



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# Rekolan vesivoimalaitoksen teknillisen kehityksen suunnittelu

Sami Martinmäki

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2016  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

MARTINMÄKI SAMI:

Rekolan vesivoimalaitoksen teknillisen kehityksen suunnittelu

Opinnäytetyö 61 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Maaliskuu 2016

---

Opinnäytetyössä tutkitaan verkkovaihtosuuntaajan tuomia hyötyjä ja haittoja epätahtigeneraattoreilla toteutetussa UPM Kymmenen Jämsänkosken Paperitehtaan yhteydessä sijaitsevassa vesivoimalaitoksessa. Vesivoimalaitoksessa kahta verkkomagnetoitua epätahtigeneraattoria pyörittää kaksi makaavaa kaksoisfrancis-turpiinia. Verkkovaihtosuuntaaja mahdollistaisi turpiinin juoksupyörän pyörimisnopeuden säätämisen putouskorkeuden muuttuessa. Verkkovaihtosuuntaaja tuottaisi epätahtigeneraattorin tarvitseman loistehon, jolloin resistiiviset häviöt siirtotiellä ja muuntajassa pienenisivät. Epätahtigeneraattorit ovat vanhoja, joten ne eivät välttämättä kestäisi verkkovaihtosuuntaajan tuottamaa pulssimoduloitua jännitettä.

Työssä käydään läpi kuinka nopeussäädetyistä järjestelmästä saavutettu hyöty voidaan laskea. Työssä tähän on käytetty historiatietoja vesivoimalaitoksen tehontuotannosta ja järvien pinnankorkeuksista. Turpiinin simpukkakäyrästä voidaan selvittää turpiinin hyötysuhde eri tilanteissa. Työssä käytettiin historiatietoja vuoden ajalta ja laskettiin, kuinka paljon nopeussäädöstä olisi saanut hyötyä.

Muut verkkovaihtosuuntaajan tuomat hyödyt ja haitat huomioiden hankkeelle laskettiin kannattavuuslaskelma ja takaisinmaksusuunnitelma.

---

Asiasanat: verkkovaihtosuuntaaja, vesivoima, francis-turpiini, epätahtigeneraattori

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

**MARTINMÄKI SAMI:**

Designing of the technical development of the Rekola hydroelectric plant

Bachelor's thesis 61 pages, appendices 0 pages  
March 2016

---

The purpose of this thesis was to examine benefits and disadvantages that using regenerative inverter in hydroelectric plant causes. The examined hydroelectric plant is in connection with UPM Kymmene's Jämsänkoski papermill. In the hydroelectric plant there are two double Francis-turbines which provide power to two asynchronous generators. Regenerative inverters would enable the control of the rotation speed of turbines' runners. Regenerative inverters would provide reactive power for asynchronous generators. This would decrease losses in the transformer and cables. Asynchronous generators are old and they may not endure inverters PWM voltage.

The thesis explains how the benefit from the speed controlled system is calculated by using the history data of hydroelectric plants power production and levels of lake surfaces. Information from the turbine manufacturer is used to calculate turbines' efficiency in different situations. The history data was used to calculate the possible benefit of the speed controlled system.

A repayment schedule and a profitability calculation were calculated so that they would consider advantages and disadvantages of the regenerative inverter.

---

Key words: regenerative inverter, hydroelectric mill, asynchronous generator, Francis-turbine

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	TEORIA.....	8
2.1	Vesivoima.....	8
2.1.1	Francis-turpiini .....	10
2.1.2	Mallikoe ja simpukkakäyrästä.....	17
2.1.3	Yhdenmuotoisuus ja affiniteetilait.....	21
2.1.4	Kavitaatio .....	22
2.1.5	Turpiinin pyörimisnopeuden säätö .....	23
2.2	Oikosulkumoottori generaattorina .....	27
2.2.1	Epätahtigeneraattori .....	27
2.2.2	Staattorikäimityksen synnyttämä pyörivä magneettivuo .....	28
2.2.3	Epätahtigeneraattorin vääntömomentti .....	30
2.2.4	Epätahtigeneraattorin magnetointi.....	32
2.2.5	Epätahtigeneraattorin mekaaninen hyötysuhde .....	33
2.3	Verkkovaihtosuuntaaja.....	34
2.3.1	Verkkovaihtosuuntaajan toimintaperiaate.....	35
2.3.2	Suotimet ja yliaallot .....	39
3	REKOLAN VESIVOIMALAITOS .....	43
4	TEKNILLINEN KEHITYS .....	49
4.1	Turpiinin pyörimisnopeuden säätämisestä saatava hyöty .....	49
4.2	Laskennassa tehdyt oletukset .....	56
4.3	Turpiinin pyörimisnopeudensäätö putouskorkeuden muuttuessa.....	56
5	POHDINTA .....	59
	LÄHTEET .....	60

## LYHENTEET JA TERMIT

a	Johtopyörästön solukkeiden välinen avauma, m
AVP	Alaveden pinta, m
$c_1$	veden absoluuttinen nopeus siiven tuloreunalla
$c_2$	absoluuttinen nopeus siiven lähtöreunalla
$c_4$	absoluuttinen nopeus imuputkessa
$c_{u1}$	absoluuttisen nopeuden kehänsuuntainen komponentti siiven tuloreunalla
$c_{u2}$	absoluuttisen nopeuden kehänsuuntainen komponentti siiven lähtöreunalla
D	Turpiinin halkaisija, m
g	Paikallinen putoamiskiihtyvyys, $m/s^2$
Hg	Bruttoputouskorkeus, m
Hm	Manometrinen putouskorkeus, m
Hn	Nettoputouskorkeus, m
$I_N$	Nimellisvirta, A
$k_{vaihde}$	Vaihteen välityssuhde
n	Turpiinin pyörimisnopeus, rpm
$n_{11}$	Turpiinin pyörintänopeus 1 metrin halkaisijalla ja 1 metrin putouskorkeudella, rpm
$n_{11R}$	Malliturpiinin ryntäyskierrosluvun yksikköarvo, rpm
$n_R$	Turpiinin ryntäyskierrosluku
$P_{11}$	Turpiinin tuottama teho 1 metrin halkaisijalla ja 1 metrin putouskorkeudella, kW
$P_4$	Turpiinin teho 0,65 metrin halkaisijalla ja 4 metrin putouskorkeudella, hv
$P_{mek}$	Mekaaninen teho, kW
$P_s$	Sähköinen pätöteho, kW
$P_{smax}$	Tuotettu sähköinen pätöteho turpiini toimiessa parhaalla hyötysuhteella, kW
$P_t$	Turpiinin tuottama mekaaninen teho, kW
$P_{tmax}$	Turpiinin tuottama mekaaninen teho tämän toimiessa parhaalla hyötysuhteella, kW
Q	Virtaama, $m^3/s$

$Q_{11}$	Virtaama 1 metrin halkaisijalla ja 1 metrin putouskorkeudella, $m^3/s$
$R_1$	Säde juoksupyörän tuloreunassa
$R_2$	Säde juoksupyörän lähtöreunassa
$u_1$	juoksupyörän kehänopeus siiven tuloreunalla
$u_2$	juoksupyörän kehänopeus lähtöreunalla
$U_N$	Nimellisjännite, V
$w_1$	relatiivinen nopeus siiven tuloreunalla
$v_1$	Tulopuolen veden virtausnopeus, m/s
$w_2$	relatiivinen nopeus lähtöreunalla
$v_2$	Veden virtausnopeus imuputken suulla, m/s
VH	Välppähäviöt, m
YVP	Yläveden pinta, m
$\alpha_0$	solukkeiden avautumiskulma
$\alpha_1$	veden tulokulma
$\alpha_2$	veden poistumiskulma
$\beta_1$	relatiivisen nopeuden tulokulma
$\beta_2$	relatiivisen nopeuden poistumiskulma
$\eta_g$	Epätahtigeneraattorin hyötysuhde
$\eta_{tmax}$	Turpiinin paras mahdollinen hyötysuhde kyseisissä olosuh- teissa
$\eta_v$	Vaihteen hyötysuhde
$\varphi$	Vaihe-erokulma, °
$\eta_t$	Turpiinin hyötysuhde
$\rho$	Veden tiheys, $kg/m^3$

## 1 JOHDANTO

UPM Kymmenen Jämsänkosken Paperitehtaan yhteydessä sijaitsevassa Rekolan vesivoimalaitoksessa kahta epätahtigeneraattoria pyörittää kaksi makaavaa kaksoisfrancis-turpiinia. Opinnäytetyössä tutkitaan epätahtigeneraattorien yhteyteen mahdollisesti asennettavien verkkovaihtosuuntaajien tuomia hyötyjä ja haittoja. Tämä mahdollistaisi turpiinin pyörimisnopeuden säädön putouskorkeuden muuttuessa. Turpiinia pystyttäisiin tällöin ajamaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella olosuhteiden muuttuessa. Käytössä olevien vesivoimalaitoksen tehontuotanto ja järvien pinnankorkeus tietojen perusteella tehtiin hankkeelle kannattavuuslaskenta ja takaisinmaksusuunnitelma.

## 2 TEORIA

Tässä luvussa käsitellään vesivoimaa sähkötuotantomuotona ja tarkastellaan tarkemmin francis-turpiinityyppiä. Luvussa käydään läpi myös epätahtigeneraattorin sekä verkko-vaihtosuuntaajan toimintaperiaate.

### 2.1 Vesivoima

Kuten organisten ja fossiilisten polttoaineiden, on myös vesivoiman potentiaalienergia peräisin auringosta. Veden saapuessa maan pinnalle haihtumisen ja sateiden myötä, alkaa tämä virrata korkeimmilta alueilta kohti meriä. Tällöin jatkuvasti veden hetkellisestä korkeusasemasta johtuva potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi. Osa tästä energiasta kuluu lämpöä kehittäviin pyörteisiin, maaperän eroosioon ja haihtumiseen. Tämä korkeusasemaan sitoutunut potentiaalienergia muunnetaan turpiinilla mekaaniseksi liike-energiaksi. (Vesivoimalaitokset, 1978, 5.)

Vesivoimalaitoksen teho riippuu saatavana olevan veden määrästä ja laitoksen yli olevasta putouskorkeudesta. Turpiinin tuottama mekaaninen teho  $P_t$  watteina voidaan laskea kaavalla (1),

$$P_t = Q \cdot H_n \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_t \quad (1)$$

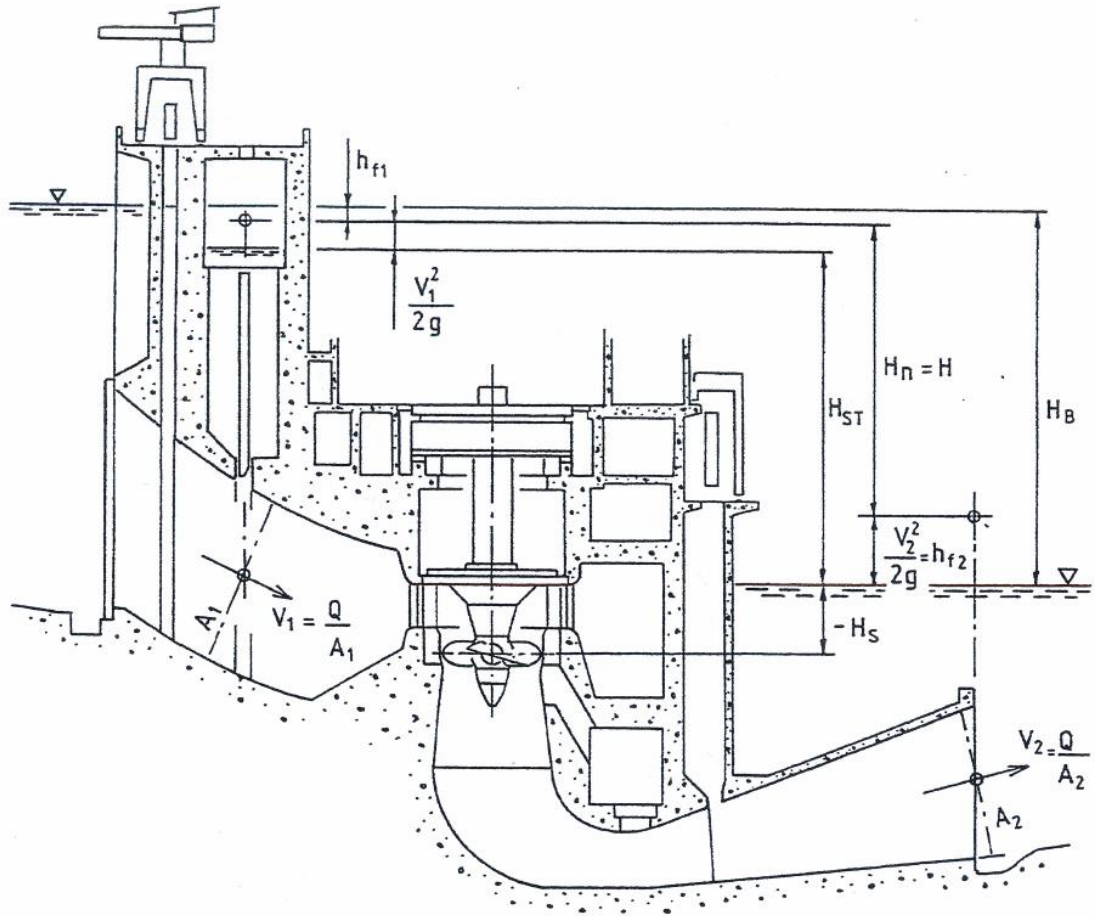
jossa  $Q$  on virtaama ( $m^3/s$ ),  $H_n$  on nettoputouskorkeus metreinä,  $\rho$  on veden tiheys ( $kg/m^3$ ),  $g$  on paikallinen putoamiskiihtyvyys ( $m/s^2$ ) ja  $\eta_t$  on turpiinin hyötysuhde. (Vesivoimalaitokset, 1978, 70).

Vesivoimalaitoksien yhteydessä puhutaan brutto, netto sekä manometrisestä putouskorkeudesta. Bruttopotouskorkeudella, eli geodettisella putouskorkeudella  $H_g$  tarkoitetaan ylä- ja alavesien pinnan korkeuseroa. Bruttopotouskorkeus voidaan laskea kaavalla (2). (Vesivoimalaitokset, 1978, 69).

$$H_g = YVP - AVP \quad (2)$$



Koko bruttoputouskorkeus ei vaikuta turpiinissa vaan osa siitä kuluu häviöihin. (KUVA 1).



KUVA 1. Vesivoimalaitoksen putouskorkeudet (Småskalig vattenkraft 1998)

Manometrasta putouskorkeutta  $H_m$  mitataan yläveden puolelta väljän jälkeen. Manometrinen putouskorkeus  $H_m$  voidaan laskea kaavalla (3),

$$H_m = H_g - VH \quad (3)$$

jossa  $VH$  on välppähäviöt. Välppäksi kutsutaan vesivoimalaitoksen tulopuolella olevaa siivilää, jolla estetään suurempien epäpuhtauksien ajautuminen turpiiniin. Ennen voimalaitosta olevan vedenpinnan  $YVP$  ja väljän jälkeisen vedenpinnan välistä korkeuseroa kutsutaan välppähäviöiksi. Kuvassa 1 manometrasta putouskorkeutta on merkitty  $H_{st}$ . Manometrasta putouskorkeutta käytetään turpiinien säätöön.

Nettoputouskorkeutta käytetään turpiinin suunnittelussa. Nettoputouskorkeuteen vaikuttaa tulopuolen pinta-ala  $A_1$ , tulopuolen veden virtausnopeus  $V_1$ , imuputken pinta-ala  $A_2$

ja veden virtausnopeus imputken suun kohdalla  $V_2$  (KUVA 1). Nettoputouskorkeus metreinä voidaan määrittää kaavalla (4),

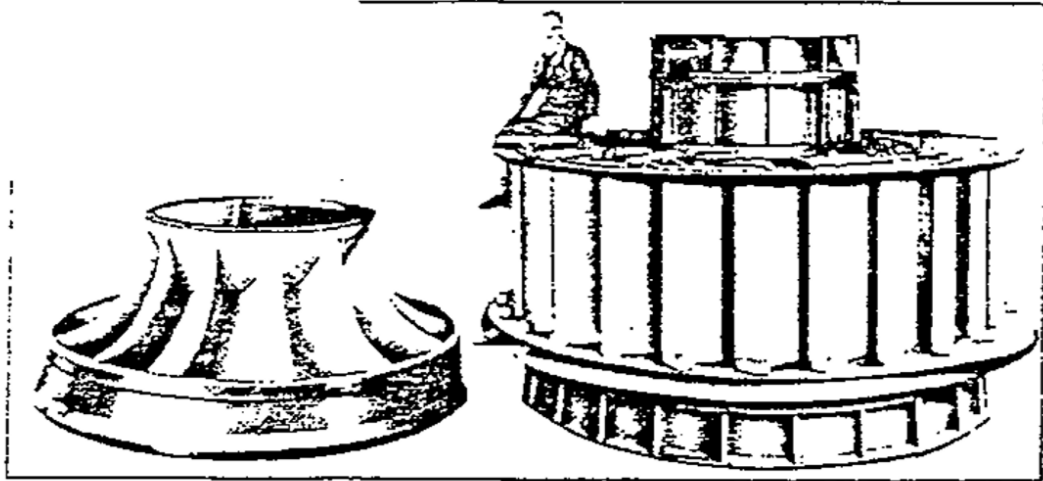
$$H_n = H_m + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

jossa  $H_m$  on manometrinen putouskorkeus metreinä,  $v_1$  on tulopuolen veden virtausnopeus luukun kohdalla ( $m/s$ ),  $v_2$  on veden virtausnopeus imputken suulla ( $m/s$ ) ja  $g$  on paikallinen putoamiskiihtyvyys ( $m/s^2$ ). (Vesivoimalaitokset, 1978, 69).

Turpiinin akseliin on vaihteen välityksellä tai suoraan kytketty generaattori, jolla jarrutetaan turpiinin pyörintänopeutta. Isoissa koneissa on akselissa suoraan kytketty tahti-generaattori. Pienissä koneissa generaattori on yleensä kytketty vaihteen välityksellä akselille, jolloin generaattori tulee edullisemmaksi. Turpiinia jarrutetaan vaihteen välityksellä turpiinin akselille kiinnitetyn generaattorin roottorin ja staattorin välisellä magneettisella vääntömomentilla. Tällöin jarrutukseen käytetty energia muuttuu sähköiseksi pätötehoksi, joka syötetään sähköverkkoon kuormalaitteille.

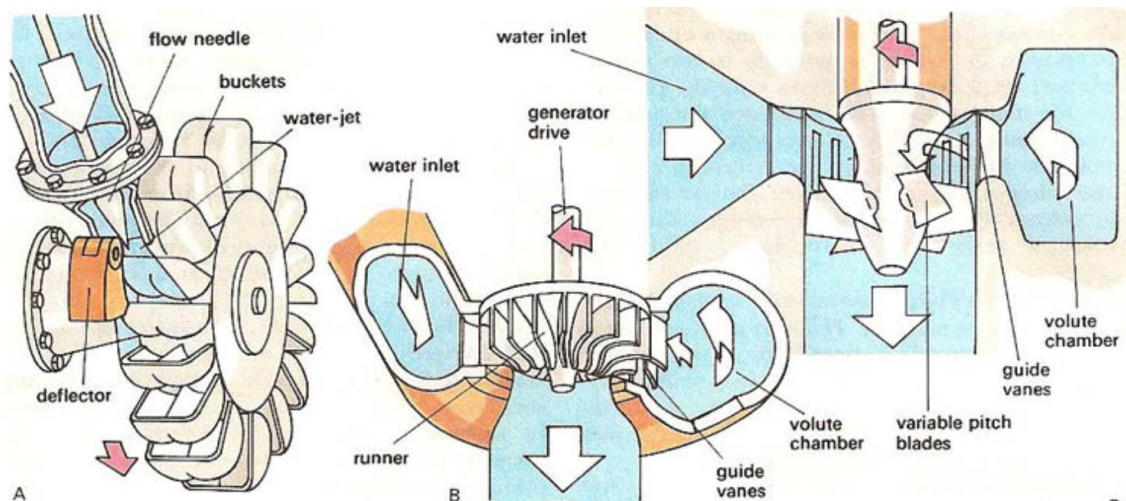
### 2.1.1 Francis-turpiini

Vesiturpiini on voimakone, jonka avulla veden painovoiman potentiaalienergia muutetaan pyörimisliikkeen mekaaniseksi energiaksi. Vesi johdetaan turpiinin pyörivään osaan, juoksupyörään (KUVA 2). Juoksupyörällä muunnetaan veden liike-energia pyörimisliikkeen mekaaniseksi energiaksi.



KUVA 2. Francis-turpiinin juoksupyörä vasemmalla ja johtopyörästä oikealla (Koneoppi 1963)

Vesiturpiinit jaetaan tasapaine- eli aktioturpiineihin ja ylipaine- eli reaktoriturpiineihin. Aktioturpiineissa veden koko käytettävissä oleva energia muutetaan johtolaitteessa eli suuttimessa liike-energiaksi. Vesi suihkutetaan suuttimesta ilmassa pyörivään juoksupyörään, jolloin vesi kohtaa määrättyllä hetkellä vain yhden siiven. Esimerkiksi Pelton-turpiini on aktioturpiini (KUVA 3). (Koneoppi)

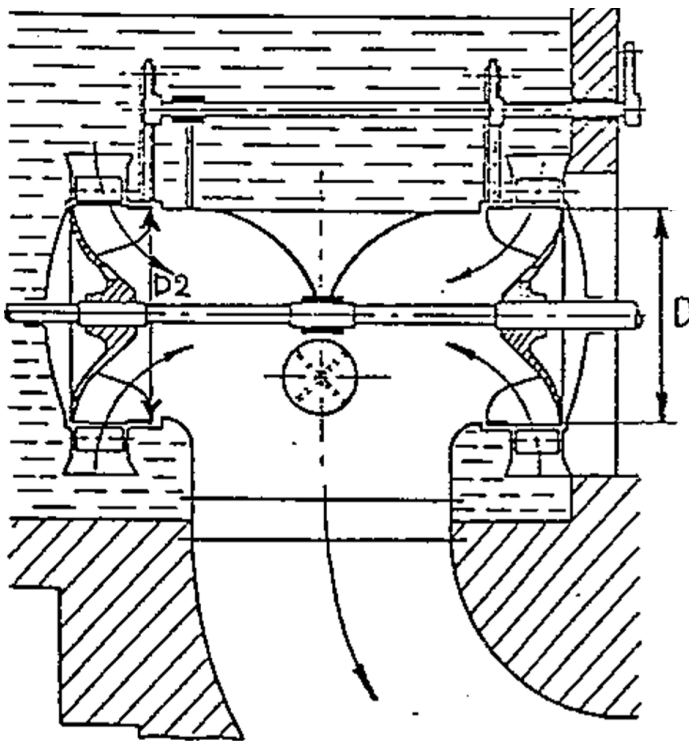


KUVA 3. Vasemmalla pelton-turpiini, keskellä yksiosainen pystysuuntainen francis-turpiini ja oikealla kaplan-turpiini (Rivers)

Aktioturpiineissa turpiinin juoksupyörä pyörii ilmassa. Reaktiiturpiineissa juoksupyörä pyörii täysin vedessä. Reaktiiturpiinin johtolaitteena toimii juoksupyörän kauttaaltaan ympäröivä johtosiivistö. Tällöin turpiinin toimiessa juoksupyörän kaikki siipisolat ovat

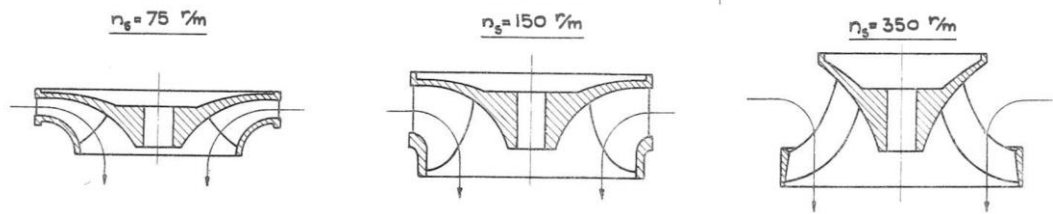
täynnä vettä. Reaktioturpiineissa vain osa veden potentiaalienergiasta muuttuu johtolaitteessa liike-energiaksi. Johtolaitteena toimivan johtopyörästä ja juoksupyörän siiven tuoreunan välisessä tilassa vallitsee suurempi paine kuin siiven jättöreunassa. Tästä tulee nimitys ylipaineturpiini. Francis- ja kaplan-turpiinit ovat reaktioturpiineja (KUVA 3). (Koneoppi).

Francis-turpiini voi olla pysty (KUVA 3) tai vaakatasoinen (KUVA 4), eli makaava turpiini (Vesivoimalaitokset, 1978, 81). Kaksoisturpiinilla on kaksi johtopyörästä ja juoksupyörää, missä yksiosaisella vain yhdet. Rekolan vesivoimalaitoksessa on kaksi makaavaa kaksoisfrancis-turpiinia (KUVA 4).



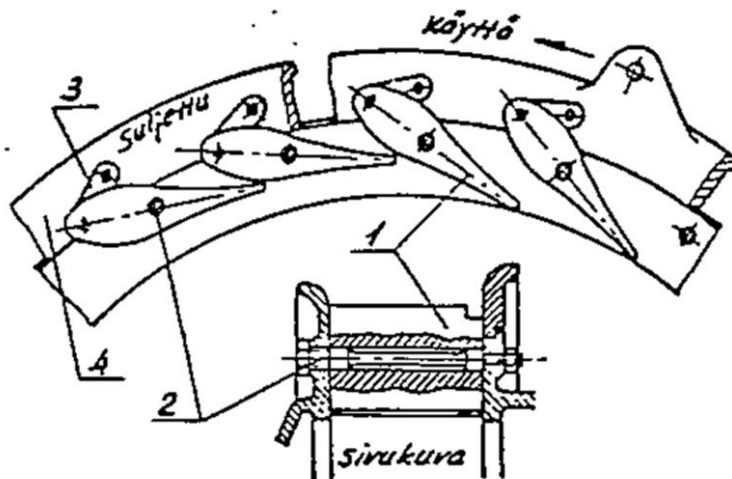
KUVA 4. Makaava kaksoisfrancis-turpiini (Koneoppi)

Francis-turpiinin pääosat ovat juoksupyörä, johtopyörästä ja imuputki. Vesi virtaa solukkeiden muodostaman johtopyörästä kautta juoksupyörään, jonka vesi saa pyörimään. Juoksupyörän jälkeen vesi poistuu turpiinista imuputkea pitkin. Juoksupyörän tarkoitus on vääntömomentin kehittäminen (Vesivoimalaitokset, 1978, 71). Tarvittavista pyörimisnopeuksista riippuen voidaan juoksupyörästä tehdä erimuotoisia (KUVA 5).



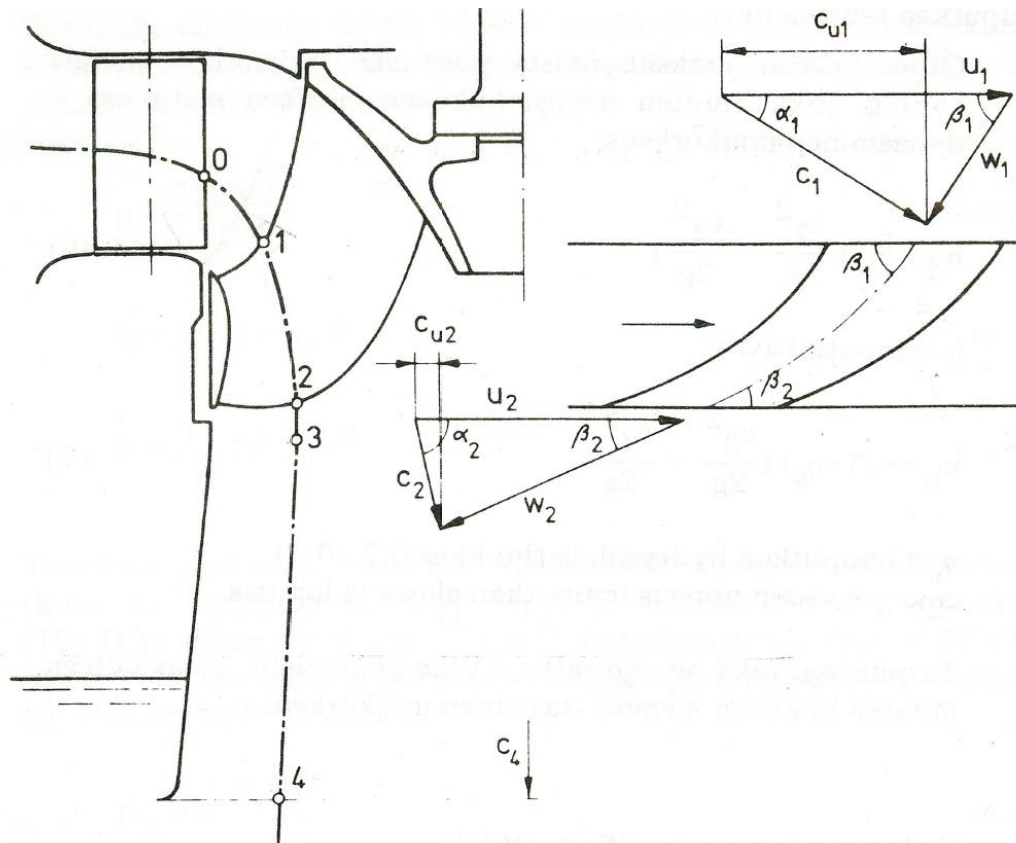
KUVA 5. Francis-turpiinin juoksupyörän tyyppejä eri ominaispyörimisnopeuksille (Andritz Hydro Oy)

Kuvassa 5 ominaispyörimisnopeudella  $n_s$  tarkoitetaan kuvan turpiinin kanssa sellaisen yhdenmuotoisen turpiinin pyörimisnopeutta, joka tuottaa 1 metrin putouskorkeudella 1 kW:n tehon (Koneoppi). Veden juoksupyörälle ohjaava johtopyörästä koostuu kehästä solukkeita (KUVA 6).



KUVA 6. Francis-turpiinin johtolaite, eli solukkeiden muodostama johtopyörästö. Johtopyörästön kaksi soluketta on suljettuna kuvassa vasemmalla ja avoinna oikealla (Koneoppi)

Turpiinin ollessa poissa käytöstä solukkeet ovat toisissaan kiinni, jolloin vesi ei pääse virtaamaan juoksupyörälle. Solukkeita avattaessa vesi alkaa virtaamaan solukkeiden välistä juoksupyörälle. Solukkeiden väliin muodostuvan aukon suuruutta kutsutaan turpiinin avaumaksi. Johtopyörästön tehtävä on muodostaa vedelle tulopyörre ja säätää tilavuusvirtaa (Vesivoimalaitokset, 1978, 71).



KUVA 7. Francis-turpiinin johtopyörä, juoksupyörä ja imuputki. Tasoon levitetty siipi-hila sekä tulo- ja lähtöreunan nopeuskolmiot (Vesivoimalaitokset 1978, 71)

Kuvassa 7 kohdalla 0 tarkoitetaan johtopyörästä solukkeen lähtöreunaa, kohdalla 1 juoksupyörän tuloreunaa, kohdalla 2 juoksupyörän lähtöreunaa ja kohdalla 4 imuputkea.

Turpiinin pyörimisnopeus määrää juoksupyörän kehänopeudet  $u_1$  ja  $u_2$ . Veden absoluuttiseen nopeuteen  $c_1$  vaikuttaa nettoputouskorkeus ja vesimäärä. Johtopyörästä solukkeiden avautumiskulmalla  $\alpha_0$  määritetään veden tulokulma juoksupyörän tuloreunalla ( $\alpha_0 = \alpha_1$ ), koska johto- ja juoksupyörän välissä veteen ei vaikuta ulkoisia momentteja (Vesivoimalaitokset 1978, 71).

Johtopyörästä solukkeet avautuvat siten, että veden virratessa tämän läpi muodostuu veden tulodralli, eli pyörre (veden absoluuttisen nopeuden kehäsuuntainen komponentti  $c_{u1} \cdot R_1$  tulo). Juoksupyörä pyörii tämän pyörteen kanssa samansuuntaisesti. Tulodrallin voimakkuus  $c_{u1}$  riippuu solukkeiden avautumiskulmasta  $\alpha_0$  ja veden absoluuttisesta nopeudesta  $c_1$ . Veden absoluuttisen nopeuden pystykomponentti määrää turpiinin läpi virtaavan vesimäärän  $Q$ .

Relatiivinen nopeus  $w_1$  määräytyy veden absoluuttisesta nopeudesta ja turpiinin kehänopeudesta. Relatiivisen nopeuden tulokulma siiven tuloreunalla  $\beta_1$  tulisi olla siipiprofiilin kanssa saman suuntainen, jotta ei aiheutuisi impulssihäviöitä. Mikäli relatiivisen nopeuden tulokulma poikkeaa tarpeeksi siipiprofiilista, voi tämä aiheuttaa kavitointia siiven tuloreunalla.

Juoksupyörä on suunniteltu siten, että sopivalla pyörimisnopeudella, putouskorkeudella ja vesimäärällä vesi poistuu juoksupyörältä lähes drallitta. Juoksupyörän kääntäessä virtausta syntyy tukireaktio, joka pyörittää juoksupyörää. (Asiantuntijalausunto, Virtanen, J. 2016).

Relatiivisen nopeuden poistumiskulma  $\beta_2$  määräytyy siipiprofiilista. Turpiinin läpi virtaava vesimäärä määrää veden absoluuttisen nopeuden pystykomponentin siiven lähtöreunalla. Veden absoluuttisen nopeuden pystykomponentti siiven lähtöreunalla määrää yhdessä relatiivisen nopeuden poistumiskulman  $\beta_2$  kanssa veden relatiivisen nopeuden  $w_2$ . Juoksupyörän kehänopeus siiven lähtöreunalla  $u_2$  ja veden relatiivinen nopeus määrittävät veden absoluuttisen nopeuden siiven lähtöreunalla  $c_2$ . Veden poistumiskulman  $\alpha_2$  ollessa terävä, jää imuputkeen virtaavaan veteen positiivista drallia (veden absoluuttisen nopeuden kehäsuuntainen komponentti  $c_{u2} \cdot R_2$ ). Veden poistumiskulman ollessa tylppä, jää imuputkeen virtaavaan veteen negatiivista drallia. Negatiivisessa drallissa  $c_{u2}$  on vastakkaisuuntainen kehänopeuteen  $u_2$  nähden.

Turpiinin momentti on verrannollinen massavirtaan ( $\dot{m} = Q \cdot \rho$ ) ja impulssimomentin (drallin) muutokseen. (Vesivoimalaitokset, 1978, 70). Turpiinin tuottama momentti  $T$  voidaan laskea kaavalla (5),

$$T = Q \cdot \rho \cdot (R_1 \cdot c_{u1} - R_2 \cdot c_{u2}) \quad (5)$$

jossa  $R_1$  ja  $R_2$  ovat säde juoksupyörän tulo- ja lähtöreunassa ja  $c_{u1}$  sekä  $c_{u2}$  ovat veden absoluuttisen nopeuden kehäsuuntaiset komponentit. (Vesivoimalaitokset, 1978, 70). Kaavasta (5) nähdään, että tulodralli ( $R_1 \cdot c_{u1}$ ) kasvattaa ja imuputkeen poistuva dralli ( $R_2 \cdot c_{u2}$ ) pienentää juoksupyörän tuottavaa momenttia. Veden tulisi poistua imuputkeen lähes drallitta. Käytännössä imuputkeen olisi hyvä jäädä hieman positiivista drallia, jotta tämä estäisi veden irtoamista imuputken seinistä imuputken laajetessa.

Mekaaninen teho  $P$  voidaan laskea kaavalla (6).

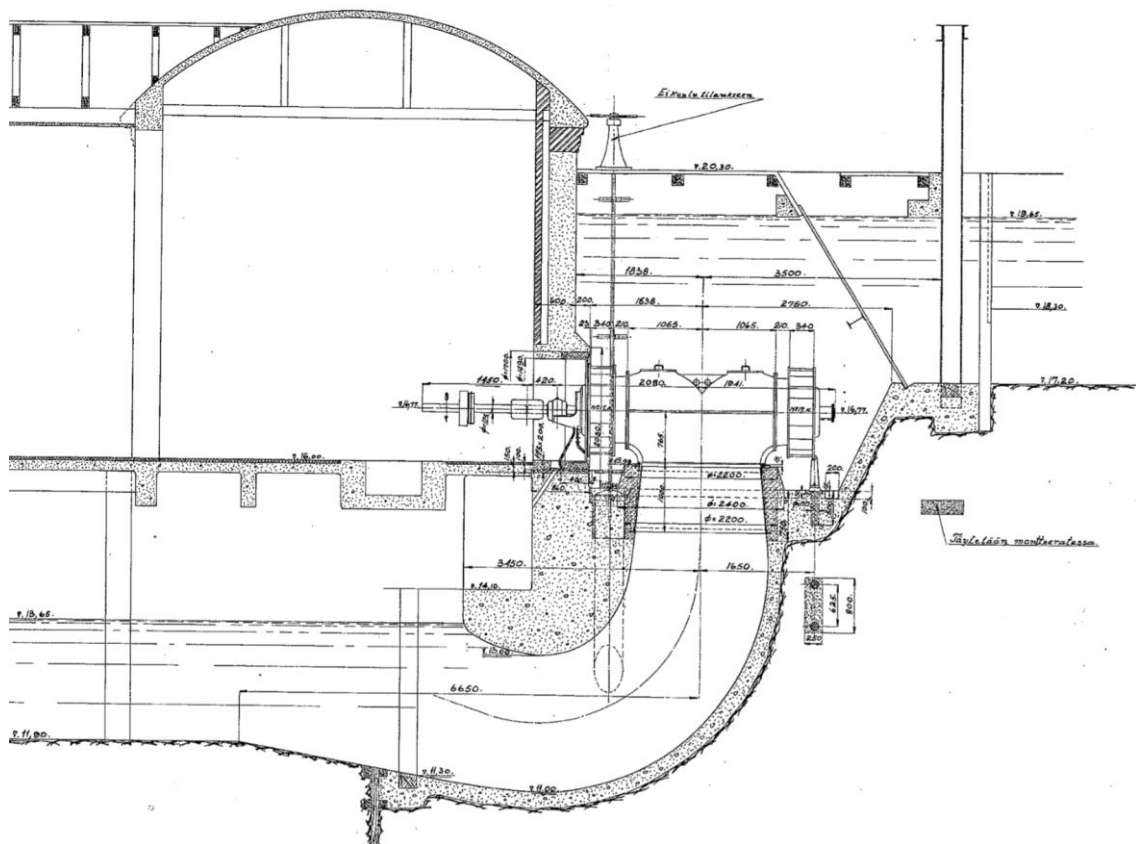
$$P = \omega \cdot T \quad (6)$$

Jättämällä turpiinin mekaaniset häviöt huomioimatta voidaan kaavan (5) momentti merkitä samaksi kuin turpiinin tehon kaavalla (1) ja kaavalla (6) ratkaistu momentti voidaan kirjoittaa turpiiniteorian tärkeä pääyhtälö (7).

$$Hn \cdot g \cdot \eta = u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2} \quad (7)$$

(Vesivoimalaitokset 1978, 71).

Juoksupyörän jälkeen vesi virtaa imuputken kurkusta sisään ja imuputken suuaukosta ulos alavesistöön (KUVA 8).



KUVA 8. Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinien sijoituspiirustus (UPM Kymmene)

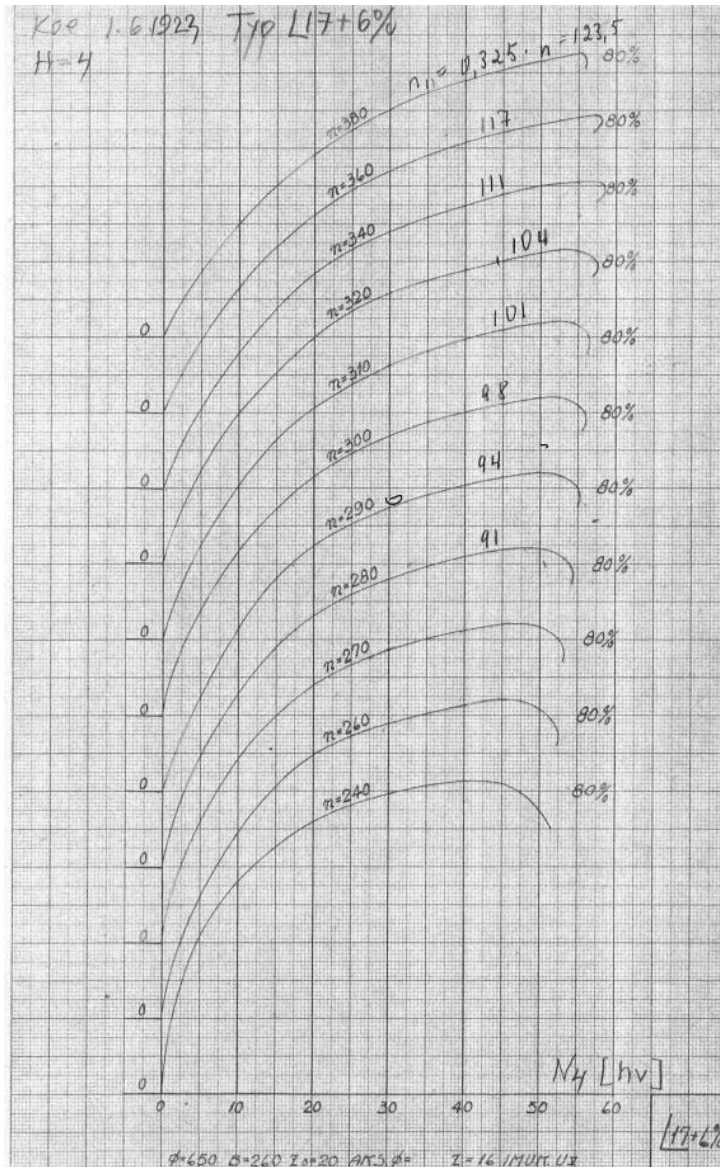


Imuputken tehtävä on laskea painetta juoksupyörän siipien jättöreunalla. Tällöin alipaine kasvattaa virtausta, jolloin turpiinin läpi virtaa enemmän vettä, jolloin turbiinin tuottama teho kasvaa. Mikäli imuputkea ei olisi, tulisi turpiini tehdä suhteessa paljon isommaksi, jotta sama vesimäärä saataisiin virtaamaan sen läpi. Mitä suurempi imuputken suuaukko on, sitä pienempi on turpiinista poistuvan veden nopeus, jolloin turpiinin hyötysuhdetta huonontava  $v_2$  kaavassa (4) pienenee. Imuputken halkaisija ei voi kuitenkaan kasvaa liian nopeasti, sillä vesi irtoisi imuputken seinistä, joka aiheuttaisi turpiinin hyötysuhteen romahtamisen. Imuputkea ei kannata myöskään tehdä liian pitkäksi, sillä tämä aiheuttaisi virtaushäviöitä ja kasvattaisi rakennuskustannuksia. Imuputken suunnittelu on kompromissi turpiinin rakennuskustannusten ja turpiinin hyötysuhteen kannalta. (Asiantuntijalausunta, Virtanen, J. 2016).

Kuvassa 8 on Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinien sijoituspiirustus. Kuvassa oikealla ylhäällä on yläveden pinta. Ensimmäiseksi laitoksen läpi virtaava vesi ohittaa patoluukun, jonka alas laskemalla voidaan padota turpiinikammioon virtaava vesi huoltotöiden ajaksi. Patoluukun ohitettuaan vesi kohtaa välpän, joka on kalteva siivilä, jolla estetään suurempien epäpuhtauksien pääsy turpiinikammioon. Mikäli turpiinikammioon pääsee pyörimään esimerkiksi keppejä, pienentää tämä turpiinilla tuotettua tehoa ja vaarantaa turpiinin toiminnan. Lika kertyy välppään, jota huoltomiehet käyvät puhdistamassa. Välpän läpäisytään vesi tulee turpiinikammioon. Vesi virtaa turpiiniin johtopyörästä läpi. Turpiinin sisällä vesi pyörittää juoksupyörää ja poistuu imuputken kautta alavesistöön.

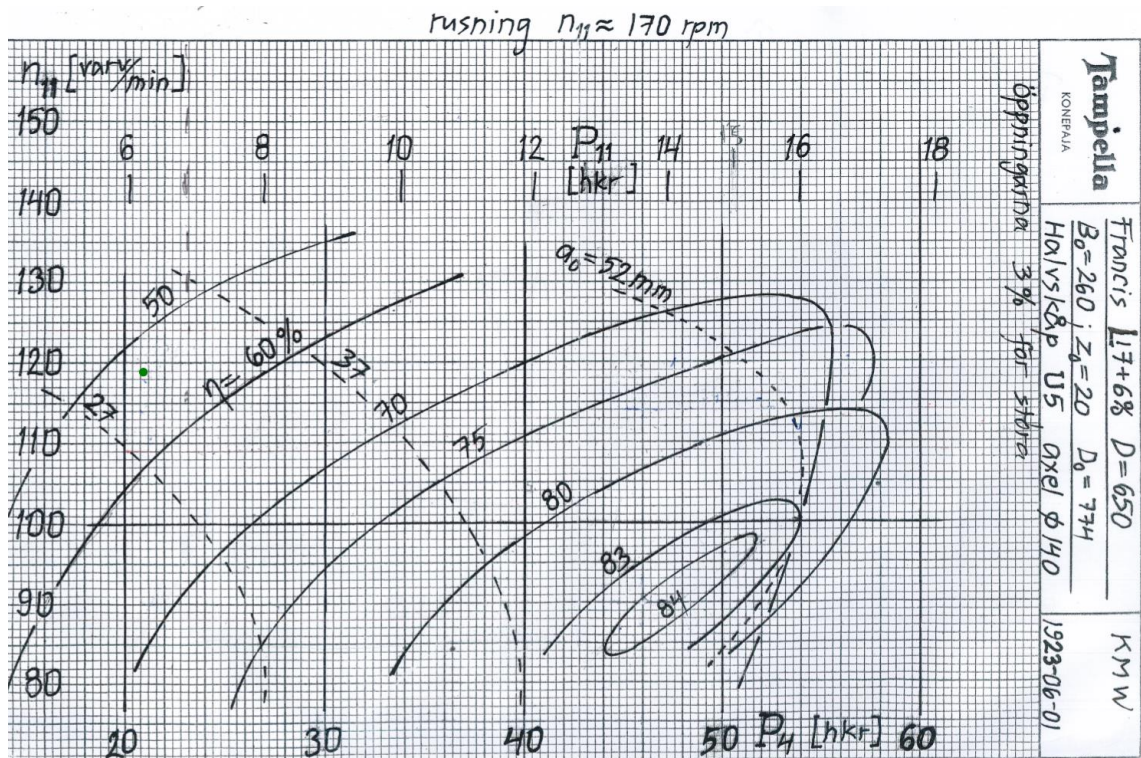
### 2.1.2 Mallikoe ja simpukkakäyrästä

Turpiinityyppien ominaisuuksia tutkitaan hydraulisessa laboratorioissa pienessä mittakaavassa tehtävillä mallikokeilla, jonka tulokset on muunnettavissa erikokoisille samanmuotoisille turpiineille yhdenmuotoisuus- ja affiniteetilakien avulla. Nämä on käsitelty luvussa 2.1.3. Nykyään turpiinin suunnittelussa käytetään tietokone mallintamista, mutta se ei ole vielä luotettavuudessa riittävällä tasolla vaan tarvitaan myös mallikoe (Asiantuntijalausunta, Virtanen, J. 2016). Turpiinin valmistajat esittävät yleensä mallikokeen tulokset laskettuna 1 metrin putouskorkeudella ja 1 metrin halkaisijalla (Vesivoimalaitokset, 1978, 73). Laboratorioissa saadaan tutkittua turpiinin ryntäysnopeus, hyötysuhteet ja kavitaatio ominaisuudet. Hyötysuhteet voidaan esittää erillisinä hyötysuhdekäyriä (KUVA 9) tai simpukkakäyrästä (KUVA 10, KUVA 11).



KUVA 9. Turpiinin hyötysuhdekäyrät (Andritz Hydro Oy)

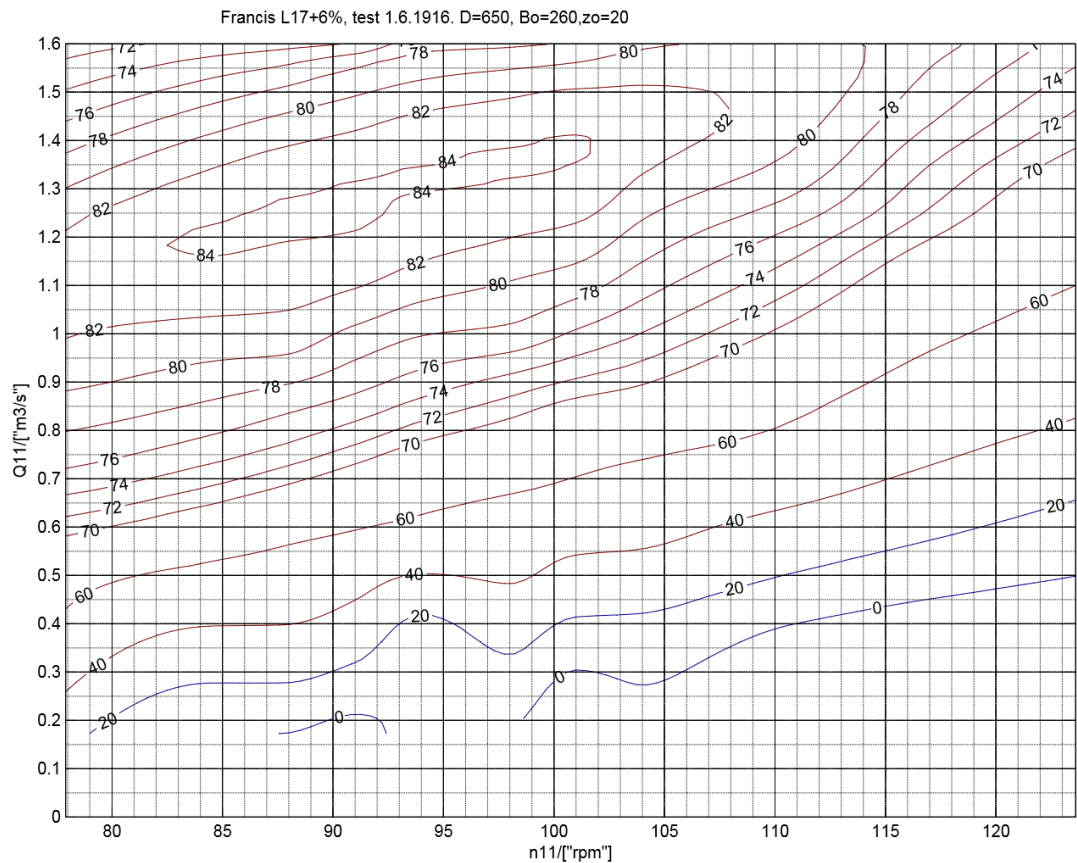
Kuvat 9 ja 10 sisältävät saman informaation eri muodossa. Turpiinilla on tehty ajokokeita, joissa sen hyötysuhdetta on mitattu virtaaman funktiona eri pyörimisnopeuksilla. Kyseinen koe on tehty 4 m putouskorkeudella juoksupyörän halkaisijan ollessa 0,65 m. Tuloksista on laskettu  $n_{11}$  ja  $P_{11}$  arvot, jotka on myöhemmin lisätty kuvaan 10. Kuvien 9 ja 10 käyrästä on piirretty tehon funktiona. (Asiantuntijalausunto, Vuoristo, S. 2015). Kuvan 9 käyrät on piirretty simpukkakäyrästä muodossa kuvaan 10. Työssä esitystapana on käytetty simpukkakäyrästä (KUVA 11).



KUVA 10. Mallikokeen simpukkakäyrästä (Andritz Hydro Oy).

Kuvassa 10 on esitetty Rekolan vesivoimalaitoksessa olevien turpiinien mallisimpukkakäyrästä. Turpiinin mallikokeet on alun perin tehty 4 metrin putouskorkeudella ja turpiinin juoksupyörän halkaisijan ollessa 0,65 metriä. Nämä tulokset vastaavat  $P_4$  akselin arvoja. Simpukkaan on myöhemmin lisätty  $n_{11}$  yksikkökierroslukuasteikko ja  $P_{11}$  yksikkötehoasteikko.  $P_{11}$  ja  $n_{11}$  arvot on laskettu turpiinille, jonka halkaisija on 1 m ja vastaavasti putous 1 m. Asteikko  $P_4$  vastaa turpiinia, jonka putous on 4 metriä. Katkoviivalla kuvaan on merkitty johtopyörän solukkeiden avauma  $a_0$ . Turpiinin mallihyötysuhteet  $\eta$  on kuvattu simpukkakäyrinä. Turpiinin hyötysuhteella tarkoitetaan sitä suhdelukua, kuinka hyvin turpiini muuttaa aikayksikössä käytettävissä olevan energian pyörivän akselin mekaaniseksi tehoksi.

Malliturpiinin ryntäyskierrosluvun yksikköarvoksi  $n_{11R}$  on saatu 170 rpm. Kyseisestä arvosta saadaan laskettua Rekolan turpiinien ryntäyskierrosluku  $n_{11R}$ . Kuvan 10 simpukkakäyrästä voidaan ratkaista jokaisesta yksikkökierrosluvun  $n_{11}$  hyötysuhdepisteestä virtaama  $Q$  kaavalla (1), josta voidaan laskea virtaaman yksikköarvo  $Q_{11}$  kaavalla (10). Tällöin voidaan piirtää kuvan 11 mallin hyötysuhdekäyrästä. Saadun mallisimpukan arvoista voidaan laskea laitosarvot  $Q$  kaavalla (10) ja nettoputouskorkeus  $H_n$  kaavalla (8).



KUVA 11. Mallikokeen hyötysuhteet esitettyinä  $n_{11}$  ja  $Q_{11}$  asteikolla laskettuna yhden metrin halkaisijalle ja yhden metrin putoukselle (Andritz Hydro Oy)

Mallikokeet on tehty eri mittakaavassa. Affiniteetti lait takaavat, että virtauskolmioiden kulmat ovat samat, mutta niiden nopeuksien itseisarvot ovat erilaisia. Tämä aiheuttaa erilaisia kitkahäviöitä erikokoisissa turpiineissa. Tämän vuoksi pienessä mittakaavassa tehtyihin mallikokeen tuloksiin tulee IEC normin mukaan laskea korotus käyttäen Reynoldsin lukua (Asiantuntijalausunto, Virtanen, J. 2016). Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinit ovat vanhoja. Kulumisesta johtuva hyötysuhteen huononeminen kompensoi tätä korotusta, joten mallisimpukan hyötysuhdearvot vastaavat riittävällä tarkkuudella laitoshyötysuhdearvoja (Asiantuntijalausunta, Vuoristo, S. 2015). Kyseisten hyötysuhdekäyrien malliturpiinissa johtopyörän solukkeita oli 20 kappaletta ja Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinissa 14 kappaletta. Tällä ei ole olennaista vaikutusta hyötysuhteeseen (Asiantuntijalausunta, Vuoristo, S. 2015), joten tämän vaikutus jätetty laskuissa huomioimatta. Työssä lähtötietoina on käytetty vuoden ajalta tallennettuja tehontuotantoarvoja ja vesistöjen pinnankorkeustietoja. Laskenta on suoritettu jokaiselle päivälle erikseen, joten kuvan 11 hyötysuhdearvot on sovitettu Excel-ohjelmalla funktioon, jota sitä on voitu soveltaa laajaan arvojoukkoon. Laskenta on käsitelty luvussa 4.1.

Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinit ovat kaksiosaisia turpiineja. Työssä käytetyn mallikokeen tulokset on ilmoitettu turpiinin juoksupyörää kohden. Tästä johtuen turpiinilla tuotettu teho ja vesimäärä jaetaan kahdella, jotta sitä voidaan verrata mallikokeen tuloksiin.

### 2.1.3 Yhdenmuotoisuus ja affiniteetilait

Geometrisesti samanmuotoisten, erikokoisten turpiinien arvot ovat muunnettavissa eri putouskorkeuksille ja halkaisijoille yhdenmuotoisuus- ja affiniteetilakeja käyttäen. Kuvien 10 ja 11 simpukkakäyrästä määrittämisessä käytetty turpiini on yhdenmuotoinen, mutta erikokoinen verrattuna Rekolan vesivoimalaitoksen turpiineihin. Pyörimisnopeus voidaan ratkaista yhtälöllä (8),

$$n = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H_n}}{D} \quad (8)$$

jossa  $n$  on voimalaitoksen turpiinin pyörimisnopeus ( $rpm$ ),  $n_{11}$  on mallikokeen turpiinin pyörimisnopeus ( $rpm$ ),  $H_n$  on nettoputouskorkeus metreinä ja  $D$  on voimalaitoksen turpiinin halkaisija metreinä (Keskinen & Pulttinen 1980).

Yksikköteho  $P_{11}$  voidaan ratkaista kaavalla (9) (Vesivoimalaitokset 1978, 73).

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot H_n \cdot \sqrt{H_n}} \quad (9)$$

Virtaama voidaan laskea yhtälöllä (10) (Vesivoimalaitokset 1978, 73),

$$Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H_n} \quad (10)$$

jossa  $Q$  on voimalaitoksen virtaama ( $m^3/s$ ),  $Q_{11}$  on mallikokeen virtaama ( $m^3/s$ ),  $D$  on voimalaitoksen turbiinin halkaisija metreinä ja  $H_n$  on nettoputoamiskorkeus metreinä. Laskettaessa virtaamaa tulee huomioida, että turpiinissa on kaksi juoksupyörää.

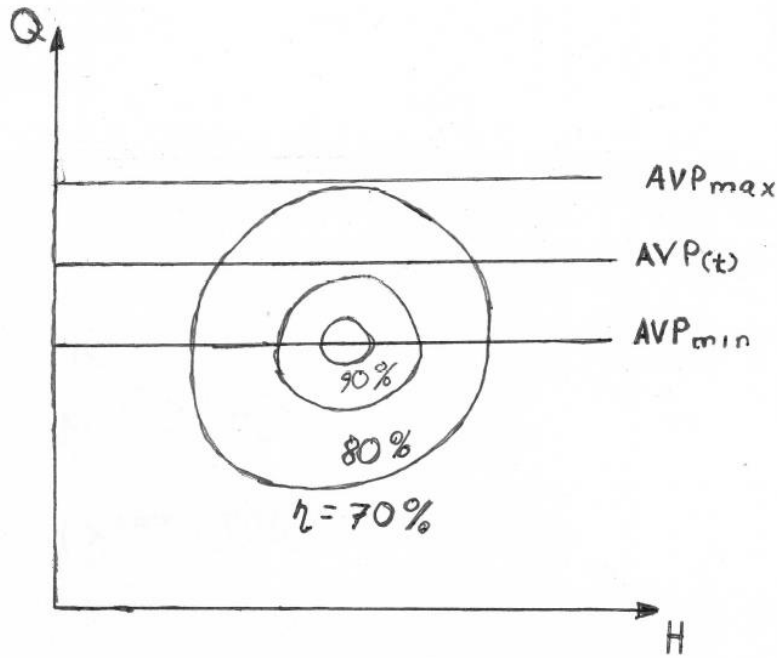
Simpukkakäyrästä akselin  $P_4$  teho voidaan laskea yhtälöllä (11),

$$P_4 = \frac{P}{0,2179 \cdot D^2 \cdot H_n \cdot \sqrt{H_n}} \quad (11)$$

jossa  $P$  on voimalaitoksen turbiinin teho ( $kW$ ),  $P_4$  mallikokeen turbiinin teho ( $hV$ ),  $D$  voimalaitoksen turbiinin halkaisija metreinä ja  $H_n$  nettoputouskorkeus metreinä (Keskinen & Pulttinen 1980). Kaavassa 11 kerroin 0,2179 on turbiinin pätötehon  $P(kW)$  suhde simpukkakäyrästä neljän metrin putouskorkeudella mitattuun tehoon  $P_4(hV)$  (Asiantuntijalausunta, Vuoristo, S. 2015).

#### 2.1.4 Kavitaatio

Kavitaatiolla tarkoitetaan veden höyrystymistä alhaisen paineen johdosta, josta seuraa turbiinin hyötysuhteen aleneminen ja kuplien kokoon iskeytymisen aiheuttava eroosio (Vesivoimalaitokset, 1978, 75). Ennen turbiinin toimintapisteen muuttamista tulee tehdä kavitaatiotarkastelu suunnitelluissa toiminta pisteissä. Alavedenpinnan korkeus rajoittaa sallittua turbiinin läpi ajettavaa vesimäärää (KUVA 12).



KUVA 12. Periaate kuva kavitaation rajoittavasta vaikutuksesta vesivoimalaitoksen läpi ajettavaan vesimäärään.

Alaveden pinnan lasku laskee painetasoa juoksupyörällä, jolloin se kavitoi helpommin. Kuvassa 1 tämä on merkitty staattisella putouskorkeudella  $H_s$ . Staattinen putouskorkeus mitataan koneen keskiön ja alavedenpinnan korkeuserona. Staattinen imukorkeus on kuvassa 1 negatiivinen, koska turpiini sijaitsee alavedenpinnan alapuolella. Turpiinin toimittaja on tehnyt turpiineja toimittaessa näille kavitaatiotarkastelun, joten turpiinin toimintapistettä muuttaessa kavitaatiolta vältytään, kun pysytään mallikokeen simpukkakuvaajassa merkityillä pyörimisnopeuksilla (Asiantuntijalausunto, Vuoristo, 2015).

### 2.1.5 Turpiinin pyörimisnopeuden säätö

Tässä luvussa käydään läpi, kuinka turpiinin toimintapistettä muuntamalla saatu hyöty on laskettu. Turpiinilla tuotettu teho  $P_t$  (kW) saadaan kaavalla (12),

$$P_t = \frac{P_s}{\eta_g \cdot \eta_v} \quad (12)$$

jossa  $P_s$  on tuotettu sähköinen pätöteho ( $kW$ ),  $\eta_g$  on epätahtigeneraattorin mekaaninen hyötysuhde ja  $\eta_v$  on vaihteen hyötysuhde. Nettoputouskorkeuden kaava (4) voidaan yksinkertaistaa, sillä käytettävät mallikokeen tulokset on otettu avoimessa laitoksessa (Asiantuntijalausunto, Vuoristo, S. 2015). Nettoputouskorkeus  $H_n$  ( $m$ ) saadaan kaavalla (13),

$$H_n = YVP - AVP - VH \quad (13)$$

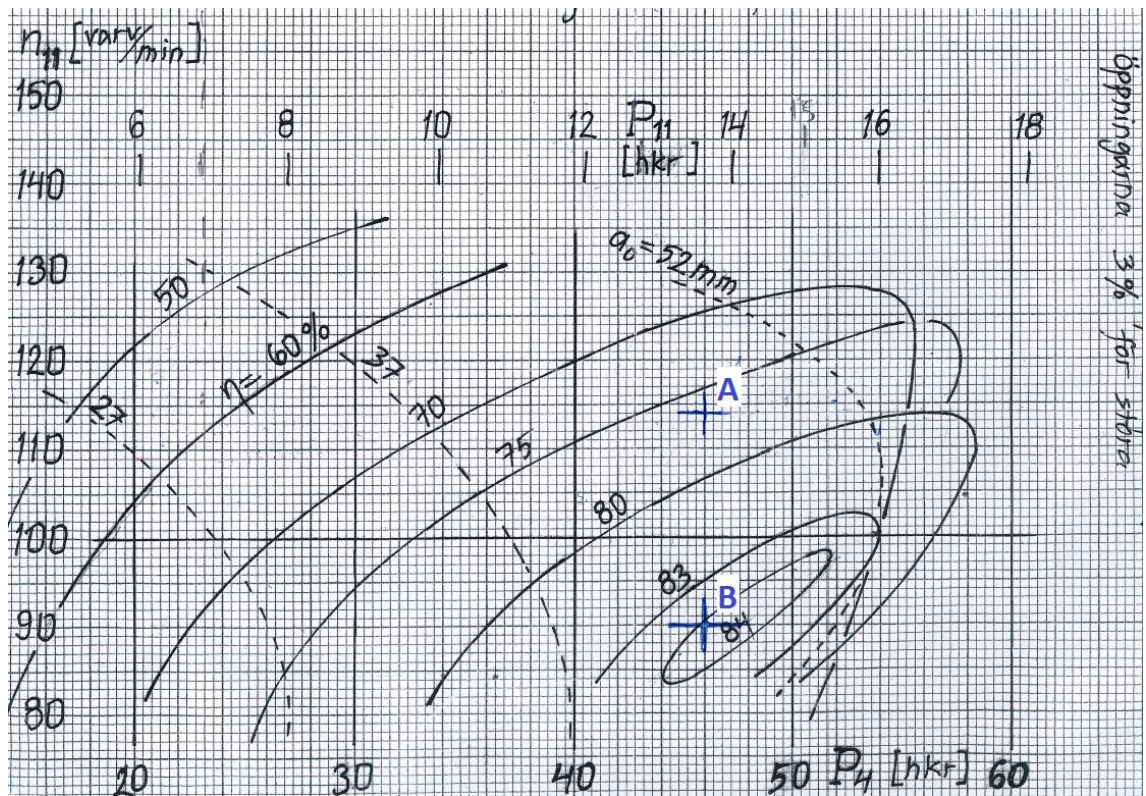
jossa YVP on yläveden pinnankorkeus metreinä, AVP on alavedenpinnan korkeus metreinä ja VH on välppähäviöt metreinä. Välppähäviöillä tarkoitetaan ylävedenpinnan ja välpän jälkeisen turpiinialtaan pinnankorkeus eroa. Tunnettaessa epätahtigeneraattorin pyörimisnopeus  $n_g$  ( $rpm$ ) voidaan turpiinin hetkellinen pyörimisnopeus laskea kaavalla (14),

$$n = \frac{n_g}{k_{vaihde}} \quad (14)$$

jossa  $n$  on turpiinin pyörintänopeus ( $rpm$ ) ja  $k_{vaihde}$  on vaihteen välityssuhde. Kummallakin turpiinilla on samanlaiset vaihteet, joiden välityssuhde on 2,5.

Kun tunnetaan mallikokeen turpiinin teho neljän metrin putouskorkeudella  $P_4$  ja malliturpiinin yksikkökierrosnopeus  $n_{11}$  voidaan simpukkakäyrästä (KUVA 10) selvittää turpiinin hyötysuhde  $\eta$  kyseisessä tilanteessa. Saaduista arvoista voidaan laskea vastaava laitosvesimäärä ja putous.





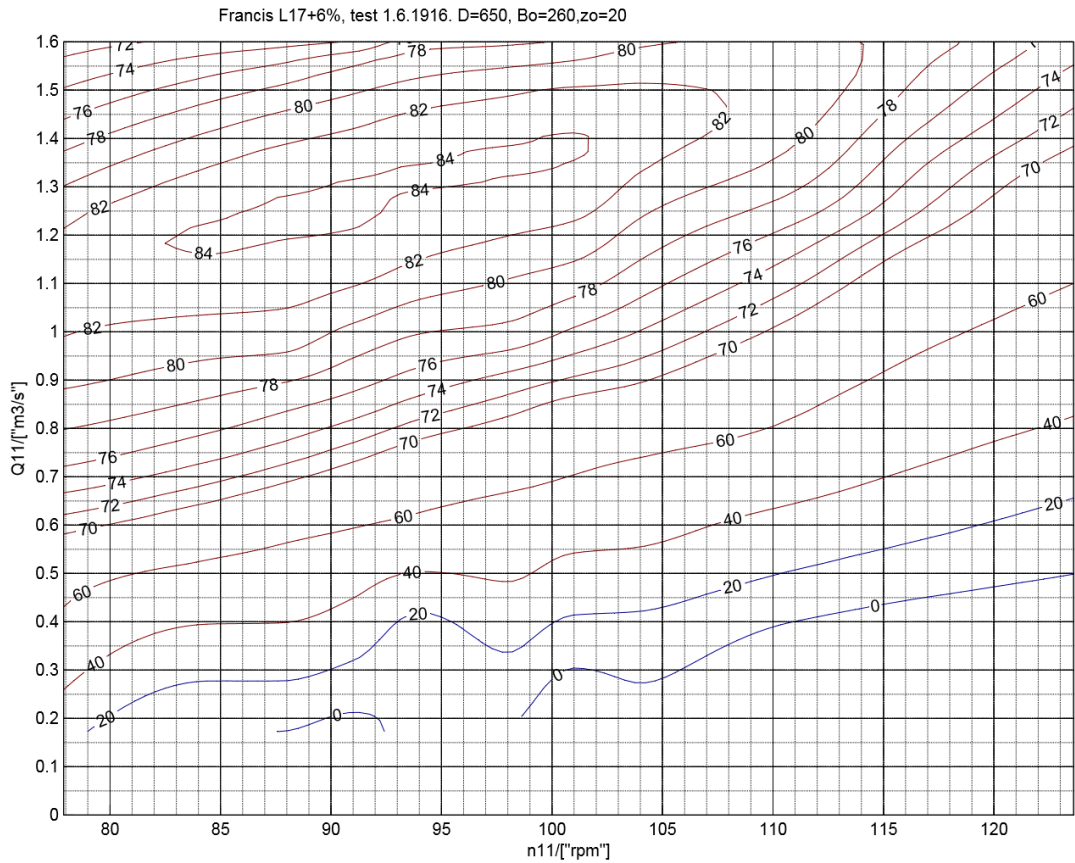
KUVA 13. Turpiinin hyötysuhteet eri pyörimisnopeuksilla

Kuvassa 13 kohdalla **A** kuvataan hyötysuhdetta ennen nopeussäätöä. Tämä tarkoittaa, että kyseisellä hyötysuhteella on tuotettu akselin  $P_4$  teho. Mikäli toimintapistettä pudotettaisiin kuvan 13 kuvaajassa kohtaa **B**, turpiinin virtaama muuttuisi. Tämän vuoksi toimintapisteen muutos lasketaan virtaaman mukaan piirretyssä simpukkakäyrästä (KUVA 14).

Tunnettaessa kyseisen tilanteen  $P_4$  ja  $\eta_{\text{malli}}$ , voidaan ratkaista kyseisen tilanteen mallikokeen vesimäärä  $Q_{11}$  kaavalla (15), joka on johdettu kaavasta (1). Putouskorkeus  $H_n$  on 1 m. Kertoimella 1000 muutetaan teho oikean yksikköön.

$$Q_{11} = \frac{P_4 \cdot 0,2179 \cdot 1000}{H_n \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_t} \quad (15)$$

Huomattavaa on, että mallisimpukan  $Q_{11}$  arvo lasketaan  $P_4$  arvosta, joten  $P_4$  skaalataan  $P_{11}$  arvoksi kertoimella 0,2179. Tunnettaessa tilanteen  $n_{11}$  ja  $Q_{11}$  voidaan selvittää turpiinin kulloinenkin toimintapiste virtaamaan mukaan piirretyltä simpukkakäyrästä (KUVA 14), sekä paras mahdollinen hyötysuhde  $\eta_{\text{max}}$  kyseisellä vesimäärällä.



KUVA 14. Mallihyötysuhteet virtaaman mukaan piirrettyinä

Tunnettaessa mallikokeen vesimäärä  $Q_{11}$  voidaan laitoksen vesimäärä  $Q$  ratkaista kaavalla (10). Tunnettaessa hyötysuhde  $\eta_{\max}$  voidaan kyseisellä vesimäärällä turpiinin parhaalla mahdollisella hyötysuhteella tuotettu teho laskea kaavalla (16).

$$P_{tmax} = Q \cdot H_n \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{tmax} \quad (16)$$

Suurin mahdollinen tuotettu sähköinen teho  $P_{smax}$  (kW) voidaan laskea kaavalla (17),

$$P_{smax} = P_{tmax} \cdot \eta_g \cdot \eta_v \quad (17)$$

jossa  $\eta_g$  on moottorin hyötysuhde ja  $\eta_v$  on vaihteen hyötysuhde. Kun tunnettaaan suurin mahdollinen tuotettu sähköinen teho ja tuotettu sähköinen teho voidaan näiden erotuksesta laskea teho, jonka nopeussäädetyllä turpiinilla voitaisiin tuottaa.

## 2.2 Oikosulkumoottori generaattorina

Oikosulkumoottori, jota kutsutaan myös induktiokoneeksi sekä epätahtikoneeksi, on teollisuuden yleisin sähkökonetyyppi (Säädetyt sähkömoottorikäytöt, 2011,55). Voimakoneen pyörittäessä moottorin akselia verkon taajuuden määräämää moottorin sisäisen magneettivuon pyörimisnopeudetta nopeammin toimii oikosulkumoottori generaattorina. Tällöin käytetään nimitystä epätahtigeneraattori.

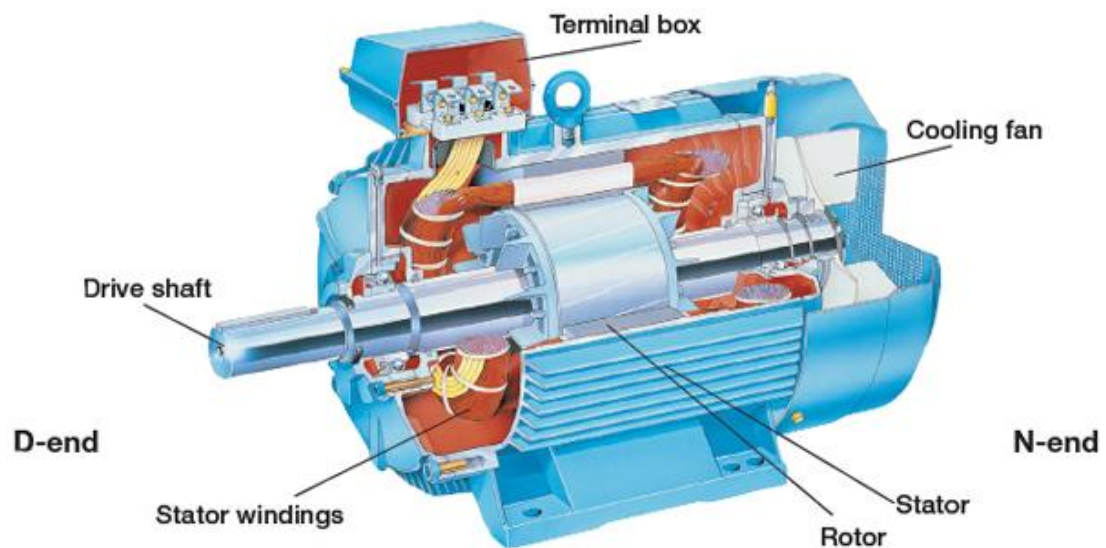
Suurista valmistuseristä ja yksinkertaisesta rakenteesta johtuen se on edullinen konetyyppi (Säädetyt sähkömoottorikäytöt, 2011,55). Epätahtikone ei ole teknisesti paras mahdollinen konetyyppi Rekolan vesivoimalaitoksen generaattoreiksi. Rekolan vesivoimalaitoksen alkuperäisten tahtikoneiden tuhoutuessa näiden korvaaminen oikosulkugeneraattoreilla on ollut teknistaloudellinen kompromissi. Turpiinien pyörimisnopeus on matala,  $\approx 300$  rpm, jolloin pyörintänopeutta tuleen nostaa vaihteella epätahtigeneraattorille sopivaksi. Mikäli vesivoimalaitoksen tekniikka saneerattaisiin täysin uudestaan, voitaisiin epätahtigeneraattorit vaihtaa teknisesti tarkoitukseen paremmin sopivampiin kestmagneettigeneraattoreihin. Kestomagneettigeneraattoreiden hyötysuhde pienillä pyörimisnopeuksilla ja osakuormilla on parempi verrattuna oikosulkugeneraattoriin. Tällöin voitaisiin ratkaisu toteuttaa ilman vaihdetta, joka parantaisi hyötysuhdetta, toisi toimintavarmuutta ja poistaisi vaihteiston öljyn aiheuttaman ympäristöriskin. Opinnäytetyössä tarkastellaan kuitenkin vain vaihtoehtoa, jossa vanhat epätahtigeneraattorit säilytetään.

Opinnäytetyössä käydään läpi verkkomagnetoidun epätahtigeneraattorin toimintaperiaate ja tämän mekaaninen hyötysuhde.

### 2.2.1 Epätahtigeneraattori

Generaattori on laite, jolla voidaan muuttaa generaattorin akselia pyörittävä mekaaninen liike-energia sähköenergiaksi (Tuulivoiman perusteet, 2014, 58). Vesivoimalaitoksessa generaattorin akselia pyörittävä mekaaninen liike-energia on peräisin turpiinilta. Generaattorin verkkoon syöttävän pätötehon määrän määrittää turpiinin tuottama mekaaninen teho.

Epätahtigeneraattorin rakenne on esitetty kuvassa 15.



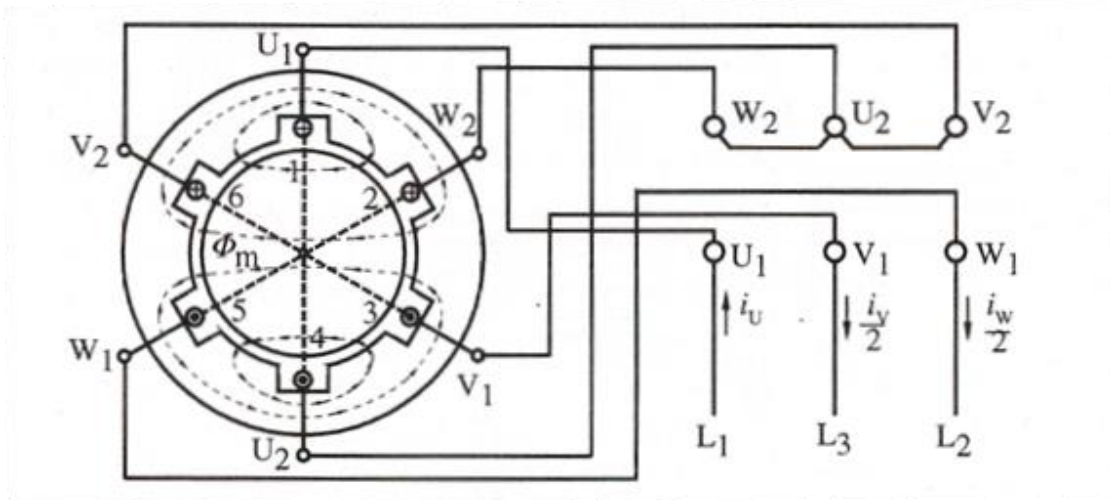
KUVA 15. Epätahtigeneraattorin rakenne (Digikey)

Epätahtigeneraattorin osat ovat roottori, staattori, staattori käämitys, kytkentärasia ja jäähdytyspuhallin (KUVA 15). Roottori ja staattori ovat mekaanisesti yhteydessä laakereilla, mutta vääntömomentti muodostuu staattorin kolmivaihekäämityksen aiheuttaman pyörivän sähkömagneettisen vuon ja roottoriin indusoituneen virran aiheuttaman sähkömagneettisen vuon vuorovaikutuksesta.

### 2.2.2 Staattorikäämityksen synnyttämä pyörivä magneettivuon

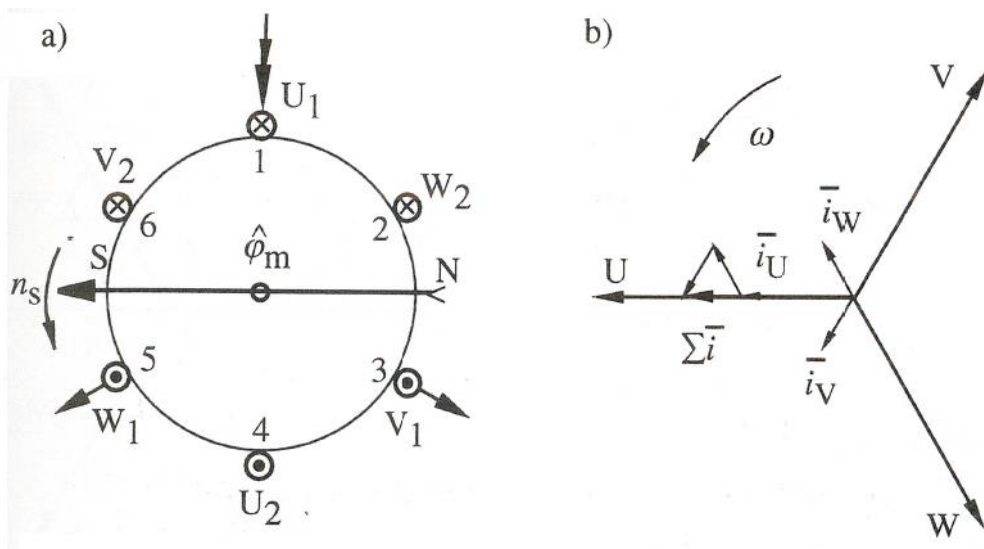
Epätahtigeneraattorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon (Säädetyt sähkömoottorikäytöt, 2011,55). Johtimeen kohdistuessa muuttuva magneettikenttä, aiheutuu sähkömagneettisen induktion seurauksena tämän päiden välille jännite, joka synnyttää johtimeen virran. Samoin myös johtimessa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän.

Epätahtigeneraattorissa staattorin kolmivaihekäämityksen yli olevan jännite-eron aiheuttama virta synnyttää epätahtigeneraattorin sisälle pyörivän magneettikentän.



KUVA 16. Yksinkertaistettu kaaviollinen esitys kolmivaihekäämityksen synnyttämästä pyörivästä magneettikentästä (Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet 1996)

Kuvassa 16 on esitetty epätahtigeneraattorin staattorin kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä. Epätahtigeneraattorin kytkentäkopassa oleviin liittimiin  $U_1$ ,  $V_1$  ja  $W_1$  kytetään vaiheet  $L_1$ ,  $L_2$  ja  $L_3$ . Kytkentäkopassa olevat liittimet  $W_2$ ,  $U_2$  ja  $V_2$  on yhdistetty, eli kone on kytketty tähtikytkentään. Kyseisellä hetkellä vaiheen  $L_1$  jännite on positiivisessa huippuarvossaan, jolloin kaksi muuta vaihetta ovat negatiivisilla puolijaksoillaan. Yhden vaiheen ollessa positiivisessa huippuarvossaan, ovat kahden muun vaiheen jännitteiden amplitudit yhtä suuret.



KUVA 17. Kolmivaihekäämityksen synnyttämä a) pyörivä magneettikenttä b) Jännitteiden ja virtojen osoittimet (Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet 1996)

Staattorin kolmivaihekäämitys on toteutettu siten, että yhden vaiheen virran aiheuttaman magneettikentän ollessa huippuarvossa, kahden muun vaiheiden virtojen aiheuttamat magneettikentät summantuvat samansuuntaisiksi. Tämä on nähtävissä kohdassa **b**, jossa summavirta  $\sum i$  muodostuu virroista  $i_U$ ,  $i_V$  ja  $i_W$ . Tämä virtojen yhteisvaikutus aiheuttaa kuvan 17 kohdan **a** magneettivuon  $\varphi_m$ . Jännitteiden vaihdellessa sinimuotoisesti, staattorin sisäinen magneettivuo pyörii akselinsa ympäri.

Staattorin käämien liittimissä oleva jännite-ero saa käämin läpi kulkemaan virran. Käämin läpi kulkeva ajan suhteen muuttuva virta synnyttää magneettivuon. Jännitteiden vaihdellessa sinimuotoisesti kolmivaihekäämityksen aiheuttamien magneettivöiden yhteisvaikutus pyörii verkon taajuuden kanssa samaa tahtia. Tällöin epätahtigeneraattorin sisälle syntyy verkon taajuudella pyörivä magneettivuo.

### 2.2.3 Epätahtigeneraattorin vääntömomentti

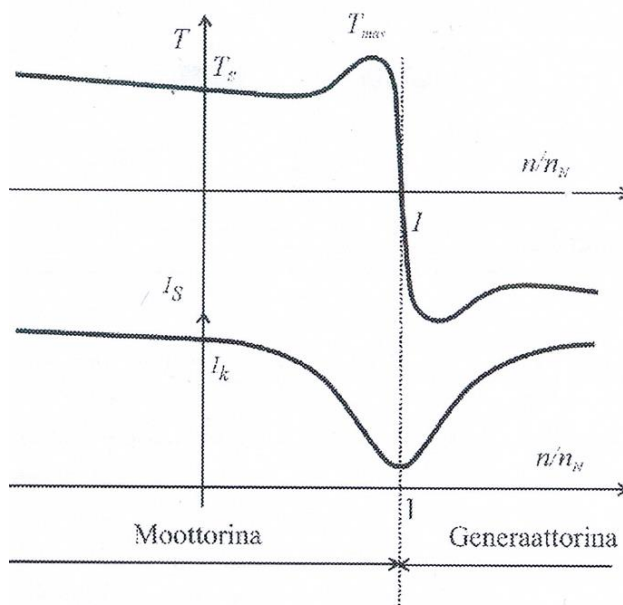
Epätahtikoneen roottori on oikosuljettu häkkikäämitys. Roottorin oikosuljetun häkkikäämityksen voidaan ajatella olevan muuttuvassa magneettikentässä oleva johdin. Tällöin sähkömagneettisen induktion vaikutuksesta roottorin häkkikäämitykseen indusoituu virta. Tämä roottorin häkkikäämityksessä kulkeva virta synnyttää oman magneettivuonsa. Staattorin sisällä vaikuttaa tällöin staattorin kolmivaihekäämityksen aiheuttama verkon vaihtojännitteen taajuuden määrittävällä nopeudella pyörivä magneettivuo ja roottorin häkkikäämitykseen indusoituneen virran aiheuttama magneettivuo.

Mikäli voimakone pyörittää epätahtigeneraattorin roottoria verkon vaihtojännitteen taajuuden määrittämän pyörimisnopeuden kanssa samalla taajuudella, ei häkkikäämitykseen kohdistu muuttuvaa magneettivuota. Tällöin ei roottorin häkkikäämitykseen indusoidu virtaa. Tällöin epätahtigeneraattorin momentti olisi nolla, ja tämä ottaisi verkosta vain staattorikäämitysten magnetointiin tarvittavan loisivirran ja tämän resistiivisiin häviöihin kuluvaan pätövirran. Tällöin staattorin sisällä vaikuttaisi vain kolmivaihekäämityksen aiheuttama magneettivuo.

Mikäli kuormitus jarruttaa (moottorikäyttö) tai voimakone pyörittää roottoria verkon pyörimistaajuutta nopeammin (generaattorikäyttö), häkkikäämitykseen kohdistuva muuttuva magneettivuo synnyttää induktion vaikutuksesta tähän virran. Tämä häkkikäämitykseen

indusoitunut virta synnyttää oman magneettivuonsa. Moottorin sisällä vaikuttavat kaksi magneettivuota pyrkivät tasapainotilanteeseen, jossa ne pyörivät samalla kierrosnopeudella vaihe-erossa toisiinsa nähden. Tästä vaihe-erosta tulee magneettinen vääntömomentti. Tällöin roottori pyörii epätahdissa staattorin aiheuttaman magneettivuon kanssa, josta tulee epätahtigeneraattorin nimitys. Jättämäksi kutsutaan staattorin magneettivuon pyörimisnopeuden ja roottorin pyörimisnopeuden suhteellista eroa.

KUVA 18 on esitetty epätahtigeneraattorin momentti ja virtakäyrät pyörimisnopeuden suhteen.



KUVA 18. Epätahtigeneraattorin momentti ja virta käyrät tämän toimiessa moottorina ja generaattorina (Säädetyt sähkömoottorikäytöt 2011)

Kuvassa 18 momentin pystyakseli  $T$  on piirretty moottorin pyörimisnopeuden 0 kohtaan. Katkoviivalla piirretty pysty viiva kuvaa tilannetta, jossa voimakone pyörittää epätahtigeneraattorin roottoria verkon synkronista pyörimisnopeustaaajuutta. Tällöin momentin nähdään olevan 0. Mikäli kuormitus jarruttaa pyörimisnopeutta, jättämä alkaa kasvaamaan. Tällöin moottori joutuu tekemään työtä pyörittääkseen akselia, jolloin tämä ottaa verkosta tähän tarvittavan pätötehon. Pyörimisnopeuden laskiessa moottorin aiheuttama momentti kasvaa kippimomenttiin  $T_{max}$  asti. Mikäli kuormamomentti kasvaa  $T_{max}$  yli, moottori menee jumiin. Kuten virtakäyrästä on nähtävissä, moottori ottaa silloin käynnistysvirtansa. Mikäli voimakone pyörittää roottoria verkon synkronista pyörimisnopeutta nopeammin, tällöin epätahtigeneraattori alkaa toimimaan jarruna. Epätahtigeneraattorin

jarrutuksessa vapautuva energia muuttuu sähköenergiaksi, joka syötetään verkon kuormituslaitteille.

#### 2.2.4 Epätahtigeneraattorin magnetointi

Johdin on resistiivinen komponentti. Johtimen päiden välille kytketty vaihtojännite synnyttää johtimen läpi virran, joka lämmittää johdinta. Jännite ja virta ovat resistiivisellä kuormituksella saman vaiheisia. Tällöin johtimen lämmittämiseen kulutettu energia on pätötehoa.

Kun johdinta kierretään käämiksi, muodostuu käämin rakenteesta johtuen käämille johtimen resistiivisen komponentin lisäksi myös induktiivinen komponentti. Tämä tarkoittaa, että käämi vastustaa tämän läpi kulkevan virran muutosta. Tästä seuraa, että käämin päihin kytketyllä vaihtojännitteellä on vaihe-erokulmaa käämin läpi kulkevan virran kanssa. Käämin läpi kulkeva virta synnyttää käämiin magneettikentän, johon varastoituu energiaa. Jännitteen noustessa käämin yli energiaa varastoituu käämin magneettikenttään ja jännitteen laskiessa energiaa purkautuu magneettikentästä. Tätä energiaa kutsutaan loistehoksi.

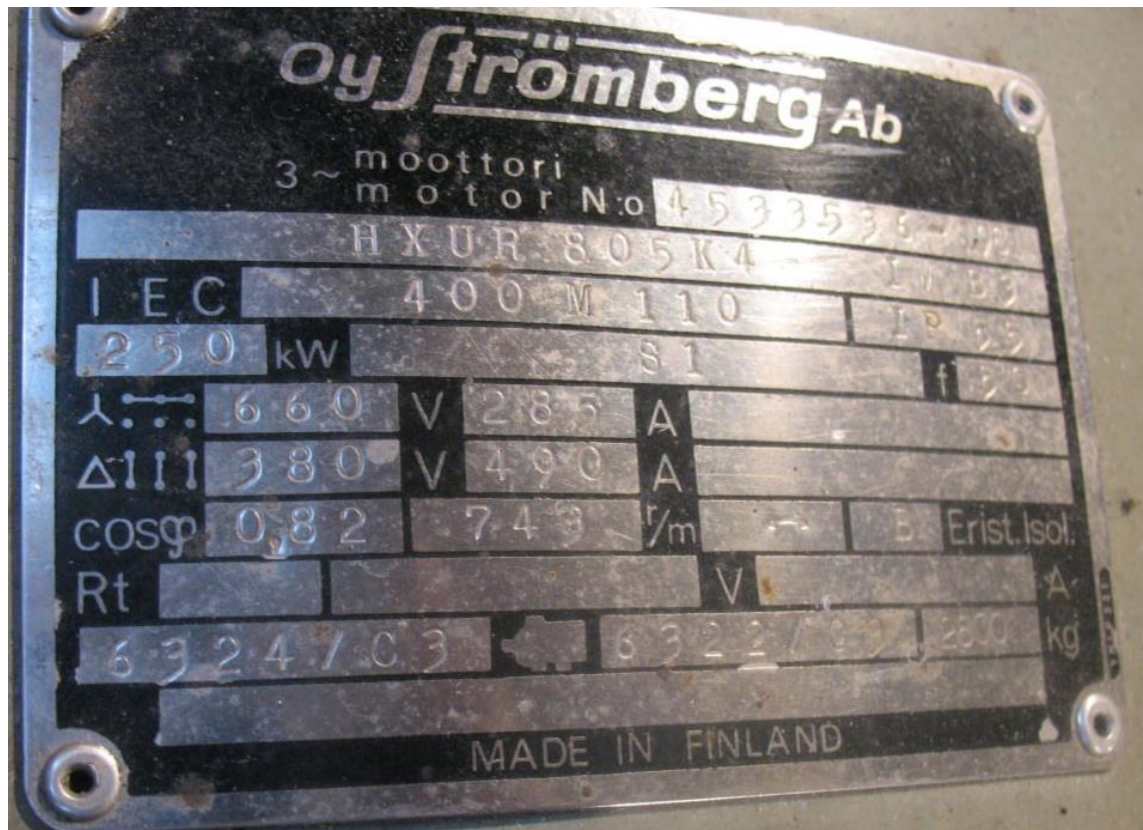
Loistehoa varastoituu myös kapasitiivisten komponenttien sähkökenttään. Induktiivinen kuorman yhteyteen tarvitsee tällöin myös kapasitiivinen kuorma, jotta loisteho voi varastoitua vuoroin käämin magneetti kenttään ja esimerkiksi kondensaattorin sähkökenttään. Epätahtigeneraattori on käämirakenteestaan johtuen hyvin induktiivinen komponentti, joten tämä tarvitsee kuormakseen resistiivisen kuorman lisäksi kapasitiivista kuormaa. Tahdigeneraattoreista poiketen epätahtigeneraattori ei pysty tuottamana itse omaa magnetointiaan.

Epätahtigeneraattorit voidaan jakaa kahteen ryhmään magnetoinnin perusteella. Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori saa magnetointinsa magnetoimiskondensaattoreista. joten ne pystyvät syöttämään sähkötehoa jännitteettömiin verkkoihin. Näitä voidaan käyttää esimerkiksi syrjäisissä paikoissa varageneraattoreina, joissa voimakoneena toimii poltto – tai dieselmoottori. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori saa magnetointinsa verkosta, joten ne eivät pysty syöttämään sähkötehoa muuhun kuin jännitteisiin verkkoihin. (Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 177).



### 2.2.5 Epätahtigeneraattorin mekaaninen hyötysuhde

Moottorivalmistajat ilmoittavat epätahtigeneraattorien tyyppitiedot tyyppikilvessä. Rekolan vesivoimalaitoksella on käytössä kaksi samanlaista epätahtigeneraattoria, joiden tyyppikilven arvot on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19: Epätahtigeneraattorin tyyppikilpi

Sama laite voi toimia joko moottorina tai epätahtigeneraattorina. Kuvan 1 pyörimisnopeus on ilmoitettu tämän toimiessa moottorina. Epätahtigeneraattorina pyörimisnopeus on kuormituksen aiheuttamasta jättämästä riippuen noin 755 rpm.

Epätahtigeneraattorin tyyppikilvessä ilmoitetaan epätahtigeneraattorin akselilta nimellisasteessa saatava mekaaninen teho. Epätahtigeneraattorin mekaaninen hyötysuhde voidaan laskea kaavalla (18),

$$\eta_m = \frac{P_s}{P_{mek}} \cdot 100\% \quad (18)$$

jossa  $\eta_m$  on epätahtigeneraattorin mekaaninen hyötysuhde prosentteina,  $P_s$  on epätahtigeneraattorin sähköinen pätöteho ( $kW$ ) ja  $P_{mek}$  on epätahtigeneraattorin mekaaninen teho ( $kW$ ) (Muuntajat ja sähkökoneet, 2011,86). Oikosulkumoottori toimiessaan generaattorina tuottaa itse omiin häviöihinsä kuluvaan pätötehoon.

Kaavan (18) sähköinen pätöteho nimellispisteessä voidaan laskea moottorin kilpiarvoista kaavalla (19),

$$P_s = \sqrt{3} \cdot I_N \cdot U_N \cdot \cos(\varphi) \quad (19)$$

jossa  $P_s$  on moottorin sähköinen pätöteho ( $W$ ),  $I_N$  on moottorin nimellisvirta,  $U_N$  on moottorin nimellisjännite ja  $\cos(\varphi)$  on moottorin tehokerroin (Muuntajat ja sähkökoneet, 2011,85). Oikosulkumoottorin hyötysuhde putoaa moottorin toimiessa osakuormilla (TAULUKKO 1).

TAULUKKO 1. Oikosulkumoottorin käyttäytyminen osakuormilla 6 – 12 napaiselle koneelle (Teknistä perustietoa oikosulkumoottoreista, ABB)

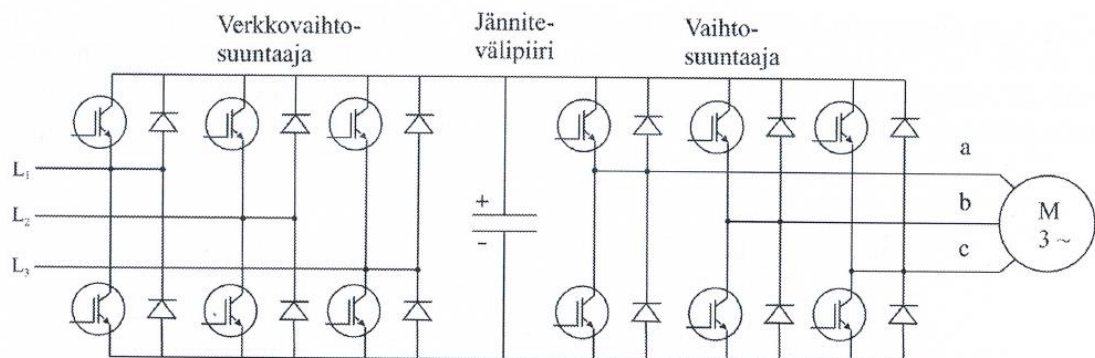
Kuormitus $P_n \times$	1	0,75	0,5	0,25
Hyötysuhde $\eta$ [%]	96	96	94	91
Tehokerroin $\cos(\phi)$	0,82	0,76	0,66	0,46

Säädetyssä käytössä oikosulkumoottorin pyörintänopeutta laskettaessa tämän hyötysuhde huononee. Työssä tutkittavat moottorit ovat vanhoja ja taulukon 1 arvot ovat nykyaikaisille moottoreille. Nämä tekijät aiheuttavat epätarkkuutta laskentaan.

### 2.3 Verkkovaihtosuuntaaja

Verkkovaihtosuuntaaja on taajuusmuuntaja aktiivisella tasasuuntauskomponentilla. Verkkovaihtosuunta voidaan toteuttaa kahdella vaihtosuuntaajalla, joilla on yhteinen jännitevälipiiriin (KUVA 20). Vaihtosuuntaajaksi kutsutaan kytkentää, jolla tasajännitteestä

voidaan muodostaa halutun taajuista vaihtojännitettä (Tehoelektronikan perusteet, 2011,87). Vaihtosuuntaajaa kutsutaan myös invertteriksi.

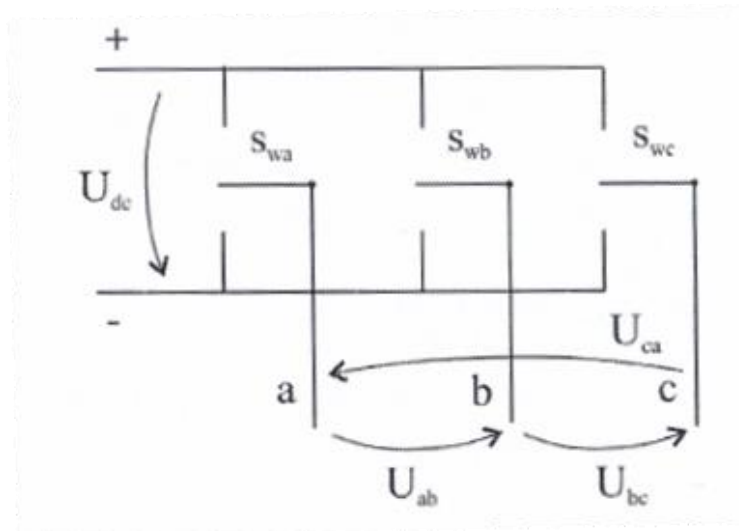


KUVA 20. Verkkovaihtosuuntaaja (Tehoelektronikan perusteet 2011)

Missä taajuusmuuntajalla pystytään vain ottamaan tehoa verkosta, verkkovaihtosuuntaajalla pystytään myös syöttämään tehoa takaisin verkkoon. Kuvassa 20 on IGBT (insulated gate bipolar transistor) transistoreilla toteutettu verkkovaihtosuuntaaja. Tasasuuntaus voitaisiin toteuttaa myös tyristori tasasuuntaussillalla (Tehoelektronikan perusteet, 2011, 93). Verkkovaihtosuuntaaja pystyy säätämään verkon näkemää tehokerrointa ja pitämään sen lähes yhtenä (Säädetyt sähkömoottorikäytöt, 2011,102).

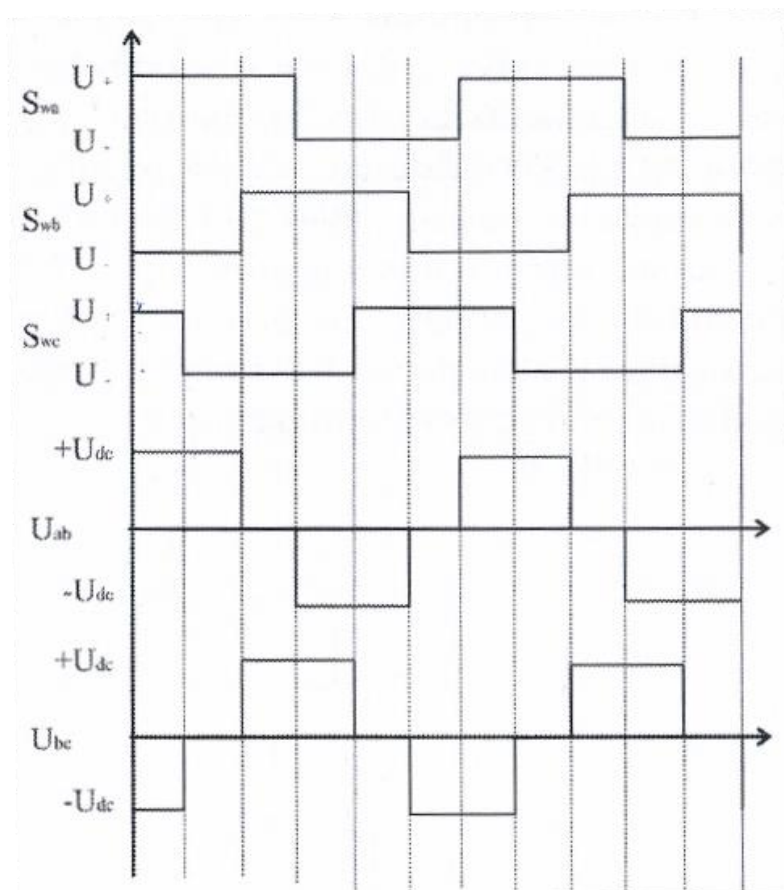
### 2.3.1 Verkkovaihtosuuntaajan toimintaperiaate

Verkkovaihtosuuntaajan verkon ja generaattorin puoleiset vaihtosuuntaajat toimivat samalla tavalla. Nämä kytkevät välipiirin tasajännitettä suurella kytkentätaajuudella eri kytkentäkombinaatioilla vaihtojännitepuolelle, luoden pulssimoduloidun, näennäisesti sinimuotoisesti vaihtelevan jännitteen. Tämä on käytännössä sopivasti pilkottu kantiaalto, jonka pulssinleveys suhdetta muuntamalla saadaan suotimen jälkeen näennäisesti sinimuotoisesti vaihteleva jännite. Vaihtosuuntaajaa voidaan mallintaa seuraavalla kytkinmallilla (KUVA 21).



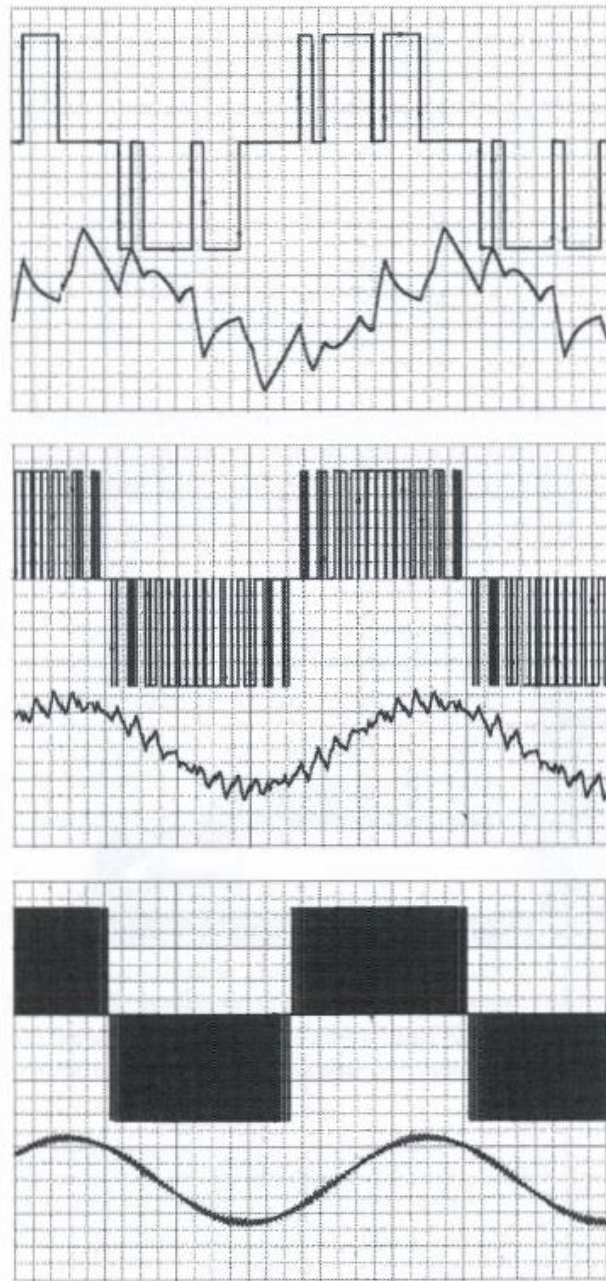
KUVA 21. Vaihtosuuntaajan mallintaminen kytkentämallilla (Tehoelektronikan perusteet 2011)

Kuvassa 21 vasemmalla  $U_{dc}$  kuvaa välipiirin tasajännitettä, joka on amplitudiltaan verkon vaihejännitteen tehollisarvoa suurempi. Kytkimet  $S_{wa}$ ,  $S_{wb}$  ja  $S_{wc}$  kuvaavat vaihtosuuntaajan IGBT transistoreja. Vaihejännitteet saadaan liittimien a, b ja c välistä. Jännitteen muodostuminen on kuvattu kuvassa 22.



KUVA 22. Vaihtosuuntaajan muodostama jännite (Tehoelektronikan perusteet 2011)

Ylimmäisenä kuvassa 22 on kohdissa  $S_{wa}$ ,  $S_{wb}$  ja  $S_{wc}$  kuvattu kytkimien asento. Kytkimet kytkevät liittimet  $a$ ,  $b$  ja  $c$  vuoroin välipiirinjännitteen negatiiviseen ja positiiviseen potentiaaliin. Vaihejännitteet  $U_{ab}$  ja  $U_{bc}$  muodostuvat näiden liittimen välille. Kun tarkastellaan jännitettä  $U_{ab}$ , nähdään kytkimen  $S_{wa}$  muodosta potentiaali liittimeen **a** positiivisena ja kytkimen  $S_{wb}$  muodosta jännite liittimeen **b** negatiivisena. Jännite  $U_{ab}$  muodostuu kytkimien  $S_{wa}$  ja  $S_{wb}$  jännitteistä. Vaihejännitteessä on nähtävissä vaihtojännite. Kun näitä vuoroin negatiivisia ja vuoroin positiivisia pulsseja aletaan katkomaan, voidaan kytkentäaajuudesta riippuen luoda yhä enemmän näennäisesti sinimuotoisesti vaihteleva vaihtojännite (KUVA 23).



KUVA 23. Vaihtosuuntajan pääjännitteen ja virran kuvaajat erilaisilla pulssiluvuilla moottorikäytössä. 150 Hz, 1 kHz ja 4 kHz. (Tehoelektronikan perusteet 2011)

Kuvassa 23 on esitetty pääjännitteet ja virran kuvaajat eri kytkentätaajuuksilla. Verkon jännitteen taajuus määräytyy pulssin muodostukseen käytetystä ajasta. Jännitteen tehollisarvo määräytyy pulssien pinta-alasta. Pulssimoduloidun jännitteen pulssin amplitudi on välijännitepiirin tasajännitteen suuruinen. Mikäli pulssimoduloidun näennäisesti sinimuotoisen jännitteen tehollisarvon amplitudia haluttaisiin pienentää, olisi välipiirin jännite vähemmän aikaa kytkettynä vaihtosähköpuolelle. Tällöin jakson aika ei muuttuisi, mutta yksittäisten pulssien pinta-ala pienenesi.

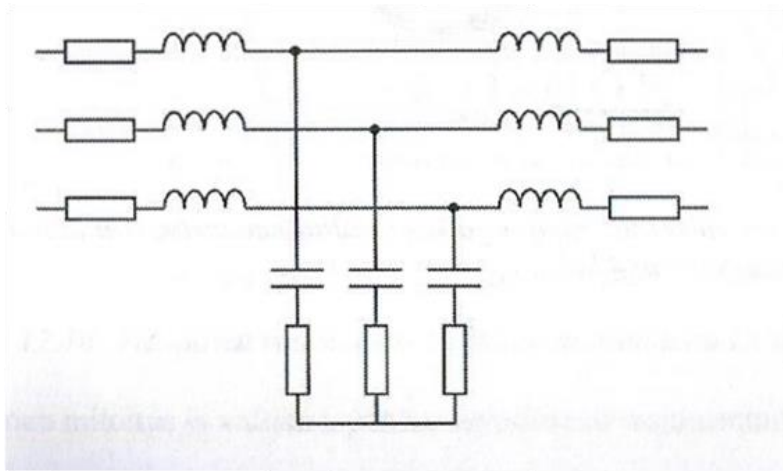
Generaattorin tarvitsema loisteho on käytännössä virran ja jännitteen vaihe-ero kulma. IGBT-transistorin ollessa johtamattomana pääsee moottori ottamaan tarvitsemansa virran nolladiodin kautta (KUVA 20). Käytännössä jännite menee tällöin nollassa. (Asiantuntijalausunto, Hietalahti, L,2015)

### 2.3.2 Suotimet ja yliaallot

Moottorin ollessa induktiivinen komponentti rajoittaa tämän virran muutosnopeutta. Tämän vuoksi kuvan 23 virran kuvaajasta tulee sinimuotoista. Jännitteen suuresta kytkentätaajuudesta johtuen aiheuttaa tämä häiriöitä ympäröiviin laitteisiin.

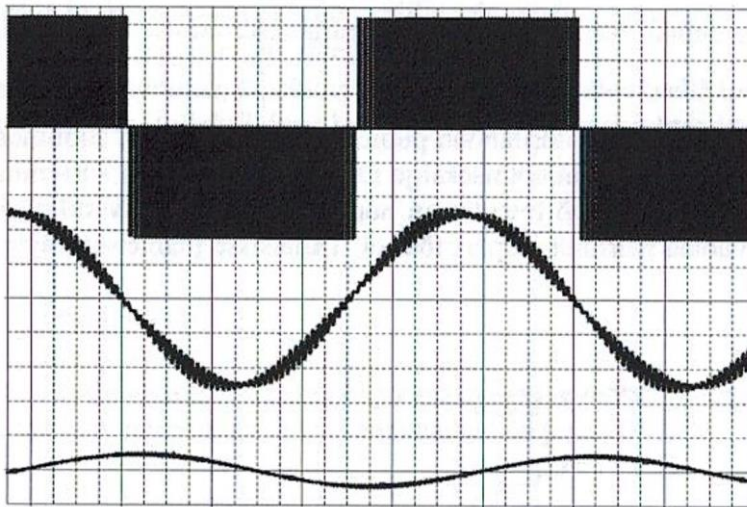
Kondensaattori koostuu kahdesta toisistaan eristeellä erotetusta levyistä, joilla on potentiaaliero. Levyjen välille muodostuu sähkökenttä, johon voidaan varastoida energiaa. Tämä sähkökenttä tarjoaa sähkövirralle kulkureitin näiden kahden levyn välille. Kondensaattorin reaktanssiksi kutsutaan tämän virran kulkua rajoittavaa ominaisuutta. Kondensaattorin reaktanssi on kääntäen verrannollinen jännitteen taajuuteen, jolloin tasavirralla kondensaattori on ääretön vastus. Jännitteen taajuuden kasvaessa reaktanssi pienenee. Pulssimoduloitu jännite koostuu useista nopeista pulsseista, jolloin jännitteiden nousunopeudet aiheuttavat jännitteelle korkeita yliaaltotaajuuksia. Moottorin käämitys ja maapotentiaaliin kytketty runko voidaan ajatella olevan toisistaan eristeellä erotetut kaksi levyä, joilla on potentiaaliero. Normaaleilla verkon taajuuksien kannalta näiden muodostaman kondensaattorin reaktanssi on hyvin suuri, mutta pulssimoduloinnin aiheuttamille jännitteen korkeille yliaalloille tämä reaktanssi voi näkyä hyvin pienenä.

Taajuusmuuntaja kuormittaa verkkoa passiivisen tasasuuntauskomponenttinsa vuoksi virran yliaalloilla. Verkkovaihtosuuntaajan aktiivisen tasasuuntauskomponentin ansiosta verkosta otettu virta saadaan hyvin sinimuotoiseksi. Verkkovaihtosuuntaajan sähköverkkoon aiheuttamat häiriöongelmat ovatkin suuresta kytkentätaajuudesta johtuvia EMC-häiriöitä (Electro Magnetic Compatibility). Nämä voidaan suodattaa lisäämällä verkon ja verkkovaihtosuuntaajan väliin LC tai LCL suodin (KUVA 24).



KUVA 24. LCL-Suodin (Säädetyt sähkömoottorikäytöt 2014)

Työssä tutkittiin mahdollisuutta, jossa muuntajan impedanssia olisi voitu hyödyntää verkon puolella tarvittavassa LCL kuristimessa. Kuitenkin valmistajien suotimet ovat tarkkaan mitoitettuja, joten tätä ei olisi voitu hyödyntää.



KUVA 25. Ylhäällä pulssimoduloitu jännite, keskelle suodatettu pulssimoduloitu jännite ja alhaalla pulssimoduloidun jännitteen aiheuttama virta induktiivisella kuormalla. (Säädetyt sähkömoottorikäytöt 2014)

Kuvassa 25 on esitetty taajuusmuuntajan moottorille syöttävä pulssimoduloitu jännite, suotimen jälkeen moottorin näkevä näennäisesti sinimuotoisesti vaihteleva jännite ja moottorin ottama virta. Moottorin ottama virta on sinimuotoista, koska moottori on hyvin induktiivinen komponentti, jolloin se vastustaa virran muutosta.



Jännitteen muodosta seuraavista jännitteen yliaalloista voi aiheutua myös ylimääräisiä häviöitä muuntajassa, epätahtigeneraattorissa, kaapeleissa. Myöskin kytkentätaajuus voi aiheuttaa äänihaittoja. (Tehoelektroniikan perusteet, 2011, 93).

Verkkovaihtosuuntaajan pulssimoduloidun jännitteen korkeataajuuskomponentit aiheuttavat sähkömagneettista häiriötä ympäristöön. Näitä voidaan rajoittaa kaapeloinnin uusinnalla ja generaattorin päässä holkkitiivisteiden vaihdolla. Kyseisessä vesivoimalaitoksessa ei ole häiriölle alttiita laitteita, joten tämä ei muodostu ongelmaksi.

Pulssimoduloidun jännitteen suuresta muutosnopeudesta johtuen käämin alku- ja loppupään välillä on suuri jännite-ero. Tämä päiden jännitteiden amplitudien ero koettelee käämin eristeiden jännitekestoisuutta. Tämä voi aiheuttaa läpilyönnin käämin kierroksien välillä.  $DU/dt$  suodin rajoittaisi jännitteen muutosnopeutta, jolloin käämin päiden välillä ei olisi niin suurta jännite-eroa. Rekolan vesivoimalaitoksessa on käytössä vanhat 1980-luvulta peräisin olevat epätahtigeneraattorit. Moottorit ovat 400/690 V eristeillä, joka parantaa tilannetta jännitekestoisuuden kannalta. Kuitenkaan nämä molemmat asiat huomioiduna ei valmistaja takaa vanhojen epätahtigeneraattorien kestävän (Tammi, A. 2015).

Pulssimoduloitu jännite aiheuttaa neutraalijännitteeseen tasajännitevälipiiriin jännitteeseen verrannollisen verkkovaihtosuuntaajan kytkentätaajuudella vaihtelevan jännitteen. Tätä kutsutaan yhteismuotoiseksi jännitteeksi. Tätä yhteismuotoista jännitettä voidaan suodattaa common mode filterillä. Common mode suodin alentaa jännitettä, mutta ei kokonaan poista sitä. (Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä, ABB.) Symmetrisellä kaapeloinnilla voidaan estää yhteismuotoisen jännitteen indusoitumista PE-johtimeen ja sitä kautta runkoon. Mikäli symmetrisen kaapelointia ei toteuteta symmetrisellä kaapelilla, on kiinnitettävä erityistä huomiota rungon maadoittamiseen. Tällöin maadoitus on tehtävä punotulla lattajohtimella. (Tammi, A. 2015.)

Suurissa moottoreissa/generaattoreissa yhteismuotoinen jännite voi aiheuttaa korkeataajuisen virran kulkemaan moottorin akselin, laakerien ja staattorin rungon muodostamaan virtapiiriin (Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä, ABB). Kiertävä virta voidaan estää vaihtamalla N-pään laakeri eristetyksi laakeriksi.

Staattorin runkoon vuotavan virran on virrattava takasin vaihtosuuntaajaan. Kaikki paluureitit sisältävät impedanssia, joten moottorin rungon jännite kasvaa lähdemään tasoon

verrattuna. Akselin ollessa maadoitettu näkyy rungon jännite laakereissa. Mikäli jännite ylittää laakerien öljykalvon läpilyöntijännitteen, osa virrasta vuotaa laakerin, askelin ja käytettävän laitteen tai vaihdelaatikon kautta takaisin vaihtosuuntaajaan. (Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä, ABB). Tämä akselin maadoitusvirta voidaan estää parantamalla moottorin rungon ja vaihtosuuntaajan välistä maadoitusta, sekä maadoittamalla moottorin runko erikseen punotulla lattajohtimella. Tällöin jännite-ero laakerien yli saadaan pienennettyä. Symmetrisessä kaapelissa on yleensä punottu suojakuori, mikä yhdistetään generaattorin ja verkkovaihtosuuntaajaan EMC holkkitiivisteiden kautta. (Tammi, A. 2015.)

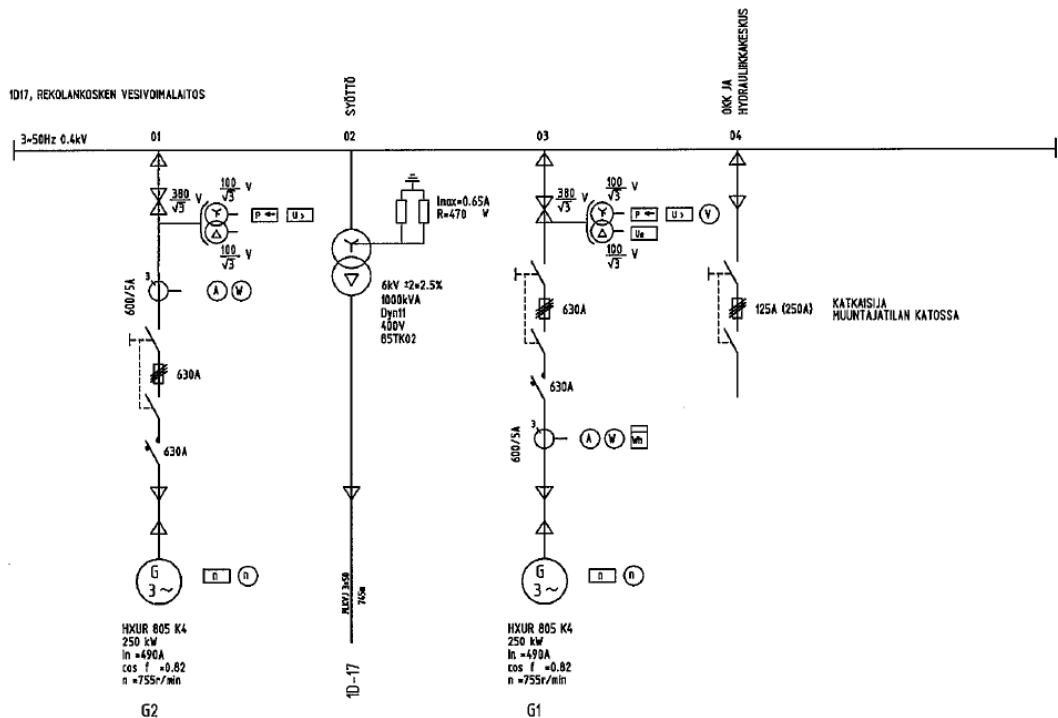
Rekolan vesivoimalaitoksen tapauksessa toimenpiteinä laakerivirtojen estämiseksi voisivat olla N-pään laakerin vaihtaminen ja common mode suotimen lisääminen. Nämä ovat valmistajan suositellut toimenpiteet runkokoon ollessa IEC 400. (Low voltage process performance motors, ABB).

Akselin maadoitusvirran estämiseksi toimenpiteinä olisi kaapeloinnin uusiminen symmetrisellä kaapelilla tai maadoitusten vahvistaminen punotulla lattajohdolla. Valmistajan mukaan moottorin jännitetason ollessa yli 500 V suositellaan asennettavaksi du/dt suodin (Low voltage process performance motors, ABB).

Generaattorit ovat 400 V jännitetasoon kytkettyjä 380/660 V eristeillä. Generaattorit ovat vanhoja, joten jänniterasitusten kannalta tilannetta helpottavat du/dt suotimien hankintaa olisi syytä harkita.

### 3 REKOLAN VESIVOIMALAITOS

Rekolan vesivoimalaitos on UPM Kymmenen Kaipolan paperitehtaan yhteydessä oleva 1920 luvulla rakennettu vesivoimalaitos. Vesi laskee Kankarisvedestä vesivoimalaitoksen läpi Koskikeskiseen. Laitoksessa on kaksi makaavaa nimellistehoaltaan 240 kW tehoista kaksoisfrancis-turpiinia. Turpiinit ovat Tampella Oy:n toimittamia. Turpiinit pyörittävät vaihteen välityksellä nimellistehoaltaan 250 kW epätahtigeneraattoreita.



KUVA 26. Vesivoimalaitoksen pääpiirikaavio

Laitoksella on oma 1 MVA muuntaja, joka on yhteydessä tehtaan 6 kV keskijänniteverkkoon. Vesivoimalaitoksen omaan sähköverkkoon kuuluu moottoreiden lisäksi laitoksen valaistus, käyttösähkö ja hydrauliikkakeskus (KUVA 26).

Rekolan vesivoimalaitos otettiin käyttöön vuonna 1922. Tällöin laitoksen turpiinit pyörittivät kahta tahtigeneraattoria. Vuonna 1981 toinen tahtigeneraattoreista paloi ja se korvattiin epätahtigeneraattorilla. Vuonna 1989 toinenkin tahtikone korvattiin epätahtigeneraattorilla. Voimalaitoksella on ollut omat säätäjät, mutta ne on purettu. Nykyään laitosta ohjataan tehtaan valvomosta käsin. Voimalaitoksella on myös paikallisohjauksen mahdollisuus.

Vesivoimalaitoksen turpiinien veden tilavuusvirta mitattiin pitämällä koskikeskisen pinta vakiona Patalan voimalaitoksella sijaitsevan ohjuoksutusluukun avulla. Tällöin Patalan ohjuoksutusluukun avauman perusteella pystyttiin arvioimaan tilavuusvirta Rekolan vesivoimalaitoksen läpi. Patalan on toinen UPM Kymmenen yhteydessä oleva vesivoimalaitos, jonka läpi Koskikeskisen vesi johdetaan. Kummaltakin turpiinilta mitattiin virtaamat täydellä ja minimiteholla. Tulokset on esitetty taulukossa 2. Turpiini kaksi tuottaa huomattavasti vähemmän tehoa kuin turpiini yksi. Tämä johtuu siitä, että turpiinin kaksi läpi virtaa vähemmän vettä solukkeiden ollessa täysin auki. Turpiinien kunto on tarkastettu ja sukeltaja on käynyt tarkastamassa imuputken, mutta syy turpiinien tehontuotantoon ei ole selvinnyt.

Rekolan tehontuotantoon kiinnitettiin automaatiokunnossapidon yhteydessä huomiota noin kolme vuotta sitten. Toisella turpiineista pystyttiin tuottamaan vähemmän tehoa kuin toisella. Näiden havaintojen perusteella vähemmän tehoa tuottavan turpiiniin vanttiruuvia pidenettiin, jolloin solukkeita saatiin enemmän auki.



Kuva 27. Rekolan vesivoimalaitoksen toisen turpiinin vanttiruuvi

Vanttiruuvilla säädetään solukkeiden asentoa. Tämä paransi tehontuotanto kykyä, mutta turpiinit eivät silti tuota vielä saman verran tehoa.

TAULUKKO 2. Virtausmittausten tulokset

Turpiini	Q[m <sup>3</sup> /s]	P[kW]
G1	5	160
G1	3	60
G2	4	135
G2	2,5	50

Generaattorit on pysäytetty tähän mennessä viimeistään 30 kW teholla. Kokeellisesti osoitettiin, että turpiinilla kaksi voitaisiin ajaa täysin nolla teholla asti, kunnes takatehorele laukeaa. Tilanne, jossa turpiini ei ota eikä syötä verkkoon tehoa, tarkoittaa sitä, että epätahtigeneraattori tuottaa omiin häviöihinsä tarvitseman pätötehon. Rekolan vesivoimalaitoksella vesitilanteen ollessa vähäinen, on vesi juoksutettu turpiinin sijasta ohijuokutusluukun kautta. Tämä on käytön kannalta helpompi tehdä. Verkkovaihtosuuntaajalla veden juoksutuksen säätely automatisoitaisiin, jolloin kaikki saatavilla oleva vesi käytettäisiin hyödyksi. Todellisuudessa tämä hyöty jää kuitenkin pieneksi, sillä vaikka pienillä vesimäärillä pyörimisnopeuden säätö toisi paremman hyötysuhteen, ei tämä tehon määrän ollessa hyvin pieni ole merkittävä. Kankarisveden ala- ja ylärajat ovat säädeltyjä (KUVIO 1).



KUVIO 1. Kankarisveden pinta korkeuserona merenpinnasta vuonna 2014. Yläraja punaisella, alaraja vihreällä ja pinnankorkeus sinisellä.

Koskikeskisen pinnanvaihtelu väli on noin 20 cm. Turpiinien tehontuotannon kannalta putouskorkeus tulisi pitää mahdollisimman korkeana. Kuitenkin vesistöjen pintojen säätely on tärkeämpää. Keväällä tulee valmistautua tulviin, jolloin virtaamat voivat nousta moninkertaisiksi. Tästä johtuu huhtikuun kohdalla oleva pudotus ylärajassa. Tulva-aikana vettä kaikki vesi ei mahdu turpiinien läpi, joten osa johdetaan ohijuokutusluukun lävitse.

Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinikammiot tyhjenetään huollon ajaksi. Kuvassa 27 on huollon aikana otettu valokuva turpiinikammioista.



Kuva 28. Rekolan vesivoimalaitoksen turpiinikammio (UPM Kymmene)

Kuvassa 28 näkyy vasemmalla ja oikealla solukkeista koostuvat johtopyörästöt. Näiden ohjaamiseen käytetty ruuvi näkyy kuvassa alhaalla.



Kuva 29. Turpiinin johtopyörästä (UPM Kymmene)



Kuva 30. Solukkeiden välistä otettu kuva turpiinin juoksupyörästä (UPM Kymmene)



Kuva 31. Rekolan vesivoimalaitoksen välppä (UPM Kymmene)

Kuvissa 29 ja 30 on valokuvat turpiinin toisesta johtopyörästä ja juoksupyörästä. Kuvassa 31 on turpiinikammioista otettu valokuva välpistä. Tämän takana näkyy alas laskettu patoluukku.



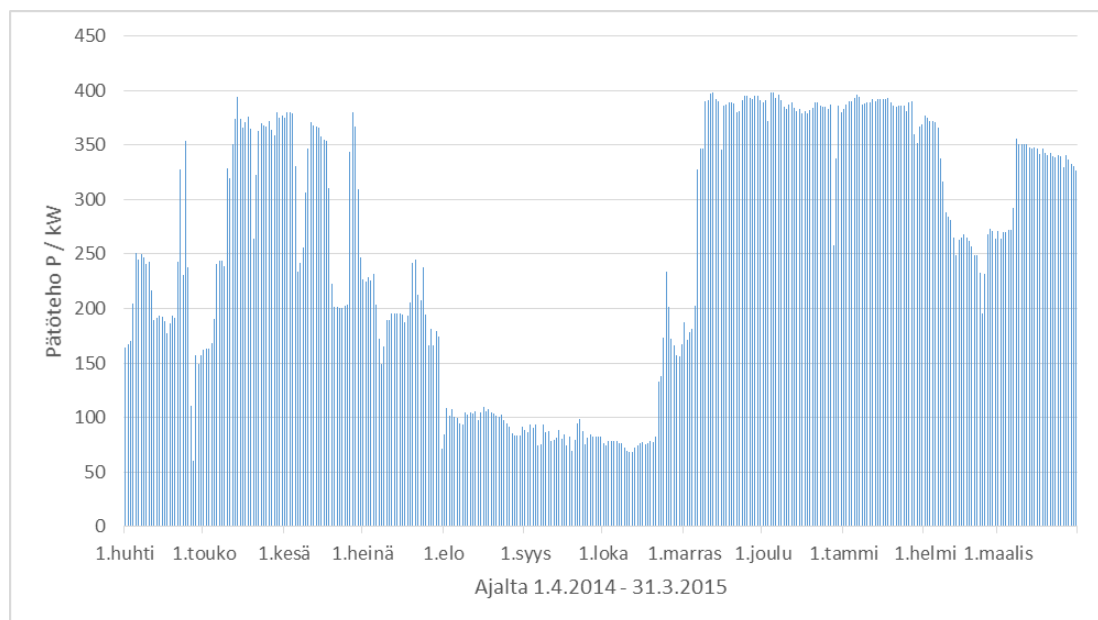
## 4 TEKNILLINEN KEHITYS

Tässä luvussa käydään läpi turpiinin pyörimisnopeuden säätämisestä saatavan hyödyn laskenta ja laskentaa varten tehdyt oletukset. Kantaa otetaan myös kuinka turpiinin pyörintänopeutta tulisi säätää, mikäli pyörimisnopeuden säätö olisi mahdollista.

### 4.1 Turpiinin pyörimisnopeuden säätämisestä saatava hyöty

Pyörimisnopeussäädöllä voitaisiin turpiinia ajaa parhaalla hyötysuhteella putouskorkeuden vaihdellessa. Tässä luvussa käydään läpi, kuinka paljon enemmän tehoa yhden vuoden aikana nopeussäädetyllä järjestelmällä olisi voitu tuottaa. Tätä käytetään perustana takaisinmaksusuunnitelman laatimiseen. Kaikki luvussa tehtävät esimerkkilaskut ovat laskettu päivälle 1.4.2014.

Vesivoimalaitokselta on tiedossa laitoksen tuottama sähköinen pätöteho (KUVIO 1). Tiedossa ei kuitenkaan ole, millä turpiinin kombinaatiolla se on tuotettu.



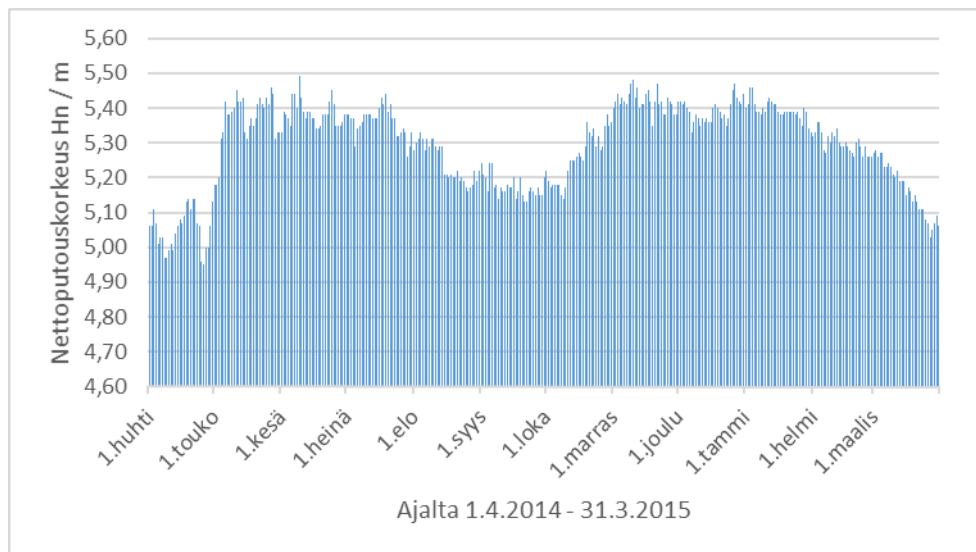
KUVIO 2. Vesivoimalaitoksen tuottama sähköinen pätöteho

Tehoa on tuotettu keskimäärin 232 kW. Pienin tuotettu teho on 55 kW ja suurin 365 kW. Tarkasteltavaksi valitulta ajankohdalta 1.4.2014 – 31.3.2015 on tiedossa myös järvien

pinnankorkeudet. Kankarisveden ja Koskikeskisen pintojen korkeudesta saadaan laskettua nettoputouskorkeus kaavalla (13). Nettoputouskorkeus on laskettu numeerisin arvoin kaavassa (20).

$$H_n = 97,40 \text{ m} - 92,27 \text{ m} - 0,07 \text{ m} = 5,06 \text{ m} \quad (20)$$

Järvien pinnankorkeudet on ilmoitettu korkeutena merenpinnasta. Kuviossa 3 on esitetty nettoputouskorkeus koko tarkasteluväliltä.



KUVIO 3. Nettoputouskorkeus ajalta 1.4.2014 31.3.2015

Generaattorin kilpiarvoista ja valmistajan materiaalista saatiin tarvittavat lähtötiedot. Moottorin kilpiarvot on esitetty aiemmin työssä (kuva 19). Vaihteen hyötysuhteena käytettiin 96 prosenttia. Turpiinivalmistajalta saatiin kyseisten turpiinien halkaisijat ja samanmuotoisen turpiinin simpukakkäyrästä. Näiden avulla voitiin laskea voimalaitoksen turpiinien todelliset hyötysuhteet eri toimintapisteissä. Lähtötietojen pohjalta on tehty oletuksia, jotka on käsitelty luvussa 4.2.

Ensimmäiseksi tulee selvittää turpiinin akselille tuottama mekaaninen teho. Tämä voidaan laskea kaavalla (12). Turpiinin tuottama teho on laskettu numeerisin arvoin kaavassa (21).

$$P_t = \frac{150,4 \text{ kW}}{0,96 \cdot 0,96} = 163,2 \text{ kW} \quad (21)$$

Turpiinin akselille tuotetusta tehosta voidaan laskea 4 metrin putouskorkeuden mallikokeen teho  $P_4$  kaavalla (11). Tämä on laskettu numeerisin arvoihin kaavassa (22).

$$P_4 = \frac{163,2 \text{ kW}}{0,2179 \frac{\text{kW}}{\text{HV}} \cdot (0,85 \text{ m})^2 \cdot 5,06 \text{ m} \cdot \sqrt{5,06} \cdot 2} = 45,53 \text{ HV} \quad (22)$$

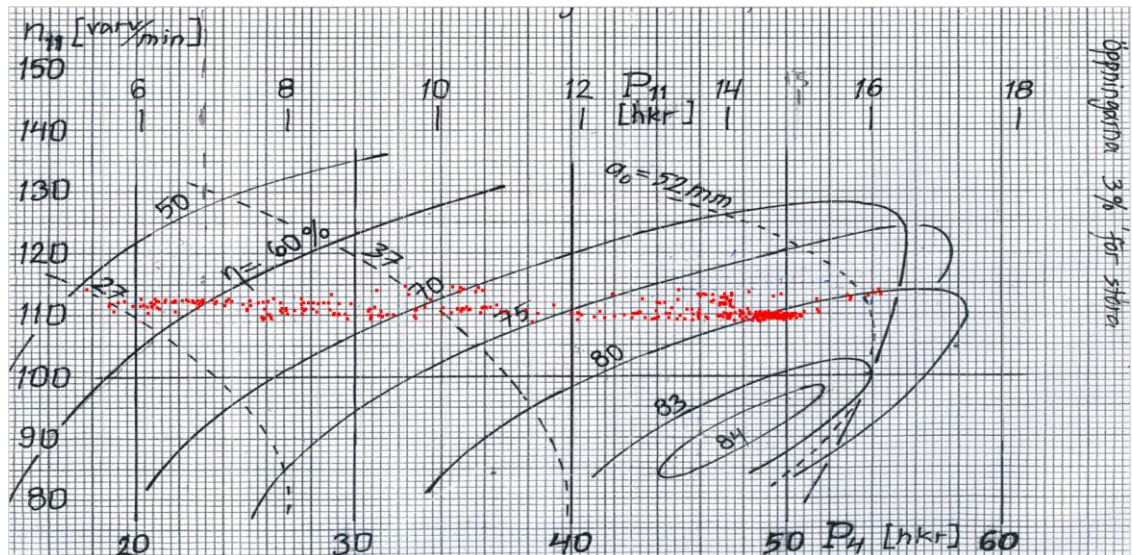
Teho jaetaan kaavassa (22) kahdella, koska teho on tuotettu yhden turpiinin molemmilla juoksupyörillä. Kaavan 16  $P_4$  arvo on laskettu päivänä, jolloin laitoksen tuotettu yhteistehto on ollut alle 180 kW. Mikäli tuotettu teho on yli 180 kW, oletetaan tämä tuotetuksi kummallakin laitoksen turpiineista. Tällöin kaavassa (22) tuotettu laitoksen teho jaettaisiin kahden sijasta neljällä.  $P_4$  arvosta saadaan turpiinin simpukkakäyrästä vaaka-akselin arvo. Pystyakselin mallikokeen turpiinin pyörintänopeus  $n_{11}$  (*rpm*) on ratkaistu kaavasta (8) kaavassa (23),

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{Hn}} \quad (23)$$

jossa  $n$  (*rpm*) on voimalaitoksen turpiinin pyörintänopeus,  $D$  (*m*) on voimalaitoksen turpiinin halkaisija ja  $H_n$  (*m*) on nettoputouskorkeus. Tämä on laskettu numeerisin arvoihin kaavassa (24).

$$n_{11} = \frac{301 \text{ rpm} \cdot 0,85 \text{ m}}{\sqrt{5,06 \text{ m}}} = 114 \text{ rpm} \quad (24)$$

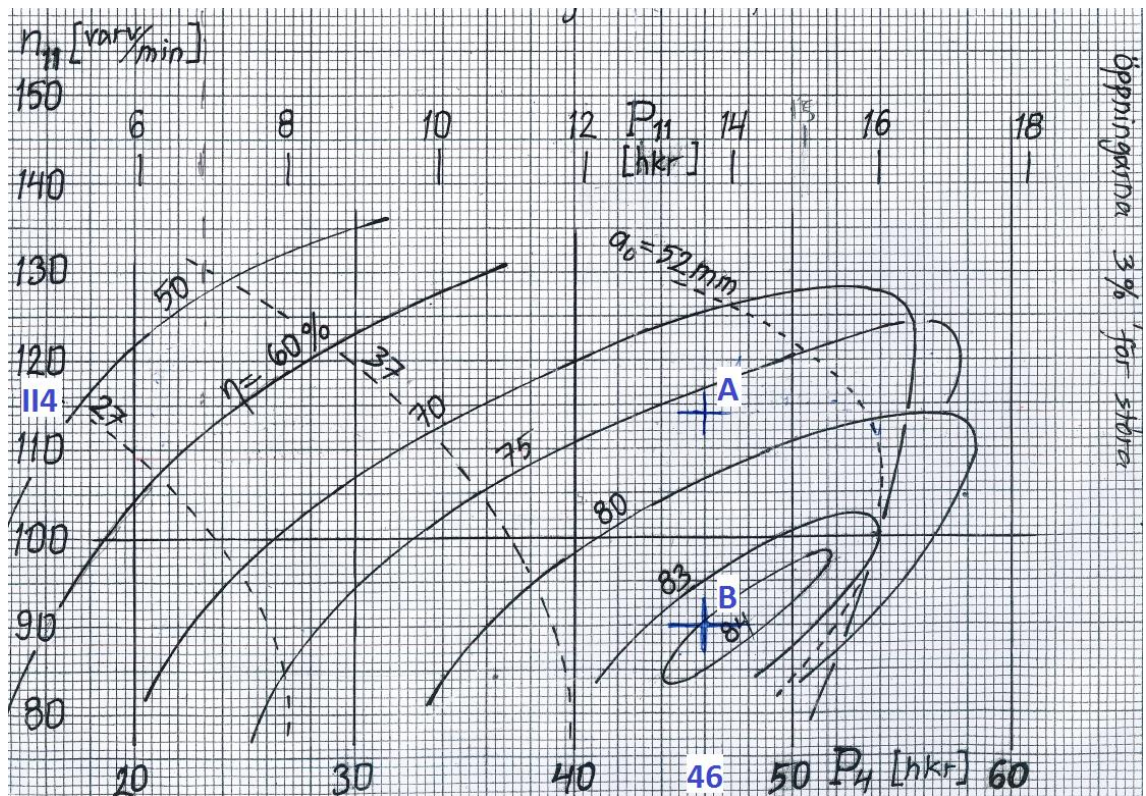
Kun tunnetaan  $n_{11}$  ja  $P_4$  arvot, voidaan määrittää turpiinin toimintapisteet simpukkakäyrästä (KUVA 32).



KUVA 32. Turpiinin toimintapisteet ajalta 1.4.2014 - 31.3.2015

Kuten kuvasta 32 nähdään, on turpiini toiminut suurimman osan ajastaan noin 80 % hyötysuhteella. Todellisuudessa enemmän tehoa tuottava turpiini on toiminut paremmalla hyötysuhteella kuin vähemmän tehoa tuottanut. Tämä johtuu siitä, että enemmän tehoa tuottaneen turpiinin läpi virtaa enemmän vettä kuin vähemmän tehoa tuottavan, jolloin suuremmilla vesimäärillä on turpiinin hyötysuhde myös parempi. Turpiinin pyörintänopeuden säädöstä on kerrottu enemmän luvussa 4.3.

Kun tunnetaan  $n_{11}$  ja  $P_4$  arvot, voidaan turpiinin hyötysuhde eri toimintapisteissä ratkaista simpukkakäyrästä. Hyötysuhde on ratkaistu kuvassa 33.

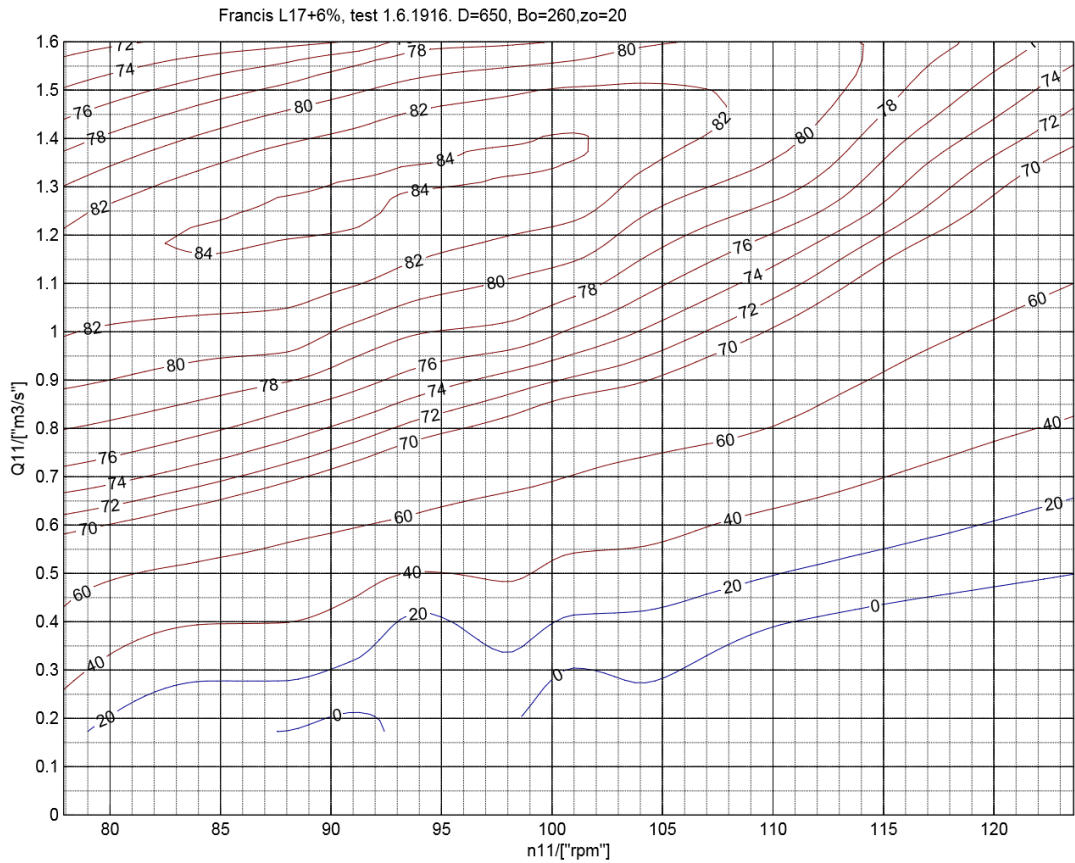


KUVA 33. Turpiinin toimintapiste eri hyötysuhteilla 1.4.2014

Kuvan 33 turpiinin hyötysuhde saadaan, kun haetaan  $P_4 = 46$  hv ja  $n_{11} = 114$  rpm kohtauspiste **A**. Tällöin hyötysuhde  $\eta_t$  on 78%, sillä hyötysuhdekäyrien välinen etäisyys voidaan arvioida riittäväällä tarkkuudella lineaarisesti (Asiantuntijalausunta, Vuoristo, S. 2015). Tällöin turpiinilla oltaisiin voitu tuottaa sama yksikköteho pisteessä **B** hyötysuhteella 84%. Tällöin saman tehon tuottamiseen olisi turpiinin läpi virrannut vähemmän vettä. Halutessa selvittää kyseisellä vesimäärällä turpiinin nopeussäädöllä tuotettu suurin teho, tulee ratkaista kyseisen tilanteen mallikokeen vesimäärä  $Q_{11}$  kaavalla (1). Tämä on laskettu kaavassa (25)

$$Q_{11} = \frac{45,5 \text{ hv} \cdot 0,2179 \cdot 1000}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,786} = 1,29 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (25)$$

Kerroin 1000 on kaavassa (25) muuttamassa tehon kW yksiköt wateiksi. Tunnettaessa pyörintänopeus  $n_{11}$  voidaan ratkaista turpiinin paras mahdollinen hyötysuhde kyseisellä virtaamalla (KUVA 34).



KUVA 34. Mallihyötysuhteet  $n_{11}$  ja  $Q_{11}$  tasossa (Andritz Hydro Oy)

Virtaamalla  $1,30 \text{ m}^3/\text{s}$  paras mahdollinen hyötysuhde  $\eta_{\max}$  on 84%  $n_{11}$  arvolla 90. Tämä tarkoittaa, että turpiinin pyörintänopeutta pudotettaessa, oltaisiin veden painovoiman potentiaalienergiasta saatu muutettua enemmän turpiinin pyörimisen mekaaniseksi liikeenergiaksi.

Tunnettaessa mallikokeen vesimäärä  $1,30 \text{ m}^3/\text{s}$  voidaan voimalaitos turpiinin vesimäärä laskea kaavalla (10). Voimalaitoksen turpiinin vesimäärä on laskettu kaavassa

$$Q = 1,29 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot (0,85 \text{ m})^2 \cdot \sqrt{5,06 \text{ m}} \cdot 2 = 4,19 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (26)$$

Kaavan (26) kerroin 2 on joko 2 tai 4, riippuen siitä, onko teho tuotettu yhdellä tai kahdella turpiinilla. Tunnettaessa paras mahdollinen hyötysuhde kyseisellä virtaamalla  $\eta_{\max}$ , voidaan turpiinin tuottama mekaaninen teho  $P_{\text{tmax}}$  laskea kaavalla (16). Turpiinin kyseisessä tilanteessa tuottama teho on laskettu kaavassa (27).

$$P_{tmax} = 4,19 \frac{m^3}{s} \cdot 5,06 m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,84 = 174,7 kW \quad (27)$$

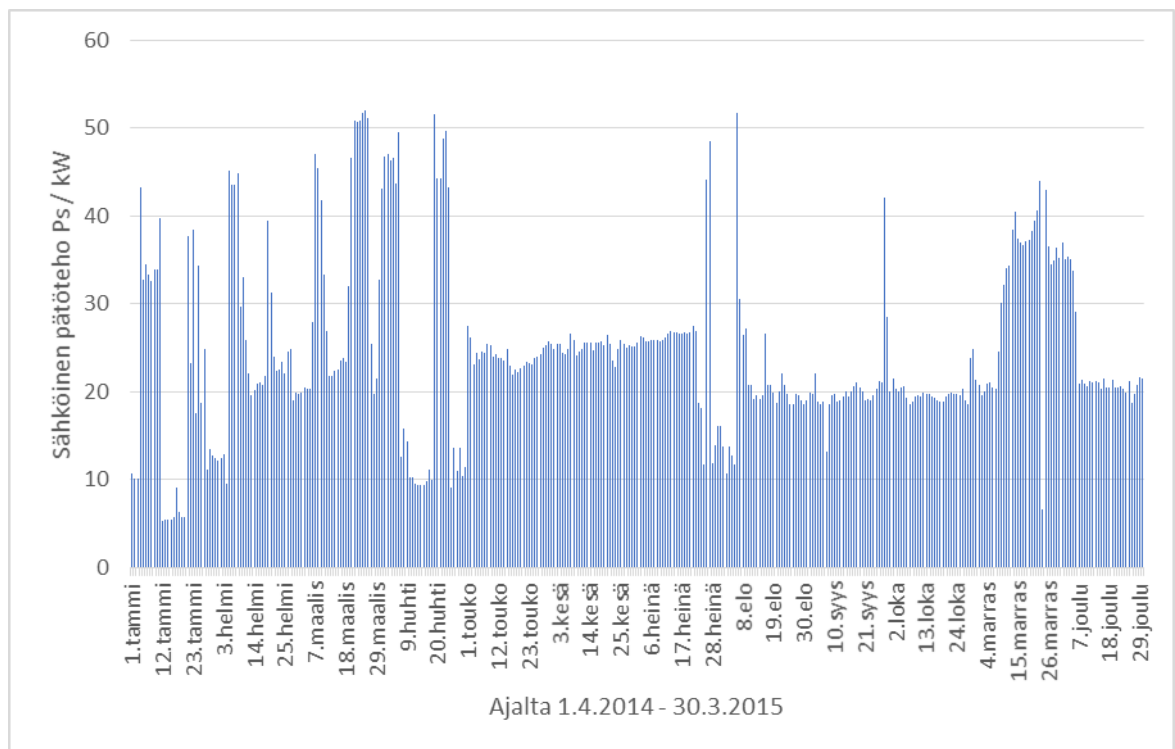
Tuotettu sähköinen pätöteho voidaan ratkaista kaavalla (17). Sähköinen pätöteho on ratkaistu numeerisesti kaavassa (28).

$$P_{smax} = 176,7 kW \cdot 0,96 \cdot 0,96 = 161,0 kW \quad (28)$$

Eri toimintapisteissä tuotettujen sähköisten pätötehojen erotus on laskettu kaavassa (29).

$$160,0 kW - 150,4 kW = 10,6 kW \quad (29)$$

Eli samalla vesimäärällä ja putouskorkeudella turpiinin pyörintänopeutta laskemalla oltaisiin generaattorilla voitu tuottaa 10,6 kW enemmän sähköistä pätötehoa.



KUVIO 4. Nopeussäädetyllä ja normaalilla järjestelmällä tuotettujen sähköisten pätötehojen erotus

Kuviossa 4 on esitetty sähköinen pätöteho, joka olisi tuotettu vuoden aikana nopeussäädetyllä järjestelmällä. Suurimmillaan tehoa olisi tuotettu 52,1 kW, pienimmillään 5,3 kW

ja keskimäärin 24,5 kW. Voimalaitoksen sähköntuotanto vaihtelee vuosittain. Tarkasteltavan ajanjakson sähköntuotanto on keskimääräistä verrattuna muihin vuosiin. Vuodessa keskimääräisen tuotetun tehon ja sähkönhinnan perusteella voidaan laskea nopeussäädetyistä järjestelmästä saatava tuotto. Verrattaessa tätä investointi ja huoltokustannuksiin voidaan tehdä takaisinmaksulaskelma.

#### **4.2 Laskennassa tehdyt oletukset**

Lähtötietoina oli laitoksen tuottama yhteisteho. Turpiineja ajetaan vuoroin yksitellen ja vesitilanteen salliessa kumpaakin yhtä aikaa. Tämän vuoksi tehtiin olettaus, että kaikki alle 180 kW on tuotettu yhdellä koneella ja kaikki yli 180 kW oli tuotettu tasan molemmilla turpiineilla. Myöskin tehtiin oletus, että turpiinit ovat identtisiä. Tämä ei pidä paikkaansa, sillä toisella pystytään tuottamaan vain 4/5 toisen tehosta. Tämä aiheuttaa virhettä, mutta oletus on, että ne kumoavat toisensa tarvittavalla tarkkuudella.

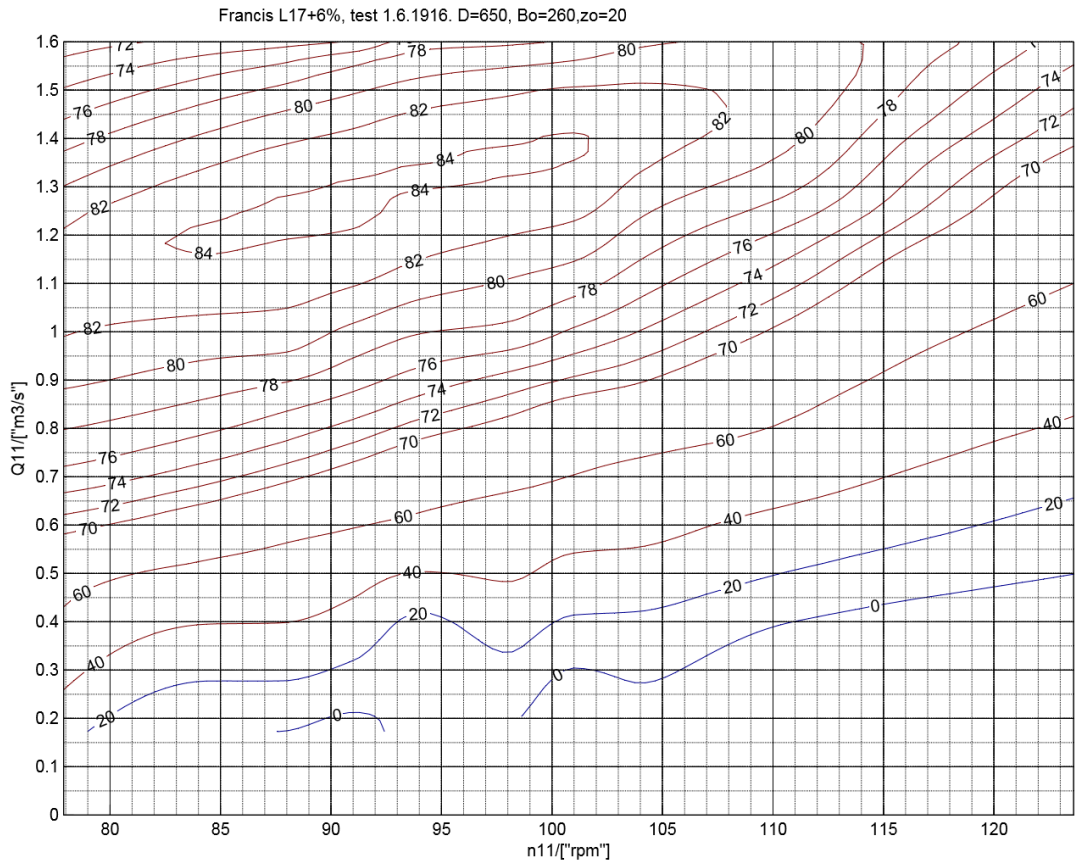
Välppähäviöiden oletettiin olevan aina 7 cm. Todellisuudessa välppähäviöt muuttuvat välpän puhdistustaaajuudesta ja vuoden ajoista riippuen. Moottorien mekaanisen hyötysuhteen oletettiin pysyvän myös muuttumattomana. Todellisuudessa hyötysuhde huononee ajettaessa pienillä kuormilla, mutta tällöin tämän vaikutus on myös suhteessa kokonaiskuvaan pienempi. Turpiinin pyörintänopeuden oletettiin vakioksi 301 rpm. Todellisuudessa tämä vaihtelee tämän molemmin puolin moottorin jättämän mukaan.

Turpiinin nettoputouskorkeuteen vaikuttaa tuloveden virtausnopeudesta ja veden ulosvirtausnopeudesta syntyvät häviöt (kuva 1 ja kaava 4). Tuloveden virtausnopeuskomponenttia ei huomioida tässä tapauksessa, koska mallikoe on suoritettu vastaavassa, avoimessa laitoksessa. Ulosvirtausnopeudesta syntyvä häviö jää hyvin pieneksi, joten se on jätetty laskuissa huomioimatta. (Asiantuntijalausunta, Vuoristo, S. 2016)

#### **4.3 Turpiinin pyörimisnopeudensäätö putouskorkeuden muuttuessa**

Jotta turpiini toimisi parhaalla hyötysuhteella, olisi turpiinin pyörimisnopeutta säädettävä kuvan 35 perusteella.





KUVA 35. Mallihyötysuhteet virtaaman mukaan piirrettynä

Kuvan 35 toiminta-alueella  $Q_{11}$  arvon pysyessä alle 1, pidetään  $n_{11}$  arvo 75 rpm.  $Q_{11}$  arvon kasvaessa pyörintänopeutta nostettaisiin siten, jotta hyötysuhde olisi paras mahdollinen.  $Q_{11}$  arvon ollessa alle 1, voidaan haluttu voimalaitoksen turpiinin pyörintänopeus laskea kaavalla (30), jossa  $n_{11}$  arvo asetetaan pysymään vakiona 75 rpm. Tämä on johdettu kaavasta (8).

$$n = \frac{75 \text{ rpm} \cdot \sqrt{Hn}}{0,85 \text{ m}} \quad (30)$$

Esimerkiksi nettoputouskorkeuden ollessa 5,06 m, laskettaisiin turpiinin pyörintänopeus kaavalla (31)

$$n = \frac{75 \text{ rpm} \cdot \sqrt{5,06 \text{ m}}}{0,85 \text{ m}} = 198,5 \text{ rpm} \quad (31)$$

Tämä tarkoittaisi, että generaattorin näkemää verkon taajuutta pudotettaisiin. Epätahti-generaattorin pyörittäminen alhaisella taajuudella laskee generaattorin hyötysuhdetta.

Turpiinin säätäminen vesimäärän mukaan vaatisi solukkeiden samanaikaisen säädön. Solukkeitten ohjaus voitaisiin tuoda automaatiojärjestelmään tai mahdollisesti toteuttaa verkkovaihtosuuntaajan sisäisellä ohjelmistolla. Säätoalgoritmi ohjaisi turpiinin juoksupyörän nopeutta ja solukkeitten asentoa.

Turpiinin säätöä rajoittaa kavitointi ja epätahtigeneraattorin vääntömomentin tuoma rajoite. Valmistaja on tehnyt kavitaatiotarkastelun simpukkakäyrästä toimintapisteille, jotta pysyttäessä simpukkakäyrästä esitetyllä toiminta-alueella, kavitaatiolta vältytään. Mikäli valmistaja ei olisi tätä tehnyt, kavitaatiotarkastelu olisi pitänyt tehdä nopeussäätöä suunnitellessa. Nopeussäädetyssä järjestelmässä otetaan pienemmällä pyörimisnopeudella tehoa ulos generaattorista. Pyörimisnopeuden pudotessa tehon pysyessä vakiona momentti kasvaa. Epätahtigeneraattorin momentti tulee laskea uusissa toimintapisteissä, jotta nimellismomentti ei ylity. Laskennassa käytetyille toimipisteille tämä ei ole ylittynyt.

## 5 POHDINTA

Verkkovaihtosuuntaajan mahdollistama nopeussäätö parantaisi turpiinin hyötysuhdetta ja vähentäisi häviöitä muuntajassa sekä siirtoyhteyksissä kompensoimalla generaattorin tarvitseman loistehon. Verkkovaihtosuuntaaja on kuitenkin häviöllinen komponentti ja tämän tuottama pulssimoduloitu jännite aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä verrattuna normaaliin sinimuotoiseen jännitteeseen. Myöskään valmistaja ei anna takuita, että vanhat generaattorit kestäisivät jännitteen nousunopeutta rajoittavan suotimenkaan jälkeen pulssimoduloitua jännitettä (Tammi, A. 2015).

Mikäli voimalaitoksen sähköntuotanto automatisoitaisiin verkkovaihtosuuntaajien asennuksen yhteydessä, hyödyttäisiin verkkovaihtosuuntaajan tuoman turpiinin paremman toimintapisteen lisäksi myös optimaalisesta ajotapamallista. Putouskorkeus voitaisiin optimoida järvenpintojen säädelyjen vaihtelujen rajoissa. Vettä ohijuoksettaisiin vain silloin, kun ylaveden pinta olisi nousemassa liian korkeaksi. Tästä koituvaa hyötyä on kuitenkin mahdotonta saatavilla olevista historiatiedoista arvioida.

Verkkovaihtosuuntaajan tuoman nopeussäädön hyöty riippuu sähkön hinnasta sekä tuotetun tehon määrästä. Muutokset sähkön hinnassa vaikuttavat investoinnin kannattavuuteen. Mikäli samanlaista investointia suunniteltaisiin toiseen, isomman kokoluokan vesivoimalaitokseen, voisi saatu hyöty olla huomattavasti suurempi.

Turpiinin pyörintänopeuden säädöstä saatava hyödyn laskenta on ollut työn edetessä kehittyvä prosessi. Mikäli työ tehtäisiin uudesta, simpukat skaalattaisiin nettoputouskorkeuden sijaan manometriselle putouskorkeudelle. Tällöin manometrista putouskorkeutta voitaisiin käyttää suoraan laskuissa.

Opinnäytetyön aiheena oli verkkovaihtosuuntaajan tuomat hyödyt ja haitat. Työn yhteydessä on ilmennyt muitakin laitoksen kehitysehdotuksia. Kahden vanhan turpiinin korvaaminen yhdellä uudella turpiinilla voisi parantaa tuotettua mekaanista tehoa. Vanhojen epätahtigeneraattoreiden korvaaminen uusilla kestromagneettigeneraattoreilla antaisi paremman hyötysuhteen eri kuormitustilanteissa. Tällöin voitaisiin mahdollisesti luopua vaihteistosta, joka aiheuttaa omat häviönsä. Mikäli voimalaitokseen tehdään joskus isompi saneeraus, tulisi edellä mainittuja vaihtoehtoja miettiä.

## LÄHTEET

ABB Motor. Oikosulkumoottorit. Teknistä perustietoa.

ABB. Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. Tekninen opas nro 5. 2000

ABB. Low voltage process performance motors. 2015

Andritz Hydro Oyin arkistoista. Oy Tampella Ab: Makaavan francis-turpiinin tyypillinen sijoituspiirustus.

Aura, L & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. 1. Painos. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.

Digikey. EV Drive Electronic Evolve to Support Rare Earth-Free Motor Technologies. Luettu 21.12.2015 <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/sep/ev-drive-electronics-evolve-to-support-rare-earth-free-motor-technologies>

Hietalahti, L, Asiantuntija, TAMK. 2015. Haastattelu 8.12.2015

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1.painos. Tampere,: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. 1. painos. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hydraulic machines, radial and axial – performance conversion method from model to prototype 62097 IEC:2009

Keskinen, R. & Pulttinen, R. 1980. Application manual for standard hydro turbines. Nohab – Tampella. Tampere, Finland,

Keskinen, R. 1963. Mallikokeet vesivoimalaitosten koneistojen valmistuksessa. Oy Tampella Ab.

Korpela, A. 2014. Tuulivoiman perusteet. Kurssimateriaali

Määttäinen, M., Koskinen, M., Pulkkinen, P., Soini, M. & Silván, H. 1978. Vesivoimalaitokset. 300 painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Paulsson S.E, Holmén E, Alfredson S, Hägglund S. 1998. Småskalig vattenkraft Nr 3767:02

Rivers.bee.oregonstate.edu. Luettu 21.12.2015  
<http://rivers.bee.oregonstate.edu/book/export/html/35>

Tammi, A. Asiantuntija, ABB. 2015. Puhelinkeskustelu 23.11.2015.

UPM Kymmenen automaatiokunnossapidon ottamia valokuvia

UPM Kymmenen Jämsänkosken tehtaan arkistoista löydettyä materiaalia turpiinien teoriasta. (Koneoppi, tietomies)

Virtanen, J. Asiantuntija, Andritz Hydro Oy. 2016. Haastattelu 8.1.2016

Vuoristo, S. Asiantuntija, Andritz Hydro Oy. 2015. Haastattelu 9.11.2015.