



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Pekka Trygge

PUMPPUKÄYTÖN MODERNISOINTI

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Pekka Trygge
Opinnäytetyön nimi	PUMPPUKÄYTÖN MODERNISOINTI
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	104 + 1 liitettä
Ohjaaja	Kari Jokinen

Opinnäytetyön aiheena on Pilvilammen vesilaitoksen matalapainepumppujen suorakäynnisteisen pumppukäytön korvaaminen taajuusmuuttajakäytöllä. Opinnäytetyön teoreettinen osa liittyy matalapainepumpun suorakäynnistyksen aiheuttaman jännitteenaleneman vaikutuksien tarkasteluun, sekä uusien pumppukäyttöjen mitoittamiseen, kilpailuttamiseen ja tarjouksien vertaamiseen.

Jännitealeneman laskemista varten lähtötiedoiksi tarvitaan syöttöverkon oikosulkuteho vesilaitoksen liittymäpisteessä, muuntajien tehot, matalapainepumpun sähkömoottorin nimellisarvot sekä matalapainepumpun sähkömoottorin syöttökaapelin tyyppi ja poikkipinta. Näillä lähtötiedoilla on laskettu pumpun käynnistyksestä aiheutuva jännitteenalenema, vesilaitoksen pääkeskuksella sekä matalapainepumpun sähkömoottorin navoilla.

Työn aikana kävi ilmi, että myös pumppu ja sähkömoottori joudutaan uusimaan. Vanha pumppu on ollut käytössä 50 vuotta, ja on sen takia käyttöikänsä päässä. Lisäksi pumppu on mitoitettu liian suureksi, tämän takia pumppauksen hyötysuhde on huono. Uuden pumpun mitoittamista varten mitattiin matalapaineputken paine pumppauksen ollessa käynnissä kokonaisnostokorkeuden selvittämiseksi. Sähkömoottori joudutaan uusimaan koska sen staattorikämmien eristeet eivät todennäköisesti kestä taajuusmuuttajakäyttöä. Lisäksi sähkömoottori on mitoitettu liian suureksi, pumppauksen tehon tarve on noin puolet nykyisen moottorin nimellistehosta.

Taajuusmuuttajan mahdollistama nopeussäätö tuo etuja prosessin säädössä. Pumppauksen virtauksen säädöllä voidaan alavesisäiliön puhdasvesialtaan pinta pitää korkeammalle tasolla, tämä auttaa varautumisessa eri häiriötilanteisiin.

Työ sisältää myös pumppukäyttöjen muutoksesta aiheutuvien piirikaavioiden suunnittelun sekä lisäksi, käyttöönoton suunnittelun ja toteutuksen.

ABSTRACT

Author	Pekka Trygge
Title	Modernisation of a Pump Start
Year	2020
Language	Finnish
Pages	104 + 1 Appendix
Name of Supervisor	Kari Jokinen

The subject of this thesis is to replace the low-pressure pump DOL start with a frequency converter. The theoretical part of the thesis is related to the study of the effects of the voltage drop caused by the DOL start of a low-pressure pump, as well as to the design, competitive tendering and selection of new pump drives.

The initial data for calculating the voltage drop were the supply network short-circuit power at the water supply connection point, the transformer power, the ratings of the low-pressure pump electric motor, and the type and cross section of the low-pressure pump electric motor supply cable. This data was used to calculate the voltage drop at the start-up of the pump at the main switchboard of the waterworks and at the terminals of the low-pressure pump electric motor.

During the thesis it became clear that the pump and electric motor also need to be replaced. The old pump has been in use for 50 years and is therefore at the end of its service life. In addition, the pump is sized too large, which results a poor pumping efficiency. For the sizing of the new pump, the pressure of the low-pressure pipe was measured while pumping was in progress to determine the total lifting height. The electric motor has to be replaced because its stator winding insulators are unlikely to withstand AC drive operation. In addition, the electric motor is sized too large, the pumping power requirement being about a half of the current motor power rating.

The speed control enabled by the frequency converter offers benefits in process control. By adjusting the flow rate of the pump, the surface of the freshwater tank of the underwater tank can be maintained at a higher level, which helps to prepare for various disturbances.

The thesis also includes the design of master and circuit diagrams resulting from the change of pump drives, as well as the design and implementation of commissioning.

Keywords Frequency converter and centrifugal pump

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

JOHDANTO	9
1 VESILAITOS	10
2 MATALAPAIN PUMPPAUS, VANHA JÄRJESTELMÄ.....	13
2.1 Toimintaperiaate	13
2.2 Oikosulkumoottori	14
2.3 Kytkinvaroke ja sulake	17
2.4 Kontaktori	21
2.4.1 Kontaktorien AC-käyttöluokat.....	24
2.5 Lämpörele	25
2.6 Matalapainepumppu.....	26
2.7 Laitekohtainen kompensointikondensaattori	33
2.8 Estokelaparisto.....	34
3 MATALAPAINEPUMPPAUS TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖLLÄ.....	37
3.1 Toimintaperiaate	37
3.2 Taajuusmuuttaja.....	37
3.3 Taajuusmuuttajan ohjaus ja liittäminen logiikkaan	40
3.3.1 Logiikka	40
3.3.2 Taajuusmuuttajan DI-, DO- ja mA-viesti	40
3.4 Matalapaineputken virtausmittaus	42
3.4.1 Virtausmittauksen mA-signaali.....	43
3.5 PID-säätö.....	45
3.6 Turvakytkin.....	48
3.7 Kaapelin mitoitus ja vikasuojaus	48

4	EMC-SUOJAUS JA HÄIRIÖT.....	51
4.1	Laakerivirrat.....	51
4.2	Jännitepulssin vaikutus moottorin käännessä.....	52
4.3	EMC-suojauksen säteilevät häiriöt.....	53
5	PÄÄ- JA PIIRIKAAVIO UUSI JÄRJESTELMÄ	57
6	LASKELMAT	60
6.1	Pumppaukseen kulutettu energia	60
6.2	Sähkömoottorin ja keskipakopumpun hyötysuhde	60
6.3	Suorakäynnistyksen aiheuttama jännitteen alenema.....	62
6.3.1	Tarkasteltavan verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä.....	63
6.3.2	Moottorin käynnistyksen aiheuttama jännitteenalenema.....	64
7	KOMPONENTTIEN VALINNAT JA KUSTANNUKSET.....	68
7.1	Sähkömoottori ja pumppu.....	68
7.2	Uuden käytön mitoitus.....	68
7.3	Tarjouspyynnöt pumppukäytöistä.....	69
7.3.1	Jukkola Systems	69
7.3.2	Grundfors	70
7.3.3	Sulzerille	73
7.4	Tarjousten yhteenveto.....	75
8	INVESTOINNIN KOKONAISKUSTANNUKSET	76
9	YHTEENVETO	77
	LÄHTEET.....	79

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kyrönjoen pumppaamo, Kalliolammen esisaostuslaitos ja Pilvilampi ..	10
Kuva 2. Vesilaitoksen prosessikaavio	12
Kuva 3. PVP62-matalapainepumppu ja loistehon kompensointikondensaattori .	13
Kuva 4. PVP62-moottorilähdönpääkontaktori, kahvavaroke ja lämpörele.....	14
Kuva 5. oikosulkumoottorin rakenne	14
Kuva 6. staattorikäänin magneettikentät	15
Kuva 7. häkkikäänitys	15
Kuva 8. oikosulkumoottori.....	16
Kuva 9. PVP61-62-moottorin lajimerkki	17
Kuva 10. sulakkeen i2t	18
Kuva 11. sulakkeenvirran rajoitus.....	19
Kuva 12. kahvasulakkeen toiminta oikosulussa.....	19
Kuva 13. OFAA kahvasulakkeiden oikosulkuvirran virranrajoituskyky	20
Kuva 14. OFAA-sulakkeiden toiminta-ajat.....	21
Kuva 15. PVP61-pääkontaktori.....	22
Kuva 16. kontaktorin kosketin	23
Kuva 17. kontaktorin elinikäkäyrä	24
Kuva 18. PATAM 2C 125-lämpörele	25
Kuva 19. yksivaiheinen keskipakopumppu, kaksinkertaisella imulla.....	26
Kuva 20. juoksupyörätyyppejä.....	27
Kuva 21. Karhula-pumppu Z-R25 R-1.....	28
Kuva 22. Karhula-pumppu Z-R25 R-1 ominaiskäyrä	29
Kuva 23. pumpun nimellinen kierrosnopeus.....	29
Kuva 24. Q/H-koordinaatisto	31
Kuva 25. kuristussäätö Q/H-koordinaatistossa	32
Kuva 26. pyörimisnopeussäätö Q/H-koordinaatistossa.....	32
Kuva 27. virta ja jännite pääkeskukselta mitattuna	34
Kuva 28. taajuusmuuttajan rakenne	38
Kuva 29. PWM-pulssimodulointi.....	39
Kuva 30. välipiirin jännite.....	39
Kuva 31. Nokeval 2012-paneelimittari prosessiviesteille.....	41

Kuva 32. magneettinen virtausmittari.....	42
Kuva 33. magneettinen virtausmittari ja sen toimintaperiaate	43
Kuva 34. Clamp-on virtausmittari.....	43
Kuva 35. WAGO 857-423.....	44
Kuva 36. WAGO 857-423 kytkentä.....	44
Kuva 37. PID-säätimen lohkokaavio.....	45
Kuva 38. Vacon 100-taajuusmuuttajan PID-säätösovelluksen oletus liitynnät....	47
Kuva 39. kiertävät- ja laakerien kautta maahan sulkeutuvat laakerivirrat	52
Kuva 40. jännitepulssin kulkuaalto	53
Kuva 41. ABB ACS880-0- taajuusmuuttajan tehokaapeleiden kytkentä ohje.....	54
Kuva 42. taajuusmuuttajan tehokaapelionnissa käytettävät kaapelit.	54
Kuva 43. EMCMK-kaapeli	Kuva 44. MCMK-kaapeli.....
Kuva 45. EMC-holkki	55
Kuva 46. moottorin EMC-suojaus.....	56
Kuva 47. PVP61 vanha piirikaavio	58
Kuva 48. vanha logiikkakuva	59
Kuva 49. IE-hyötysuhdeluokat 4-napaiset moottorit 1.1-90 kW	61
Kuva 50. sähkömoottorin elinkaarikustannukset	61
Kuva 51. verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä	63
Kuva 52. PVP61	69
Kuva 53. KSB-pumppu ja moottori	70
Kuva 54. Grundfors-NK 250-350/266 A1F1AE-SBAQE.....	70
Kuva 55. Grundfors pumppukäyrä.....	72
Kuva 56. Sulzer APP43-300-pumppu	73
Kuva 57. APP43-300 C-pumppukäyrä.....	74
Kuva 58. Sulzer-taajuusmuuttajakäyrä.....	74

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Tarjouksien vertailu.....	75
--	----

LIITELUETTELO

Liite 1. Matalapainepumppujen sähköpiirustukset.....	81
---	----

JOHDANTO

Pilvilammen vesilaitoksella on kaksi kappaletta matalapainepumppuja. Pumput ovat Karhulan vuonna 1963 valmistamia kaksinkertaisella imulla varustettuja yksivaihekeskipakopumppuja. Opinnäytetyön tarkoitus on suunnitella ja mitoittaa taajuusmuuttajakäyttö korvaamaan pumppujen suorakäynnistys. Pumppuja pyörittää ABB:n valmistama 55 kW:in tehoinen oikosulkumoottori, sen nimellispyörimisnopeus on 985 rpm ja nimellisvirta 110 A. Matalapainepumppuja käytetään alavesisäiliön täyttämiseen kaksi kertaa vuorokauden aikana. Yksi pumppausjakso kestää noin 6 h ja vettä siirretään yhden pumppausjakson aikana noin 4200 m³ eli noin 4.2 miljoonaa litraa. Veden virtausnopeus putkessa on noin 700 m³/h ja käytötunteja yhdelle pumpulle tulee vuodessa noin 4 344 h.

Työn tarkoitus on tutkia vanhaa järjestelmää ja verrata sitä uuteen. Uuden järjestelmän vaikutukset energian kulutukseen jäävät pieniksi, koska suoralla käytöllä vedenvirtauksen säätö on pieni ja vedenvirtaus on venttiilillä kuristettu 700 m³/h. Pumpun maksimivirtaus ilman kuristusta on 750 m³/h moottorin nimellispyörimisnopeudella. Taajuusmuuttajan mahdollistama pyörimisnopeuden säätö antaa muita etuja, mitä ei suoralla käytöllä saavuteta.

Vesilaitoksen ja alavesisäiliön pinnansäätö helpottuu taajuusmuuttaja käytöllä. Pinnansäädön avulla voidaan vesilaitoksen ja alavesisäiliön puhtasvesialtaissa pitää vesisäiliöiden pinta korkeammalla tasolla. Tämä auttaa varautumista häiriötilanteisiin, esim. epänormaalin suuri vedenkulutus, runkoputken rikkoutuminen, tulipalo kaupungissa tai mahdollinen häiriö vesilaitoksella. Normaalikulutuksen aikana päivällä vesilaitokselta pumpataan vettä korkeapainepumpulla kuluttajille noin 350 m³/h ja alavesisäiliöllä sijaitsevalla korkeapainepumpulla saman verran. Yöllä alavesisäiliön korkeapainepumppu sammutetaan ja kaikki suoraan kulutukseen menevä vesi lähtee vesilaitokselta.

Työn tavoitteina on ensinnäkin tutkia suorakäynnistysten verkkoon aiheuttamaa jännitteen alenemaa sekä prosessin säädön kehittämistä. Samalla tutkitaan myös alavesisäiliön ja vesilaitoksen puhtasvesialtaiden pinnansäätöä.

1 VESILAITOS

Vaasan vesi on perustettu 1915, jolloin vettä pumpattiin ensimmäisen kerran vesitorniin ja kulutukseen torilla olleen palopostin kautta. Vaasan Vesi tuottaa talousveden noin 70000 asiakkaalle ja ottaa Vaasan lisäksi jätevesiä vastaan Mustasaa-resta ja Maalahdesta. Vaasan vedellä on neljä toimipaikkaa; konttori, Pilvilammen vesilaitos puhtaan veden tuotanto, verkosto puhtasvesi ja jätevesi putket ja Pättin puhdistamo, jossa on jäteveden puhdistus sekä jätevesipumppaamot.

Pilvilammen vesilaitos oli alun perin pohjavesilaitos, mutta pohjaveden huonon laadun vuoksi, vedenotto siirrettiin Kyrönjokeen ja vesilaitos muutettiin pohjavesilaitoksesta pintavesilaitokseksi.

Raakavesi pumpataan Kyrönjoesta Båskaksen pumppaamolta Kalliolammen esikäsittelylaitoksen kautta pilvilampeen (**Kuva 1.**). Pilvilammen suuri tilavuus vähentää vesilaitoksen riippuvuutta Kyrönjoesta. Kevättulvien aikaan veden huonon laadun takia raakaveden pumppaus pysäytetään ja käytetään Pilvilammen varastoitua vettä. Veden viipymä Pilvilammessa on noin 2 kuukautta.



Kuva 1. Kyrönjoen pumppaamo, Kalliolammen esisaostuslaitos ja Pilvilampi

Pilvilammen vesilaitos on pintavesilaitos, tämän takia veden puhdistusprosessi on vaativa. Prosessi on kuvattu alla olevassa kuvassa (**Kuva 2.**).

Pikahämmennys: veteen sekoitetaan saostuskemikaali ja säädetään pH kalkilla noin 5:een flotaatiota varten.

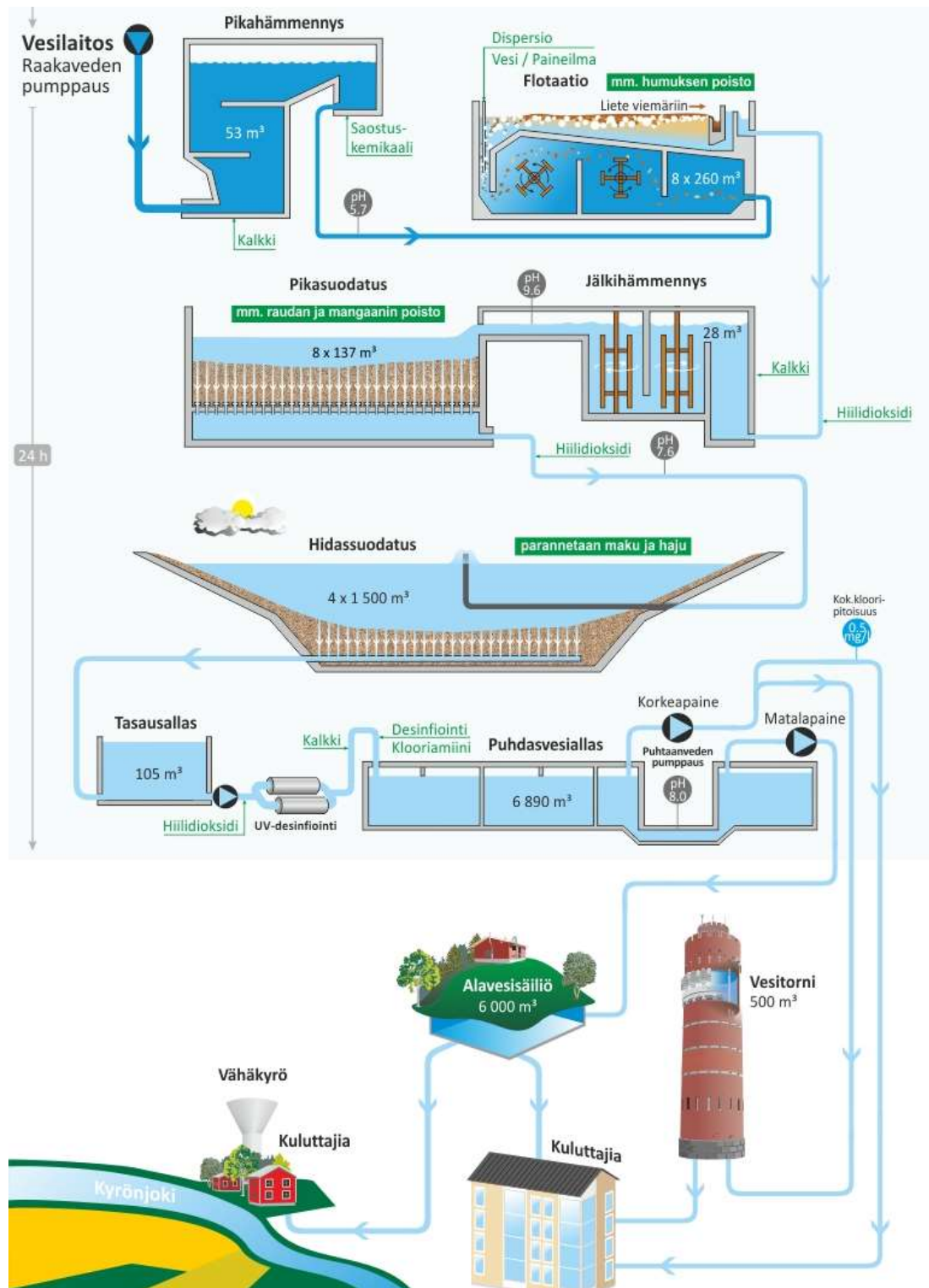
Flotaatio: saostuskemikaalin sitoma humus nostetaan dispersioveden avulla pintaan, josta se kaavitaan pois.

Pikasuodatusta: Flotaation jälkeen pH nostetaan varten noin 9.5:een. Korkea pH tarvitaan, että rauta ja mangaani saadaan saostumaan. Pikasuodatuksessa vesi kulkee hiekkapatjan läpi, johon rauta ja mangaani saostuu. Suodattimet vasta huuhdellaan paineilmalla ja vedellä noin kolmen vuorokauden välein.

Hidassuodatusta: Pikasuodatuksen jälkeen veden pH lasketaan hiilidioksidilla noin 7.5:een. Hidassuodattimet ovat myös hiekkasuodattimia, mutta niiden pinta-ala on noin 3000 m² veden viipymä suodattimissa on pidempi. Hidassuodatus parantaa biologisesti veden makua ja hajua.

Desinfiointi: Hidassuodatuksen jälkeen vesi desinfioidaan UV-reaktorissa, joka tappaa 99 %:ia viruksista ja bakteereista, mutta koska UV ei anna pitkäaikaista suojaa, veteen syötetään desinfiointikemikaaleja, natriumhypokloriittia ja ammoniumsulfaattia. Ammoniumsulfaatti ja natriumhypokloriitti reagoivat keskenään putkessa ja muodostavat kloramiinin, joka kestää verkostossa viimeiselle kuluttajalle asti. Hiilidioksidia lisätään alkaloinnin vuoksi, alkalointi estää verkoston putkiston syöpymisen.

Vesilaitoksen prosessissa veden pumppaukseen hyödynnetään suurelta osin painovoimaa. Laitokselle tuleva pilvilammen raakavesi pumpataan pikahämmentimen alaosaan. Vesi virtaa pikahämmentimen yläosaan, josta se lähtee valumaan eri prosessi osien läpi aina hidassuodattimien jälkeen olevaan tasausaltaaseen. Tasausaltaassa on seuraava pumppaus, josta puhdasvesi pumput siirtävät veden puhdasvesi altaaseen. Veden virtausta prosessin läpi säädetään kahdessa eri kohdassa pneumaattisilla säätöventtiileillä. Venttiilejä ohjataan PID säätimellä, joka venttiiliä ohjaamalla pyrkii pitämään asetettua pinnankorkeutta. Säädetävät pinnat ovat pikahämmennin- sekä flotaation lähtökanavan pinnan korkeus.

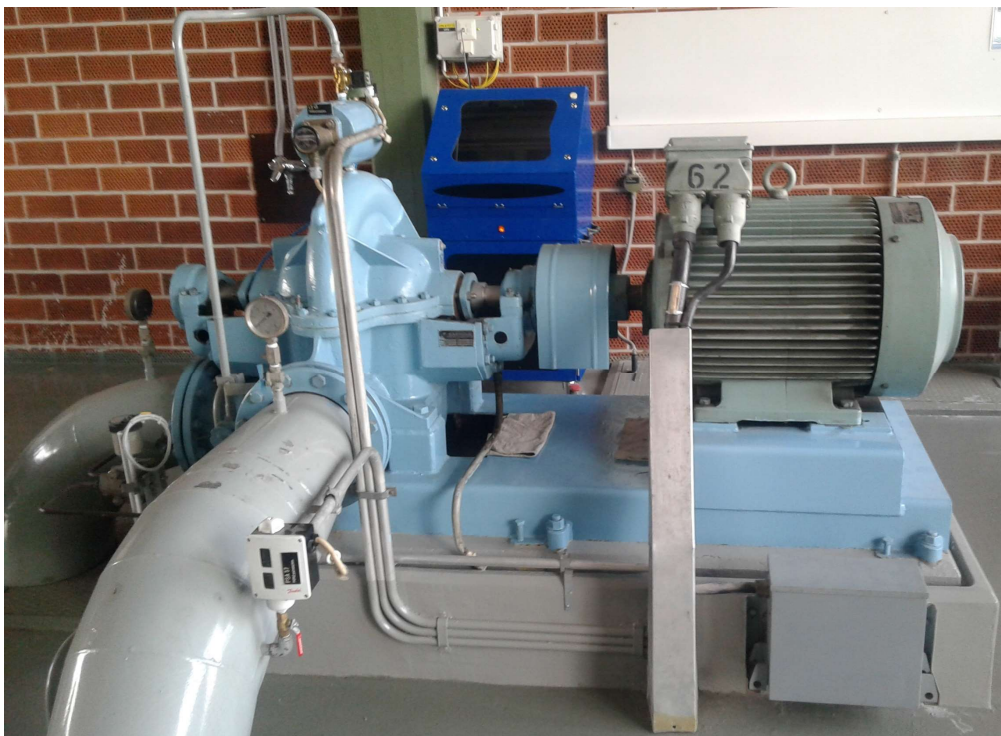


Kuva 2. Vesilaitoksen prosessikaavio

2 MATALAPAINEN PUMPPAUS, VANHA JÄRJESTELMÄ

2.1 Toimintaperiaate

Pumpun käynnistys on kaksivaiheinen; ensiksi vesi imetään pumpun pesään alipaineen avulla, pesän täytyttyä pumpun tyhjiösäiliössä oleva pintakytkin antaa pumpulle käynti luvan. Pumpun suoraikäynnistys aiheuttaa verkkoon jännitteen aleneman, minkä voi havainnoida laitoksen valaisimista, jotka välähtävät joka käynnistyksessä.



Kuva 3. PVP62-matalapainepumppu ja loistehon kompensointikondensaattori

Vanha pumppukäyttö on toteutettu suoralla käynnistyksellä. Lisäksi sähkömoottorin viereen on asennettu kompensointikondensaattori suoraan moottorin napoihin kompensoimaan moottorin sähköverkosta ottama loisteho (**Kuva 3.**).



Kuva 4. PVP62-moottorilähdönpääkontaktori, kahvavaroke ja lämpörele

Pääkeskuksessa oleva moottorilähtö, joka sisältää kytkinvarokkeen, kontaktorin ja lämpöreleen (**Kuva 4.**).

2.2 Oikosulkumoottori

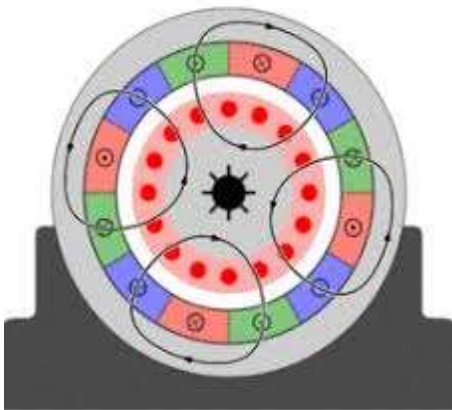
Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi suosittu moottori teollisuuskäytöissä (**Kuva 5.**). Oikosulkumoottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa sähköteho viedään koneen pyörivään osaan roottoriin, sähkömagneettisen induktion avulla. Oikosulkumoottorista puuttuu galvaaninen yhteys pyörivän roottorin ja sähköverkkoon kytketyn staattorin kesken. Energian siirto roottoriin tapahtuu magneettikentän välityksellä ilman galvaanista yhteyttä, tästä tulee nimitys induktiomootori. Oikosulkumoottorin pääosat ovat runko, akseli, tuuletin, staattorikäämi sekä roottorikäämitys. /21/



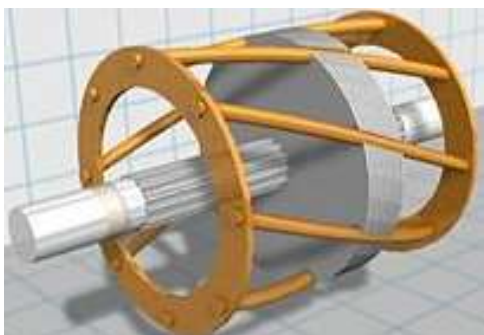
Kuva 5. oikosulkumoottorin rakenne

Staattorikäämi koostuu kolmesta eri vaiheesta; U, V ja W, jotka on käämitty staattorin uriin 120° kulmaan toisiinsa nähden. Yhden vaiheen käämin muodostaa yksi tai useampi vyyhti, staattorikäämityksessä voidaan käämiä, kaikille vaiheelle useampia käämityksiä, jolla voidaan muuttaa moottorin napaparien lukumäärää. Napaparien lukumäärää määrää moottorin synkroninopeuden eli staattorissa verkko-
taajuudella pyörivän magneettikentän nopeuden. /1, 21/

Oikosulkumoottorin roottorikäämi muodostuu sauvoista (**Kuva 7.**), jotka on oikosuljettu oikosulkurenkailla molemmista roottorin molemmista päistä. Roottorin pyöriessä hitaammin kuin staattorikäämin pyörivä magneettikenttä (**Kuva 6.**), leikkaa staattorin magneettikentän vuoviivat roottorikäämin hitaammin pyöriviä sauvoja, näin indusoituu roottorisauvoihin virta. Samalla virallinen sauva saa aikaan voiman, ja moottorin akselille syntyy vääntömomentti. /21/



Kuva 6. staattorikäämin magneettikentät



Kuva 7. häkkikäämitys

Jos roottori pyörii tahdissa staattorin kanssa, ei staattorin vuoviivat leikkaa roottorikäämin sauvoja, tällöin magneettinen induktio häviää. Samalla menetetään root-

torin magneettikenttä ja moottorin vääntömomentti on nolla. Moottorin tuottama vääntömomentti on staattorin ja roottorivuon ristitulo. /1, 21/

Epätahtikone pyörii aina tietyllä jättämällä. Kuormituksen kasvaessa roottorin jättämä kasvaa suhteessa staattoriin. Jättämä s määritetään magneettikentän kierto nopeuden ja roottorin todellisen kiertonopeuden suhteellisella arvolla, joka on laskettavissa yhtälöiden (1) ja (2) avulla. Matalapainepumpun oikosulkumoottori nimellinen jättämä on 1,5 % (2) sekä synkroninopeus 1000 rpm (1). /21/

$$\begin{aligned} f &= 50\text{Hz} & f &= \text{verkontaajuus} \\ p &= 3 & p &= \text{oikosulkumoottorin napapariluku} \\ n_s &= \text{moottorin synkroninopeus} \end{aligned}$$

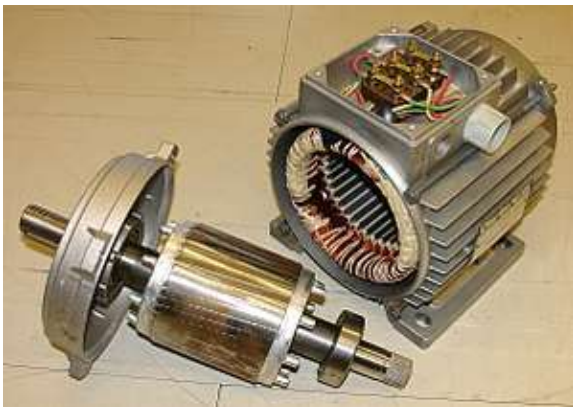
$$n_s = \frac{f \cdot 60s}{p} = 1000 \text{ rpm} \quad (1)$$

n_n = nimellinen jättämä

$$n_n = 985 \text{ rpm}$$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = 1.50 \% \quad (2)$$

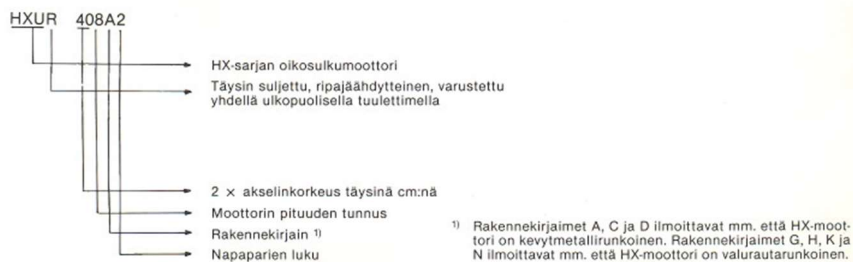
Staattorissa olevien kolmen vaiheen kääminpäät ovat johdotettu kytkentäkoteloon Tämä mahdollistaa moottorin kytkennän muutoksen tähti- ja kolmiokytkennän välillä (**Kuva 8.**).



Kuva 8. oikosulkumoottori

Lajimerkki

Moottorin lajimerkki on seuraavan esimerkin mukainen:



Kuva 9. PVP61-62-moottorin lajimerkki

Moottori: HXUR 562G3

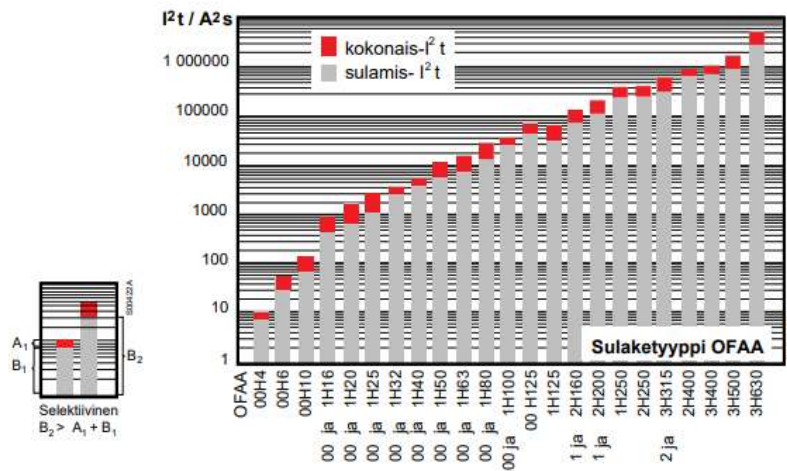
Kuvassa (**Kuva 9.**) matalapaine pumpun moottorin lajimerkki.

- HXU: HX-sarjan oikosulkumoottori
- R: täysin suljettu, ripajähdytteinen, yksi ulkopuolinen tuuletin
- 56: 2x akselikorkeus cm:nä, ei IEC-standardin mukainen korkeus.
- 2: moottorin pituuden tunnus
- G: rakennekirjain valurautainen runko
- 3: moottorin napaparien luku, synkroninopeus 1000 rpm

2.3 Kytkinvaroke ja sulake

Kytkinvaroke on laite, jolla erotetaan esimerkiksi moottorin pääpiiri verkosta. Kytkinvaroke on varokealustan ja kuormakytkimen yhdistelmä. Käytetään moottorikäynnistimen oikosulkusuojaukseen ja alakeskuslähtöjen pääkojeena. Kytkinvarokepohjaan asennetaan kahvasulakkeet suojaamaan kaapelia ylikuormitukselta, oikosulun aiheuttamalta lämpenemältä, sekä rajoittamaan oikosulussa aiheutuvan kosketusjännitteen nousu. /2, 3/

Sulakkeen koon valintaan vaikuttaa moottorin koko, nimellisvirta ja sen käynnistyksen aiheuttama käynnistysvirta, joka on moottori tyypistä riippuen noin 6-9 kertaa suurempi kuin moottorin nimellisvirta. Sulakkeen on kestettävä tämä käynnistysvirtapiikki sulamatta. I^2t arvo kuvaa kuinka suuren energian sulake kestää sulamatta (**Kuva 10.**). Moottorilähdön sulake joudutaan usein mitoittamaan suhteellisen suureksi verrattuna moottorin syöttökaapeliin, joten sulake toimii moottorilähdössä ainoastaan oikosulkusuojana ja lämpörele suojaa ylikuormitukselta.



Kuva 10. sulakkeen i^2t

Oikosulkuvirran rajoituskyky pitää ottaa huomioon laitteiden valinnoissa. Oikosulkuvirran tehollisarvo pääkeskuksen kiskolla on noin 20.4 kA yhtälö (26) ja oikosulkuvirran huippuarvo 40.4 kA yhtälö (3). /3/

$$i_s = \text{Oikosulkuvirran huippuarvo kA}$$

$$I_{k3m} = \text{Oikosulkuvirran tehollisarvo 20.4 kA, yhtälö (26) sivu (66).}$$

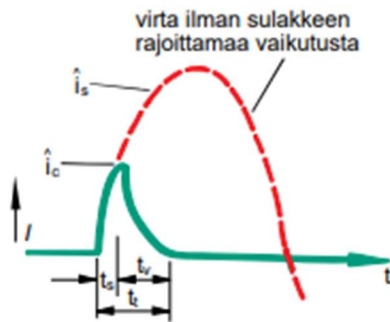
$$i_s := 1.4 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3m} = 40.4 \text{ kA} \quad (3)$$

$$t_s = \text{sulakeliuskan sulamisaika}$$

$$t_v = \text{valokaariaika}$$

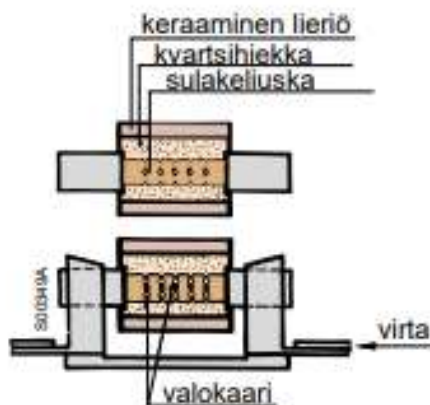
$$t_t = \text{kokonaistoiminta-aika}$$

$$i_c = \text{sulakkeen rajoittaman virran huippuarvo 22 kA}$$



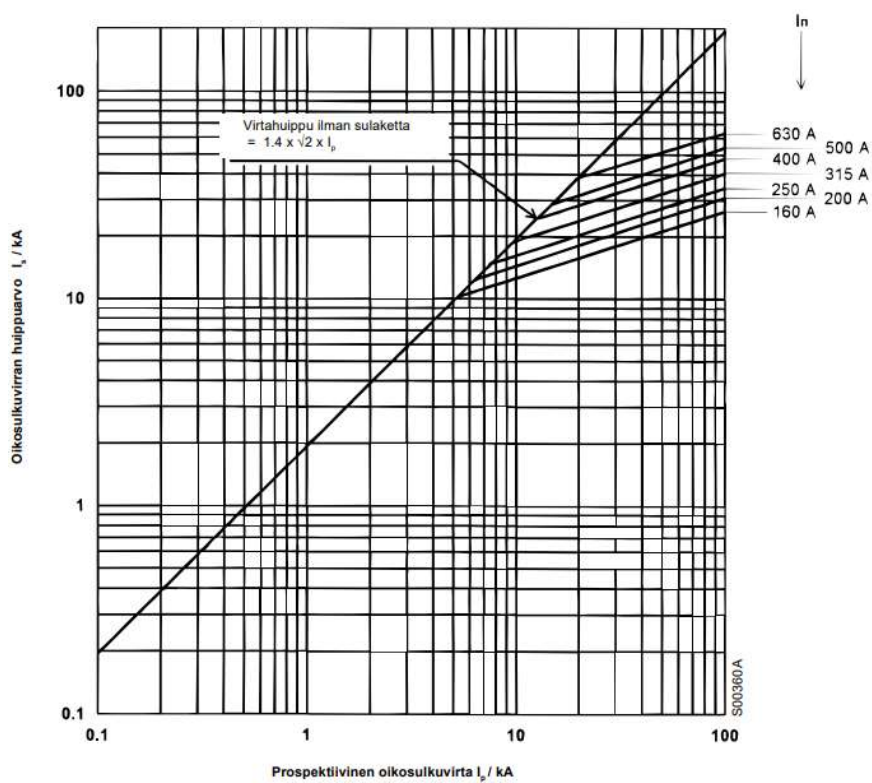
Kuva 11. sulakkeenvirran rajoitus

Matalapainepumppujen lähtöjen kytkinvarokkeisiin on asennettu 500 A gG-sulakkeet. 500 A gG-sulake rajoittaa oikosulkuvirran huippuarvon noin 22 kA:iin. Laitteiden on kestävä oikosulkuvirran aiheuttamat termiset sekä dynaamiset vaikutukset. Kuvassa (**Kuva 11.**) kuvattu sulakkeen virtaa rajoittava vaikutus viikatilanteessa.



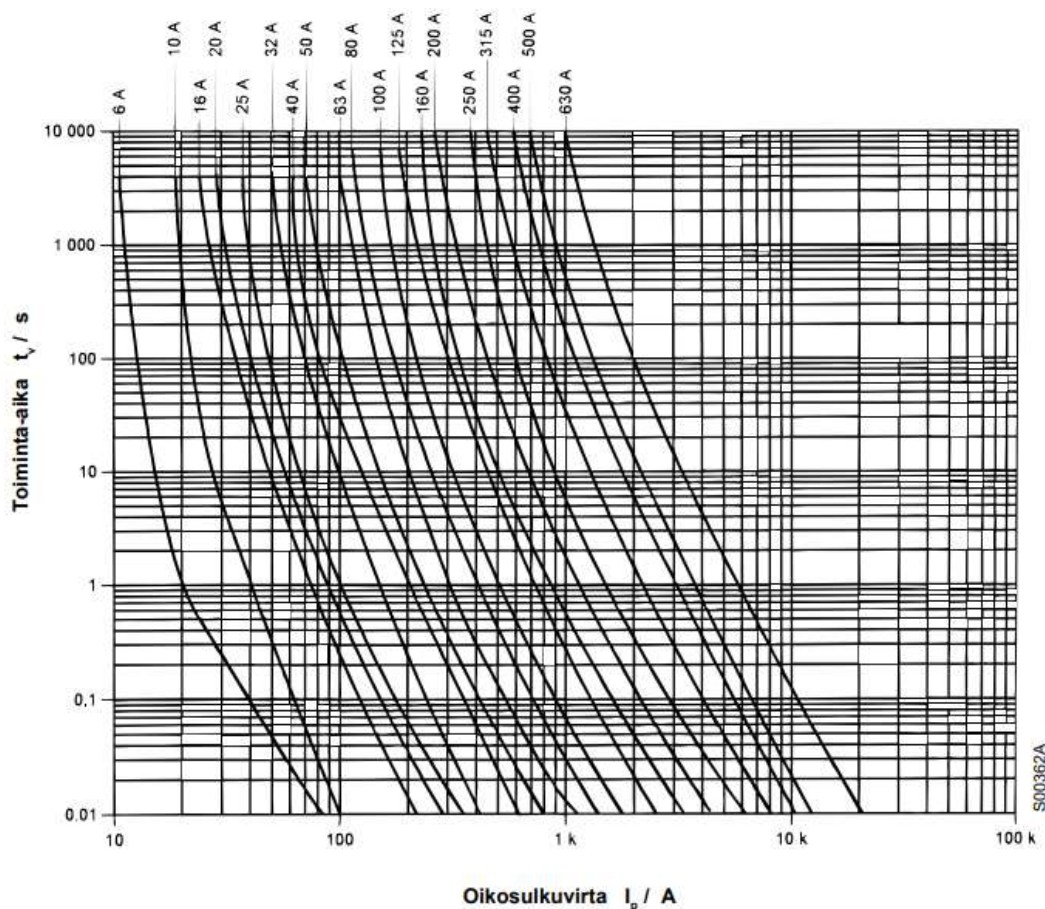
Kuva 12. kahvasulakkeen toiminta oikosulussa

Sulakkeiden oikosulkuvirran rajoituskyky perustuu sulakkeen sisällä syntyvään valokaariresistanssin nopeaan kasvuun (**Kuva 12.**). Sulakkeiden erinomaisen virranrajoituskyvyn ansiosta piirin muita kojeita ei tarvitse ylimitoitaa vaan normaali mitoituksella saadaan kontaktorin ja lämpöreleen oikosulkulujuus riittäväksi. /3/



Kuva 13. OFAA kahvasulakkeiden oikosulkuvirran virranrajoituskyky

Kuvassa (**Kuva 13.**) on esitetty kahvasulakkeiden 160-630 A virran rajoituskyky.



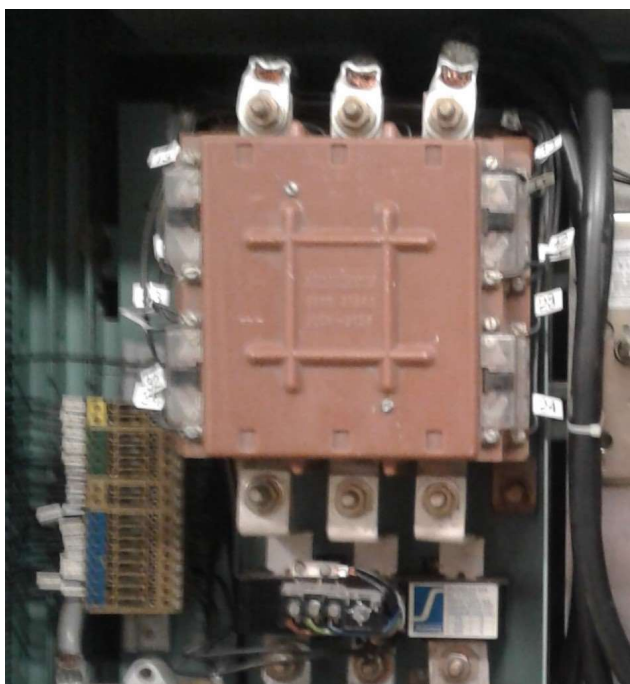
Kuva 14. OFAA-sulakkeiden toiminta-ajat

Kuvassa (**Kuva 14.**) OFAA-sulakkeiden toiminta-ajat, vikavirran ollessa 20.4 kA 500 A gG-sulake toimii alle 0.01 sekunnissa, tällöin tarkastellaan sulakkeen sytäsvirranrajoituskykyä kuva 13. /3/

2.4 Kontaktori

Kontaktorit ovat sähkömekaanisia kytkimiä, joita käytetään yleisesti moottorilähdoissä. Kontaktorin yksinkertaisen rakenteen takia ne ovat edullisia verrattuna muihin moottorikäynnistimiin, esim. pehmokäynnistin tai taajuusmuuttaja. Muita etuja kontaktorin käyttöön on sen aiheuttamat pienet tehohäviöt. Huonoja puolia on mekaaninen kuluminen, mutta myös kontaktorin koskettimet kuluvat pääpiirin kuormitus virtojen katkaisusta. Kuorman kytkentä- ja erotustilanteessa syttyy valokaari koskettimien väliin, valokaari kuluttaa koskettimia ja voi pahimmassa tapauksessa hitsata koskettimet yhteen. Vaikeita kytkentäkohteita kontaktorille ovat oikosulkumoottorit niiden suuren käynnistysvirtapiikin takia. Kontaktorin ei tar-

vitse katkaista oikosulkuvirtoja. Kontaktorit kestävät mekaanisesti päälle/poiskytkentöjä paljon, mutta kontaktorin käyttöikä rajoittaa sen koskettimien kuluminen sähköisesti. Valokaari vaurioittaa koskettimia jokaisessa kuorman kytkentätilanteessa. Tämä ei ole valokaaren ainoa haitta. Valokaaren vaurioittaman koskettimen kosketuspinta pienenee, mikä aiheuttaa koskettimen ylimenovastuksen suurentumisen, tämä aiheuttaa kontaktipinnan kuumentumista. Oikosulkumoottorin induktanssi vaikeuttaa valokaaren sammumista. /2, 20/



Kuva 15. PVP61-pääkontaktori

Matalapainepumppujen moottorin pääkontaktori (**Kuva 15.**) on Strömbergin valmistama OKYM 315A1 tyyppinen kontaktori. Kontaktorin terminen nimellisvirta on 315 A, jonka kontaktori kestää jatkuvasti kuormitettuna. Kontaktorin on kestettävä moottorin käynnistysvirran tehollisarvo, mikä on noin 660 A yhtälö (4). Moottorin suorakäynnistys aiheuttaa myös nopeasti vaimenevan sysäysvirran. Sysäysvirta voi olla $\sqrt{2} * 2$ suurempi kuin käynnistysvirran tehollisarvo, sysäysvirran suuruuteen vaikuttaa myös kytkentä hetki, sysäysvirta yhtälö (7). Käynnistysvirran aiheuttama hetkellinen huippu vaimenee nopeasti ensimmäisen jakson aikana.

Matalapaineumpun käynnistys- ja sysäysvirta.

$$I_{start} = \frac{I_s}{I_n} = 6, \text{ moottoriluettelon arvo}$$

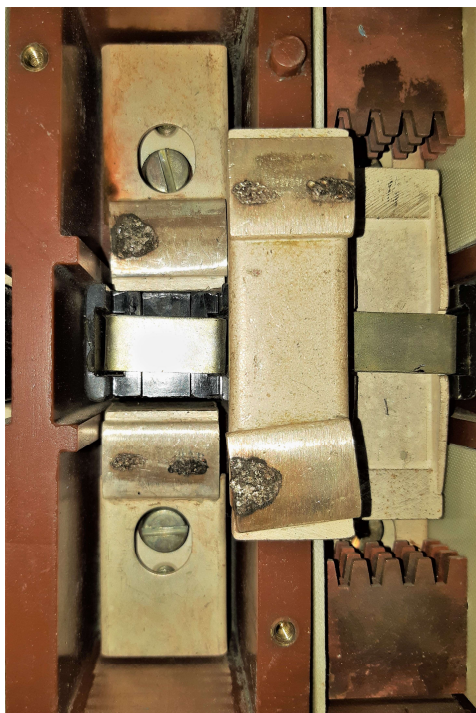
$$I_{Start} := I_{start} \cdot I_n = 660 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_n = 110 \text{ A}$$

$$I_{sy} = \sqrt{2} * 2 \quad (5)$$

$$I_{start} = I_{start} \cdot I_n = 660 \text{ A} \quad (6)$$

$$I_s = I_n \cdot I_{start} \cdot I_{sys} = 1867 \text{ A} \quad (7)$$



Kuva 16. kontaktorin kosketin

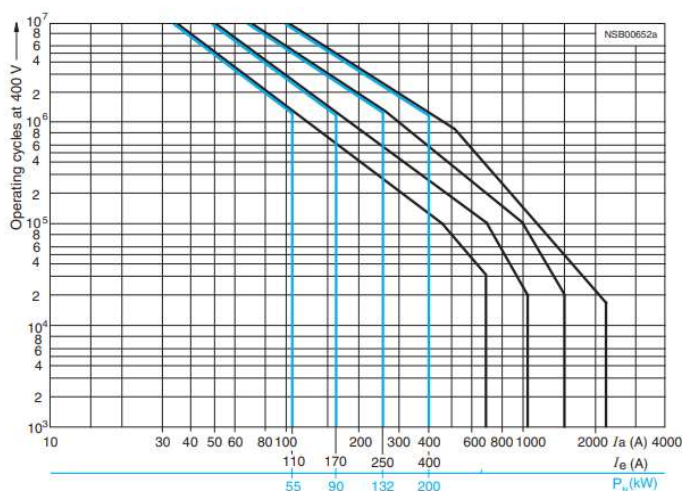
Kuvassa (**Kuva 16.**) näkyy PVP61 valokaaren vaurioittama kontaktorin kosketin. Valokaaren vaurioittama koskettimessa kontaktipinnassa näkyy valokaaren aiheuttamia vaurioita. Kuvassa näkyy myös valokaaren sammutuskammiot koskettimien molemmilla puolilla. Sammutuskammion tarkoitus on valokaaren jäähdytys, mikä nopeuttaa valokaaren sammutusta.

2.4.1 Kontaktorien AC-käyttöluokat

Kontaktoreilla IEC 947-4 standardin mukaiset AC-käyttöluokat. Standardin käyttöluokissa määritellään virta-arvot, jotka kontaktorin on kyettävä kytkemään ja katkaisemaan. Nämä virta-arvot ovat riippuvaisia, kytkettävästä kuormasta induktiivinen, tai resistiivinen sekä kytkentähetken olosuhteista. Kytkeä- tai katkaisuhetkellä voi olla moottorin normaali käynnistys, moottorin jumitila, tai suunnanvaihto, mikä vaikuttaa katkaistavan virran suuruuteen. Kontaktorin maksimikatkaisukyvyyn nimellisarvot on ilmoitettu tehokertoimella $\cos\varphi = 0.35$, kun $I_n > 100 \text{ A}$. /12/

Kontaktorien käyttöluokat:

- AC-1 käyttöluokka käsittää kuormat, joiden tehokerroin on vähintään 0.95 ($\cos\phi \geq 0.95$) esim. lämmitys.
- Käyttöluokka AC-3 käsittää oikosulkumoottorikäytöt. Käynnistettäessä oikosulkumoottori kontaktori kytkee moottorin käynnistysvirran (10x moottorin I_n). Katkaisu kyky AC-3 luokassa on (8x moottorin I_n). /14/

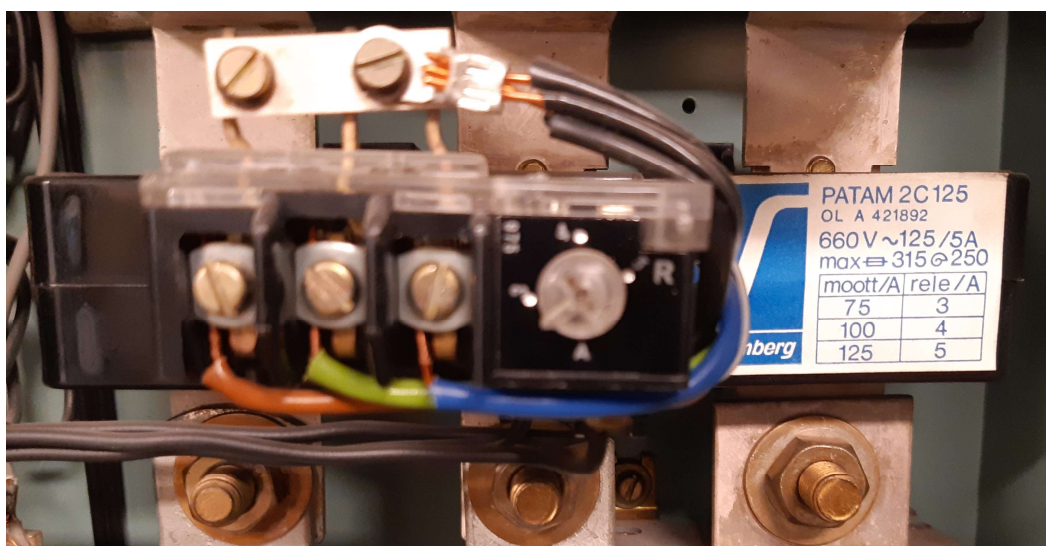


Kuva 17. kontaktorin elinikäkäyrä

Kontaktorin keston vaikuttaa kytkettävän virran suuruus verrattuna kontaktorin nimellisvirtaan. Kontaktorien mekaanista kestoja kuvataan elinikäkäyrällä (**Kuva 17.**). /2/

2.5 Lämpörele

Kontaktorin lisäksi moottorilähtöön on asennettu ylikuormitussuojaksi Strömbergin PATAM 2C 125-lämpörele (**Kuva 18.**). Lämpöreleen maksimi ensiövirta on 125 A, jolloin toisiovirta on 5 A. Lämpöreleen toiminta perustuu bi-metallista valmistettuun liuskaan, joka taipuu moottorin kuormitus virran aiheuttamasta lämmöstä. Moottorin virta lämmittää bi-metalli liuskaa, joka taipuu ja aiheuttaa releen laukaisun ylikuormitus, jumi- tai vinokuormitustilanteissa.



Kuva 18. PATAM 2C 125-lämpörele

Eri metalleilla on erilaiset lämpölaajenemisen ominaisuudet, jonka takia yhteen liitetyt metalliliuskat taipuvat lämmön vaikutuksesta. Bimetalliliuskojen taipuminen aiheuttaa ohjauspiirin hälytyskoskettimien avautumisen, joka aiheuttaa pääkontaktorin avautumisen. Bi metalli liuskoihin perustuvan lämpöreleen on annettava jäähtyä kuittauksen jälkeen hetki, koska bi-metalliliuskoilla kestää hetki jäähtyä ja palautua hitaasti normaalitilaan. Bi-metalliin perustuvan lämpöreleen toimintaan vaikuttaa ympäristön lämpötila, yleensä suojattava moottori sijaitsee eri tilassa, kuin sitä suojaava lämpörele. Lämpöreleen asetteluarvo ei vastaa moottorin kuormitusvirtaa, koska ne ovat erillämpötiloissa. Releitä rakennetaan tietyille virroille, mutta suurivirtaisissa moottorilähdöissä käytetään lämpöreleen ja päävirtauapiirin välissä virtamuuntajia. Virtamuuntajan tarkoitus on pienentää pääpiirin ensiövirta sopivaksi virtamuuntajatosioon kytketylle lämpöreleelle.

Lämpöreleessä on yleensä vaihtokosketin, jonka avautuva kärki kytketään sarjaan pääkontaktorin A1-liittimen kanssa. Näin saadaan pääkontaktori aukeamaan ylikuormitustilanteessa. Lämpörele voi myös aiheuttaa turhia laukaisuja, jos käynnistysaika on pitkä ja käynnistysvirta on suuri. Taajuusmuuttaja suojaa moottoria ylikuormitukselta samalla tavoin kuin lämpörele. /12/

2.6 Matalapainepumppu

Matalapainepumppu on keskipakopumppu (**Kuva 19.**) ja ne ovat teollisuudessa yleisimmin käytettyjä pumppuja, niiden osuus kaikista pumpuista on noin 80 %. Matalapainepumppauksessa käytetyt keskipakopumput ovat Karhulan vuonna 1963 valmistamia kaksinkertaisella imulla varustettuja yksivaihekeskipakopumppuja. Keskipakopumpun toiminta perustuu pyörivään juoksupyörään. Sähkömoottorin ulkoa tuoma energia siirtyy pyörivien juoksusiipien kautta pumpattavaan nesteeseen hydraulisena energiana eli paineena ja nopeutena keskipakovoiman vaikutuksesta. Keskipakopumpun toiminta on periaatteeltaan jatkuvatoiminen. Keskipakovoima siirtää pumpattavaa nestettä kehällä, samaan aikaan muodostuu alipaine imuaukolle, mistä vesi virtaa pumppuun. /8/



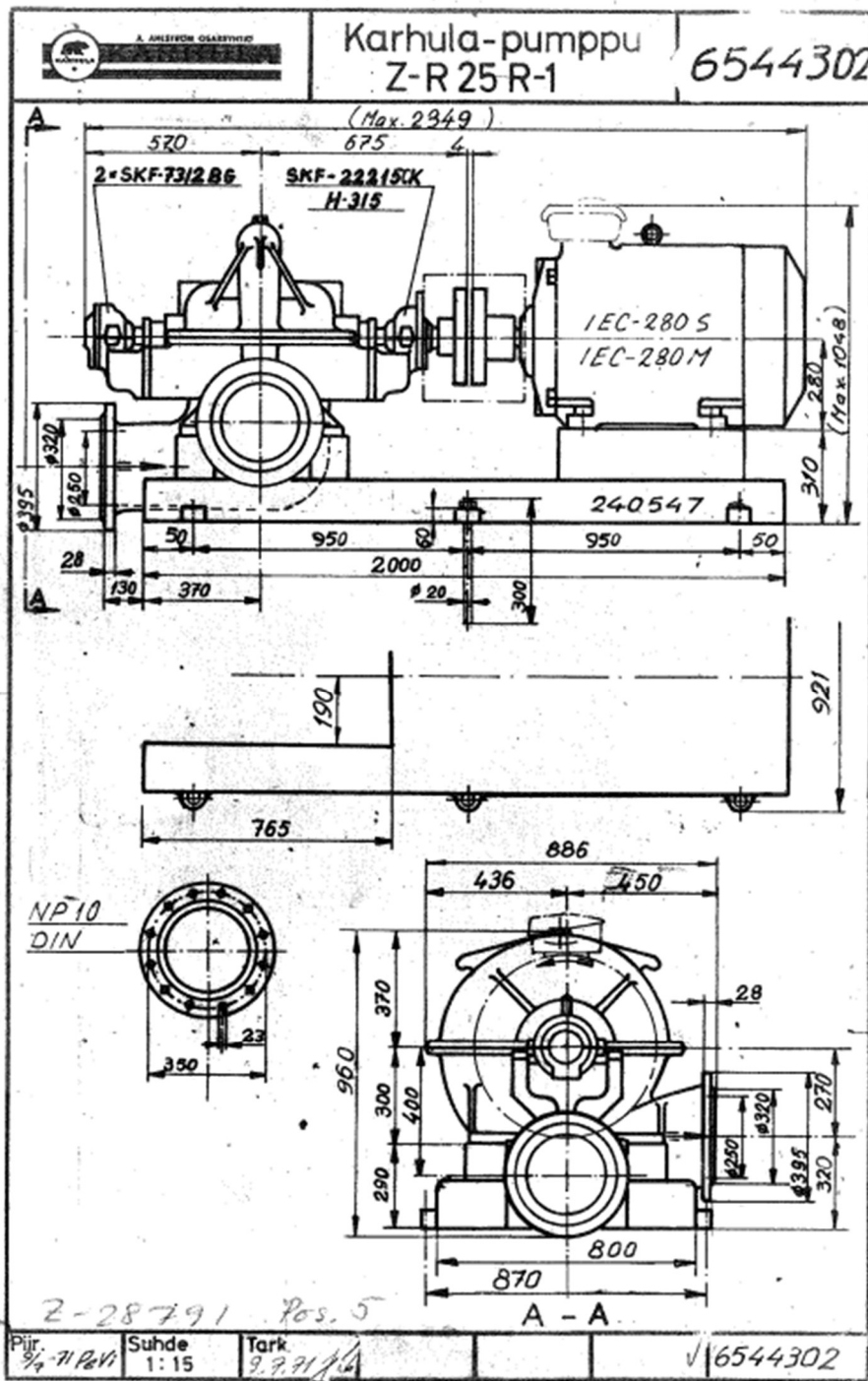
Kuva 19. yksivaiheinen keskipakopumppu, kaksinkertaisella imulla

Pumpun juoksupyörän valmistusmateriaali riippuu pumpattavasta nesteestä sekä juoksupyörän mitoitus riippuu halutusta nostokorkeudesta sekä tilavuusvirrasta. Mitoitukseen vaikuttaa myös pumppua pyörittävän moottorin kierrosnopeus sekä juoksupyörä tyyppi. /8/

Juoksupyörä tyyppinä on monia erityyppisiä, eri käyttötarkoituksiin. Kuvassa (Kuva 20.) Erityyppisiä juoksupyörä ratkaisuja on esimerkiksi avoin-, puoliavoin- sekä suljettu juoksupyörä. /8/

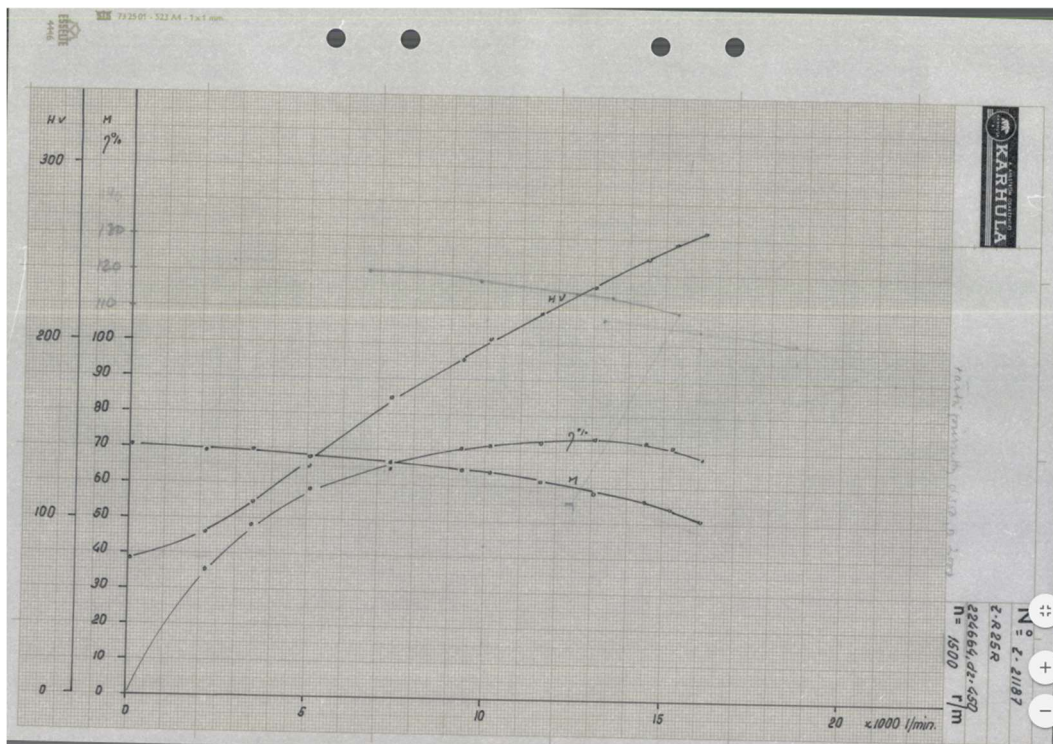


Kuva 20. juoksupyörätyyppejä



Kuva 21. Karhula-pumppu Z-R25 R-1

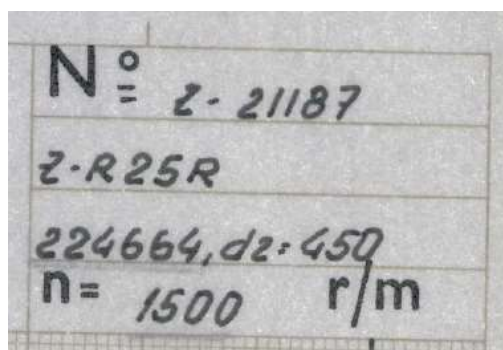
Kuvassa (Kuva 21.) matalapaineumpun alkuperäinen piirustus vuodelta 1971.



Kuva 22. Karhula-pumppu Z-R25 R-1 ominaiskäyrä

- μ =hyötysuhde
- H=nostokorkeus
- HV=hevosvoimaa

Matalapainepumppujen nimellinen pyörimisnopeus on 1500 rpm:ää (**Kuva 23.**), jolla pumpun pumppukäyrä on piirretty (**Kuva 22.**), mutta pumppua pyöritetään moottorilla, jonka nimellisyörimisnopeus on 985 rpm.



Kuva 23. pumpun nimellinen kierrosnopeus

Keskipakopumpun toimintaa kuvataan pumpun ominaiskäyrällä (pumppukäyrä). Ominaiskäyrä kuvaa pumpun tilavuusvirtaa suhteessa nostokorkeuteen. Pumpun vaatima akseliteho voidaan laskea yhtälöstä (8).

$$P_{aks} := \frac{H \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{\eta_p} \quad (8)$$

P_{aks} = pumpun vaatima akseliteho

H = nostokorkeus toimintapisteessä

Q = tilavuusvirta toimintapisteessä

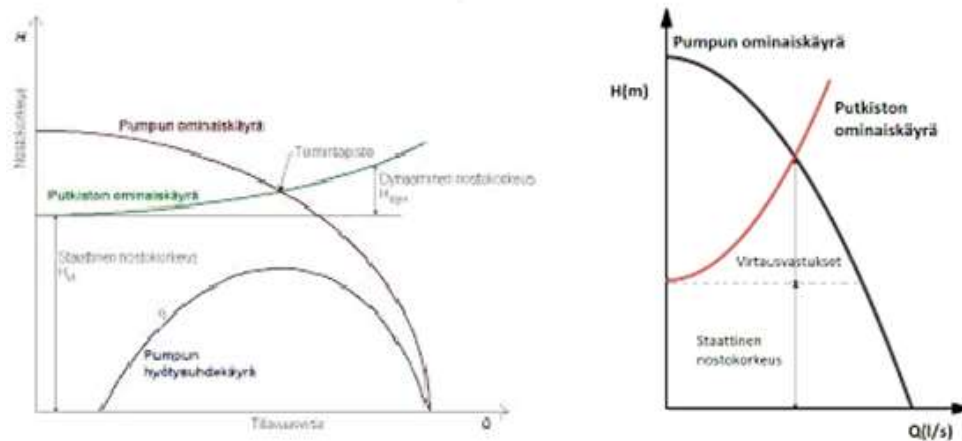
ρ = nesteen tiheys

P_{aks} = pumpun vaatima akseliteho

η_p = pumpun hyötysuhde

Oikean pumpun valintaan vaikuttaa pumpun ominaiskäyrä, sekä putkiston ominaiskäyrä (systeemikäyrä). Pumpun ominaiskäyrästä käy ilmi pumpunsuorituskyky. Tyypillinen ominaiskäyrästä kuvataan usealla eri juoksupyöräkoolla tai eri kierrosnopeuksilla. Tulokset esitetään virtaus/nostokorkeuskoordinaatistossa. Pumpun nostokorkeudella tarkoitetaan pumpun nostamaa vesipatsaan korkeutta m/nestepatsas, joka muodostuu staattisesta ja dynaamisesta nostokorkeudesta. tilavuusvirtausta kuvataan tyypillisesti l/min tai m³/h. Staattinen nostokorkeus muodostuu nestepinnan ja pumpun välisestä korkeuserosta. Dynaamisella nostokorkeudella tarkoitetaan nesteen virtauksen aiheuttamaa painehäviötä. Maksiminostokorkeudella nesteen virtaus on nolla ja nostokorkeuden laskiessa veden virtaus suurenee ja on suurimmillaan, kun nostokorkeus on 0m.

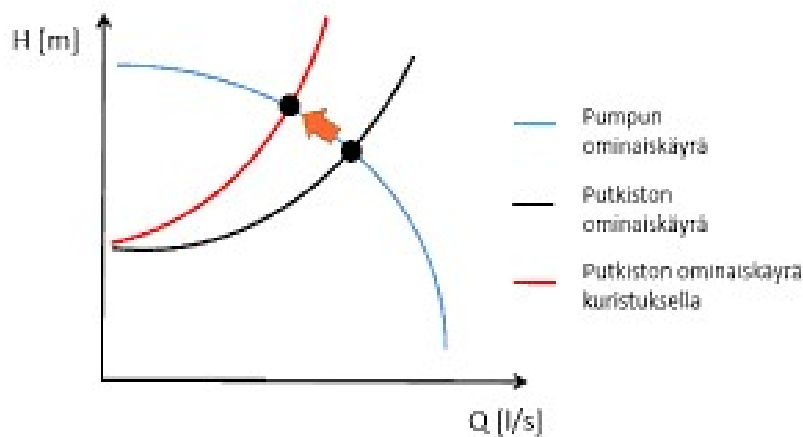
Pumpun ominaiskäyrää määritetään ajamalla pumppua nimellisyörimisnopeudella säätöventtiiliä vasten. Venttiiliä säädetään 0-100 % samalla mitataan pumpun tilavuusvirta sekä nostokorkeus. Näistä mittaustuloksista laaditaan pumpulle Q/H-koordinaatisto. Q/H-koordinaatistossa on piirretty pumpun nostokorkeus virtaaman funktiona. /3/



Kuva 24. Q/H-koordinaatisto

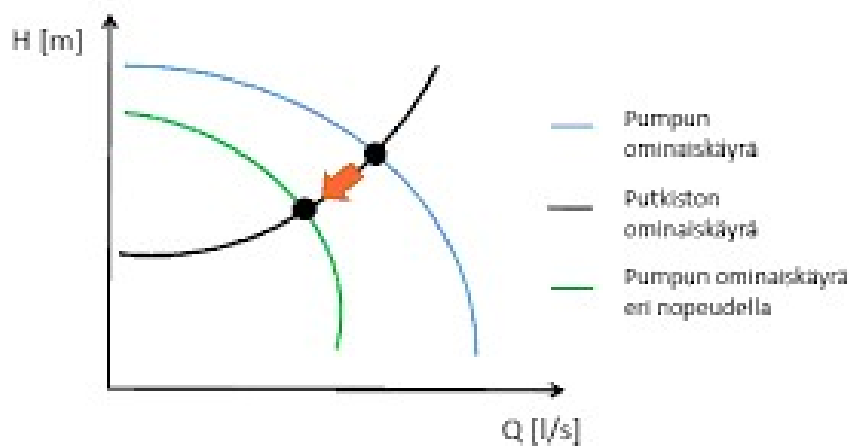
Pumppaukseen ja pumpun valintaan vaikuttaa myös putkiston ominaisuudet. Putkiston ominaiskäyrä eli systeemin ominaiskäyrästä käy ilmi putkistossa nesteen virtaukseen vaikuttavat ominaisuudet mm. kitkahäviöt sekä nostokorkeus. Pumpulle muodostuu toimintapiste, joka riippuu pumpun ominaiskäyrästä ja putkiston systeemikäyrästä (**Kuva 24.**). Piirtämällä putkiston systeemikäyräpumpun ominaiskäyrän kanssa samaan koordinaatistoon voidaan määrittää pumpun toimintapiste. Lisäksi pumpun ominaiskäyrän kanssa samaan koordinaatistoon piirretään pumpun hyötysuhdetta kuvaava käyrä, tämän avulla nähdään pumpun optimaalinen toimintapiste. /3/

Tilavuusvirran säätöön on käytännössä kolme tapaa: kuristussäätö, nopeussäätö ja käy-seissäätö. Pumppu pitää mitoittaa suurimman virtauksen mukaan. Tätä maksimivirtausta yleensä tarvitaan harvoin, joten virtaus pitää säätää prosessille sopivaksi. Säätö tavalla on suuri taloudellinen merkitys, lisäksi prosessin kannalta esimerkiksi käy-seissäätöä voi olla hankala käyttää, jos tarvitaan jatkuva virtaus.



Kuva 25. kuristussäätö Q/H-koordinaatistossa

Kuristussäätö on teollisuudessa eniten käytetty virtaussäätö, kuristussäädössä virtaus säädetään pumpun painepuolen venttiiliä säätämällä. Kuristussäätö perustuu venttiilin aiheuttamaan painehäviöön, jossa pumpun nostokorkeus pienennetään venttiilillä, nostokorkeuden pieneminen pienentää virtausta ja pumpun toimintapiste siirtyy. Virtauksen kuristaminen venttiilillä aiheuttaa pumppaukseen häviön, joka on kuristussäädön haitta. Prosessin kannalta kuristussäätö on yhtä hyvä kuin nopeussäätö. Kuristussäätö muuttaa putkiston ominaiskäyrää suurentamalla putkistovastusta (**Kuva 25.**). /3/



Kuva 26. pyörimisnopeussäätö Q/H-koordinaatistossa

Pyörimisnopeussäädössä muutetaan pumpun pyörimisnopeutta, jonka takia pumpun ominaiskäyrä muuttuu ja pumppaus hakeutuu uuteen toimintapisteeseen. Pyörimisnopeussäätö tehdään yleensä taajuusmuuttajaa käyttämällä, jolla saadaan hy-

vä virtauksen säätö (**Kuva 26.**). Taajuusmuuttajakäytössä muita hyviä puolia pumppauksen energiasäästön lisäksi on sisäänrakennettu säätösovellus sekä liitettävyys automaatiojärjestelmään. Vesilaitoksella pumppauksessa on yleisesti käytössä taajuusmuuttajien oma PID säädin virtauksen tai paineen säätöön. Taajuusmuuttajan säädintä käytettäessä automaatiojärjestelmän häiriötilanteessa pumppauksen säätö toimii itsenäisesti, vaikka automaation ohjearvo häviää. Tällaisessa tilanteessa ohjearvo valinta vaihdetaan käsiohjeelle, mikä annetaan potentiometrillä kyseisen pumpun ohjauskeskuksesta. /3/

Pyörimisnopeussäädön energiaa säästävä vaikutus perustuu akselitehon pienemiseen, pumpun tehon tarve on suoraan verrannollinen nostokorkeuden ja virtauksen tuloon. Käy-seis säätö on energia taloudellisesti hyvä, mutta prosessin ohjauksen kannalta haastava. Ylensä käy-seis säätöä käytetään säiliöiden täytössä. /8/

2.7 Laitekohtainen kompensointikondensaattori

Matalapainepumpun moottorin napoihin on kytketty kompensointikondensaattori kompensoimaan moottorin ottamaa loisvirtaa. Kaikki sähkökoneet ottavat verkosta loisvirtaa koneen magnetointia varten, yksittäiskompensointia on sovellettu vanhoissa asennuksissa tavallisesti moottoreille. Nykyään asennetaan automaattinen kompensointilaitteisto, joka on kytketty pääkeskukseen. Vesilaitoksella on ABB:n valmistama estokelaparisto loistehon kompensointiin. Estokelaparisto säättää automaattisesti kompensoinnin optimaaliselle tasolle. Vanha moottorikohtainen kompensointi voidaan purkaa pois. Yhtälöissä (9), (10) ja (11) on laskettu nimelliskuormalla toimivan moottorin pätöteho, näennäisteho ja loisteho. /11/

$$P = \text{pätöteho}$$

$$Q = \text{loisteho}$$

$$S = \text{näennäisteho}$$

$$U_n = \text{nimellinen jännite } 400V$$

$$I_n = \text{nimellinen virta } 110A$$

$$\cos\phi = \text{tehokerroin } 0.84$$

$$P = \sqrt{3} * U_n * I_n * \cos \phi = 58,2kW \quad (9)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 37,6kvar \quad (10)$$

$$P = \sqrt{3} * U_n * I_n = 69,3kVA \quad (11)$$

Matalapainepumpun 55 kW:in moottorin verkosta ottama nimellinen näennäisteho on 69,3 kVA ja loisteho on 37,6 kvar, joka kompensoidaan 43 kvar:in kompensointikondensaattorilla. Pelkkiä kompensointikondensaattoreita käytettäessä syntyy mahdollinen rinnakkaisresonanssin vaara. Kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja syöttävän verkon induktanssi muodostavat rinnakkaisresonanssiin joillakin verkossa esiintyvillä yliaaltotaajuuksilla. Mikäli verkossa esiintyy yliaaltoja lähellä kyseistä taajuutta, vahvistuvat yliaaltovirrat moninkertaisiksi. Tämä aiheuttaa sähkönlaadun huononemista sekä häiriöiden ja vaurioiden todennäköisyyden kasvua. Tämän vaaran eliminoimiseksi on käytetty estokelaparistoa, joka toimii kuin kondensaattori 50 Hz perustaajuudella. /11/

2.8 Estokelaparisto

Estokelaparisto on automaattinen kondensaattoriparisto, jossa kondensaattoripor-
taat on varustettu estokeloilla, joiden ansiosta rinnakkaisresonanssia verkon kans-
sa ei voi syntyä. Estokelapariston viritystaajuus (189 Hz tai 141 Hz) valitaan siten,



Kuva 27. virta ja jännite pääkeskukselta mitattuna

että se on alimman verkossa esiintyvän yliaaltotaajuuden alle. Vesilaitoksen sähköverkossa suurimmat yliaaltovirrat ovat 5:llä ja 7:llä yliaallolla, joiden taajuudet ovat 250 Hz ja 350 Hz:ä (**Kuva 27.**), mitkä ovat tyypillisiä sähköverkoissa, joissa on paljon taajuusmuuttajakäyttöjä. Taajuusmuuttajan 6-pulssitasasuuntaajaa aiheuttaa verkkoon viidettä ja seitsemättä yliaaltoa. Kela suojaa kondensaattoria yliaalloilta, mutta estokelapari ei juurikaan suodata yliaaltoja pois verkosta. /11/

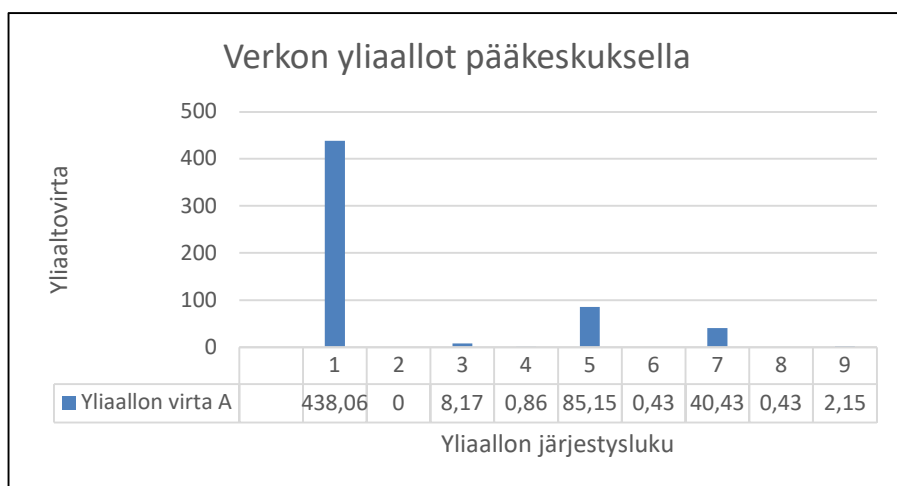
Kuvassa (**Kuva 27.**) virranyliaalto lukemasta voidaan huomata, että laitoksella on paljon taajuusmuuttajakäyttöjä, viides- ja seitsemäsyliaaltoa on korostunut yliaaltomittauksessa. Yliaaltojen muodostuminen suuntaajakäytöllä riippuu suuntaajan pulssiluvusta, minkä perusteella voidaan laskea suuntaajan tuottamat yliaallot. Tavallisissa taajuusmuuttajissa pulssiluku on 6 mikä tarkoittaa sitä, että tasasuuntaajassa on kuusi pääjännitepulssi verkkojännitteen jakson aikana. /15/

$$n = \text{aallon järjestysluku (taajuus}=n \cdot 50\text{Hz)}$$

$$p = \text{pulssiluku}$$

$$i = \text{kokonaisluku}$$

$$n = p \cdot i \pm 1$$



Kaavio 1. 6-pulssisuuntaaja verkkovirran yliaallot

Vesilaitoksen pääkeskukselta mitatut viidennen ja seitsemännen yliaaltojen perusteella laskettu (viides ja seitsemäs yliaalto) virran kokonaissärö (THD) on 23 %.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = 23 \% \quad (12)$$

THD = harmoninen kokonaissärö

I = kokonaistehollisarvo, 430 A

*I*₁ = 419A, *I*₅=85,15A, *I*₇=40,43 A

Yhdeksäs yliaalto ja siitä suuremmat ovat yliaallot niin pieniä, että niillä ei ole suurta merkitystä laskettuun tulokseen yhtälö (12). Estokelapariston näyttöpaneelistä luettu virran THD on 24,1 %. Standardin SFS-EN 50160 mukaan jakelujännitteen kokonaissärökertoimen on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %, mukaan lukien harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka.

3 MATALAPAINEPUMPPAUS TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖLLÄ.

3.1 Toimintaperiaate

Matalapainepumpun käytön modernisoinnin suurin muutos liittyy pääkontaktorin korvaamiseen taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajakäytön etu verrattuna kontaktorilla toteutettuun suoraan käyttöön on pyörimisnopeuden säädön mahdollisuus sekä käynnistysvirran pieneneminen. Moottori voidaan kiihdyttää haluttuun nopeuteen hitaasti kiihdyttäen. Tällä tavalla käynnistettäessä moottorin käynnistysvirta ei nouse paljon nimellisestä virrasta ja suuri käynnistysvirtapiikki jää kokonaan pois.

Matalapainepumppu on asennettu suoraan puhdasvesialtaan päälle. Tämän vuoksi ennen pumpun käynnistystä, täytyy vesi nostaa alipaineen avulla puhdasvesialtaasta pumpun pesään. Pumpun painepuolella on takaiskuventtiili ja imupuolen putki menee suoraan puhdasvesialtaan pohjalle. Pumpun pesän yläpuolelle on asennettu säiliö, jonka sisällä on pintakytkin ja se on liitetty alipainesäiliöön. Säiliöön on asennettu kaksi magneettiventtiiliä, joista toisella ohjataan alipaine pumpunpesään ja toisella tyhjennetään pumppu pumppauksen jälkeen.

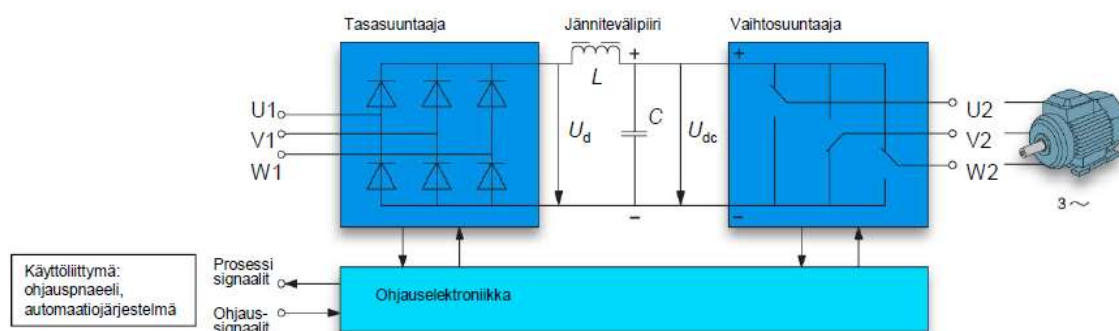
3.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on kehitetty vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuden säätöön. Taajuusmuuttaja mahdollistaa siihen kytketyn moottorin pyörimisnopeuden säätämisen portaattomasti. Taajuusmuuttajakäytön mahdollistama pehmeä käynnistys ja pysäytys poistaa esimerkiksi pumppukäytössä nesteiden paineiskut putkistossa. Samalla moottorin ottama käynnistysvirta putoaa merkittävästi. Käynnistysvirran pieneneminen pienentää moottorin sähköverkkoon aiheuttamia häiriöitä sekä käynnistysvirran aiheuttamia mekaanisia rasituksia. Vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuden säätö taajuusmuuttajalla toteutetaan moottorille syötetyn vaihtosähkön taajuutta säätämällä. /6, 18/

Vaihtosähkömoottorilla on nimellinen pyörimisnopeus, joka riippuu verkon taajuudesta sekä moottorin napaparin luvusta. Moottorin napapariluku määrää moottorin nimellisen pyörimisnopeuden verkkotaajuudella, myös moottorin kuormitus vaikuttaa vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuteen. Tämä on huomioitava käytössä missä pyörimisnopeuden säätö pitää olla tarkka. Vaihtosähkömoottori pyörii aina tietyllä jättämällä, joka riippuu moottorin kuormituksesta. Moottorin kuormituksen suurentumisen aiheuttama jättämän suurentuminen tämä voidaan kompensoida taajuutta nostamalla ja moottorin nopeus pysyy vakiona. Matalapainepumppujen moottorien synkroninopeus on 1000 rpm, joten moottorit ovat kuusinaipaisia ja niiden napapariluku on 3. /1/

Taajuusmuuttajan rakenne ja pääosat ovat:

- 6 pulssitasasuuntaaja
- välipiirin kondensaattorit
- IGBT-transistorit
- Ohjaukset

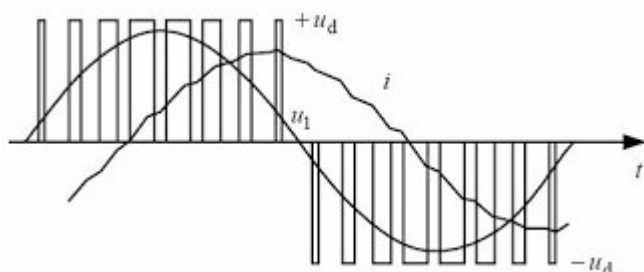


Kuva 28. taajuusmuuttajan rakenne

Taajuusmuuttajan toiminnan pääperiaate ja rakenne (**Kuva 28.**): ensiksi sinimuotoinen verkkojännite tasasuunnataan diodeilla DC-jännitteeksi, välipiirin kondensaattorit tasoittavat sykkivän DC-jännitteen tasaiseksi, jonka jälkeen vaihtosuuntaaja muuttaa DC-jännitteen halutun taajuiseksi, kolmivaiheiseksi jännitteeksi moottorille. /11/

Pyörimisnopeuden säätö taajuusmuuttajalla perustuu pulssimodulointiin. Pulssimoduloinnissa säädetään jännitteen tehollisarvoa pulssin leveyttä säätämällä, PWM tulee sanoista (engl. Pulse Width Modulation, PWM). Pulssin kytkentätaajuus taajuusmuuttajilla on tyypillisesti 1.5-6 KHz. Kytkentätaajuutta voi säätää taajuusmuuttajan parametreista. /11/

Kuvassa (**Kuva 29.**) näkyy pulssimoduloinnin periaate. IGBT-transistorit kytkvät vuorotellen välipiirin DC+ ja DC- jännitteen siten, että siitä muodostuu kolmivaiheista vaihtosähköä. Moottorin navoissa jännite on pulssimaista, mutta moottorin suuren induktanssin takia moottorin virta on sinimuotoista. /11/

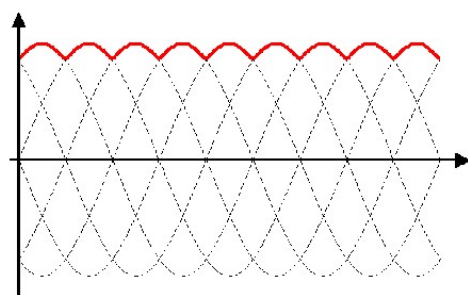


Kuva 29. PWM-pulssimodulointi

$\pm U_d =$ moottorin jännite

$i =$ moottorin virta

$u_1 =$ moottorin jännite



$$U_d = 2.34 U_v = 538.2 \text{ V} \quad (13)$$

$$U_v = 230 \text{ V}$$

Kuva 30. välipiirin jännite

Taajuusmuuttajan välipiirin jännite 6-pulssisuuntaajalla on $\sim 540 \text{ Vdc}$ (**Kuva 30.**). Välipiirin jännite lasketaan kertomalla tulovaihejännite kertoimella 2,34, näin laskettuna arvo ei ole tarkka, vaan siihen vaikuttaa kuormitus sekä välipiirin konden-

saattorit. Kerroin määräytyy suuntaajan pulssiluvun mukaan, suuntaajan pulssiluku tarkoittaa dc-jännitepulssien määrää verkkojännitteen jakson aikana. /15/

3.3 Taajuusmuuttajan ohjaus ja liittäminen logiikkaan

3.3.1 Logiikka

Matalapainepumppujen taajuusmuuttajat liitetään vesilaitoksen automaatiojärjestelmään. Vesilaitoksen automaatiojärjestelmä on toteutettu Omronin logiikalla ja valvomon käyttöliittymä on toteutettu wonderware In Touch-ohjelmalla. Logiikka on jaettu kuuteen ala-asemaan prosessin eri osien mukaan. Matalapainepumppaus on kytketty PA3-logiikkaan, joka on asennettu AA6-keskukseen valvomon sähkötilaan. Logiikan digitaalitulo ja lähtökortit on hajautettu kentälle. HAJ5.1 ala-asema on RK101.1-keskuksessa, mutta analogitulo ja lähtökortit sijaitsevat AA6-keskuksessa valvomon sähkötilassa. AA6-keskuksesta on vedetty runkokaapeli, jonka kautta taajuusmuuttajien analogisignaalit saadaan kytkettyä PA3-logiikkaan.

3.3.2 Taajuusmuuttajan DI-, DO- ja mA-viesti

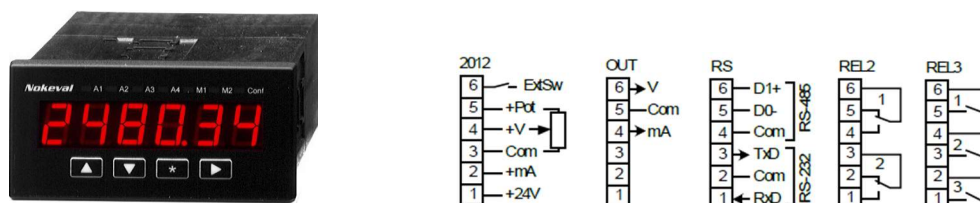
Matalapainepumpun taajuusmuuttajan ohjaukseen käytetään mA-virtaviestiä sekä logiikan digitaalilähtöjä/tuloja. Taajuusmuuttajan käy- ja vikatiedot tulevat digitaalitetoina HAJ5.1 logiikkaan sekä 4-20 mA-viesti PA3-logiikkaan.

Milliampeerivirtaviestiä käytetään yleisesti teollisuuden instrumentoinnissa sekä toimilaitteiden ohjauksessa, standardi viesti on 4-20 mA. 4-20 mA virtaviestialue on yleisempi kuin ennen käytetty 0-20 mA, koska virtaviestin virheellisyys voidaan todeta ja sen vikaantumisesta saadaan automaatiojärjestelmään hälytys. Jos virta tippuu alle 4 mA, anturi on todennäköisesti vikaantunut tai piirissä on katkos. Virtaviestin käytön etu verrattuna jänniteviestiin on sen parempi sieto sähköisiä häiriöitä vastaan. Vanhemmissa instrumenteissa on vielä käytössä 0-20 mA viesti, mutta sen käytössä haittana on instrumentin vikaantuessa virtaviestin puuttumista ei välttämättä heti havaita. /4/

Instrumentteja ja toimilaitteita on erityyppisiä ja niiden kytkentä vaihtelee tyyppin mukaan. Päätyypit ovat 2, 3 ja 4 johdinlähettimet. Kaksijohdinlähettimessä +liittimeen syötetään +24 dc jännite. Ja toinen johdin kytketään logiikan AI tuloon. Logiikan AI tulon toinen liitin kytketään DC- liittimeen. Näin kytkettynä virtaviesti pääsee kulkemaan logiikan AI tulon kautta DC-. Lähetin saa samalla käyttöjännitteen. Vesilaitoksella pinnanmittauksissa käytettävät paine- ja ultraääneen perustuvat kaikuanturit ovat kaksijohdin lähettimiä. 3 ja 4 johdinlähettimien suurin ero 2 johdinlähettimeen on käyttöjännitteellä tulevat omat liittimet. /7/

mA-viesti kytketään taajuusmuuttajan AI-tuloon sekä skaalataan taajuusmuuttajan parametreilla nopeusohjeeksi. 4 mA on miniminopeus 400 rpm ja 20 mA on maksiminopeus 985 rpm. Taajuusmuuttajassa on myös analogilähtö 4-20 mA, jonka voi ohjelmoida lähettämään taajuusmuuttajan lähtötaajuus, virta, viesti jne. Ne liitetään logiikan mA-tulokorttiin ja skaalataan logiikassa näyttämään vastaavaa suuretta valvomo-ohjelmassa. Matalapainepumppujen käytössä taajuusmuuttajalle annetaan logiikalla virtauksen ohjearvo m³/h, jota taajuusmuuttaja pyrkii pitämään sisäisen PID säätimen avulla. Taajuusmuuttaja AO-lähtö kytketään logiikan AI-tuloon, josta saadaan virtaviestinä moottorin virta.

Taajuusmuuttajaa on myös pystyttävä käynnistää ja ohjata käsin. Taajuusmuuttajan ohjearvo valitaan nokkakytkimellä OK104-keskuksesta: A-asento on logiikkaohje ja K-asento on potentiometriohje. Käsin annettava ohjearvo annetaan potentiometrillä, joka kytketään Nokevalin paneelinäyttöön (**Kuva 31**). Paneelinäyttö näyttää numeerisesti potentiometrillä annetun ohjearvon ja skaalaa paneelimitarin mA-lähtöön välille 0-750 m³/h / 4-20 mA.



Kuva 31. Nokeval 2012-paneelimitari prosessiviesteille

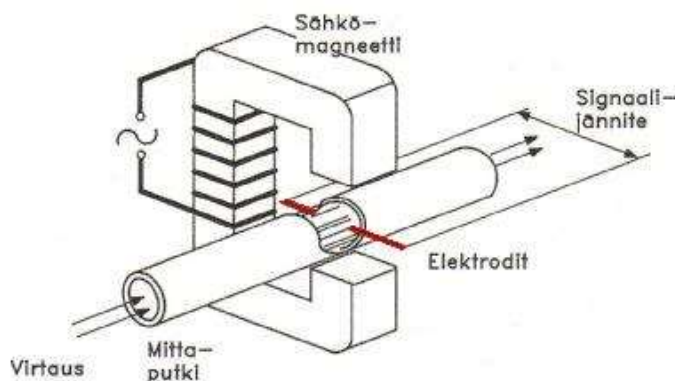
3.4 Matalapaineputken virtausmittaus

Matalapaineputken veden virtaus mitataan kahdella virtausmittarilla. Toinen mittareista on vesilaitoksella ja toinen on alavesisäiliöllä. Kahdennetulla mittauksella varmistetaan, että putkessa ei ole vuotoa. Vesilaitokselta lähtevä ja alavesisäiliölle tuleva vesimäärä on oltava sama. Virtausmittarit ovat magneettisia virtausmittareita. Tämän tyyppiset virtausmittarit ovat hyvin yleisiä teollisuuden prosesseissa. Virtausmittarin anturi asennetaan putkeen laippaliitoksella, anturista johdotetaan signaali kaapelit vahvistimella, joka lähettää 4-20 mA signaalin logiikalle.



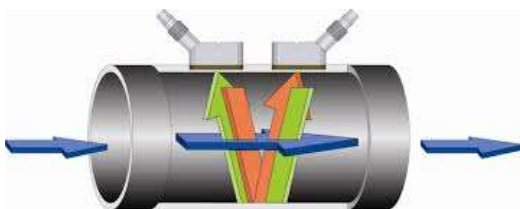
Kuva 32. magneettinen virtausmittari.

Magneettiset virtausmittarit ovat luotettavia ja niiden tarkkuus on hyvä. Anturin asennuksessa pitää huomioida vaatimukset putkiston osalta. Anturi pitää olla asennettuna siten, että putki on koko ajan täynnä vettä anturin kohdalla, sekä tarkassa mittauksen luotettavuuden varmistamiseksi tarvitaan suora putkiosuus ennen ja jälkeen anturin. Eri valmistajilla on omat suositukset suoran osuuden pituuksista. Vaadittavan suoran osan pituus on riippuvainen putken halkaisijasta, johonka anturi on asennettu. Magneettisen anturin huono puoli on huollettavuus, putken väliin laippaliitoksella asennettu anturi on vaikea vaihtaa ja jossakin prosessin osissa se voi olla mahdotonta. Kuvassa (**Kuva 32.**) esimerkkinä yhden valmistajan erityyppisiä magneettisia virtausmittareita. /13/



Kuva 33. magneettinen virtausmittari ja sen toimintaperiaate

Kuvassa (**Kuva 33.**) toisen tyyppinen nesteen virtaukseen käytetty virtausmittari, jonka toiminta perustuu ultraääneen, on Clamp on mittari. Clamp on mittari, joka mittaa ultraäänen kulkunopeutta nesteessä ja sen perusteella laskee nestevirtauksen. Kuvassa (**Kuva 34.**) esitetty ultraäänimittarin toiminta periaate. Virtausmittarin hyvä puoli on se, että sen voi asentaa putken päälle, mutta sen tarkkuus ei ole yhtä hyvä kuin magneettisella virtausmittarilla. /9/



Kuva 34. Clamp-on virtausmittari

3.4.1 Virtausmittauksen mA-signaali

Vesilaitoksen virtausmittarin mA-signaali kytketään molemmille taajuusmuuttajille logiikan AI-tuloon sekä valvomossa olevaan AA6 -keskuksessa olevaan paikalliseen paneelinäyttöön. mA-signaalia ei voi kytkeä sarjaan kaikkien AI-tulojen kautta. Sarjakytkentä olisi periaatteessa mahdollinen, mutta mA-silmukkaan voi

vastus olla maksimissaan 1000 Ω , yhden AI-tulon vastus on 250 Ω . Lisäksi kahta taajuusmuuttajan AI-tuloa ei voi kytkeä sarjaan kekenään. Lisäksi toisen taajuusmuuttajan vikaantuessa voi mA-signaali katketa, jonka johdosta toinenkaan taajuusmuuttaja ei toimi. Tämän takia mA-signaali kierrätetään erotusvahvistimen kautta. Erotusvahvistimella saadaan taajuusmuuttajat erotettua galvaanisesti toisistaan sekä toisen vikaantuessa mA-signaali ei menetetä.

Virtausmittarilta tuleva mA-signaali kytketään sarjaan AA6-keskuksessa olevan PA3-logiikan ja paneelinäytön kanssa. Logiikkakeskus AA1 on vedetty runko-kaapeli pääkeskukselle PK1. Pääkeskukselle asennetaan WAGO 857-423 erotusvahvistin (**Kuva 35.**) ja (**Kuva 36.**), erotusvahvistimen toisesta mA-lähdöstä vietään mA-viesti OK104 olevalle paikallinäytölle. Toisesta mA-lähdöstä virtaviesti vietään PK1.1 ohjauskeskukselle, mistä viesti jaetaan kahdesta eri mA-lähdöstä taajuusmuuttajille. Taajuusmuuttajat tarvitsevat virtaustiedon PID säätösovellusta varten.



Kuva 35. WAGO 857-423

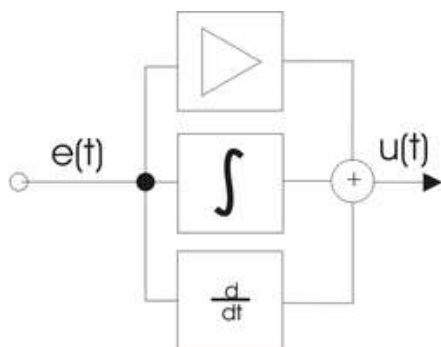
IN+	1	IN	5	OUT 1+
GND 1	2		6	GND 2
OUT 2+	3	OUT 2	7	Us+
GND 4	4		8	GND 3
				POWER

Kuva 36. WAGO 857-423 kytkentä

3.5 PID-säätö

PID säädin on yleisesti teollisuuden prosesseissa käytetty säätöalgoritmi. PID-säädin voi olla erillinen koje ohjauskeskuksessa, logiikassa ohjelmoituna säätimenä, sovelluksena taajuusmuuttajassa tai toimilaitteessa. Vaconin tekemissä taajuusmuuttajissa on erikseen PID sovellus PID käyttöä varten. PID säätimen suosio johtuu sen suuresta käyttöalueesta ja sen yksinkertaisuudesta. /5/

PID säädin tarvitsee prosessista oloarvon sekä käyttäjän antaman asetusarvon. PID säätimen algoritmi laskee prosessin oloarvon ja asetusarvon perusteella tarvittavan ohjearvon taajuusmuuttajalle. PID säätimen nimi tulee kolmesta kertoimesta: suhde-, integrointi- ja derivointi. Näitä kolmea kerrointa muuttamalla saadaan säätimelle optimivaste prosessin ohjaukseen. Säätimen pitää pystyä vastaamaan prosessitapahtuviin muutoksiin, mutta se ei saa häiritä sitä. PID säädin laskee prosessia säätävän arvon, anturin oloarvon ja annetun ohjearvon erotuksesta. Prosessin ohjausarvoa voidaan säätää suhde-, integrointi-, ja derivointi kertoimien avulla. Yleensä käytetään PI säädintä, jolloin derivointiosa jätetään pois. /5/



Kuva 37. PID-säätimen lohkokkaavio

Kuvassa (**Kuva 37.**) PID säätimen lohkokkaavio, missä ylhäällä on vahvistu P, keskellä integrointi I ja sen alla derivointi D.

$$Y := K_p \cdot e + K_p \cdot \frac{1}{T_I} \cdot \int e dt + K_p \cdot T_D \cdot \frac{de}{dt} \quad (14)$$

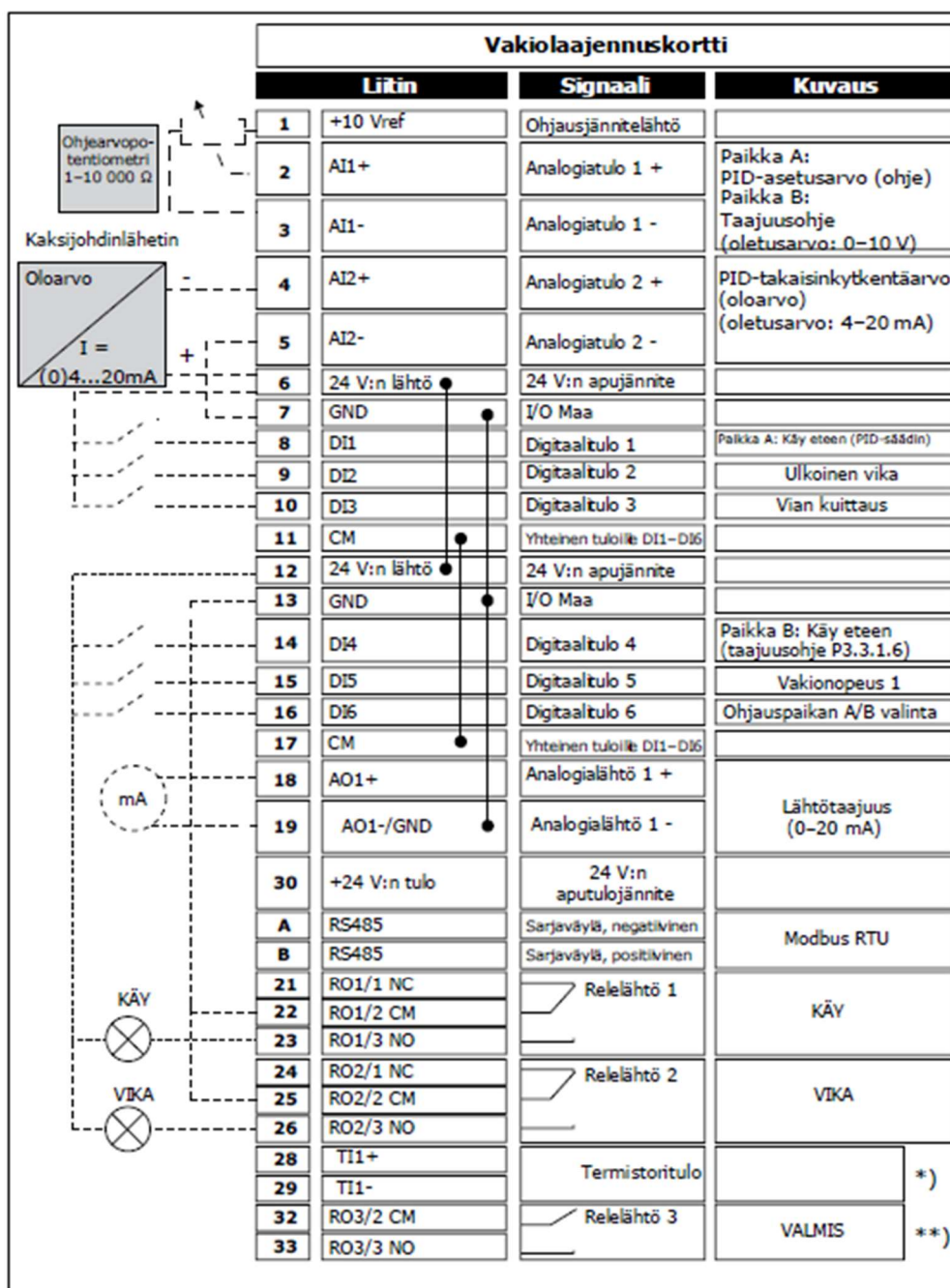
Suhdevahvistus K_p riippuu vain prosessimuuttujan ja asetusarvon erotuksesta. Tätä kutsutaan erosuureeksi. Suhdevahvistus määrittää ohjaussuureen vahvistuskerroimen mukaan, jos suhdevahvistus on 10 ja erosuuren on 2 säätimen ohjausarvoksi tulee 20. Liian suuri suhdevaste aiheuttaa helposti värähtelyä prosessiin sekä pahimmassa tapauksessa voi aiheuttaa prosessin kontrollin menetyksen. /5/

Integrointivaste eli integrointikomponentti summaa erosuureen ajan suhteen. Tuloksena pienikin erosuureen kasvu aiheuttaa integrointikomponentin hitaan kasvun.

Yhtälön (14) derivointiosa on verrannollinen erosuureen eli k_p muutos nopeuteen.

PID säätimen virittämiseen on useita tapoja, joista arvaa ja testaa menetelmä on monissa tapauksissa toimiva, jos käyttäjä ymmärtää kertoimien merkitykset ja vaikutukset prosessiin. Joissakin säätimissä on automaattiviritystila, joka hakee säätimen arvot automaattisesti. Monessa tapauksessa automaattivirityksellä on saatu perusasetukset säätimelle, mutta lopullinen viritys pitää tehdä manuaalisesti.

/5/



Kuva 38. Vacon 100-taajuusmuuttajan PID-säätösovelluksen oletus liitännät

Kuvassa (**Kuva 38.**) esitetty Vaconin taajuusmuuttajan oletus kytkentä käytettäessä PID säätösovellusta. Prosessin olo arvo kytketään AI2-tuloon ja ohjearvo AI1-tuloon.

3.6 Turvakytkin

Sähkömoottorin syöttökaapeli kytketään moottorin viereen asennetun turvakytkimen kautta. Turvakytkin sijoitetaan telineeseen moottorin viereen, näin asennettuna moottori voidaan turvallisesti kytkeä irti syötöstä mekaanisen huollon ajaksi. Turvakytkimen apukoskettimesta kytketään sarjaan ohjausjännitteen kanssa. Tämä estää pumpun tahattoman käynnistymisen ja turvakytkimen avauksesta tulee tieto automaatiojärjestelmään. Turvakytkin pitää olla EMC-suojattumalli, EMC-suojaukseen pitää kiinnittää huomiota taajuusmuuttaja-asennuksissa. Valmistajilla on laitekohtaiset asennusohjeet EMC-suojauksen toteuttamisesta.

3.7 Kaapelin mitoitus ja vikasuojaus

Taajuusmuuttajan ja moottorin syöttökaapeli mitoituksessa pitää ottaa huomioon moottorin koko sekä onko käytön tyyppi kevyt vai raskas. Nämä yhdessä määrittävät tarvittavan taajuusmuuttajan tehon. Pumppujen moottorien koko on 22 kW sekä nimellisvirta 43 A, pumppujen käynnistys on kevyt, joten taajuusmuuttajat voidaan mitoittaa kevyelle käytölle. Taajuusmuuttajan minimiteho 46 A nimellisvirran moottorille on Vacon 100 MR6 46 A Taajuusmuuttaja pystyy kevyellä käytöllä syöttämään jatkuvasti 46 A:in virran moottorille. Taajuusmuuttajan valmistaja suosittelee tehokaapeliksi 3x16+16 cu tai 3x25+16 al kaapelia sekä 50 A gG etusulakkeita vikasuojaukseen. Kaapelin mitoituksessa pitää ottaa myös huomioon asennus ympäristö, joka määrää kaapelin mitoituksessa käytettävät kertoimet. Kaapelit asennetaan tikashyllyille ja ympäristön lämpötila on maksimissaan noin 25 °C. Kaapelihyllyillä on noin 6-8 muuta syöttökaapeleita.

Vikasuojauksella tarkoitetaan suojausta, jonka avulla estetään ihmisiä tai kotieläimiä koskettamasta vian seurauksena jännitteiseksi tulleita osia niin, että siitä aiheutuisi vaaraa. Eristysvian aiheuttama vikavirta ja syntyvä kosketusjännite on poistettava niin nopeasti, ettei siitä aiheudu vaaraa ihmiselle. /7/

Taajuusmuuttajan syöttökaapelin sekä moottorin syöttökaapelin poikkipinta-ala määrittäminen perustuu SFS standardiin, missä määritellään vaaditut oikosulkuvirta, millä sulake toimii vaaditussa ajassa, joka on 0.4 s tai 5 s riippuen asennuksesta. Matalapainepumppujen taajuusmuuttajien syötössä sovelletaan 5 s sääntöä, koska syöttöä suojaava sulake on >32 A. Sulakkeen on toimittava vikatilanteessa 5 sekunnissa. Tällä varmistetaan, että vikaantuneen laitteen kosketusjännite ei nouse niin suureksi, että siitä olisi vaaraa ihmiselle. Sen lisäksi, että kosketusjännite pitää kytkeä pois mahdollisimman nopeasti pois, vian aikana esiintyvän kosketusjännitteen suuruutta on pyrittävä rajoittamaan. Tämä voidaan tehdä yhdistämällä sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat potentiaalintasaukseen. Sähköiskulta suojaamiseksi tehdystä potentiaalintasauksesta käytetään myös nimitystä suojaava potentiaalintasaus. /7/

Vikasuojauksen toiminta pitää varmistaa sähkölaitteistoa suunniteltaessa. Standardin SFS 6000 kohdan 132 mukaan sähköasennusta suunniteltaessa on varmistettava, että suojaus toteuttaa standardin luvun 131 mukaisesti. Luku 131 sisältää vaatimuksen vikasuojauksesta. Mitattujen oikosulkuvirtojen tulee olla 25% suurempia kuin suojalaitteiden toimintavirtarajat. Tämä johtuu siitä, että kaapelissa kulkeva vikavirta lämmittää kaapelia, joka takia johtimien resistanssi nousee, joka pienentää vikavirtaa. /7/

Oikosulkuvirta voidaan mitata tai laskea. Käytännössä oikosulkuvirtaa laskettaessa voidaan tehdä jotain yksinkertaistuksia. Seuraavassa on esitetty menetelmä, jota käytettäessä virhe voi olla yleensä korkeintaan noin 10%. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää, koska virheet tapahtuvat aina turvallisempaan suuntaan eli laskettu oikosulkuvirta on pienempi kuin todellinen. /7/

Vaadittava oikosulkuvirta 50 A gG-sulakkeelle 5 s säännöllä on 250 A ja johdon kuormitettavuus on oltava 55 A.

Maksimi syöttökaapelin pituus 3*25 al+16 cu.

$$l_{max} = \left((c * U) \div (\sqrt{3} * I_k) \right) - Z_v / z \quad (15)$$

$c = 0,95$, vakio kerroin kaapelin lämpenemän vaikutus oikosulkuvirtaan.

$U = 400$ V, pääjännite.

$I_k = 250$ A, suojalaitteen vaadittu oikosulkuvirta.

$Z_v = 0,0113 \Omega$, Syöttävän verkon impedanssi ennen suojalaitetta, syöttöverkon impedanssi + muuntajan impedanssi yhtälöt 23 ja 20.

$z = 0,0029 \Omega/m$, suojattavan kaapelin kokonaisimpedanssi, sisältää vaihe- ja suojamaajohtimen impedanssit.

Suurin sallittu kaapeli pituus vaaditulla 250 A oikosulku virralla 3*25 al+16 cu alumiini kaapelille on 299 m. Taajuusmuuttajan syöttökaapelin pituus on noin 15 m, joten 50A gG-sulake toimii vikatilanteessa vaaditussa 5s.

Kaapelin kuormitettavuus korjauskertoimet:

Sulake 50 A gG, kaapelin kuormitettavuus oltava 55 A. Kaapeli kulkee tikashyllyllä asennustapa E, jolla on 5-6 muuta kaapelia. Kertoimet SFS-käsikirjasta 600-1 pienjännite asennukset osa 5-52: sähkölaitteiden valinta ja asentaminen johtojärjestelmät. /7/

Lämpötilankorjauskerroin ympäristön lämpötila 30°C= 1

Muiden kaapelien vaikutus hyllyllä 6 muuta kaapelia = 0,76

Kaapelin korjattu kuormitettavuus = 55A / (1*0,76) = 72,4 A

AMCMK 3x25+16 cu kaapelin kuormitettavuus on 78 A.

Taulukosta B.52.11 PVC eristeisen 25mm² alumiini kaapelin, jossa kolmekuormitettu johdinta kuormitettavuus on 78A. Taajuusmuuttajan tehokaapelointiin voidaan valita AMCMK 3x25+16cu-kaapeli.

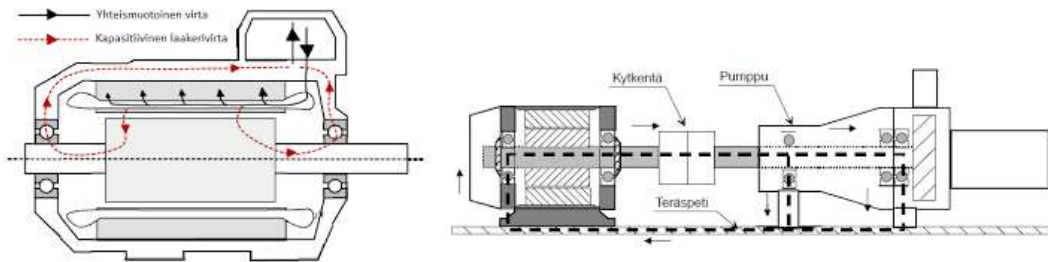
4 EMC-SUOJAUS JA HÄIRIÖT

Sähkölaitteiden häiriöpäästöjä ja häiriöiden sietoa on säädelty EMC-direktiivillä jo 1990 luvun alkupuolelta. Direktiivi on uusittu äskettäin ja uuden direktiivin soveltamisalaan sisältyy sähkölaitteiden lisäksi myös sähköasennukset. Sähköasennuksilta ei edellytetä samaa vaatimuksenmukaisuuden arviointimenetelmää eikä CE-merkintää kuten sähkölaitteilta, koska kiinteää sähköasennusta voidaan jatkuvasti muuttaa eikä sähköasennusta toisaalta siirretä paikasta toiseen. Sen sijaan sähköasennuksissa tulee noudattaa sähkölaitteen valmistajan antamia asennus-, käyttö- ja hoito-ohjeita sekä hyviä suunnittelu- ja asennuskäytäntöjä. Sähkölaitteen valmistajan on annettava tarpeelliset ohjeet EMC-vaatimusten huomioon ottamiseksi ja asennuksessa on noudatettava näitä valmistajan ohjeita. /11/

Taajuusmuuttajat aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä ympäristöön säteilemällä sekä johtumalla. EMC-häiriöt ja niiltä suojautuminen on tärkeää taajuusmuuttajia asennettaessa. Taajuusmuuttaja ei saa aiheuttaa tiettyjä rajoja ylittävää elektromagneettisia häiriöitä muuhun laitteistoon. Taajuusmuuttajan IGBT-polihohteiden ohjaustavasta johtuen moottorin jännite on pulssimaista ja pulssin nousunopeus on suuri. Pulssijännite voi nousta kaksinkertaiseksi nimellisestä jännitteestä moottorin liittimissä. /11/

4.1 Laakerivirrat

Jännitepulssit ja korkea kytkentätaajuus aiheuttaa suurtaajuisia virtapulsseja, tämä on haitallista moottorin laakereille. Kun pulssilla on tarpeeksi energiaa, metallia siirtyy kuulalaakerista ja vierintäpinnasta voiteluaineeseen. Ilmiötä kutsutaan kipinätyöstöksi (EDM, Electrical Discharge Machining). Pienikin kipinätyöstön aiheuttama poikkeama kerää uusia pulsseja ja muodostaa lopulta kipinätyöstökuopan. Koska kytkentätaajuus on korkea, muodostuu virtapulsseja suuri määrä. Tämän takia laakeri voi kulua hyvinkin nopeasti. Laakerivirtoja ei pystytä kokonaan estämään taajuusmuuttajakäytössä, mutta niiden taso voidaan pienentää, niin että niistä ei ole haittaa. Kuvassa (**Kuva 38.**) esitetty laakerien kautta sulkeutuvat laakerivirrat. /11/

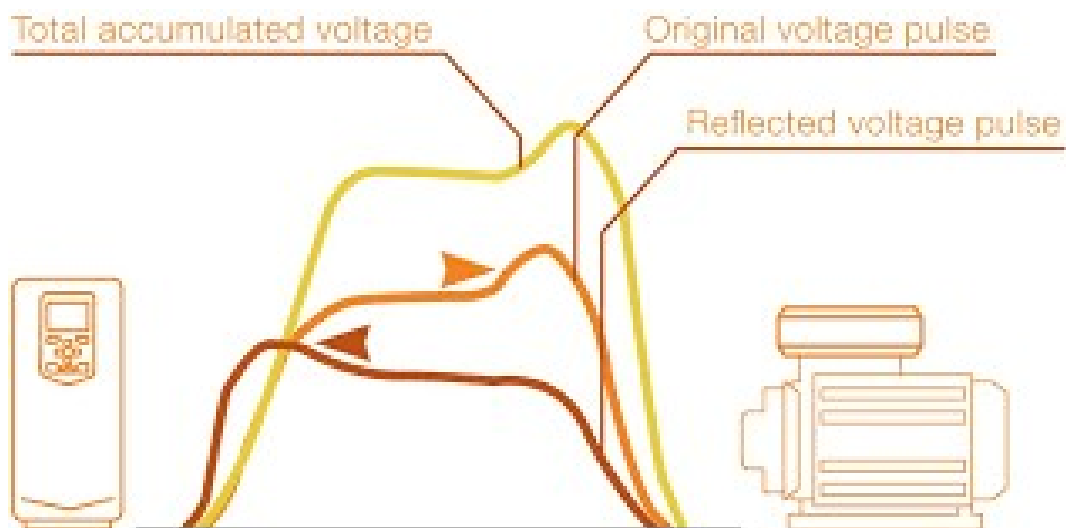


Kuva 39. kiertävät- ja laakerien kautta maahan sulkeutuvat laakerivirratt

Laakerivirratt voivat olla kiertäviä tai työkonetta kautta sulkuettavia virtoja (**Kuva 39.**). Laakerivirtojen ehkäisyssä hyvä maadoitus on tärkeä, se ehkäisee moottorin rungon potentiaalın nousua maahan nähden. Muita keinoja laakerivirtojen ehkäisyyn on eristetty laakerimoottorin toisessa päässä, joka katkaisee reitin maahan sulkeutuvalta laakerivirralla. /11/

4.2 Jännitepulssin vaikutus moottorin käämissä

Taajuusmuuttajan lähtöjännite koostuu nopeasti nousevista jännite pulsseista. Inverteristä lähtevä jännitepulssi etenee kulkuaaltona (**Kuva 40.**), joka heijastuu moottorin päästä kaksinkertaisella nousunopeudella $2xU_d$ arvoon. Tämä jännitteen nousunopeus ja amplitudin nousu kaksinkertaiseksi aiheuttaa ongelmia staattorikäämissä ja korostuu pitkillä moottorikaapeleilla >30 m. Staattorinkäämiin voi syntyä tilanne, jossa staattorin urassa olevien vyyhtien vierekkäisten käämilankojen potentiaaliero voi olla jännitepulssien maksimiarvon suuruinen. Tämä voi aiheuttaa kierrossulun moottorin staattorikäämiin, joka rikkoo moottorin. /11/

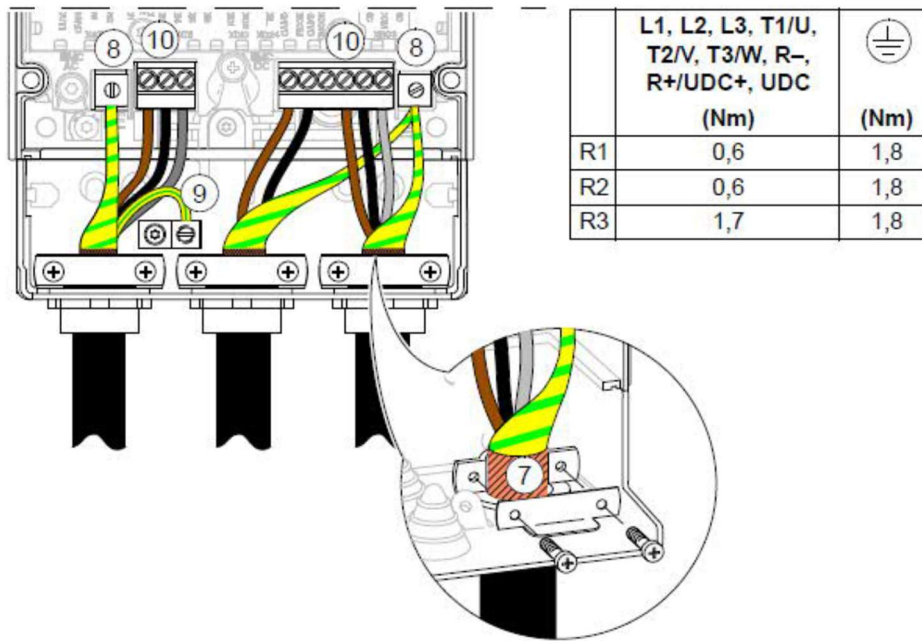


Kuva 40. jännitepulssin kulkuaalto

Jännitepulssien haittavaikutuksia voi ehkäistä lisäämällä taajuusmuuttajan ja moottorin väliin du/dt - tai sinisuodattimen. Du/dt -suodatin hidastaa jännitepulssin nousunopeutta. Tällöin jännitepulssi ei ehdi nousta moottorin navoilla kovin suureksi ennen kuin inverteristä heijastuva negatiivinen pulssi ehtii heikentämään sitä. /11/

4.3 EMC-suojaus säteilevät häiriöt

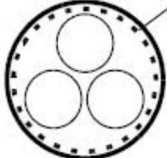
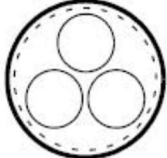
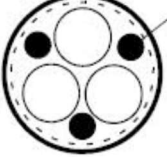
EMC-suojaus ympäristöön säteileviä häiriötä vastaan perustuu faradayn häkkiin. Faradayn häkki sulkee häkin sisäpuolelta aiheutuvat sähkömagneettiset häiriöt häkkiin sisään. Häkin toiminta perustuu varauksien asettumiseen johtavalle pinnalle. Laitteet ja kaapelit on suojattu metallikuorella, joka ympäröi koko laitteen 360° . Tämä kuori maadoitetaan maadoituskiskoon, jonka kautta häiriöt pääsevät sulkeutumaan maahan.



Kuva 41. ABB ACS880-0- taajuusmuuttajan tehokaapeleiden kytkentä ohje

Kuvassa (**Kuva 4 1**) ABB ACS880-0- taajuusmuuttajan tehokaapeleiden kytkentä ohje ja kuvassa (**Kuva 42.**) asennukseen suositellut kaapelit. /6/

Suosittelut tehokaapelityypit

	Symmetrinen, suojattu kaapeli, jossa on kolme vaihejohtinta ja konsentrisen PE-johdin suojavaippana. Suojavaipan tulee täyttää standardin IEC 61439-1 vaatimukset, katso sivu 67. Tarkista paikalliset sähköturvallisuusmääräykset poikkeamien varalta.
	Symmetrinen, suojattu kaapeli, jossa on kolme vaihejohtinta ja konsentrisen PE-johdin suojavaippana. Erillinen PE-johdin tarvitaan, jos suojavaippa ei täytä standardin IEC 61439-1 vaatimuksia. Lisätietoja on sivulla 67.
	Symmetrinen, suojattu kaapeli, jossa on kolme vaihejohtinta, symmetrinen PE-johdin ja suojavaippa. PE-johtimen tulee täyttää standardin IEC 61439-1 vaatimukset.

Kuva 42. taajuusmuuttajan tehokaapelionnissa käytettävät kaapelit.

Taajuusmuuttajan asennuksessa pitää huomioida kojeiden EMC-suojaus. Kaapeli sekä kaapelien läpiviennit ovat kriittisiä EMC-suojauksen kannalta. Taajuusmuuttajan verkkokaapelissa häiriösuojatun kaapelinkäyttö ei ole välttämätöntä, mutta sen pitää olla konsentrisella suojajohtimella oleva kaapeli, esim. MCMK-tyyppistä kaapelia. Symmetrinen verkkokaapeli, jossa on pieni impedanssinen suojavaippa. Moottorin syöttökaapeliksi suositellaan EMCMK-tyyppistä kaapelia (**Kuva 43.**), jolla voidaan toteuttaa paras häiriösuojaus, joka vaaditaan EMC suojaluokassa C4. Teollisuudessa tehtävät asennukset luokitellaan EMC-luokkaan C3 ja C4, jonka vaatimukset tiukemmat, kuin luokan C1 ja C2 kotitalousympäristö. Vesilaitoksellakäyttö ympäristössä on luokka C3, joten siellä voidaan käyttää MCMK-tyyppistä kaapelia (**Kuva 44.**), jossa on 360° konsentrisen maadoitus. Kaapelien läpivienneissä käytettävissä läpivienneissä suojauksen pitää myös olla 360°. /10, 11/



Kuva 43. EMCMK-kaapeli



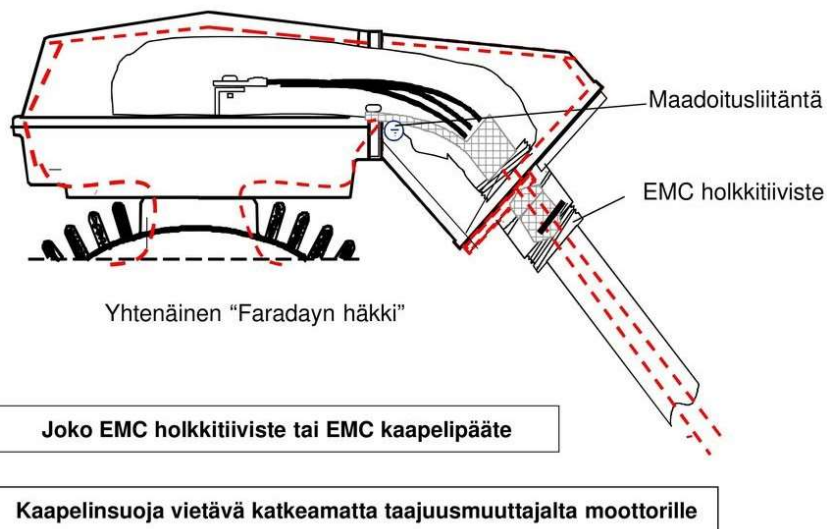
Kuva 44. MCMK-kaapeli



Kuva 45. EMC-holkki

Kuvissa (**Kuva 44.**) ja (**Kuva 45.**) yleisimmin käytetyt kaapelityypit. MCMK-kaapelissa vaihejohtimien ympärillä konsentrisen maadoituskupari. EMCM-

tyyppisessä kaapelissa on 360°:en kuparivaippa vaihejohtimien päällä, jolla saadaan paremmin suojattua taajuusmuuttajan säteilemät häiriöt, ettei ne aiheuta haittaa muille laitteille. Kuvassa (**Kuva 46.**) EMC-kaapelin läpivientiholkki, jolla kaapelin suojavaippa maadoitetaan laitteen runkoon. Holkissa on kynnet, jotka maadoittavat kaapelin suojavaipan 360° (**Kuva 45.**).

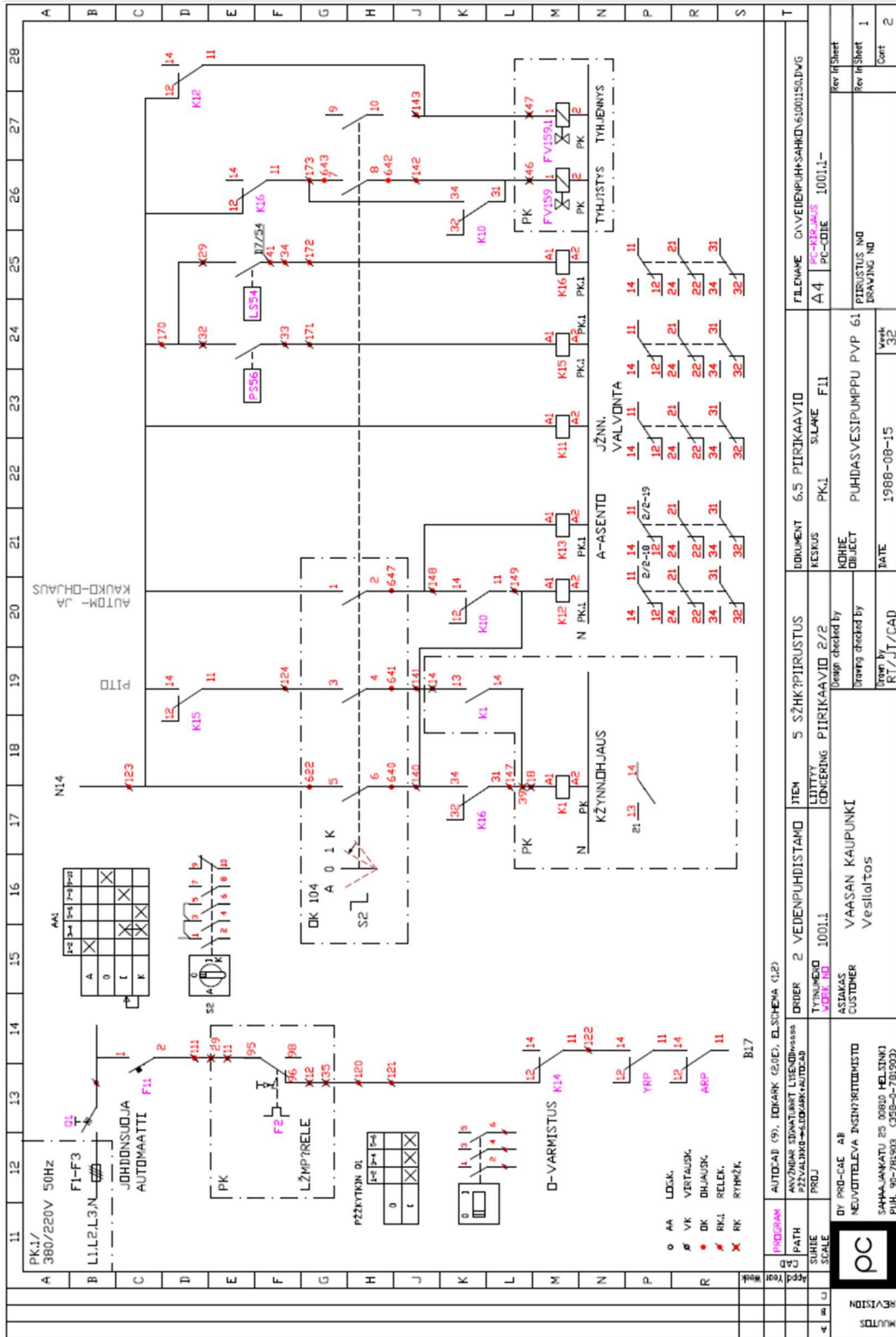


Kuva 46. moottorin EMC-suojaus

Faradayn häkin muodostuminen moottorilla. Syöttökaapeli maadoitetaan EMC-holkilla kytkentäkotelon runkoon, joka on myös sähköä johtavaa materiaalia (**Kuva 46.**) /11/

5 PÄÄ- JA PIIRIKAAVIO UUSI JÄRJESTELMÄ

Vanha järjestelmän pääpiiri koostuu edellä läpi käydyistä kojeista ja sen piirikaaviot on esitetty kuvissa 47 ja 48. Kytkinvaroke, kontaktori ja lämpörele. Matalapainepumpun ohjauspiirissä uuteen piirikaavioon ei tehdä suuria muutoksia. Käynnistyksen periaate on sama, mutta OK104-ohjauskuskekselle lisätään molemmilla pumpuille, omat paikallinäytöt pumpun virtauksen asetusarvon antamista varten. Lisäksi automaatiojärjestelmään lisätään kosketintieto pumpun käyttövalintakytkimen käsiajoasennosta. Liite 1.



Kuva 47. PVP61 vanha piirikaavio

6 LASKELMAT

6.1 Pumppaukseen kulutettu energia

Matalapainepumppujen vuotuinen käyttötuntimäärä on noin 4015 h/vuosi. Pumpun ottama virta pumppauksen aikana, on 55 A, josta laskemalla sähkötehoksi saadaan 29,7 kW yhtälö 15. Tehokerroin on oletettu pysyvän lähellä nimellistä. Vuositasolla sähköenergian kulutus on noin 128 MWh, se maksaa vuodessa noin 12800 euroa.

I_{55A} = mitattu virta

$$P_{m55A} = \sqrt{3} \cdot U_{nm} \cdot I_{55A} \cdot \cos\phi = 29.7 \text{ kW} \quad (15)$$

$$P_{m55Aaks} = P_{m55A} \cdot \eta = 27.7 \text{ kW} \quad (16)$$

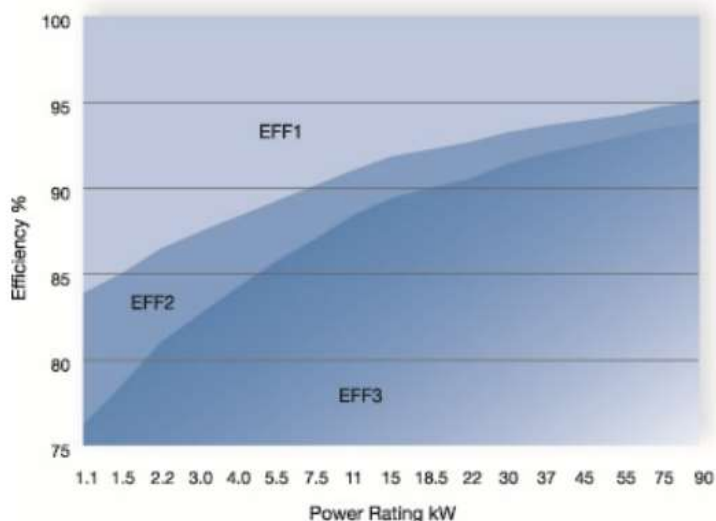
Sähköenergian säästöä ei saada suorankäynnistyksen muuttamisesta taajuusmuuttajakäytöksi, koska taajuusmuuttajasta aiheutuu lisähäviötä. Taajuusmuuttajakäyttö tuo paljon muita hyötyjä, mitä suoralla käytöllä ei ole mahdollista toteuttaa, käynnistysvirta pienenee sekä prosessin säätö monipuolistuu.

Säästöä sähköenergian kulutuksessa saadaan pienentämällä pumpun pesää, juoksupyörää, sähkömoottorin kokoa sekä nostamalla pumpun nimellistä kierrosnopeutta. Pumppaukseen vaadittu teho on noin 30 kW, vanha moottori on ylimitoitettu tähän käyttöön. Vanha pumppu on jo noin 50 vuotta vanha, keskipakopumppujen hydraulikka on kehittynyt paljon 50 vuoden aikana.

6.2 Sähkömoottorin ja keskipakopumpun hyötysuhde

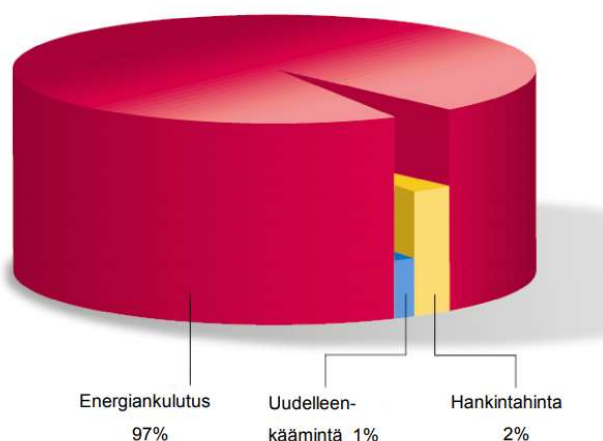
Teollisuudessa pyörivät oikosulkumoottoreilla toimivat pyörivät koneet kuluttavat noin 65 % kaikesta teollisuudessa käytetystä sähköenergiasta. Moottorin hankintahinta on verrannollinen sen 8-12 viikon sähkönkulutukseen. Paremman hyötysuhteen omaavien moottorien hankintahinta on suurempi kalliimpien valmistusmenetelmien sekä materiaalien takia. Moottorin hyötysuhteen kasvattaminen 3 %

yksikköä alentaa häviöitä 40 %. Sähkömoottorit on jaettu hyötysuhteen perusteella neljään eri IE-luokkaan (**Kuva 49.**).



Kuva 49. IE-hyötysuhdeluokat 4-napaiset moottorit 1.1-90 kW

Sähkömoottorin hankintahinta muodostaa vain pienen osan moottorin koko elinkaaren kustannuksista. Suurin osa moottorista aiheutuvista kustannuksista syntyy sen kuluttamasta sähköenergian hinnasta. Jo pienet erot moottorin hyötösuhteessa maksaa hankintahinnassa syntyvän eron takaisin pienentyneenä energian kulutuksena. Luotettavilla korkean hyötysuhteen moottoreilla päästään pienempiin elinkaarikustannuksiin (**Kuva 50.**). /11/



Kuva 50. sähkömoottorin elinkaarikustannukset

6.3 Suorakäynnistyksen aiheuttama jännitteen alenema

Oikosulkumoottorin suorakäynnistys aiheuttaa sähköverkkoon jännitteen aleneman, jonka suuruuteen vaikuttaa syöttöverkon jäykkyys, muuntajan sekä syöttökaapeleiden koko. Käynnistysvirran tehollisarvo on normaalisti noin 6-8 kertaa suurempi kuin moottorin nimellisvirta. Moottorin käynnistyksen aiheuttama jännitteen aleneman aiheutuu suurimmaksi osaksi moottorin ottamasta loisivirrasta, eli moottorin ottamasta reaktiivisesta tehosta.

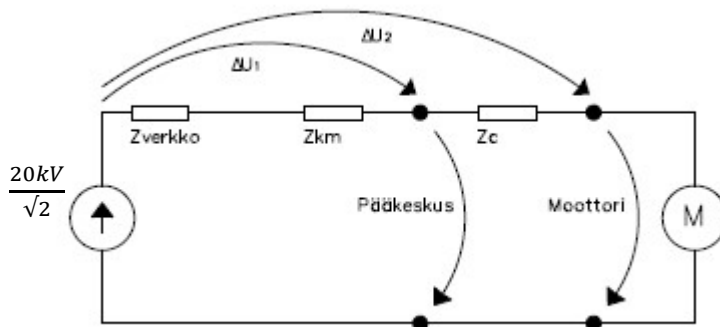
Moottorin käynnistyksessä ottamaan käynnistysvirtaan vaikuttaa käynnistettävän moottorin koko, mutta ei vastamomentin suuruus. Suuri käynnistettävä massa aiheuttaa käynnistyksen ajan pidentymisen, joka pidentää käynnistysvirran ajan keston. Raskaiden käyttöjen suorassa käynnistyksessä pitää ottaa huomioon käynnistysvirran moottorille aiheuttamat lämpövaikutukset.

Moottoria käynnistettäessä pysähdyksistä sen jättämä käynnistyshetkellä on suurimmillaan ja moottori vastaa käynnistyshetkellä oikosulussa olevaa muuntajaa. Heti käynnistyksen jälkeen jättämä ja käynnistysvirta alkaa pienenemään, kun moottori alkaa pyörimään ja saavuttamaan staattorin pyörivää magneettikenttää.

/12/

6.3.1 Tarkasteltavan verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä

Kuvassa (**Kuva 51.**) on esitetty matalapainepumppua syöttävän verkon yksivaihe sijaiskytkentä sekä jännitteen alenemaan vaikuttavat impedanssit. Syöttöverkon jännite on 20 kV. Muuntajan etäisyys pääkeskukselta on noin 15m ja muuntajan nimellisteho on 1000 kva:ta. Vaasan sähkön ilmoittama kolmivaiheinen oikosulkuvirta vesilaitoksen liittymäpisteessä 20 kV puolella on 1784 A. Näillä lähtötiedoilla on laskettu suorankäynnistyksen aiheuttama jännitteen alenema pääkeskuksen kiskolla sekä moottorin navoissa.



Kuva 51. verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä

Z_{verkko} =syöttöverkon impedanssi

Z_{km} =muuntajan impedanssi

Z_c =kaapelin impedanssi

Kuvassa (**Kuva 51.**), ΔU_1 on verkon ja muuntajan käynnistyksessä aiheuttama jännitteen alenema pääkeskuksella sekä ΔU_2 on kokonaisjännitteenalenema moottorin navoilla. Moottorin navoissa käynnistyshetken jännitteen alenema on verkon, muuntajan, sekä moottorikaapelin impedanssien yhteenlaskettu impedanssi.

6.3.2 Moottorin käynnistyksen aiheuttama jännitteenalenema

Laskelmissa on tarkasteltu moottorin käynnistyksen aiheuttamaa jännitteenalenemaa pääkeskuksen kiskolla sekä moottorin navoissa. Jännitteenalenema laskelmissa moottorin $\cos\phi$:nä on käytetty arvoa 0.35. Jännitteenaleneman eri paikoissa aiheuttaa suurimmaksi induktiivinen loisvirta. Loisvirran aiheuttama jännitteenalenema on noin 29 kertainen verrattu resistanssin aiheuttamaan jännitteenalenemaan pääkeskuksen kiskolla. Pääkeskuksen kiskon jännitteenalenema on mukana laskelmissa, koska se vaikuttaa koko laitoksen sähköverkkoon. Lisäksi on laskettu käynnistyksen aiheuttama sysäysvirta, jonka suuruus voi olla $\sqrt{2} \cdot I_s$. Sysäysvirran vaikutusta ei yleensä oteta huomioon jännitteenalenemalaskelmissa, koska se vaimenee muutaman jakson aikana. Sysäysvirran vaikutus laskettiin pääkeskuksen kiskolla, koska laitoksen loistevalaisimet välähtävät nopeasti, matalapainepumpun käynnistyessä.

Jännitteenalenema-yhtälö:

$$\Delta U = R * I * \cos\phi + X * I * \sin\phi \quad (17)$$

R=resistanssi

X=reaktanssi

$\cos\phi$ =tehokerroin

ΔU =jännitteenalenema

Syöttöverkon lähtötiedot:

$I_{k3} = 1784 \text{ A}$, syöttöverkon kolmivaiheinen oikosulkuvirta

$U_s = 20,5 \text{ kV}$, syöttöverkon nimellisjännite

$U_{nm2} = 400 \text{ V}$, muuntajan toisiojännite

syöttöverkon kolmivaiheinen oikosulkuteho:

$$S_{kv} = \sqrt{3} * U_s * I_{k3} = 63,36 \text{ Mva} \quad (18)$$

syöttöverkon impedanssi:

$$Z_{\text{verkko}} := \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot I_{k3}} = 6.6 \Omega \quad (19)$$

syöttöverkon impedanssin redusointi 400V puolelle:

$$Z_{\text{verkko400v}} := Z_{\text{verkko}} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_s} \right)^2 = 0.0025 \Omega \quad (20)$$

syöttöverkon oikosulkuresistanssi ja reaktanssi, verkon oikosulkuresistanssi 10%:ia reaktanssista:

$$R'_{sv} = R_{sv\%} \cdot Z_{\text{verkko400v}} = 0.00025 \Omega \quad (21)$$

$$X'_{sv} = \sqrt{Z_{\text{verkko400v}}^2 - R'_{sv}{}^2} = 0.0025 \Omega \quad (22)$$

muuntajan nimellisarvot:

$z_{k\%} = 5,5 \%$, muuntajan oikosulkuimpedanssin prosenttiarvo

$U_{n2} = 400 \text{ V}$, muuntajan toisio nimellijännite

$P_{kn} = 10,2 \text{ kW}$, muuntajan nimellinen kuormitushäviö

$S_n = 1000 \text{ Kva}$, muuntajan nimellisteho

muuntajan sijaiskytkennän komponentit oikosulkuimpedanssi Z_k , -reaktanssi X_k ja -resistanssi R_k :

$$Z_k = z_{k\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.0088 \Omega \quad (23)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 0.0086 \Omega \quad (24)$$

$$R_k = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.001632 \Omega \quad (25)$$

kolmivaiheinen oikosulkuvirta pääkeskuksen kiskolla, jonka suuruuteen vaikuttaa syöttöverkon sekä muuntajan oikosulkuimpedanssit:

$$I_{k3m} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R'_{sv} + R_{km})^2 + (X'_{sv} + X_{km})^2}} = 20.4 \text{ KA} \quad (26)$$

moottorin käynnistys- ja sysäysvirta:

$$I_n = 110A, \text{ moottorin nimellisvirta}$$

$$I_{startn} = 6, \text{ moottorin nimellinen käynnistysvirta 6 kertaa nimellisvirta}$$

moottorin käynnistysvirta

$$I_{start} = I_{startn} \cdot I_n = 660A \quad (27)$$

muuntajan ja verkon aiheuttama jännitteenalenema pääkeskuksen kiskolla:

$$\Delta U_m := (R_{km} + R'_{sv}) \cdot I_{start} \cdot \cos\phi_s + (X_{km} + X'_{sv}) \cdot I_{start} \cdot \sin\phi_s = 7.3V \quad (28)$$

vaihejännite pääkeskuksen kiskolla:

$$U_n = 230V, \text{ pääkeskuksen nimellinen vaihejännite}$$

$$U_{vpkstart} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} - (\Delta U_{mv}) = 223.6V \quad (29)$$

$$\Delta pkkisko\% = \frac{\Delta U_{mv}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} = 3.2\% \quad (30)$$

Moottorin syöttökaapelin aiheuttama jännitteenalenema, syöttökaapelin pituus 50m ja tyyppi MMK-3/150 cu:

$$r_c = 0,13 \Omega/km, \text{ kaapelin resistanssi}$$

$$x_c = 0,08 \Omega/km, \text{ kaapelin resistanssi}$$

$$l_c = 0,05 km, \text{ kaapelin resistanssi}$$

syöttökaapelin aiheuttama jännitteenalenema:

$$\Delta U_c = (l_c \cdot r_c) \cdot I_{start} \cdot \cos\phi_s + (l_c \cdot x_c) \cdot I_{start} \cdot \sin\phi_s = 3.98V \quad (31)$$

jännitealenema moottorin navoilla käynnistys hetkellä:

$$\Delta U_M := [(l_c \cdot r_c) + R'_{sv} + R_{km}] \cdot I_{start} \cdot \cos\phi_s + [(l_c \cdot x_c) + (X'_{sv} + X_{km})] \cdot I_{start} \cdot \sin\phi_s = 11.3V \quad (32)$$

$$\Delta UM\% = \frac{\Delta UM}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} = 4.7\% \quad (33)$$

sysäsvirran aiheuttama jännitteen alenema pääkeskuksen kiskolla:

$$I_{sta} = 660A, \text{ moottorin käynnistysvirta}$$

$$I_{sys} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{start} = 1866.8 A \quad (34)$$

$$\Delta U_{mv} := (R_{km} + R'_{sv}) \cdot I_{sys} \cdot \cos\phi_s + (X_{km} + X'_{sv}) \cdot I_{sys} \cdot \sin\phi_s = 20.7 V \quad (35)$$

vaihejännite pääkeskuksen kiskolla:

$$U_{Vpkstart} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} - \Delta U_{mv} = 210.2 V \quad (36)$$

$$\Delta U_{pkisys\%} = \frac{\Delta U_{mv}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} = 9.0 \% \quad (37)$$

Jännite putoaa moottorin käynnistyshetkellä pääkeskuksen kiskolla nimellisestä 230 Vac vaihejännitteestä, 223.6 V:iin yhtälö (29). Jännitteenalenema käynnistyshetkellä on noin 3.2 %. (yhtälö 30). Alle 4 %:iin jäävä jännitteenaleneman ei pitäisi aiheuttaa ongelmia muille samaan verkkoon kytketyille laitteille. Moottorin käynnistyksessä ottama sysäysvirta aiheuttaa pääkeskuksen kiskolle 20.7 V:in aleneman vaihejännitteessä yhtälö (35). Tämä on todennäköisesti syy, miksi laitoksen loistevaloissa voidaan havaita nopea välähdys moottorin käynnistyessä.

7 KOMPONENTTIEN VALINNAT JA KUSTANNUKSET

7.1 Sähkömoottori ja pumppu

Komponenttien valinnassa vastaan tuli asia, mikä täytyi huomioida vanhojen suoraikäynnisteiden oikosulkumoottorien muuttamisessa taajuusmuuttajakäyttöiksi. Nykyisten moottoreiden staattorikämmien eristeiden jännitelujuus ja siihen vaikuttava eristeluokka ei välttämättä riitä taajuusmuuttajakäyttöön. Moottoreiden eristeluokka on B, taajuusmuuttajakäyttöön suositellaan F luokan käämitystä.

7.2 Uuden käytön mitoitus

Koska sähkömoottori joudutaan uusimaan vanhan moottorin staattorikämmien heikkojen eristeiden takia ja pumppu on käytössä loppuun kulunut, se on asennettu vuonna 1971 ja se on myös kerran peruskorjattu syöpymisen johdosta. Vuonna 1970 ennustettiin, että Vaasan kaupungin veden kulutus kaksinkertaistuisi 30:n vuoden aikana, mutta tällä hetkellä kulutus onkin samalla tasolla, mitä se oli vuonna 1970. Tämän takia vanha pumppukäyttö on ylimitoitettu, ja sen takia hyötysuhde on huono.

Kappaleessa 5.1 on laskettu moottorin verkosta ottama sähköteho, noin 30 kW, joka laskettiin moottorin todellisesta kuormitusvirrasta ~55 A. Moottorin nimellisteho on 55 kW, nimellisvirta 110 A ja nimellisnopeus on 985 rpm. Vanhojen dokumenttien mukaan matalapainepumppuun alun perin suunnitellun moottorin teho oli 110 kW ja nimellinen pyörimisnopeus 1500 rpm. Siitä miksi ja missä vaiheessa moottorin kokoa on pienennetty, ei löytynyt dokumenttia.

Pumpun ja moottorin mitoituksessa on todennäköisesti yritetty huomioida kaupungin vedenkulutuksen kasvua monta vuosikymmentä eteenpäin. Vuorokautinen vedenkulutus vuonna 1960 oli samalla tasolla, mitä se on nyt eli noin 14000 m³/vuorokausi. Vaikka kaupungin väkiluku on kasvanut ja sen myötä asukkaiden veden kulutus noussut, niin samalla on hävinnyt paljon vettä käyttävää teollisuutta. Tämän vuoksi kaupungin vedenkulutus on pysynyt samantasoisena viimeiset 40 vuotta.

Vesä											
Q	12000	H mon	40	H vesi	m	NPSH	Pumpattava neste	Vesi	Tarjoukseen		
n	1480	N	87140	N moottori	110	115	Käiv. aks.	Imuyhd.	Paineyhd.	Käsitteijä	ins. Kolhonen/HÄ
Barokodi	DIN-HP10	Tiiv. pesä	4009	Tiiv. neste			Paine kp/cm ²	Tiiviste	Lehtitehto	Lähtöno	Pölylys 2)
Käyttökone	HXUR-565B2B3	Toim. + Ei toim. - Korhuloan		Merkkiä	N	110	kw	n	r/min	Laskusviite	
Juoksupyörän perusm.	450	Koneistetaan	390-380	Koepaine kp/cm ²	6	ML	22	Asiaperit	3SF-300	Vert.n:o	Moott.lehti.le
Osajuttelo	6267-7103	Mittapiiri	6544302	Kokonaismäär.	225104			Suunn.aika	Piir. valmiit	Asennettu	
Pesä		Juoksupyörä		Tiiv.reng/ohj.		Akseli		Toimitukseen kuuluu + / ei kuulu -			

Kuva 52. PVP61

Kuvassa (**Kuva 52.**) dokumentissa, josta käy ilmi vanhan pumpun mitoitus arvoja. Pumpun nostokorkeus 40 m, pyörimisnopeus 1480 rpm ja teho 110 kW, mutta pumpulle asennettu moottorin teho on 55 kW ja pyörimisnopeus 985 rpm. Pumpun tuotto 55 kW moottorilla on 750 m³/h, (12500 l/min).

7.3 Tarjouspyynnöt pumppukäytöistä

Pumppukäytöstä pyydettiin samoilla lähtötiedoilla tarjoukset kolmelta pumppu-toimittajalta: Jukkola Systems, Grundfors sekä Sulzerilta.

- nostokorkeus 8 m
- virtaus 750 m³/h
- taajuusmuuttajakäyttöön soveltuva moottori
- keskipakopumppu

7.3.1 Jukkola Systems

Jukkola Systems tarjosi KSB:n spiraalipesällistä keskipakopumppua etanorm RG 250/330-, 22 kW:in moottoria (**Kuva 53.**) sekä Vacon100-3L-0046A-5-flowtaajuusmuuttajaa. Tällä kokoonpanolla päästään 8 metrin nostokorkeudella noin 700 m³/h.

Sähkömoottorin tekniset arvot:

- Moottorimalli: SIEMENS
- IE-hyötysuhdeluokka: IE3
- Nimellisteho - P2: 22 kW
- Syöttötaajuus: 50 Hz
- Nimellisjännite: 3 x 380-420D/660-725Y V
- Nimellisvirta: 69,0-64,0/39,5-37,0 A
- Cos phi - tehokerroin: 0.86
- Nimellisnopeus: 1000 rpm
- Hyötysuhde: IE3 93,9%

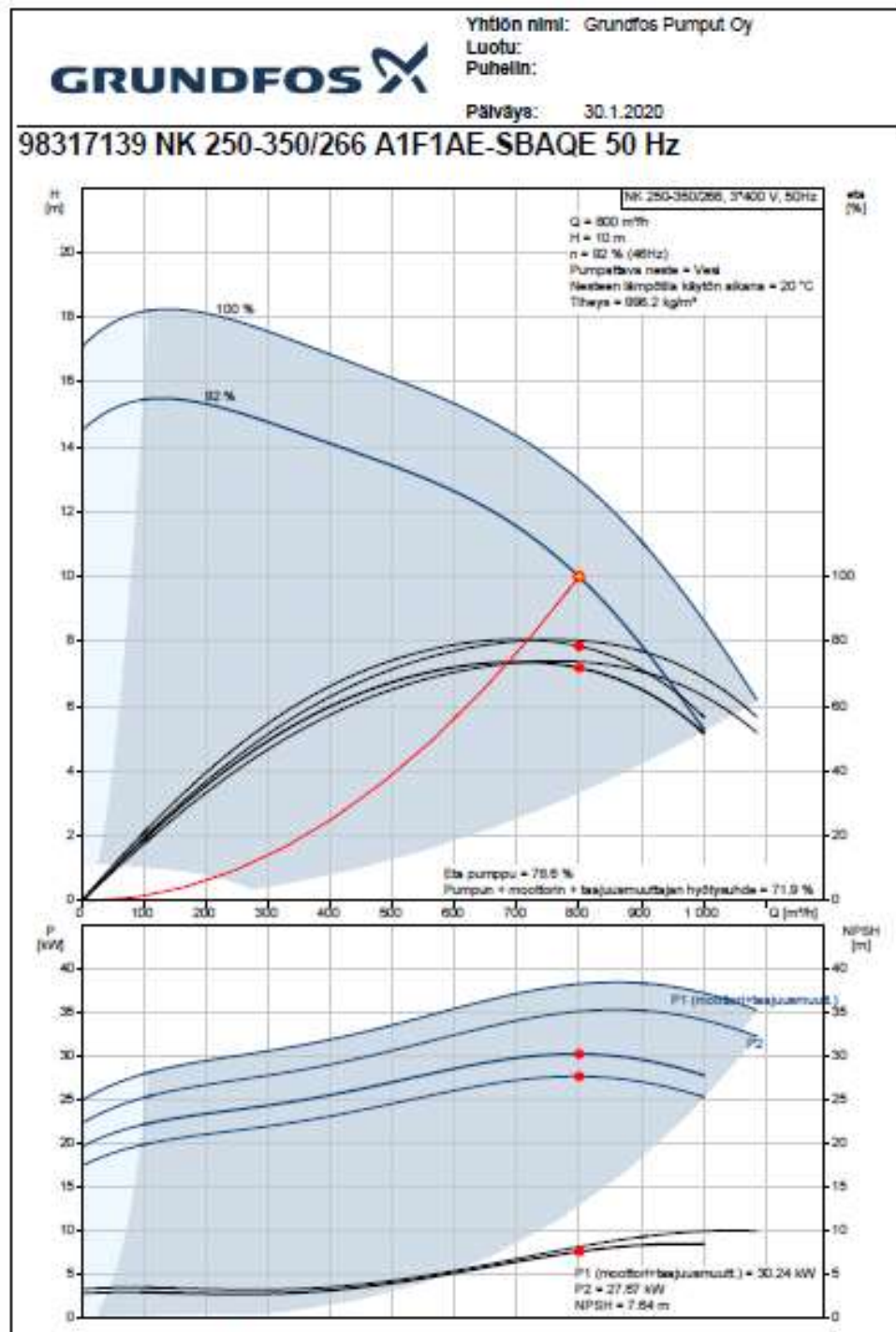
Sähkömoottorin tekniset arvot:

- Moottorimalli: SIEMENS
- IE-hyötysuhdeluokka: IE3
- Nimellisteho - P2: 37 kW
- Syöttötaajuus: 50 Hz
- Nimellisjännite: 3 x 380-420D/660-725Y V
- Nimellisvirta: 69,0-64,0/39,5-37,0 A
- Cos phi - tehokerroin: 0.86
- Nimellisnopeus: 1480 rpm
- Hyötysuhde: IE3 93,9%
- Moottorin hyötysuhde täydellä kuormalla: 93.9-93.9 %
- Moottorin hyötysuhde 3/4 kuormalla: 94.5-94.5 %
- Moottorin hyötysuhde 1/2 kuormalla: 94.4-94.4 %
- Napaluku: 4
- Kotelointiluokka (IEC 34-5): 55
- Eristysluokka (IEC 85): F

Pumpun tekniset tiedot:

- Pumpputietoihin perustuva pumpun nopeus: 1480 rpm
- Todellinen laskettu virtaama: 800 m³/h
- Pumpun kehittämä paine: 10 m
- Nimellinen juoksupyörä: 350 mm
- Todellinen. juoksupyörän halkaisija: 266 mm
- Akselin ensiötiiviste: BAQE
- Toisio akseliiviste: NONE
- Käyrätoleranssit: ISO9906:2012 3B
- Suurin teho P2 käyrällä: 35.3 kW

Grundforsin tarjouksen pumpun, sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan yhteenlaskettu hyötysuhde, toiminta pisteessä nostokorkeus 10m ja virtaus 800 m³/h on 71.9 % pumppukäyrä kuvassa **(Kuva 55.)**.



Kuva 55. Grundfors pumppukäyrä

7.3.3 Sulzerille

Sulzerin tarjosi keskipakopumppua malli: APP43-300 C, 30 kW:in moottorilla (**Kuva 56.**). Tällä kokoonpanolla päästään 8 metrin nostokorkeudella noin 740 m³/h



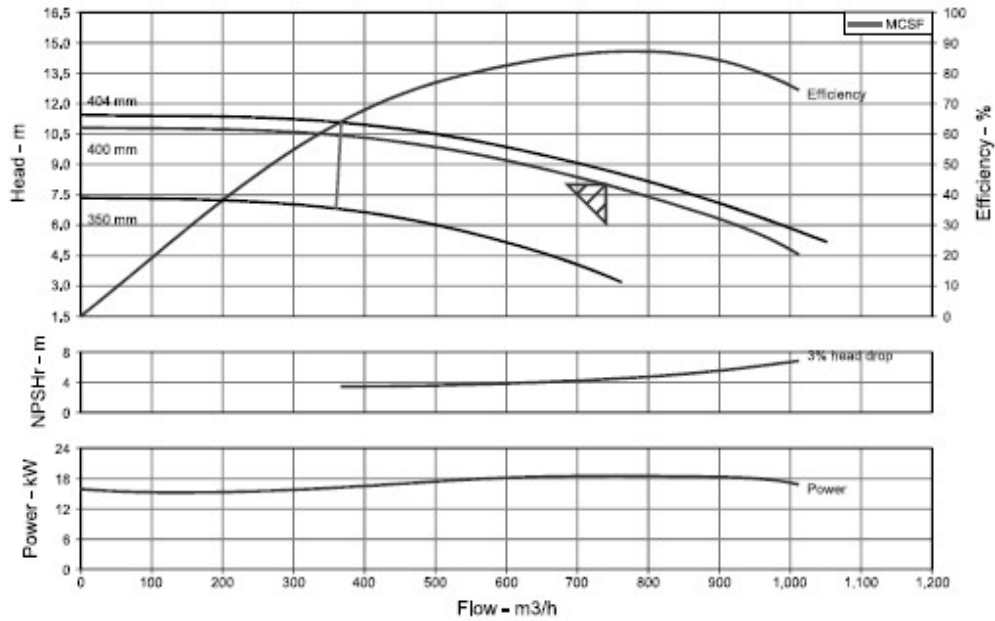
Kuva 56. Sulzer APP43-300-pumppu

Sähkömoottorin tekniset arvot:

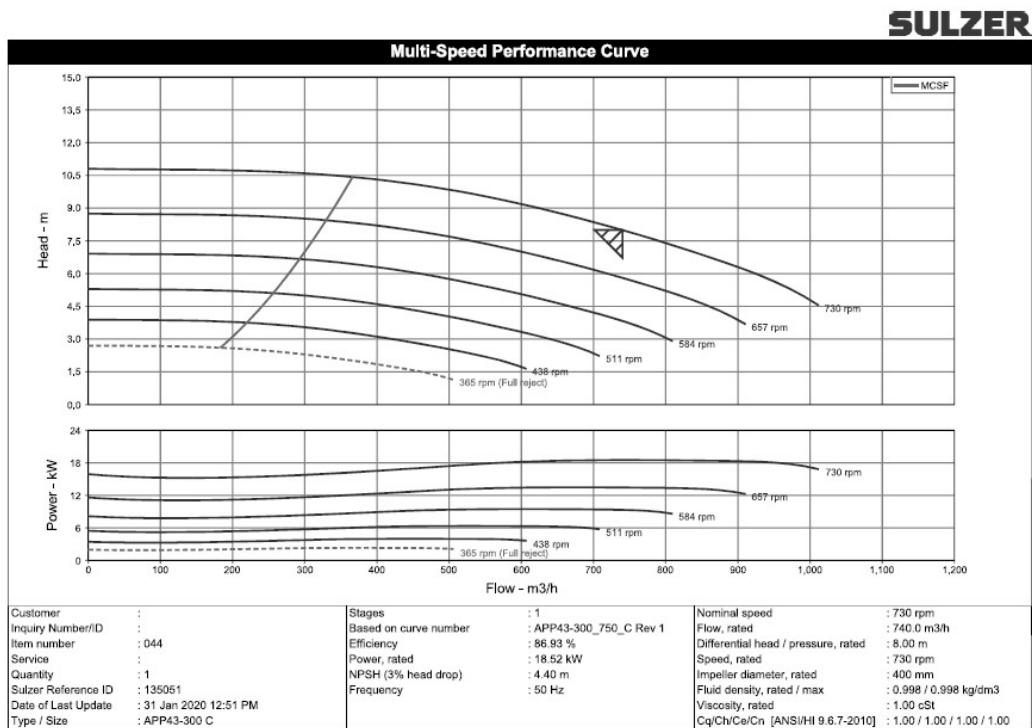
- Moottorimalli: ABB
- IE-hyötysuhdeluokka: IE2
- Nimellisteho - P2: 30 kW
- Syöttötaajuus: 50 Hz
- Nimellisjännite: 3 x 380-420D/660-725Y V
- Nimellisaika: 750 rpm
- Napaluku: 8
- Kotelointiluokka (IEC 34-5): 55

Pumpun tekniset tiedot:

- pumppumalli APP43-300C



Kuva 57. APP43-300 C-pumppukäyrä



Kuva 58. Sulzer-taajuusmuuttajakäyrä

Kuvassa (Kuva 58.) pumpun toiminta pisteet eri kierrosnopeuksilla sekä pumppukäyrä (Kuva 57.). Pyörimisnopeuden säätö alue on 438-730 rpm. Pumppauksen virtaus voidaan säätää välille 600-1000 m3/h.

7.4 Tarjousten yhteenveto

Tarjousten suurimmat eroavaisuudet ovat sähkömoottoreissa sekä pumpun nimellisessä pyörimisnopeudessa.

Taulukko 1. Tarjouksien vertailu

Sähkömoottori	Jukkola	Grundfors	Sulzer
teho/kW	22kW	37kW	30kW
Nn/rpm	1000rpm	1480rpm	750rpm
Pumppu			
nosto korkeus/m	8m	10m	8m
virtaus/m ³ /h	700m ³ /h	800m ³ /h	740m ³ /h

Kaikissa kolmessa tarjouksessa moottorin nimellinen kierrosnopeus on eri, nopeudet vaihtelevat välillä 750-1500 rpm. Pumppu tyyppi on sama yksivaiheinen keskipakopumppu. Sähkömoottorien koko vaihtelee välillä 22-37 kW. Mitoitettu pumpun nostokorkeus on 8-10m ja maksimi virtaus on 700-800 m³/h. Taulukossa koonti kolmesta eri tarjouksesta.

8 INVESTOINNIN KOKONAISKUSTANNUKSET

Investoinnin kustannukset koostuvat laitehankinnoista pumppu, moottori ja taajuusmuuttaja. Lisäksi moottorien kaapelointi pitää uusia ja lisätä turvakytkimet moottoreille. Ohjauspiiriin muutoksia on tehtävä taajuusmuuttajan tarvitseman virtausviestin takia.

Uuden pumpun asennuksen vaatimien putkistomuutoksien takia tarvitaan ulkopuolista urakoitsijaa. Putkistomuutoksiin menee aikaa noin 4-5 päivää matalapainepumppua kohti, yhteensä noin 8-10 päivää. Sähköasennukset ja taajuusmuuttajan käyttöönotto tehdään itse.

Arvio yhden matalapaine pumpun uusiminen maksaa:

- pumppu ja sähkömoottori 13000 €
- taajuusmuuttaja 1800 €
- kaapelit 800 €
- mA-paneelinäytöt ja mA-muuntimet 1400 €
- putkistomuutokset 5000 €

Kustannukset yhteensä per pumppu 22000 € ja molemmat pumput yhteensä 44000 €

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli matalapainepumpun suorakäynnistyksen korvaaminen taajuusmuuttajakäytöllä. Työn aikana vanhankäytön tutkimisen yhteydessä ilmeni asioita, jotka vaikuttivat työn etenemiseen.

Sähkömoottori ja pumppu on valmistettu vuonna -72 ja niillä on ikää jo noin 50 vuotta. Taajuusmuuttajatarjouksia pyydetessä kävi ilmi, että sähkömoottori ei välttämättä tule kestäämään taajuusmuuttajan korkeataajuista pulssimaista jännitettä, koska sen staattorikäämin eristeet eivät ole tarpeeksi kestävä. Lisäksi pumpun ja moottorin mitoitus dokumenteissa oli ristiriitaisuuksia. Moottori ja pumppu on alun perin mitoitettu 1500 rpm nimellinopeudelle mutta paikalle asennetun moottorin nimellinen pyörimisnopeus on 1000 rpm. Tämän takia ja koska pumppu on käyttöikänsä päässä, päätettiin uusia koko pumppukäyttöä.

Taajuusmuuttajakäyttö tuo matalapaine pumppaukseen virtauksen säätö mahdollisuuden, joka auttaa varautumiseen erilaisten häiriötilanteiden sattuessa. Alavesisäiliön puhdasvesialtaan pinta voidaan pitää korkeammalla tasolla, joten vettä on varastossa enemmän häiriötilanteen sattuessa. Lisäksi taajuusmuuttajan mahdollistama nopeuden säätö poistaa kokonaan pumpun käynnistysvirtapiikin ja sen aiheuttaman jännitteenaleneman.

Uusi pumppu mitoitettiin pumppauksen todellisen nostokorkeuden mukaan, tämän takia moottorikoko sekä pumppu pienenee huomattavasti verrattuna vanhaan käyttöön. Lisäksi uudenpumpun ja moottorin hyötysuhde on parempi mitä ne ovat tällä hetkellä. Taajuusmuuttaja tuo käyttöön lisähäviön mutta pumppauksen kokonaishyötysuhde paranee merkittävästi verrattuna vanhaan.

Opinnäytetyöhön kuului myös piirikaavioiden suunnittelu. Suunnittelussa haastavinta oli vanhojen kuvien tietojen tarkistaminen. Piirikaaviot suunniteltiin cads-ohjelmalla.

Teoreettinen osa opinnäytetyöstä käsittää suorankäynnistyksen aiheuttamaa jännitteen aleneman laskemisen vesilaitoksen sähköverkossa, sekä pumppaukseen kuluvan sähköenergian tutkiminen.

LÄHTEET

/1/ Verkkonen, V. 2017. Sähkömoottorikäytöt osa 2 epätahtikoneet, luentomoniste VAMK

/2/ Pölkki, O. 2015. Kontaktorien sekä kytkinvarokkeiden vaihtosuunnitelma ja lämpökuvaukset. Opinnäytetyö Savonia-ammattikorkeakoulu.

/3/ Jokinen, K. Teollisuuden ja voimalaitoksen sähköjärjestelmät, VAMK.

/4/ Saarela, M. 2017. Mittalaitteiden toiminnallisuuden ja korvattavuuden tarkastelu. Opinnäytetyö Savonia-ammattikorkeakoulu.

/5/ Ohtonen, O. 2007. Lämpötilan PID-säätö reaaliaikajärjestelmässä. Opinnäytetyö Kajaanin ammattikorkeakoulu.

/6/ Nyberg, T. 2015. Sähkömagneettinen suojaus. Diplomityö Tampereen teknillisen yliopisto.

/7/ Tiainen, E. 2017. D1-2012 käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Helsinki, Painokurki oy.

/8/ Keskinen, J. 2014. Keskipakopumpun ja hammaspyörä pumppujen rakenteet ja toimintaperiaatteet. Opinnäytetyö Satakunnan ammattikorkeakoulu.

/9/ FinnPri Oy Viitattu 26.10.2019.

<https://www.finnpri.com/tuotteet/virtausmittarit/ultraaani/neste/pt900>

/10/ Siemens magneettiset virtausmittarit Viitattu 11.8.2019.

<http://www.siemens.fi>

/11/ Jokinen, K. Säädetty sähkökäytöt, luentomoniste, VAMK.

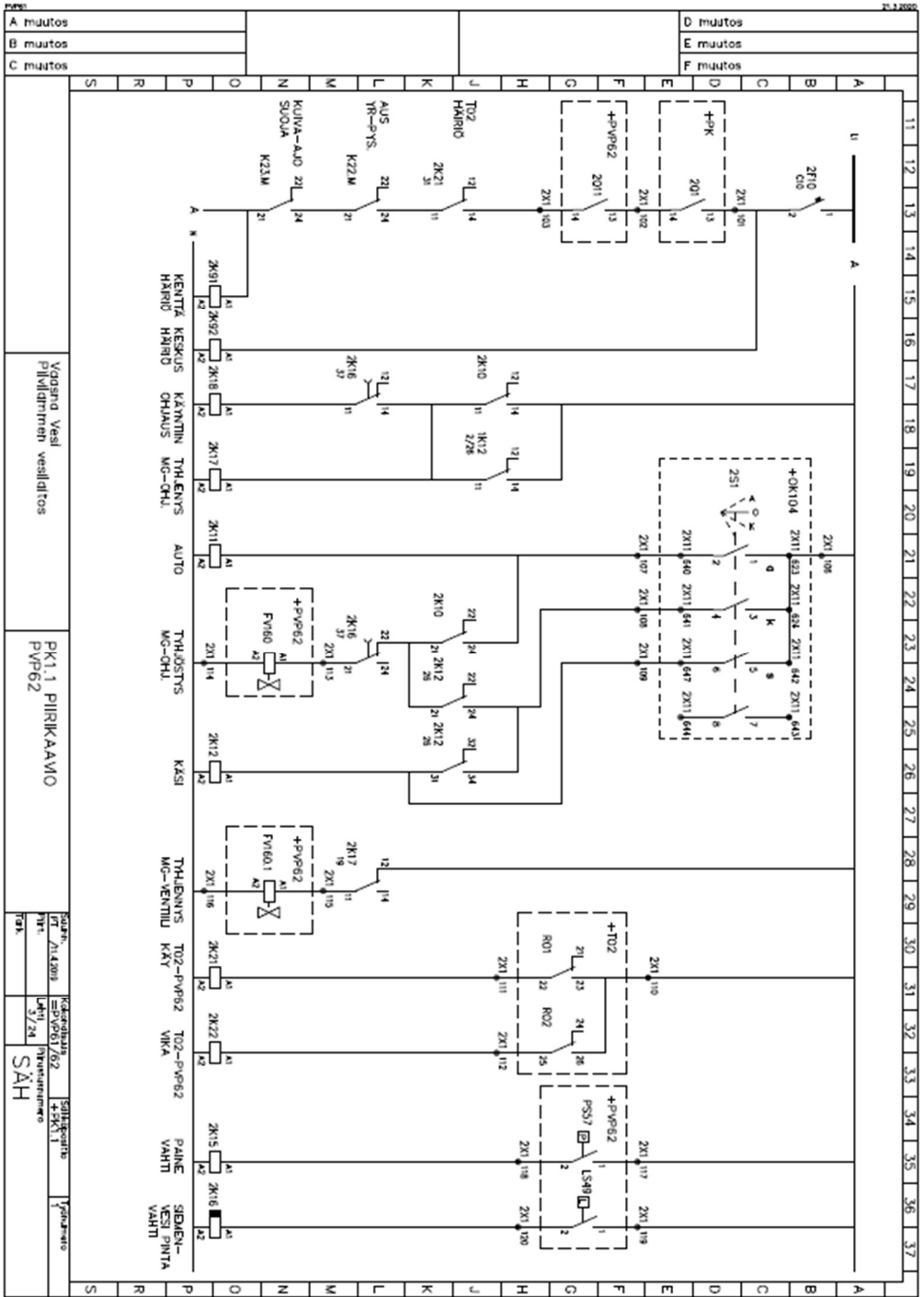
/12/ Jokinen, K. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus, luentomoniste, VAMK.

/13/ Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet, Tampere, Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

/14/ Scheider electric Tesys käyttöluokat iec 947-4 viitattu 21.1.2020.

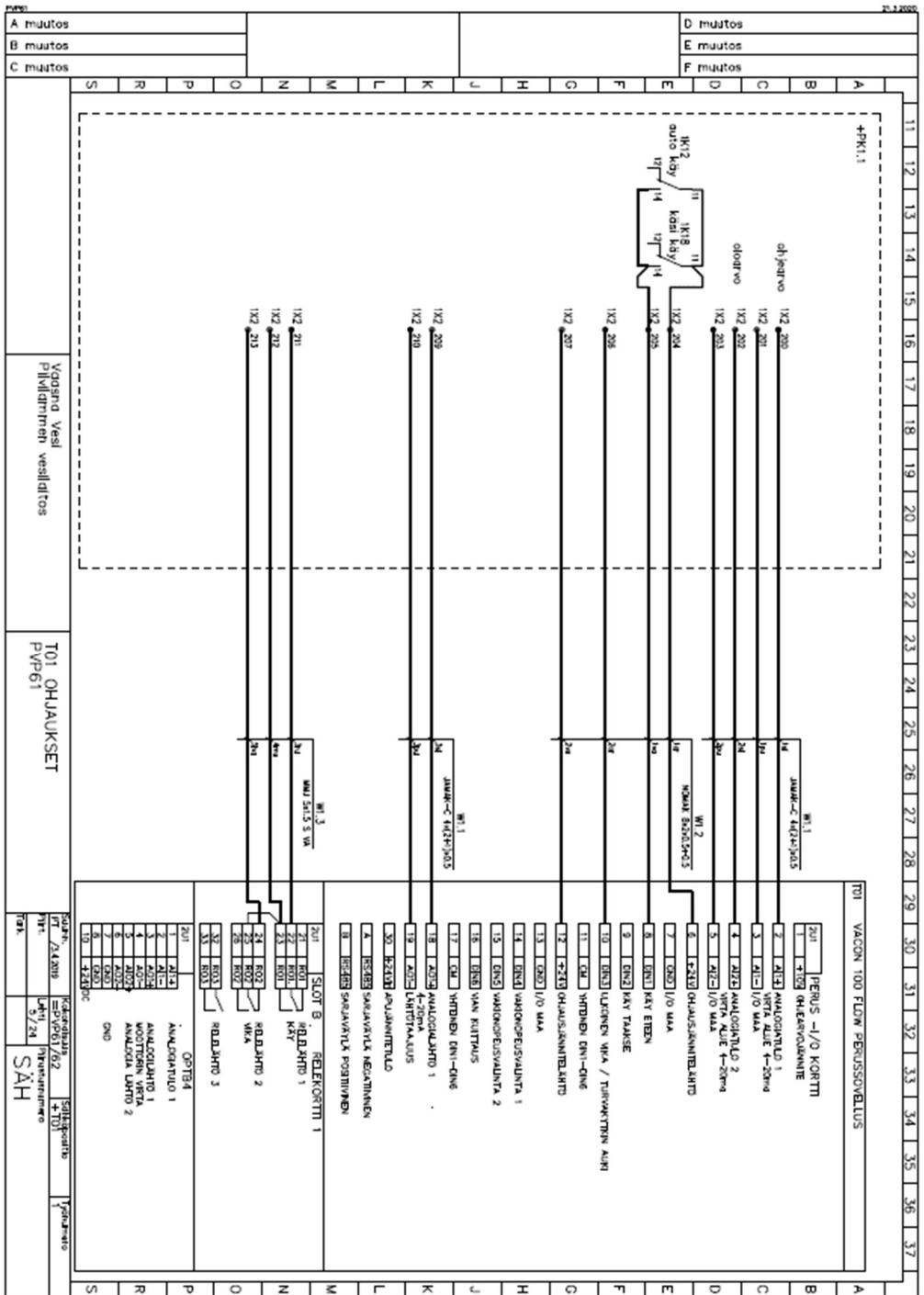
https://www.se.com/ww/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/333000/FA333698/fi_FI/Tesys%20k%C3%A4ytt%C3%B6luokat.pdf

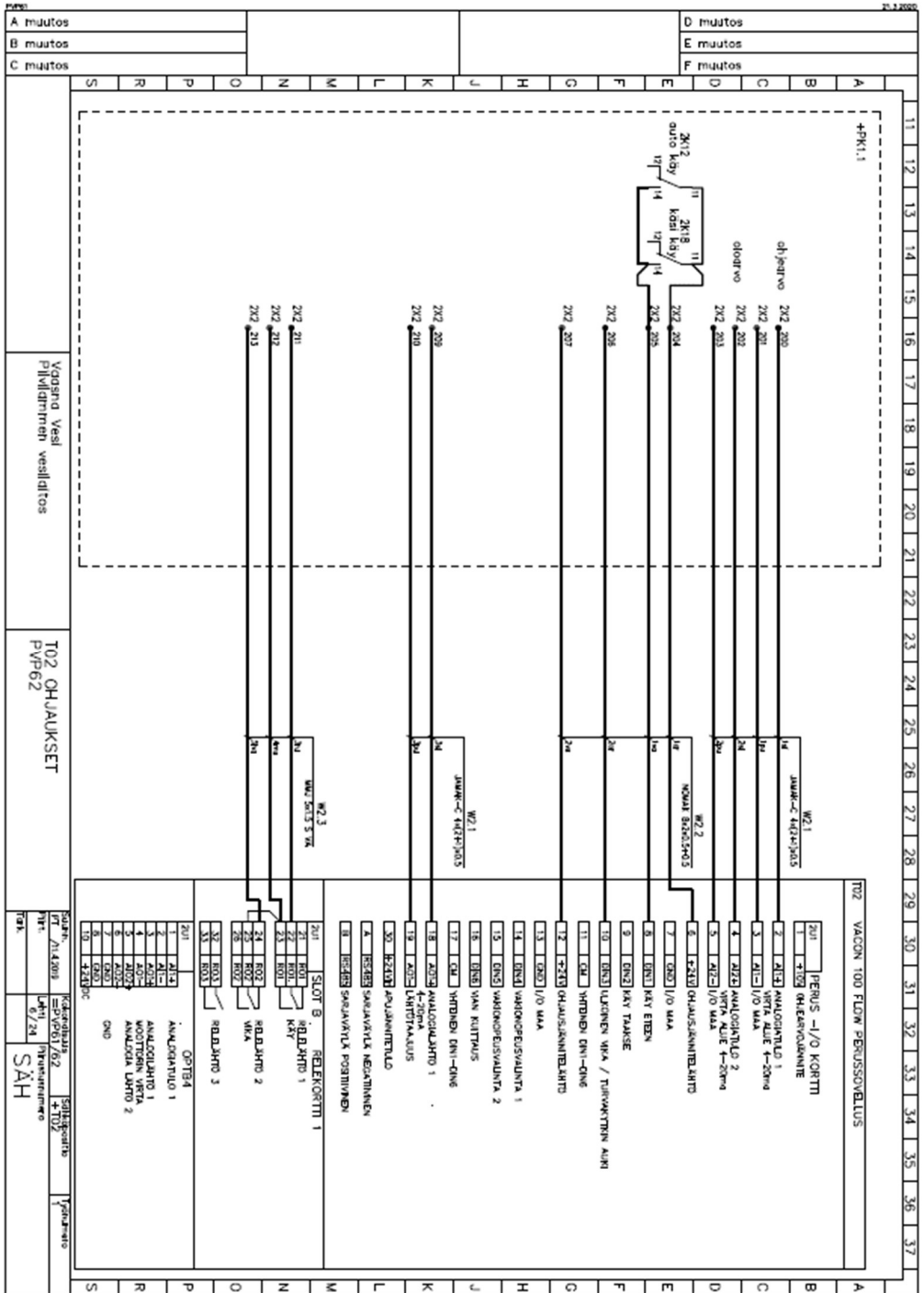
/15/ Jokinen, K. Suuntaaja tekniikka, luentomoniste, VAMK.

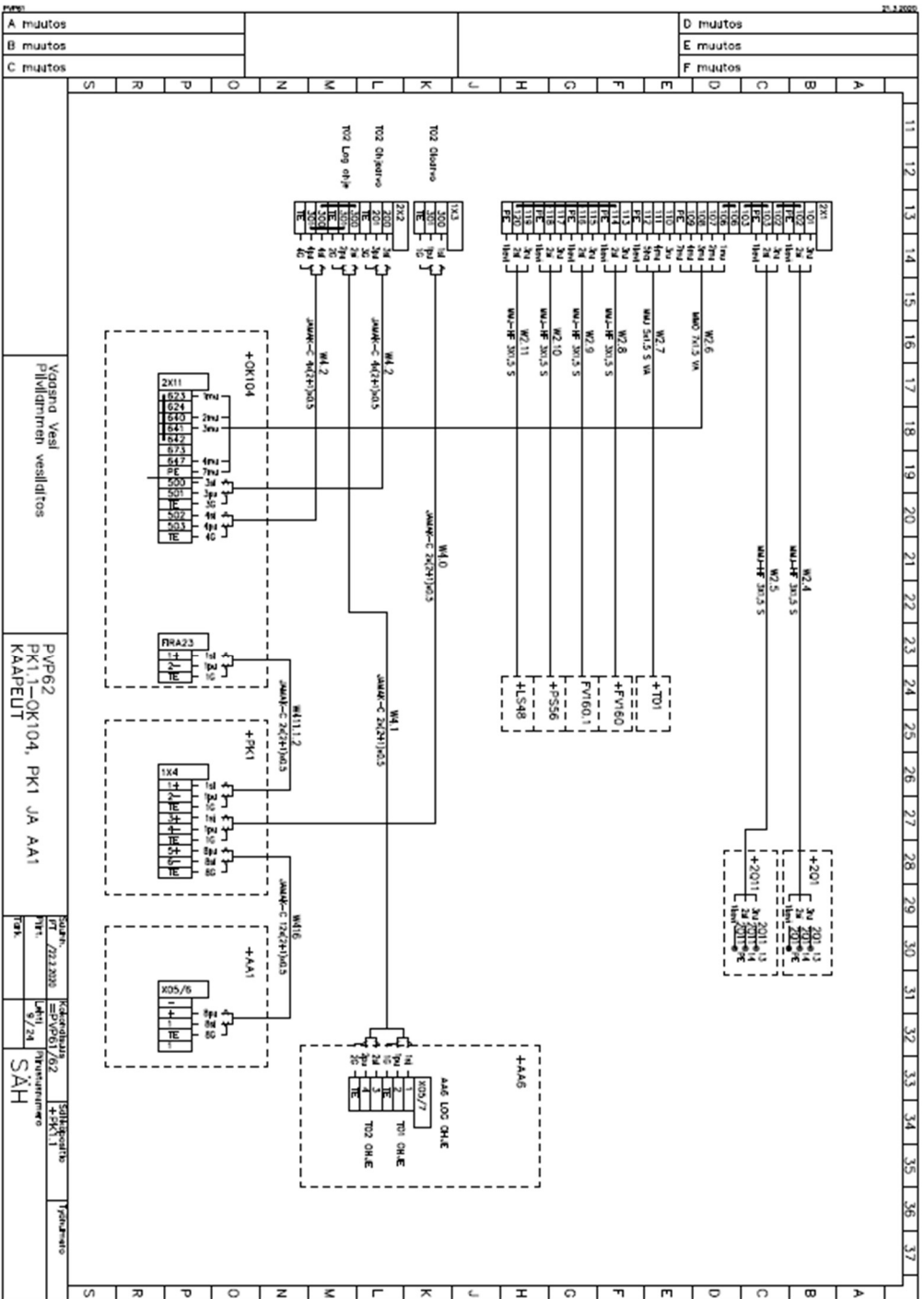


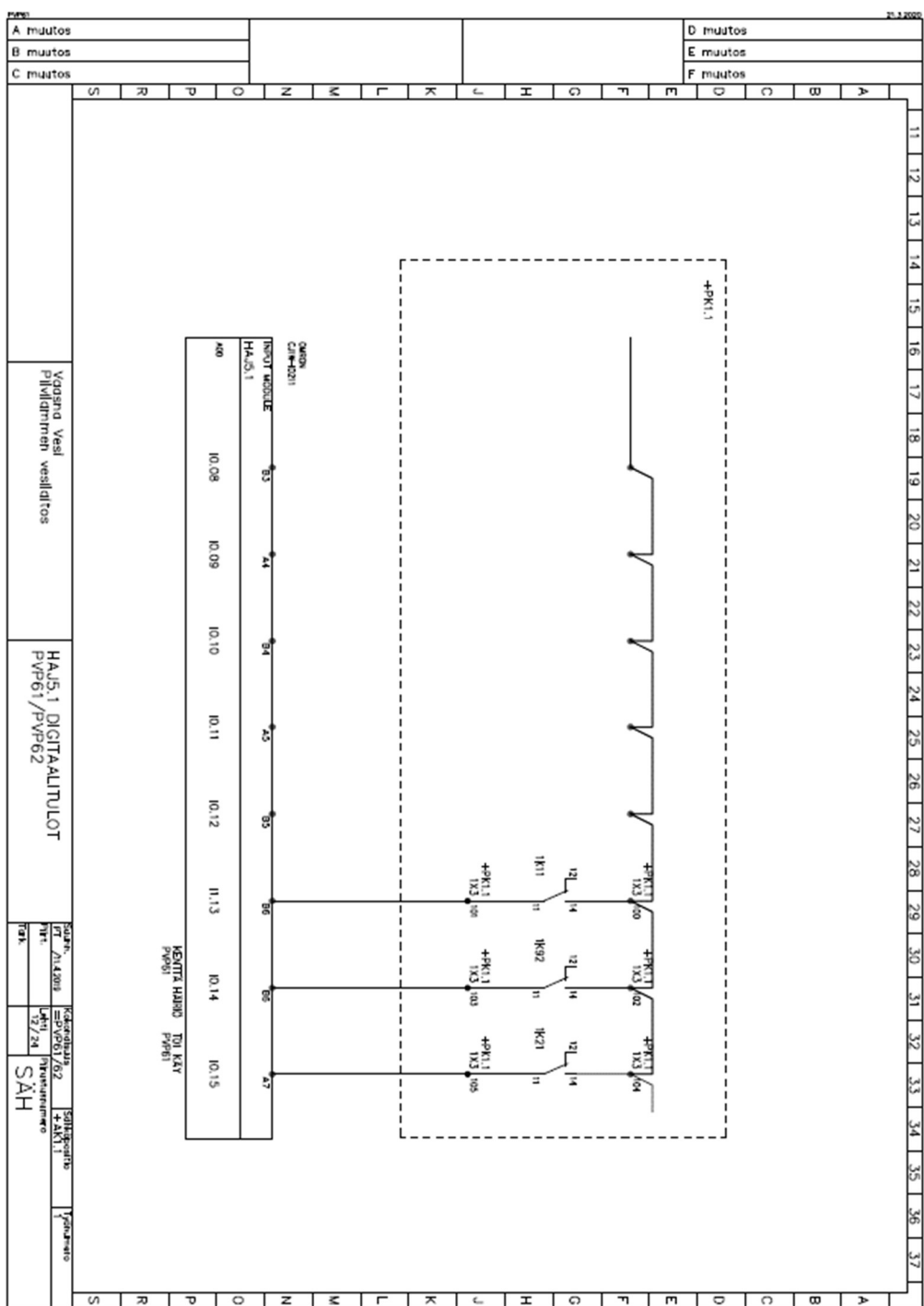
A muutos	D muutos
B muutos	E muutos
C muutos	F muutos

PK1.1 PIIRIKAAVIO	Käytännön PVP62	Käytännön PVP62/52	Säätökeskus +PK1.1	Ympäristö
Vaaraa Veäl Pillidistritin vesialdits	PK1.1 PIIRIKAAVIO	SAH		









Vasara Veal
Pillidatimein vesilaitos

HAUS 1 DIGITAALITULOT
PVP61/PVP62

Kaht. / 21.4.2005
Lp / 24
SAH

HOOTTA HARJO TOUKAY
PVP61

Suhtekorraldus
+AKT.1
Tehumato

