytysaineena joko ilmaa tai öljyä. Muuntajaa nimitetään jäähdytysaineensa mukaan joko kuiva- tai öljymuuntajaksi. (Korpinen 9)

Kuten kuvan (Kuva 13) kuivamuuntajassa käämitykset ja rautasydän ovat suoraan kosketuksissa ympäröivään ilmaan. Lämpöhäviöiden vaikutuksesta muuntajaa ympäröivä ilma lämpenee lämpösäteilyn vaikutuksesta. Lämmin ilma virtaa kevyenä ylöspäin ja synnyttää muuntajan läheisyyteen ilmavirtauksen, joka siirtää lämmön ympäristöön. Tällöin puhutaan luonnollisesta ilmajäähdytyksestä. Kiihdytettyssä ilmajäähdytyksessä ilmavirtauksen nopeutta suurennetaan puhaltimilla, jolloin jäähdytyskyky paranee. (Korpinen 9)

Kuivamuuntajien käytöllä pyritään minimoimaan palovaarat ja ympäristölle aiheutuvat vahingot. Kuivamuuntajia käytetään ensisijaisesti tiloissa, joissa tulipalolla on katastrofaaliset seuraukset, kuten suuret toimistorakennukset, sairaalat, ostoskeskukset, varastot, merialukset, öljy ja kaasun tuotantolaitokset. (ABB. 1)



KUVA 13. 1800kVA kolmivaiheinen valuhartsinen kuivamuuntaja. (AQ Trafotek)

3 JÄÄHDYTYSYKSIKKÖ JA PUHALLINYKSIKKÖ

3.1 Käyttökohteet ja olosuhteet

AQ Trafotek valmistaa tehomuuntajia lukuisiin eri käyttökohteisiin. Suuri osa valmistetuista muuntajista menee erittäin vaativiin marine- ja offshore-kohteisiin, kuten laivoille ja öljynporauslautoille. Aluksilla on yleisesti suuret tehonsiirto tarpeet ja ahtaat tilat.

Muuntajien tehoa rajoittavat erilaisten luokituslaitosten asettamat lämpöluokat. Muuntajaa nimellisellä teholla ajettaessa on lämpötilan tasapainotila saavutettava ennen luokituslaitoksen asettaman lämpöluokan lämpötilan raja-arvoa, asetettuun ympäristön lämpötilaan saakka. Tasapainotilanne saavutetaan, kun häviötehon tuotto on yhtä suuri kuin tehon siirtyminen sitä jäähdyttävään ympäristöön. (Hietalahti 2013, 171)

Jatkuvassa käytössä muuntajaa ei pitäisi kuormittaa nimellistehoa suuremmalla kuormalla. Muuntajalla voidaan hetkellisesti kuormittaa nimellistä korkeammalla teholla. Tehon kasvaessa muuntajan käämivirrat kasvavat. Virta vuorostaan lämmittää käämejä, joka lisää käämien resistanssia. Kasvava käämiresistanssi taas vuorostaan kasvattaa kuormitushäviöitä. Kuormitushäviöt kasvavat lähes neliöllisesti suhteessa virtaan.

Jos muuntajan nimellistehoa halutaan lisätä, ei häviöistä syntyvää lämpötehoa pyritä vähentämään, vaan se pyritään siirtämään pois muuntajan sydäimestä ja käämityksistä, jotta muuntajan tasapainotila saavutettaisiin suuremmilla tehoilla ennen lämpöluokan rajoittamaa maksimilämpötilaa. Tämä toteutetaan yleisesti erilaisilla jäähdytysjärjestelmillä. Jäähdytysjärjestelmillä voidaan siis saavuttaa samalla muuntajalla korkeampi nimellisteho, muuttamatta itse muuntajan fyysisiä mittoja.

Tehokkaiden jäähdytysjärjestelmien avulla muuntajat saadaan pysymään suuritehoisina ja pienikokoisina. Yhdistelmä sopii erinomaisesti marine- ja offshore-käyttöihin.

3.2 Muuntajan jäähdytys tavat

AQ Trafotekin tehomuuntajissa yleisemmin käytetyt jäähdytystavat voidaan lajitella kolmeen eri luokkaan:

- AN (Air natural)
- AF (Air forced)
- AFWF (Air forced & water forced)

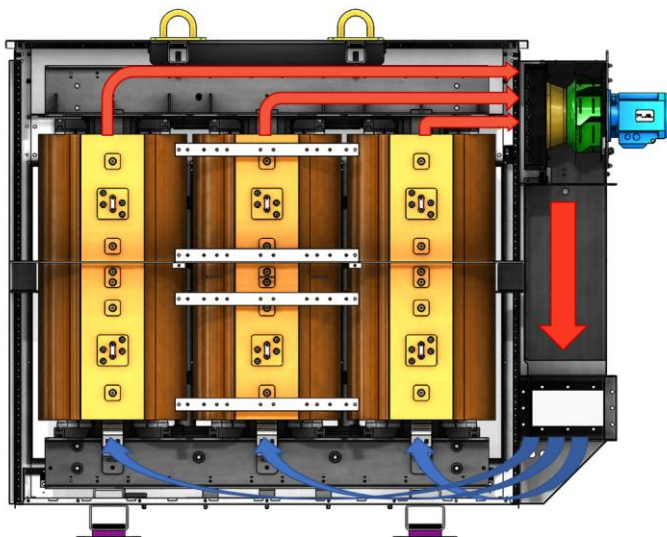
AN jäähdytyksessä muuntaja jäähtyy luonnollisen konvektiovirtauksen avulla. Muuntaja lämmittää ympäröivää ilmaa ja saa ilman siirtymään ylöspäin.

AF jäähdytyksessä muuntajan luonnollista jäähtymistä on tehostettu puhaltimilla, joita pyöritetään moottoreilla. Puhaltimet tehostavat muuntajan pinnoilla kulkevan ilman virtausta. Muuntajankotelon rakenteessa on yleensä avoin IP23 tai IP44D pohjaritilä, josta huoneilma pääsee sisään ja se kuljetetaan muuntajan käämien ja sydämen pintaa pitkin kotelon yläosaan, josta se puhalletaan jäähdytysyksikön läpi takaisin huoneilmaan.

AFWF Jäähdytyksessä jäähdytyksen periaate on sama kuin AF jäähdytyksessä sillä erolla, että ilmankierto ei tapahdu muuntajahuoneen ilmassa, vaan on täysin suljettu. Häviöstä johtuva lämpö johdetaan jäähdyttimen avulla veteen.

Nestejäähdytteisessä jäähdytysjärjestelmässä muuntajan kotelo on täysin ilmatiivis. Puhallinyksiköllä siirretään ilmaa lauhduttimen läpi, jossa virtaa nestettä. Häviöiden lämpö siirtyy lauhduttimen kautta nesteeseen, ja ilma jäähtyy. Jäähdytetty ilma johdetaan takaisin muuntajan alaosioon, josta se kulkeutuu käämien ja sydämen avoimia pintoja pitkin takasin ylös, kuvan (Kuva 14) mukaisesti.

Nestejäähdytyksen yhteydessä käytetään yleisesti myös ilmanohjainlevyjä, jotka on sijoitettu muuntajan keskilinjalle. Ilmaohjainlevyjen avulla muuntajan kotelon sisäinen tila jaetaan kahteen osaan, jossa alapuolella on jäähdytetty ilma ja ylhäällä lämmitetty ilma. Ilmaohjainlevyjen avulla tukitaan mahdollisimman tehokkaasti ilmankulku kotelon tyhjässä tilassa ja pakotetaan ilma kulkeutumaan mahdollisimman tehokkaasti käämien ja sydämen pintaa pitkin.



KUVA 14. Nestejäähdytteisen jäähdytysyksikön toimintaperiaate. Lämmin ilma on kuvattu punaisilla nuolilla ja viilennetty sinisillä nuolilla. (AQ Trafotek)

3.3 Nestejäähdytysyksikön rakenne

AQ Trafotekin käyttämä jäähdytysyksikön rakenne on suhteellisen yksinkertainen. Se koostuu jäähdyttimestä kanavaosista ja puhallin yksiköstä, jossa on yleisesti kaksi puhallinsiipeä ja niitä pyörittävät moottorit. Nestejäähdytysyksikkö sijaitsee kuvassa (Kuva 15) kotelon oikealla sivulla.



KUVA 15. Muuntajan IP54 koteloitu muuntaja. (AQ Trafotek)

3.3.1 Lauhdutin

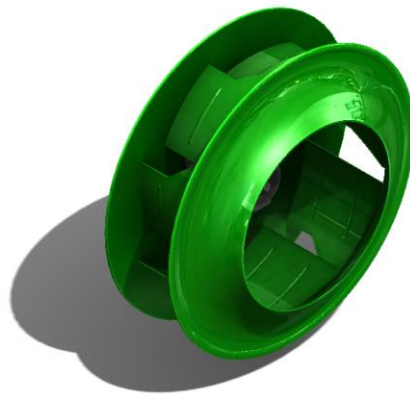
Jäähdytysyksiköiden nestejäähdytysnä käytetään Modinen valmistamia lauhduttimia (Kuva 16). Lauhduttimet ovat suunniteltu generaattorien ja moottorien jäähdyttämiseen. Suurin osa jäähdytysyksikön painehäviöstä muodostuu lauhduttimessa.



KUVA 16. Muuntajan jäähdytin (Modine)

3.3.2 Puhaltimet

Puhaltimien pääasiallinen tehtävä on saada ilmaa liikkumaan riittävästi, jotta jäähdytysteho saadaan sopivaksi. Puhaltimina käytetään Fläktwoods valmistamia Centriflow plus GPEB radiaali puhaltimia (Kuva 17). Puhallinta saa monessa eri kokoluokassa. Puhaltimen koon kasvaessa kasvaa myös sen tehon tarve. Puhallinyksiköissä käytössä on puhallin koot 31, 45, 50 ja 56.



KUVA 17. Centriflow plus GPEB puhallin (Fläktwoods)

3.3.3 Moottorit

Riippuen puhaltimien tehon tarpeesta, tarvitaan riittävän tehokas moottori pyörittämään puhallinsiipiä. Puhallinyksikön moottoreina on yleisesti käytetty ABB valmistamia oikosulkumoottoreita (Kuva 18).



KUVA 18. ABB oikosulkumoottori (ABB)

Käytössä olevia moottoreita oli kolmea eri teholuokkaa (1,5 kW, 2,2 kW ja 3,0 kW), joista kutakin löytyi nelinapaisena. Keskimmäistä kokoa (2,2 kW) löytyi myös kaksinapaisena. Tehon ja napaparien kombinaatioita löytyi neljä erilaista.

Jännite ja taajuus yhdistelmiä moottoreissa oli kuutta erilaista. 50 Hertsin taajuudella moottoreita löytyi jännitteillä 230, 400 ja 690 V. Jännitteet 60 hertsin alueella olivat 440, 480 ja 690 V.

3.4 Puhallinmoottorimitoituksen lähtötiedot

Puhallinyksiköistä oli tarkoitus mitoittaa uudelleen vain puhaltimien moottorit. Mitoitusta varten tehtiin taustatyötä käytössä olevien moottoreiden menekistä, mitoituksesta puhaltimiin ja IE-luokista.

Tiedonhallintajärjestelmästä löytyi 217 moottorinimikettä. Nimikkeiden suuri määrä johtui moottoreiden useasta tehon, napaparien, jännitteen ja taajuuden

yhdistelmästä, joista kutakin löytyi usealle eri luokituslaitokselle leimatut mallit. Kun luokituslaitokset jätettiin tarkasteluista pois. Nimikkeitä jäi jäljelle 24 kappaletta. Nimikkeiden suhteellinen jakautuminen vuosina 2018 ja 2019 taulukoitiin (Taulukko 1).

TAULUKKO 1. Moottoreiden suhteellinen jakautuminen vuosina 2018–2019.

		Teho (kW)/ Navat				
		1,5	2,2	2,2	3	
Hz	V	4P	4P	2P	4P	Osuus
50	230	0,0 %	2,5 %	3,4 %	0,0 %	5,9 %
50	400	2,9 %	8,8 %	5,5 %	2,9 %	20,1 %
50	690	0,8 %	2,9 %	4,0 %	0,0 %	7,8 %
60	440	16,8 %	9,4 %	3,8 %	6,1 %	36,1 %
60	480	2,9 %	0,0 %	2,5 %	0,0 %	5,5 %
60	690	12,2 %	6,7 %	5,0 %	0,8 %	24,7 %
Osuus		35,6 %	30,4 %	24,1 %	9,9 %	100%

Kullekin puhallinsiivelle oli määritelty oma moottori riippuen siiven tehontarpeesta. Siiven tehontarve on riippuvainen sen pyörimisnopeudesta. Pyörimisnopeus taas on riippuvainen syöttävän verkon taajuudesta ja moottorin napaparien määrästä. Moottoreiden tiedot listattiin taulukkoon (Taulukko 2).

TAULUKKO 2. Puhallinsiiville aiemmin mitoitettut moottorit.

GPEB	P	Hz	kW
31	4	50	1,5
	4	60	1,5
	2	50	2,2
	2	60	2,2
45	4	50	2,2
	4	60	2,2
50	4	50	2,2
	4	60	3
56	4	50	3

Vuonna 2016 luodusta moottoreiden tilauslistasta kävi myös ilmi moottoreiden IE-luokitukset. Listassa moottorit olivat vaihtelevasti välillä IE1-IE3. Kaikille moottoreille oli erikseen listauksessa myös IE3 versiot. Kaikki IE3 moottorit eivät täytäneet IE3 luokitusta. Erityisesti 60 Hz moottoreissa IE3 luokkaa ei saavutettu juurikaan millään jännitealueella. 50 Hz moottoreissa saavutettiin IE3 luokka.

4 MOOTTOREIDEN MITOITUS

Uusien moottorien mitoituksessa oli kaksi päätavoitetta.

1. kaikkien moottoreiden hyötysuhdeluokan siirtäminen IE3 tasoon.
2. moottoreiden mahdollisen ylimitoituksen purkaminen.

Lisäksi toivottiin, että IE3 tasoon nostamisen hintakustannukset saataisiin kompensoitua pienempi tehoisilla moottoreilla. Optimaalisessa tilanteessa saataisiin korkeamman hyötysuhteen moottorit ja ne olisivat edullisempia kuin aiemmat huonomman hyötysuhteen omaavat moottorit.

4.1 Puhaltimien tehon tarve

Moottoreiden mitoitus aloitettiin määrittelemällä puhaltimien tehontarve. Puhaltimissa yleisesti momentti on neliöllisesti ja teho on kuutiollisesti verrannollinen puhaltimen kierroslukuun (ABB 2). Kierrosluvun määrittelee moottorin taajuus ja napaparien määrä.

Moottoreita löytyi kaksi- ja nelinapaisina, joista kumpaakin käytettiin 50 ja 60Hz taajuudella. Sijoittamalla kaavaan (1) napaparien lukumäärä ja taajuus saatiin laskettua moottoreiden nimelliskierrosmäärä.

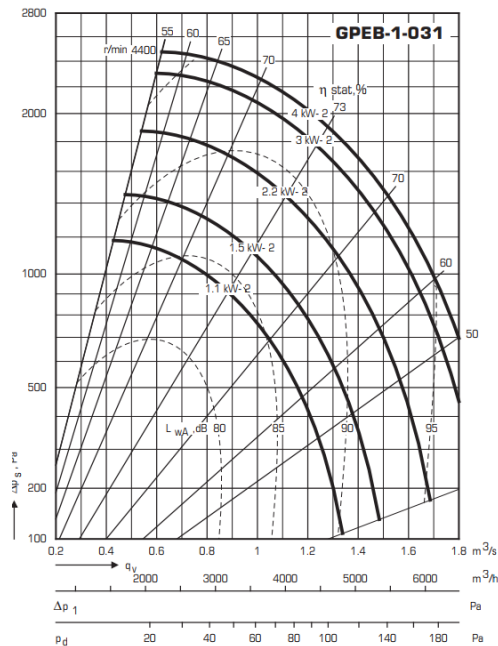
$$\frac{50\text{Hz} \cdot 60s}{2} = 1500\text{rpm}$$

Samalla periaatteella laskettiin nimelliskierrosmäärät jokaiselle napaparin ja taajuuden yhdistelmälle. Nimelliset kierrosmäärät kirjattiin taulukkoon (Taulukko 3).

TAULUKKO 3. Moottoreiden nimelliset kierrosmäärät.

P	Hz	rpm
4	50	1500
4	60	1800
2	50	3000
2	60	3600

Jokaisen käytössä olevan puhallinkoon tiedot haettiin puhaltimien datalehdistä. Jokaisella puhaltimella oli ominaiskäyrät, joista kävi ilmi puhaltimien tehontarve tietyllä kierrosmäärällä suhteessa painehäviöön ja ilmamäärän (Kuvio 2). Jokaiselle puhaltimelle oli myös ilmoitettu eritehoisten moottoreiden maksimaalinen akseliteho ja kierrosnopeus millä teho saavutettiin (Kuvio 3).



KUVIO 2. GPEB-1-031 puhallinsiiven ominaiskäyrästä. (Fläktwoods)

Product code Produkt Kode Produktkod	Rated output Nennleistung Märkuteffekt kW	Size Grösse Storlek IEC	Motor code Motorbezeichnung Motorkod	Speed Drehzahl Varvtal rpm	Weight Gewicht Vikt. kg	Max. Speed Drehzahl Varvtal rpm	Max Hz	Antivibration mountings Schwingungsdämpfer Vibrationsdämpare	
								Rubber/ Gummi	Spring/Feder Stålfjäder
GPEB-1-00-031-08-0	0,75	80	APAL-4-00075-c-d6	1420	11	2556	90,0	GPEZ-42-00-031-1-0	GPEZ-43-00-031-1-0
GPEB-1-00-031-09-0	1,1	90	APAL-4-00110-c-d6	1440	14	2592	90,0	GPEZ-42-00-031-1-0	GPEZ-43-00-031-1-0
GPEB-1-00-031-08-0	1,1	80	APAL-2-00110-c-d6	2850	11	3039	53,3	GPEZ-42-00-031-1-0	GPEZ-43-00-031-1-0
GPEB-1-00-031-09-0	1,5	90S	APAL-2-00150-c-d6	2870	14	3370	58,7	GPEZ-42-00-031-1-0	GPEZ-43-00-031-1-0
GPEB-1-00-031-09-0	2,2	90L	APAL-2-00220-c-d6	2850	16	3829	67,2	GPEZ-42-00-031-1-0	GPEZ-43-00-031-1-0

KUVIO 3. Moottoritaulukko GPEB-1-031 puhallinsiivelle. (Fläktwoods)

Taulukoista saatujen tietojen avulla kunkin puhallinsiiven akseliteho halutulla pyörimisnopeudella saatiin laskettua kaavan (13) avulla.

$$P_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \cdot P_2 \quad (13)$$

Jossa P_1 on teho nimellisellä pyörimisnopeudella, n_1 on nimellinen pyörimisnopeus, P_2 on vertailuteho ja n_2 on pyörimisnopeus vertailupisteessä.

$$P_1 = \left(\frac{1500}{2556}\right)^3 \cdot 0,75kW = 0,15kW$$

Nelinapaisella moottorilla, jota syötetään 50Hz taajuudella saadaan nimellisellä pyörimisnopeudella 31 kokoluokan puhaltimelle maksimitehoksi 0,15kW.

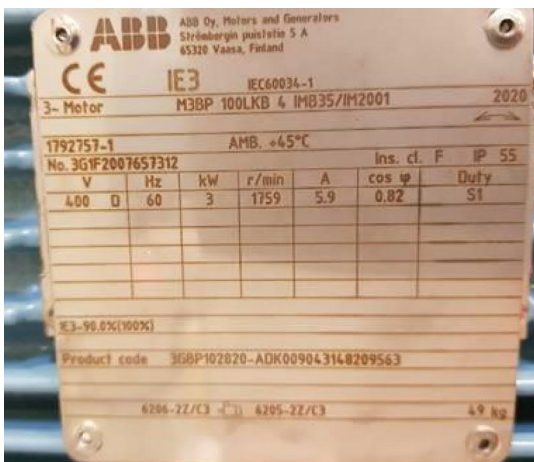
Kaikkien käytössä olleiden puhaltimien tehot saatiin laskettua kaikilla aiemmin määritellyillä nimelliskojeilla. Puhaltimien vaatimat tehot ovat esitetty taulukossa (Taulukko 4).

Suurten kierrosmäärien takia kaksinapaisia moottoreita pystyttiin käyttämään vain 31 kokoluokan puhallinsiivissä. Suuremmissa puhaltimissa moottoreiden koot olisivat kasvaneet suhteettoman suuriksi. Tämän takia kaksinapaiset koneet jätettiin suosiolla pois tarkasteluista yli 31 kokoluokan siivissä.

TAULUKKO 4. Puhaltimien maksimitehot eri kierrosmäärillä.

GPEB	P	Hz	rpm	P1 (kW)
31	2	50	3000	1,06
	2	60	3600	1,83
	4	50	1500	0,15
	4	60	1800	0,26
45	4	50	1500	0,78
	4	60	1800	1,35
50	4	50	1500	1,44
	4	60	1800	2,48
56	4	50	1500	2,47
	4	60	1800	4,27

Lasketut tulokset varmennettiin mittauksilla. Mitattavaksi yksilöksi valikoitui tuotannossa löytynyt jäähdytysyksikkö. Yksikössä oli kaksi GPEB-50 puhallinta ja niiden moottoreina toimi 3 kW moottorit. Moottorin tiedot ilmenivät sen arvokilvestä (Kuva 19).



KUVA 19. Mitattavan puhaltimen moottorin arvokilpi.

Moottorin sähköisen tehon määrittämiseksi piti sen verkosta ottama virta mitata. Virran mittaamiseksi toinen moottoreista käynnistettiin ja sen vaihevirratt mitattiin (Taulukko 5). Mitatuista vaihevirroista laskettiin keskiarvo, jota käytettiin moottorin ottaman tehon laskennassa.

TAULUKKO 5. Mitatun moottorin virrat.

	L1	L2	L3	Avg
Virta (A)	4,604	4,465	4,587	4,552

Moottorin verkosta ottama teho (P_v) voitiin laskea kaavalla (3). Moottorin jännitteen (400V) ja tehokertoimen (0,82) arvot saatiin arvokilvestä. Virtana käytettiin mitattujen virtojen keskiarvoa.

$$P_v = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 4,552A \cdot 0,82 = 2,59kW$$

Moottorin verkosta ottama teho oli 2,59 kW. Moottorin akseliteho eli puhaltimen teho (P_p) saadaan laskettua kertomalla verkosta otettu sähköteho moottorin hyötysuhteella.

$$P_p = 2,59\text{kW} \cdot 90\% = 2,33\text{kW}$$

Puhaltimen tehoksi saatiin 2,33 kW. Teho oli odotetusti pienempi kuin aikaisemmin määritelty puhaltimen maksimi teho.

Moottoritehoa (P_m) tarkasteltiin laskennallisesti sijoittamalla moottorin jättämän sisältävä pyörimisnopeus ja teho, sekä moottorin nimellinen pyörimisnopeus kaavaan (13).

$$P_m = \left(\frac{1800}{1759}\right)^3 \cdot 2,33\text{kW} = 2,49\text{kW}$$

Nimellisellä kierrosmäärällä 60 Hz verkossa nelinapaisella moottorilla saatiin tehoksi 2,49 kW. Katalogista saatujen arvojen mukaan laskettuna tehon pitäisi olla 2,48 kW. Tarkastelun perusteella voitiin todeta, että puhaltimien laskennallinen teho oli hyvin linjassa todellisuuden kanssa.

4.2 Moottoreiden mitoittaminen puhaltimille

Kun puhaltimien tehontarve oli määritelty, piti kullekin yhdistelmälle määritellä sopiva moottori. Moottoreiden valintaan käytettiin apuvälineenä ABB:n Motosize-moottorimitoitushjelmaa ja ABB moottorikatalogia.

Kaikki moottorit haluttiin alumiinirunkoisina, joissa hyötysuhde luokka olisi IE3. Moottorin minimi runkokokoa rajoitti eri luokituslaitosten vaatimukset. Runkokoon ollessa pienempi kuin 71, ABB ilmoitti, että moottorit eivät täytä luokituslaitosten vaatimuksia. Moottorirungon kokoluokan ollessa 90 tai enemmän moottoreihin olisi mahdollista hankkia luokkien sertifikaatit. Yleisesti aiemmin käytössä olleet moottorit täyttivät luokkien vaatimukset, mutta eivät olleet sertifikaatillisia. Luokkien vaatimusten takia uusien moottoreiden runkokokojen pitäisi olla vähintään 71.

ABB moottorikatalogia tarkastellessa oli huomattavissa, että alumiinisia IE3 moottoreita ei ollut saatavilla alle 0,75 kW tehoisina. Tämä johtunee MEPS säännöksistä, joiden mukaan moottoreiden, jotka ovat alle 0,75 kW ei toistaiseksi tarvitse täyttää IE3 hyötysuhdeluokkaa.

Lisäksi laippakiinnityksen laipan koko määritteli mahdollisen moottorirungon koon. Alle 0,75 kW moottoreiden runkokoko oli pienempi kuin 80. Laippakoko on yhtäläinen moottorin runkokoon ollessa 80–90, joka kattaa tehoalueen 0,75–2,2 kW. Seuraava laippakoko on välillä 100–112, joka vuorostaan kattaisi tehoalueen 3–4 kW. Moottoreiden tehoalueen ollessa 0,75–4 kW pärjättäisiin kahdella laippakoolla. Rajaamalla laippakoot kahteen, saadaan erilaisten moottorinkiinnitykseen käytettyjen levyjen nimikkeiden määrä rajattua pienemmäksi.

Puhaltimien tehontarpeet sijoittuivat välille 0,15–4,27 kW. Edellä olevien tarkastelujen pohjalta moottoreiden mitoittaminen rajattiin tehoalueella 0,75–4 kW. Ratkaisu tiputti tarkastelusta pois 56 kokoluokan puhallinsiiven käytön 60Hz sovelluksissa, jota ei aiemminkaan ollut käytössä.

Seuraavaksi oli vuorossa itse moottoreiden valinta. Moottoreiden tehot määriteltiin valitsemalla nimellisteholtaan pienin tehontarpeen ylittävä moottori kullekin sovellukselle. Rajatun tehoalueen sisälle jäivät taulukossa (Taulukko 6) listatut moottorit. Valitut moottorit on listattu taulukkoon (Taulukko 7).

TAULUKKO 6. Katalogin mukaiset moottoritehot (P_n) välillä (0,75–4) kW.

No.	P_n (kW)
1	0,75
2	1,1
3	1,5
4	2,2
5	3
6	4

TAULUKKO 7. Puhallinsiipien tehontarpeet (P_p) ja sovitettujen moottorien tehot (P_n).

GPEB	P	Hz	rpm	P_p (kW)	P_n (kW)
31	2	50	3000	1,06	1,1
	2	60	3600	1,83	2,2
	4	50	1500	0,15	0,75
	4	60	1800	0,26	0,75
45	4	50	1500	0,78	1,1
	4	60	1800	1,35	1,5
50	4	50	1500	1,44	1,5
	4	60	1800	2,48	3
56	4	50	1500	2,47	3

50 hertsin sovelluksissa olisi jatkossa käytössä neljää eri moottoritehoa, joista 1,1kW moottoria tarvittaisiin myös kaksinapaisena. Yhteensä tarvittaisiin viisi erilaista moottoria. 60 hertsin sovelluksissa käytettäisiin neljää eritehoista moottoria, joista 2,2 kW malli olisi kaksinapainen ja muut nelinapaisia (Taulukko 8).

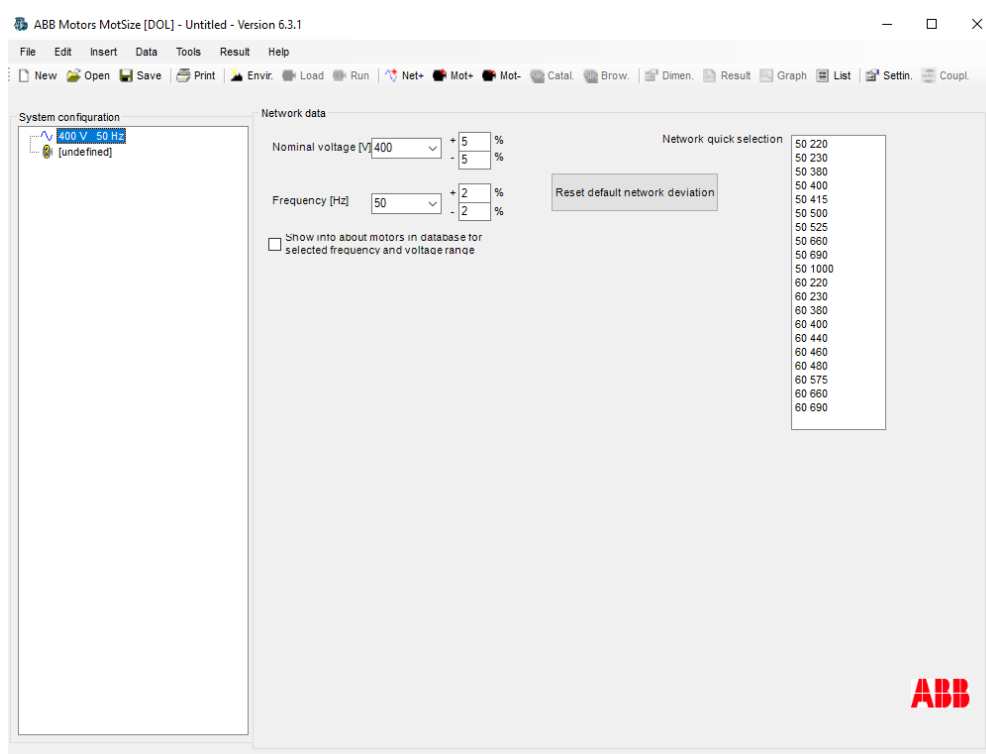
TAULUKKO 8. Tarvittavat moottoritehot 50 ja 60 hertsin verkoissa.

	50 Hz	60 Hz
31/4P	0,75	0,75
31/2P	1,1	2,2
45/4P	1,1	1,5
50/4P	1,5	3
56/4P	3	4

5 MOOTTOREIDEN VALINTA JA KUSTANNUSLASKELMAT

5.1 Moottoreiden valinta

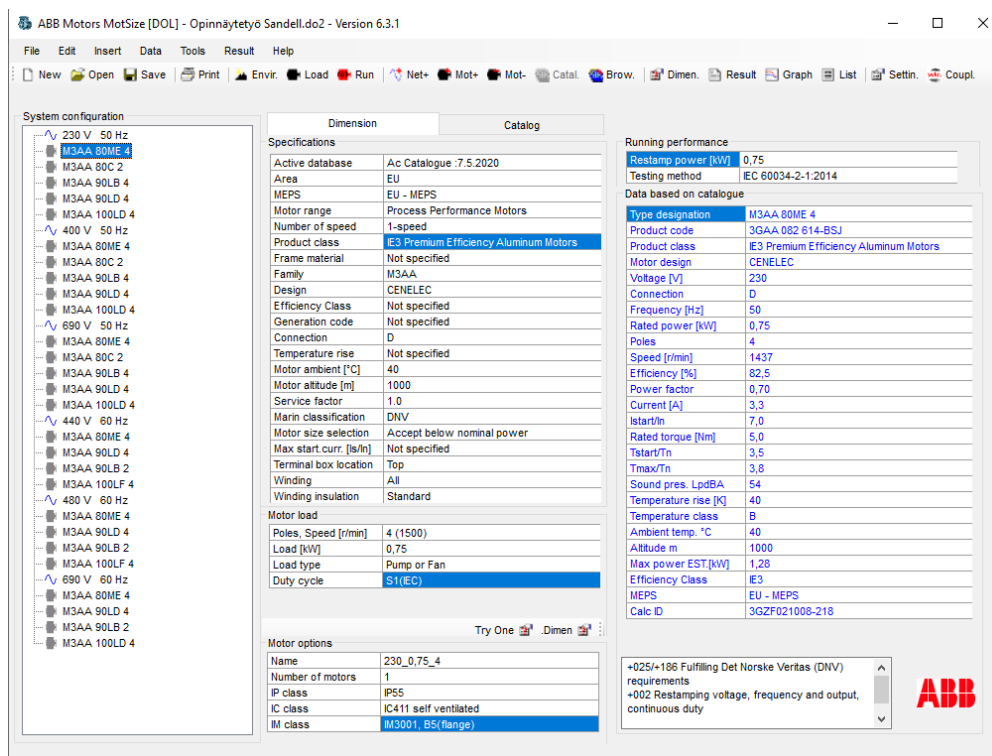
Kun moottoreiden tavoitenimellistehot olivat tiedossa, siirryttiin valitsemaan tarkat moottorimallit Motsize ohjelmistolla. Valinta aloitettiin luomalla kaikki tarvittavat jänniteverkot ohjelmaan (Kuva 20). Verkkoa valittaessa määritettiin sen taajuus ja jännite. Verkkoja luotiin tarpeen mukaisesti kuusi kappaletta. 50 Hz taajuudella toimivia verkkoja luotiin jännitteille 230, 400 ja 690 V. 60Hz verkkoja valittiin jännitteille 440, 480 ja 690 V.



KUVA 20. Verkon valinta Motzise ohjelmistolla.

Tarvittavien jänniteverkkojen määrittelyn jälkeen, kullekin verkolle valittiin moottorit, joita verkossa haluttiin käyttää. Moottorien valinta aloitettiin 230V/50Hz verkosta. Valikosta asetettiin moottorille kuvan (Kuva 21) mukaiset halutut vaatimukset ja ohjelmiston avulla valittiin sopiva moottori. Toiminto toistettiin kaikille toivottuille moottoritehoille, jotka aiemmin määritettiin 50Hz verkkoihin.

Seuraavaksi siirryttiin valitsemaan moottoreita 400V/50Hz verkkoon. Moottorien valinta hoidettiin lähes samalla tavalla kuin 230V verkossa. Erona oli käämityksen valinta. Moottorin nimellisjännitteen ollessa 400V voitiin sen käämitykseksi valita joko S- tai D-käämitys. Käämitysten erona oli se, että S-käämityksellä nimellisjännite 400V saavutettiin tähtikytkennällä ja D-käämityksellä sama nimellisjännite kolmiokytkennällä. Käämityksen valinnalla ei ollut vaikutusta moottorin hintaan. 400V sovelluksissa päädyttiin käyttämään D-käämistystä missä moottorin nimellisjännitettä saataisiin kytkentää muuttamalla nostettua 690 volttiin.



KUVA 21. Moottorin tietojen täyttäminen ohjelmaan.

Moottoreiden valinta toistettiin noudattamalla samaa periaatetta kaikissa verkoissa. Valittujen moottoreiden tiedot tulostettiin taulukoksi (Taulukko 9).

TAULUKKO 9. Valittujen moottoreiden tiedot

Motor list												
Data: Voltage 230 V, Frequency 50 Hz,												
Item	Reference	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed [r/min]	Eff [%]	EffSt.	Eff Class	PF	Current [A]	Insul./ T-Rise
1	230_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1437	82,5	EU - MEPS	IE3	0,70	3,3	F / 40
2	230_1,1_2	M3AA 80C 2	B5(flange)	1,10	2	2871	82,7	EU - MEPS	IE3	0,80	4,2	F / 49
3	230_1,1_4	M3AA 90LB 4	B5(flange)	1,10	4	1437	84,1	EU - MEPS	IE3	0,78	4,3	F / 33
4	230_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1445	85,3	EU - MEPS	IE3	0,75	5,8	F / 33
5	230_3_4	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3,0	4	1445	87,9	EU - MEPS	IE3	0,83	10,3	F / 43
Data: Voltage 400 V, Frequency 50 Hz,												
6	400_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1437	82,5	EU - MEPS	IE3	0,70	1,90	F / 36
7	400_1,1_2	M3AA 80C 2	B5(flange)	1,10	2	2871	82,7	EU - MEPS	IE3	0,80	2,4	F / 49
8	400_1,1_4	M3AA 90LB 4	B5(flange)	1,10	4	1437	84,1	EU - MEPS	IE3	0,78	2,5	F / 33
9	400_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1445	85,3	EU - MEPS	IE3	0,75	3,3	F / 33
10	400_3_4	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3,0	4	1445	87,9	EU - MEPS	IE3	0,83	5,9	F / 43
Data: Voltage 690 V, Frequency 50 Hz,												
11	690_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1437	82,5	EU - MEPS	IE3	0,70	1,05	F / 36
12	690_1,1_2	M3AA 80C 2	B5(flange)	1,10	2	2871	82,7	EU - MEPS	IE3	0,80	1,40	F / 49
13	690_1,1_4	M3AA 90LB 4	B5(flange)	1,10	4	1437	84,1	EU - MEPS	IE3	0,78	1,42	F / 33
14	690_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1445	85,3	EU - MEPS	IE3	0,75	1,95	F / 33
15	690_3_4	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3,0	4	1445	87,9	EU - MEPS	IE3	0,83	3,4	F / 43
Data: Voltage 440 V, Frequency 60 Hz,												
16	440_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1740	85,5	NA	IE3	0,68	1,69	F / 32
17	440_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1746	86,6	NA	IE3	0,76	3,0	F / 29
18	440_2,2_2	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2,2	2	3508	86,8	NA	IE3	0,73	4,5	F / 52
19	440_3_4	M3AA 100LF 4	B5(flange)	3,0	4	1755	89,5	NA	IE3	0,83	5,4	F / 40
Data: Voltage 480 V, Frequency 60 Hz,												
20	480_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1752	85,3	NA	IE3	0,62	1,71	F / 31
21	480_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1752	86,5	NA	IE3	0,72	2,9	F / 40
22	480_2,2_2	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2,2	2	3524	86,5	NA	IE3	0,73	4,2	F / 53
23	480_3_4	M3AA 100LF 4	B5(flange)	3,0	4	1762	89,7	NA	IE3	0,79	5,1	F / 40
Data: Voltage 690 V, Frequency 60 Hz,												
24	690_0,75_4	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1723	85,2	NA	IE3	0,73	1,01	F / 40
25	690_1,5_4	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1733	86,0	NA	IE2	0,82	1,80	F / 40
26	690_2,2_2	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2,2	2	3484	86,1	NA	IE2	0,90	2,4	F / 56
27	690_3_2	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3,0	4	1734	86,9	NA	IE1	0,89	3,2	F / 40

50Hz taajuudella toimivat moottorit saatiin suoraan mitoitettua onnistuneesti. 440V/60Hz ja 480V/60Hz verkoissa moottorit saatiin hyötysuhdeluokkaan IE3. Kolme valituista moottoreista piti nostaa J-generaatiosta K-generaation moottoreiksi IE3 hyötysuhteen saavuttamiseksi. Taulukossa (Taulukko 9) moottorit, joiden tausta on maalattu harmaalla ovat K-generaation moottoreita.

Kuten jo aiemmin mitoitetuissa moottoreissa 690V/60Hz verkossa ei saavutettu haluttua hyötysuhdeluokkaa, joka saavutettiin vain 0,75 kW tehoisella moottorilla. Motsize ohjelmisto ei löytänyt moottoreita, joilla IE3 hyötysuhdeluokka olisi saavutettu 1,5 kW, 2,2 kW, ja 3 kW moottoreille.

Kaikki moottorit eivät saavuttaneet haluttua hyötysuhdeluokkaa, vaikka työn päälimmäisenä tavoitteena oli saada kaikki tulevaisuudessa käytettävät moottorit IE3-hyötysuhdeluokan omaaviksi. Tämä pystyttiin saavuttamaan valitsemalla sovellukseen teholtaan suurempi moottori ja leimaamalla se pienemmälle teholle

(Taulukko 10). Näin saavutettiin helposti ja kustannustehokkaasti tarvittava hyötysuhdeluokka.

TAULUKKO 10. IE3 hyötysuhdeluokan täyttävät moottorit 690V, 60Hz verkossa.

Data: Voltage 690 V, Frequency 60 Hz,												
Item	Reference	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed [r/min]	Eff [%]	EffSt.	Eff Class	PF	Current [A]	Insul./ T-Rise
25	690_1,5_4	M3AA 100LE 4	B5(flange)	1,50	4	1767	89,3	NA	IE3	0,79	1,78	F / 12
26	690_2,2_2	M3AA 100LC 2	B5(flange)	2,2	2	3519	88,1	NA	IE3	0,89	2,3	F / 24
27	690_3_2	M3AA 112MB 4	B5(flange)	3,0	4	1759	90,8	NA	IE3	0,78	3,6	F / 29

Kaikkien tarvittavien sovelluksien moottorit oli valittu onnistuneesti. Moottoreiden teoreettinen kuormitusaste tarkastettiin tarkkojen kierrosmäärien mukaan. Tulokset kirjattiin ylös taulukkoon (Taulukko 11). Tuloksista näki selkeästi, että pienemmän tehon moottoreiden tilalle olisi voinut mitoittaa vielä pienemmät moottorit, jos se muuten olisi ollut käytännöllistä. Tiukimmat mitoitukset jäivät noin 85 prosenttiin maksimaalisesta tehosta. 85% käyttöaste jättää hyvin marginaalia mahdollisille tehonnousulle.

TAULUKKO 11. Valittujen moottoreiden kuormitus puhallintehon maksimipisteessä. (P_p =puhaltimen teho, P_n =moottorin teho.)

P	V	Hz	rpm	P_p (kW)	P_n (kW)	G	IE-	P_r/P_m
2	230	50	2871	0,93	1,1	J	3	0,843
2	400	50	2871	0,93	1,1	J	3	0,843
2	690	50	2871	0,93	1,1	J	3	0,843
2	440	60	3508	1,69	2,2	J	3	0,769
2	480	60	3524	1,72	2,2	J	3	0,780
2	690	60	3519	1,71	2,2	K	3	0,776
4	230	50	1437	0,12	0,75	J	3	0,155
4	400	50	1437	0,12	0,75	J	3	0,155
4	690	50	1437	0,12	0,75	J	3	0,155
4	440	60	1740	0,21	0,75	J	3	0,275
4	480	60	1752	0,21	0,75	J	3	0,281
4	690	60	1723	0,20	0,75	J	3	0,267
4	230	50	1437	0,69	1,1	J	3	0,625
4	400	50	1437	0,69	1,1	J	3	0,625
4	690	50	1437	0,69	1,1	J	3	0,625
4	440	60	1746	1,23	1,5	J	3	0,822
4	480	60	1752	1,25	1,5	K	3	0,830
4	690	60	1767	1,28	1,5	K	3	0,852
4	230	50	1445	1,28	1,5	J	3	0,856
4	400	50	1445	1,28	1,5	J	3	0,856
4	690	50	1445	1,28	1,5	J	3	0,856
4	440	60	1755	2,30	3	K	3	0,766
4	480	60	1762	2,33	3	K	3	0,775
4	690	60	1759	2,31	3	J	3	0,771
4	230	50	1445	2,21	3	J	3	0,736
4	400	50	1445	2,21	3	J	3	0,736
4	690	50	1445	2,21	3	J	3	0,736

5.2 Kustannusvaikutukset

Kun kaikki moottorit oli määritelty, oli aika tarkastella työn kustannusvaikutuksia. Moottoreiden hintaan vaikutti se, että valitut moottorit olivat uudempaa ja parempaa generaatiota kuin aiemmin mitoitettut moottorit. Tämä olettavasti nostaisi moottoreiden kustannuksia. Kustannusten nousua pyrittiin hillitsemään mitoittamalla moottorit nimellisteoltaan pienemmiksi. Lähes kaikki uudet moottorit saatiin teholtaan pienemmiksi kuin edeltäjänsä.

Uusien moottoreiden hinnoista pyydettiin tarjous ABB:ltä. Uusien moottoreiden hinnoitteluun vaikutti moottorin nimellisteho, napaparimäärä ja generaatio. Lisäksi 690V/60Hz moottoreiden hintaan vaikutti nostavasti virallista nimellistehoa suuremman moottorirungon käyttö.

Taulukkoon (Taulukko 12) on kerätty yhteen uudet korvaavat moottorit ja soveluksessa aiemmin käytetyt moottorit. Moottoreiden hinnat on esitetty suhteellisena muutoksena. Lisäksi taulukkoon on listattu moottoreiden oletettu vuosikulutus kussakin sovelluksessa aiemmin selvitettyjen vuosikulutusten pohjalta.

TAULUKKO 12. Moottoreiden hinnanmuutos ja suhteellinen kulutus.

Jännite (V)	P	Taajuus (Hz)	IE3	<IE3	Hinta (IE3/<IE3)	kpl (%)
-	4	50	0,75	1,5	86,3 %	4,1 %
-	2	50	1,1	2,2	96,7 %	14,1 %
-	4	50	1,1	2,2	92,7 %	7,7 %
-	4	50	1,5	2,2	97,3 %	7,7 %
-	4	50	3	3	99,7 %	3,2 %
-	4	60	0,75	1,5	86,3 %	34,5 %
-	4	60	1,5	2,2	97,3 %	5,0 %
-	2	60	2,2	2,2	112,4 %	6,8 %
-	4	60	3	3	108,6 %	3,2 %
690	4	60	1,5	2,2	122,8 %	7,3 %
690	2	60	2,2	2,2	141,4 %	5,5 %
690	4	60	3	3	114,5 %	0,9 %

Tarkastelussa oli huomattavissa, että moottoreiden hyötysuhdeluokan korotuksesta huolimatta, moottoreiden kokonaiskustannuksissa saavutettiin vuositasolla pieni säästö.

6 POHDINTA

Työn päällimmäisenä tarkoituksena oli mitoittaa kaikki AQ Trafotek:in muuntajissa käytettävät moottorit IE3 hyötysuhdeluokkaan. Hyötysuhdeluokan nostolla pyrittiin vastaamaan asiakkaiden kasvavaan haluun saada käyttökohteissaan hyvän hyötysuhdeluokan omaavat laitteistot. Samalla oli tarkoitus minimoida muutoksesta johtuvien kustannusten nousu.

Mitoitus alitettiin määrittelemällä puhaltimien tehontarve mahdollisimman tarkasti. Puhaltimien tehontarve määriteltiin valmistajan ilmoittamien arvojen ja mittausten perusteella. Kun puhaltimien tehontarve kussakin sovelluksessa oli määritelty, puhaltimille mitoitettiin sopiva moottori. Moottoreiden mitoituksessa pyrittiin saamaan mahdollisimman kustannustehokas moottori jokaiseen tarvittavaan puhallin sovellukseen. Moottoreiden valinnassa tiettyjen rajaehojen täytyi täytyä, jotta moottoreiden muuttaminen ei olisi vaikuttanut suuresti jäähdytysyksiköiden muuhun rakenteeseen sekä muutokset olisivat taaksepäin yhteensopivia.

Kaikki moottorit saatiin mitoitettu hyötysuhdeluokaltaan IE3 tasolle. Samalla saatiin purettua aiemmin mitoitettujen moottoreiden ylimitoitusta. Moottoreiden optimoinnin takia saavutettiin tilanne, jossa kaikki muuntajien jäähdytysyksiköiden puhallinmoottorit tulevat täyttämään EU MEPS asettamat määräykset toistaiseksi, riippumatta lopputuotteen käyttökohteesta. Lisäksi hyötysuhteen nostolla ei ollut negatiivista vaikutusta kustannuksiin. Tulosten valossa voidaan todeta, että projekti on ollut erittäin onnistunut.

Moottoreiden optimointiprojektin hyvien tulosten seurauksena on päätetty jatkaa jäähdytysyksiköiden kustannustehokkuuden nostamista. Tulevaisuudessa jäähdytysyksikön peltiosien rakenne, puhaltimet ja jäähdyttimet tullaan tarkastelemaan ja optimoimaan.

LÄHTEET

Lähde

Hietalahti, L. 2013 Sähkövoimatekniikan perusteet. Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011 Muuntajat ja sähkökoneet. Tammertekniikka.

Korpinen, L. 9. Muuntajat ja sähkölaitteet 1 <http://leenakorpinen.com/fi/julkaisut/opetusaineistoja/>

Korpinen, L. 10. Sähkökoneet Osa 1
<http://leenakorpinen.com/fi/julkaisut/opetusaineistoja/>

ABB Transformer handbook, 3rd edition. (ABB 1)

ABB Tekninen opas nro7. (ABB 2)
[library.e.abb.com > public > Tekninen_opasnro7](http://library.e.abb.com/public/Tekninen_opasnro7)

Centriflow Plus, katalogi, Fläktwoods 2008.

LIITTEET

Liite 1. ABB moottorilista 2016 (1/3)

Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN [KW]	Poles	Speed [r/min]	Eff [%]	EffSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Attitude [m]	Price Each
1	400 1.5 4	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1435	84.2	EU - MEPSIE2	E2	0.76	3.4	F/27	40	1000	
2	400 2.2 2	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	2870	84.6	EU - MEPSIE2	E2	0.86	4.4	F/57	40	1000	
3	400 2.2 4	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1450	86.4	EU - MEPSIE2	E2	0.79	4.7	F/38	40	1000	
4	400 3 4	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	85.7	EU - MEPSIE2	E2	0.79	6.4	F/50	40	1000	
5	400 1.5 4 IE3	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1445	85.3	EU - MEPSIE3	E3	0.75	3.4	F/33	40	1000	
6	400 2.2 2 IE3	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	2903	85.9	EU - MEPSIE3	E3	0.79	4.7	F/63	40	1000	
7	400 2.2 4 IE3	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1455	86.7	EU - MEPSIE3	E3	0.80	4.6	F/35	40	1000	
8	400 3 4 IE3	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	87.9	EU - MEPSIE3	E3	0.83	5.9	F/43	40	1000	
Data: Voltage 440 V, Frequency 60 Hz																
Data: Voltage 440 V, Frequency 50 Hz																
ABB																
Motorlist																
Remarks: Data based on catalogue values, binding data on request.																
Customer: ABB ref. no: Date: 11.4.2016																
Project name: Handled by: File name: moottorilista.doc.xls																
Customer ref: Revision: A																
Location: Page: 1																
LV Motors																

Liite 2. ABB moottorilista 2016 (2/3)



Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN[kW]	Poles	Speed/r/min	Eff[%]	EffSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
Data: Voltage 480 V, Frequency 60 Hz																
17	480 2.2 2	1	M3AA 90LB 2	B3(foot)	2.2	2	3494	84.6	NA	IE1	0.86	3.6	F/50	40	1000	
18	480 2.2 4	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1757	87.5	NA	IE2	0.75	4.0	F/32	40	1000	
19	480 3 4	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1756	87.5	NA	IE2	0.75	5.5	F/43	40	1000	
20	480 1.5 4 IE3	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1755	86.1	NA	IE2	0.69	3.0	F/29	40	1000	
21	480 2.2 2 IE3	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	3524	86.5	NA	IE3	0.73	4.2	F/53	40	1000	
22	480 2.2 4 IE3	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1763	86.7	NA	IE1	0.75	4.1	F/31	40	1000	
23	400 3 4 IE3	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1752	87.9	NA	IE2	0.79	5.2	F/36	40	1000	
Data: Voltage 690 V, Frequency 50 Hz																
Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN[kW]	Poles	Speed/r/min	Eff[%]	EffSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
24	690 1.5 4	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1435	84.2	EU - MEPS IE2	IE2	0.76	1.96	F/27	40	1000	
25	690 2.2 2	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	2870	84.6	EU - MEPS IE2	IE2	0.86	2.5	F/57	40	1000	
26	690 2.2 4	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1450	86.4	EU - MEPS IE2	IE2	0.79	2.7	F/38	40	1000	
27	690 3 4	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	85.7	EU - MEPS IE2	IE2	0.79	3.7	F/50	40	1000	
28	690 1.5 4 IE3	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1445	85.3	EU - MEPS IE3	IE3	0.75	1.95	F/33	40	1000	
29	690 2.2 2 IE3	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	2903	85.9	EU - MEPS IE3	IE3	0.79	2.7	F/63	40	1000	
30	690 2.2 4 IE3	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1455	86.7	EU - MEPS IE3	IE3	0.80	2.7	F/35	40	1000	
31	690 3 4 IE3	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	87.9	EU - MEPS IE3	IE3	0.83	3.4	F/43	40	1000	
Remarks: Data based on catalogue values - binding data on request.																
Customer: ABB ref. no: 11.4.2016																
Project name: Handled by: moottorilista.doc.xls																
Customer ref: File name:																
Location: Revision: A																
Page: 2																LV Motors

Liite 1. ABB moottorilista 2016 (3/3)



Motorist

Data: Voltage 690 V, Frequency 60 Hz

Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed[r/min]	Eff [%]	EFFst.	EFFclass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
32	690 60 1.5 4	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1721	84.1	NA	IE2	0.79	1.88	F/25	40	1000	
33	690 60 2.2 2	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	3446	85.0	NA	IE1	0.90	2.4	F/61	40	1000	
34	690 60 3 4	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1739	87.5	NA	IE2	0.84	3.4	F/48	40	1000	
35	690 60 1.5 4 IE3	1	M3AA 90LD 4	B5(flange)	1.50	4	1733	86.0	NA	IE2	0.82	1.78	F/31	40	1000	
36	690 60 2.2 2 IE3	1	M3AA 90LB 2	B5(flange)	2.2	2	3484	86.1	NA	IE2	0.90	2.4	F/56	40	1000	
37	690 60 2.2 4 IE3	1	M3AA 100LC 4	B5(flange)	2.2	4	1745	86.5	NA	IE1	0.85	2.5	F/33	40	1000	
38	690 3 4 IE3	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1734	86.9	NA	IE1	0.89	3.2	F/40	40	1000	

Remarks: Data based on catalogue values, binding data on request

Customer:	ABB ref. no:	11.4.2016
Project name:	Date:	11.4.2016
Customer ref:	Handled by:	moottorilista do2.xls
Location:	File name:	moottorilista do2.xls
	Revision:	A


Liite 2. ABB moottorilista 2020 (1/3)



Motorlist

Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed[r/min]	Eff [%]	EffSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
Data: Voltage 230 V, Frequency 50 Hz																
1	230 0.75 4 1	1	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0.75	4	1437	82.5	EU - MEPS IE3	E3	0.70	3.3	F / 40	40	1000	
2	230 1.1 2 1	1	M3AA 80C 2	B5(flange)	1.10	2	2871	82.7	EU - MEPS IE3	E3	0.80	4.2	F / 49	40	1000	
3	230 1.1 4 1	1	M3AA 90L B 4	B5(flange)	1.10	4	1437	84.1	EU - MEPS IE3	E3	0.78	4.3	F / 33	40	1000	
4	230 1.5 4 1	1	M3AA 90L D 4	B5(flange)	1.50	4	1445	85.3	EU - MEPS IE3	E3	0.75	5.8	F / 33	40	1000	
5	230 3 4 1	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	87.9	EU - MEPS IE3	E3	0.83	10.3	F / 43	40	1000	
Data: Voltage 400 V, Frequency 50 Hz																
6	400 0.75 4 1	1	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0.75	4	1437	82.5	EU - MEPS IE3	E3	0.70	1.90	F / 36	40	1000	
7	400 1.1 2 1	1	M3AA 80C 2	B5(flange)	1.10	2	2871	82.7	EU - MEPS IE3	E3	0.80	2.4	F / 49	40	1000	
8	400 1.1 4 1	1	M3AA 90L B 4	B5(flange)	1.10	4	1437	84.1	EU - MEPS IE3	E3	0.78	2.5	F / 33	40	1000	
9	400 1.5 4 1	1	M3AA 90L D 4	B5(flange)	1.50	4	1445	85.3	EU - MEPS IE3	E3	0.75	3.3	F / 33	40	1000	
10	400 3 4 1	1	M3AA 100LD 4	B5(flange)	3.0	4	1445	87.9	EU - MEPS IE3	E3	0.83	5.9	F / 43	40	1000	
Data: Voltage 690 V, Frequency 50 Hz																
11	690 0.75 4 1	1	M3AA 80ME 4	B5(flange)	0.75	4	1437	82.5	EU - MEPS IE3	E3	0.70	1.05	F / 36	40	1000	
12	690 1.1 2 1	1	M3AA 80C 2	B5(flange)	1.10	2	2871	82.7	EU - MEPS IE3	E3	0.80	1.40	F / 49	40	1000	
Remarks: Data based on catalogue values, binding data on request																
Customer: ABB ref. no: 23.4.2020																
Project name: Handled by: opinnäytelyö sandell.xism																
Customer ref: File name:																
Location: Revision: A																
																Page: 1
																LV Motors

Liite 2. ABB moottorilista 2020 (2/3)

Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed[r/min]	Eff [%]	EFFSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
																
Motorlist																
	13	690_1_1_4	1 M3AA90LB 4	B5(flange)	1,10	4	1437	84,1	EU - MEPS	IE3	0,78	1,42	F / 33	40	1000	
	14	690_1_5_4	1 M3AA90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1445	85,3	EU - MEPS	IE3	0,75	1,95	F / 33	40	1000	
	15	690_3_4	1 M3AA100LD 4	B5(flange)	3,0	4	1445	87,9	EU - MEPS	IE3	0,83	3,4	F / 43	40	1000	
Data: Voltage 440 V, Frequency 60 Hz																
	16	440_0_75_4	1 M3AA80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1740	85,5	NA	IE4	0,68	1,69	F / 32	40	1000	
	17	440_1_5_4	1 M3AA90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1746	86,6	NA	IE3	0,76	3,0	F / 29	40	1000	
	18	440_2_2_2	1 M3AA90LB 2	B5(flange)	2,2	2	3508	86,8	NA	IE3	0,73	4,5	F / 52	40	1000	
	19	440_3_4	1 M3AA100LF 4	B5(flange)	3,0	4	1755	89,5	NA	IE3	0,83	5,4	F / 40	40	1000	
Data: Voltage 480 V, Frequency 60 Hz																
	20	480_0_75_4	1 M3AA80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1752	85,3	NA	IE3	0,62	1,71	F / 31	40	1000	
	21	480_1_5_4	1 M3AA90LD 4	B5(flange)	1,50	4	1752	86,5	NA	IE3	0,72	2,9	F / 40	40	1000	
	22	480_2_2_2	1 M3AA90LB 2	B5(flange)	2,2	2	3524	86,5	NA	IE3	0,73	4,2	F / 53	40	1000	
	23	480_3_4	1 M3AA100LF 4	B5(flange)	3,0	4	1762	89,7	NA	IE3	0,79	5,1	F / 40	40	1000	
Remarks: Data based on catalogue values, binding data on request.																
Customer: ABB ref. no:																
Date: 23.4.2020																
Handled by:																
Project name: opinnäyteyö sandell.xism																
Customer ref. File name:																
Location: Revision: A																
																Page: 2
																LVMotors

Liite 2. ABB moottorilista 2020 (3/3)

Item	Reference	Qty	Type	Mounting	PN [kW]	Poles	Speed[r/min]	Eff [%]	EffSt.	EffClass	PF	Current	Insul./T-Rise	Ambient°C	Altitude[m]	Price Each
24	690_0,75_4	1	M3AA80ME 4	B5(flange)	0,75	4	1723	85,2	NA	IE3	0,73	1,01	F/40	40	1000	
25	690_1,5_4	1	M3AA100LE 4	B3(foot)	1,5	4	1767	89,3	NA	IE3	0,79	1,78	F/12	40	1000	
26	690_2,2_2	1	M3AA100L C 2	B3(foot)	2,2	2	3519	88,1	NA	IE3	0,89	2,3	F/24	40	1000	
27	690_3_2	1	M3AA112MB 4	B3(foot)	3	4	1759	90,8	NA	IE3	0,78	3,6	F/29	40	1000	
Remarks: Data based on catalogue values, binding data on request																
Customer: ABB ref. no: 23.4.2020																
Project name: Handled by: optinäytelyö sandell_Xsm																
Customer ref: File name:																
Location: Revision: A																
															Page:	3
															LVMotors	

Liite 3. ABB Process performance motors katalogi luokituslaitokset.

Code/Variants	Frame size												
	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280
067 External earthing bolt.	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Hazardous Environments													
334 Ex t, Dust group III B T125C Db, IP6X (non-conductive dust) acc. IEC/EN60079-31.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
335 Ex t, Dust group III B T125C Dc, IP5X (non-conductive dust) acc. IEC/EN60079-31.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
336 Ex t, Dust group III C T125 Db, IP6X (conductive dust) acc. IEC/EN60079-31.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
337 Ex t, Dust group III C T125 Dc, IP6X (conductive dust) acc. IEC/EN60079-31.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
340 Ex t, Dust group III B T125C Dc (non-conductive dust) with manufacturers declaration	-	•	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-
456 Ex ec IIC T3 Gc acc. IEC/EN 60079-7 with certificates.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
480 Ex nA II acc. to ATEX directive 2014/34/EU, temp. class T3.	-	•	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-
804 DIP/Ex tD, IEC 61241, T125 °C, IP55 (zone 22).	-	-	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-
805 DIP/Ex tD, IEC 61241, T125 °C, IP65 (zone 21).	-	-	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-
Heating elements													
450 Heating element, 100-120 V	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
451 Heating element, 200 - 240 V	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Insulation system													
014 Winding insulation class H.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
405 Special winding insulation for frequency converter supply.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
406 Winding insulation for supply > 690 <= 1000 volts	-	-	-	-	-	-	-	-	-	•	•	•	•
Marine													
024 Fulfilling Bureau Veritas (BV) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
025 Fulfilling Det Norske Veritas (DNV) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
026 Fulfilling Lloyds Register of Shipping (LR) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
027 Fulfilling American Bureau of Shipping (ABS) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
049 Fulfilling Germanischer Lloyd (GL) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
050 Fulfilling Registro Italiano Navale (RINA) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
051 Fulfilling Russian Maritime Register of Shipping (RS) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
096 Fulfilling Lloyds Register of Shipping (LR) requirements, without certificate (non-essential duty only)	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
186 Fulfilling Det Norske Veritas (DNV) requirements, without certificate	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
481 Fulfilling Nippon Kaiji Kyokai (NK) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
483 Fulfilling China Classification Societies (CCS) requirements (Beijing), with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
484 Fulfilling Korea Register of Shipping (KR) requirements, with certificate.	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
491 Fulfilling Nippon Kaiji Kyokai (NK) requirements, without certificate.	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
492 Fulfilling Registro Italiano Navale (RINA) requirements, without certificate.	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
493 Fulfilling China Classification Societies (CCS) requirements (Beijing), without certificate.	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
494 Fulfilling Korea Register of Shipping (KR) requirements, without certificate.	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
496 Fulfilling Bureau Veritas (BV) requirements, without certificate(non-essential duty only)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
497 Fulfilling Russian Maritime Register of Shipping (RS) requirements, without certificate.	-	-	-	-	-	-	-	•	•	•	•	•	•
675 Fulfilling American Bureau of Shipping (ABS) requirements, without certificate (non-essential duty only)	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
676 Fulfilling Germanischer Lloyd (GL) requirements, without certificate (non-essential duty only)	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Mounting arrangements													
007 IM 3001 flange mounted, IEC flange, from IM 1001 (B5 from B3).	-	-	-	-	-	-	-	•	•	•	•	•	•
008 IM 2101 foot/flange mounted, IEC flange, from IM 1001 (B34 from B3).	•	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-	-
009 IM 2001 foot/flange mounted, IEC flange, from IM 1001 (B35 from B3).	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
047 IM 3601 flange mounted, IEC flange, from IM 3001 (B14 from B5).	•	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-	-
048 IM 3001 flange mounted, IEC flange, from IM 3601 (B5 from B14).	-	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-	-
066 Modified for specified mounting position differing from IM B3 (1001), IM B5 (3001), B14 (3601), IM B35 (2001), IM B34 (2101)	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
080 (IM 3001) Flange mounted, DIN A-flange.	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-

○ = Included as standard | • = Available as option | - = Not applicable