

Haapakoski Pasi

VESIVOIMALAITOSTEN RAKENNERATKAISUT

Opinnäytetyö

KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2011



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieska	Aika 26.4.2011	Tekijä/tekijät Pasi Haapakoski
Koulutusohjelma Sähkötekniikka		
Työn nimi Vesivoimalaitosten rakenneratkaisut		
Työn ohjaaja DI Jari Halme		Sivumäärä 53
Työelämäohjaaja Teuvo Joensuu		
<p>Tämä opinnäytetyö on Tevo Oy:n tilaama ja sen tarkoituksena on antaa perustiedot vesivoimalaitoksista ja niihin liittyvistä ominaisarvoista. Työssä on keskitytty Kaplan- ja potkuriturbiini ratkaisuihin.</p> <p>Tiedonlähteinä opinnäytetyöhön olivat alan kirjallisuus sekä generaattorivalmistajien internet-sivut.</p> <p>Opinnäytetyön alussa kerrotaan ominaisarvoista ja rakenteesta, keskiosa käsittelee vesivoimalaitos- ja turbiinityyppejä, loppuosassa on käsitelty säätö- ja valvontalaitteita sekä vesivoima generaattoreita.</p>		
Asiasanat Vesivoimalaitos, Kaplan-turbiini, potkuriturbiini		

ABSTRACT

CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	Date 26.4.2011	Author Pasi Haapakoski
Degree programme Electricity technology		
Name of thesis Structural solutions in hydroelectric power plants		
Instructor Jari Halme		Pages 53
Supervisor Teuvo Joensuu		
<p>This thesis was made for Tevo Oy. The purpose of this thesis was to give basic information on hydroelectric power plants and eigenvalues. The thesis focused on Kaplan- and propel turbine solutions.</p> <p>The information sources in this thesis were literature and the internet pages of generator manufacturers.</p> <p>In the first part of this thesis the focus is on eigenvalues and structure. The middle part focuses on hydroelectrical power plant types and turbine types and the final part deals with control and surveillance devices and hydropower generators.</p>		

Key words hydroelectrical power plant, Kaplan-turbine, propel turbine

SYMBOLILUETTELO

c_1	Veden todellinen nopeus ennen juoksupyörää	(m/s)
c_2	Veden todellinen nopeus juoksupyörän jälkeen	(m/s)
c_{u1}	Todellinen u_1 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää	(m/s)
c_{u2}	Todellinen u_2 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää	(m/s)
f	taajuus	(1/s)
g	painovoiman aiheuttama kiihtyvyys m/s^2	(noin 9,81 m/s^2)
H	kokonaisputous korkeus	(m)
H_1	yläveden ja alaveden pinnankorkeuden ero metreinä	(m)
h_b	Barometrinen ilmanpaine	(Pa)
h_v	Veden höyrystymispaine	(Pa)
$\Delta h'$	Dynaaminen paineen aleneminen	(Pa)
σ_L	Laitoksen kavitaatio kerroin	(-)
M	momentti	(Nm)
MQ	keskivirtaama	(m^3/s)
n	pyörimisnopeus	(1/min)
n_s	ominaiskierrosluku	(-)
Q_R	rakennusvirtaama	(m^3/s)
P	teho	(W)
p	napapariluku (jne.)	(1,2,3)
ΔP	Δq_v :n tuottama teho	(W)
Q	Turbiinintilavuusvirta	(m^3/s)

$Q\rho$	massavirta	(Kg/s)
Δq_v	Pieni osuus virtaamasta	(m ³ /s)
σ_T	Thoman kavitaatiokerroin	(-)
u_1	juoksupyörän kehänopeus	(m/s)
u_2	juoksupyörän kehänopeus	(m/s)
v_1	turbiiniin virtaavan veden nopeus metreinä sekunissa	(m/s)
v_2	turbiinista poistuvan veden nopeus metreinä sekunissa	(m/s)
w_1	veden suhteellinen nopeus ennen juoksupyörää	(m/s)
w_2	veden suhteellinen nopeus juoksupyörän jälkeen	(m/s)
ρ	veden tiheys	(kg/m ³)
η	turbiinin hyötysuhde	(%)

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö on tehty Tevo Oy:lle, jota kiitän aiheesta, jonka parissa on ollut mielenkiintoista työskennellä. Suuret kiitokset työn ohjaajalleni Teuvo Joensuulle opinnäytetyön aiheesta ja työnrajauksesta sekä diplomi-insinööri Jari Halmeelle työn valvomisesta ja asiantuntevista neuvoista.

Ylivieskassa 20.4.2011

Haapakoski Pasi

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

ESIPUHE

SISÄLLYS

KUVIOT

TAULUKOT

1 JOHDANTO	1
2 VESIVOIMALAITOKSEN OMINAISARVOJA	2
2.1 Rakennusvirtaama ja turbiinin tilavuusvirta	2
2.2 Teho	3-5
2.3 Putouskorkeus	6
2.4 Pyörimisnopeus	7-9
2.5 Imukorkeus	10
2.6 Kavitaatio	10-13
3 VESIVOIMALAITOKSEN RAKENNE	14
3.1 Juoksupyörä	14
3.2 Johtopyörä	15
3.3 Imuputki	16
3.4 Spiraali	17
4 SUOMESSA YLEISESTI KÄYTETYT VOIMALAITOSTYYPIT	18
4.1 Säännöstelyyn ja käyttötapaan perustuva jaottelu	18
4.1.1 Jokivoimalaitos	18
4.1.2 Säännöstelyvoimalaitos	18
4.1.3 Pumppuvoimalaitos	18
4.2 Rakenteellisiin ratkaisuihin perustuva jaottelu	19
4.2.1 Patolaitos	19
4.2.2 Paineputkilaitos	19
4.2.3 Tunnelilaitos	19
4.3 Putouskorkeuden mukaan tapahtuva jaottelu	21

4.3.1 Pienpainelaitokset	21
4.3.2 Keskipainelaitokset	21
4.3.3 Keskipainelaitokset	21
5 KAPLAN-TURBIINI	22-24
6 PUTKITURBIINIT	25-26
6.1 Potkuriturbiini	27
7 TURBIININ SÄÄTÖLAITTEET	28
7.1 Sähköhydrauliset säätäjät	28
7.2 Mekaanis- hydrauliset säätäjät	28
7.3 Johtopyörän säätö	29
7.4 Juoksupyörän säätö	29
7.5 Pumppukoneistot	30
7.6 Vaihteet	31
8 VALVONTA- JA VAROLAITTEET	32-33
9 LUUKUT JA VÄLPÄT	34
9.1 Tuloputken sulkuluukut	34
9.2 Imuputken sulkuluukut	35
9.3 Segmenttiluukut	36
9.4 Nostokoneistot	37
9.5 Muut sulkulaitteet	37
9.6 Venttiilit	37
9.7 Välpät ja välpänpuhdistajat	38
10 SUPPO	39
10.1 Supon muodostuminen	39
10.2 Supon vaikutukset	39-40
10.3 Suppohaittojen vähentäminen	40-41
11 VESIVOIMAGENERAATTORIT	42-43
11.1 Tahtigeneraattori	43-44
11.2 Epätahtigeneraattori	45
11.3 Kestomagneettigeneraattori	45-46
12 VESIVOIMAGENERAATTORIN RAKENNE	47
12.1 Staattori	47
12.2 Roottori	48
12.3 Akseli	49

12.4 Laakerointi	50
12.5 Muut varusteet	51
13 YHTEENVETO	52
14 POHDINTA	53
LÄHTEET	

KUVIOT

KUVIO 1. Virtaaman jakautuminen Rygenen Kaplan-turbiinissa.	4
KUVIO 2. Vesivoimalaitoksen putouskorkeus	5
KUVIO 3. Hyötysuhde käyriä eri turbiini tyypeillä ja ominaispyörimisnopeuksilla virtaaman funktiona	8
KUVIO 4. Ominaispyörimisnopeuden vaikutus juoksupyörän kokoon. Kaikissa $H = 1\text{m}$ ja teho $P = 0,735\text{ kW}$	8
KUVIO 5. Kavitaation aiheuttamaa kulumista Kaplan-turbiinin siivessä.	10
KUVIO 6. Kaplan-turbiinin juoksupyörä	13
KUVIO 7. Kaplan-turbiinin johtopyörä ja juoksupyörä.	14
KUVIO 8. Kaplan-turbiinin imuputki ja juoksupyörä, imuputken suunnasta nähtynä.	15
KUVIO 9. Kaplan-turbiinin spiraali	16
KUVIO 10. Vesivoimalaitoksen rakenteellinen jaottelu	19
KUVIO 11. Kaplan-turbiini	23
KUVIO 12. Kotelotyypinen putkiturbiini / Bulb-turbine	24
KUVIO 13. Kuilutyypinen putkiturbiini / Pit-turbine	25
KUVIO 14. Putkityypinen putkiturbiini / S-turbiini	25
KUVIO 15. Imuputken sulkuluukku	34
KUVIO 16. Segmanttiluukku	35
KUVIO 17. Generaattorin toiminta	39
KUVIO 18. Staattorin käämitys	43
KUVIO 19. Generaattorin roottori	44
KUVIO 20. Roottoriin kiinnitettävä akselinpäätty	45

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Esimerkki vesivoimalaitoksen tehon määrittämisestä Haapakosken voimalaitos pyhäjoessa.	3
TAULUKKO 2. Yleisen sähköverkon taajuudella käytettäviä pyörimisnopeuksia	7

1 JOHDANTO

TEVO Oy on yksityinen Raahelainen koneenrakentaja, jonka erikoisalana ovat teräs-, paperi-, kemian- ja laivanrakennusteollisuuden koneet sekä laitteet. TEVO Oy:llä on toimipiste myös Turengissa missä valmistetaan offshore-laitteita ja laivanpotkureita. TEVO Oy:n levitysteloja on viety yli 800 kappaletta maailmanlaajuisesti 30 eri maahan. Yritys on perustettu vuonna 1974 ja tällä hetkellä se työllistää 135 metallialan osaajaa joista 100 työskentelee Raahessa ja 35 Turengin potkuritehtaalla.

Opinnäytetyön lähtökohtana oli koota keskeistä tietoa vesivoimalaitoksista ja alan termistöstä. Työn toteutuksen aloitin materiaalin keräämisellä. Olin hieman yllätynyt siitä, miten hankala oli löytää laajasti alalta kertovaa kirjallisuutta. Työnohjaajaltani sain materiaaleja ja alaan liittyvää kirjallisuutta. Internetistä löytyviin lähteisiin suhtauduin hieman kriittisesti enkä mielelläni käyttänyt niitä. Työssäni keskityin lähinnä Kaplan- ja potkuriturbiineihin.

Opinnäytetyön alussa käsittelen vesivoimalaitoksiin liittyviä ominaisarvoja ja esittelen alaan liittyviä termejä. Seuraavaksi työssä esitellään vesivoimalaitoksissa käytettäviä rakenneratkaisuja ja voimalaitostyypppejä. Työn keskiosassa käsitellään turbiinityyppejä. Käsiteltäviä turbiinityyppejä ovat Kaplan- ja potkurityyppiset turbiiniratkaisut. Turbiiniratkaisuista siirrytään turbiinin valvonta- ja varolaitteisiin, sekä vesivoimalaitoksissa käytössä oleviin luukkuihin ja välppiin. Loppuosassa käsitellään supon ilmenemiseen johtavia tekijöitä, sekä niiden poistamiseen käytettäviä keinoja. Viimeisenä työssä on esitelty generaattoriratkaisuja. Aluksi esitellään vesivoimalaitoksissa käytössä olevia generaattorityyppejä. Seuraavaksi keskitytään generaattoreiden rakenteeseen.

2 VESIVOIMALAITOKSEN OMINAISARVOJA

2.1 Rakennusvirtaama ja turbiinin tilavuusvirta

Laitoksen kaikkien turbiinien käyttämää suurinta yhteenlaskettua virtaamaa kutsutaan rakennusvirtaamaksi. Käytettävän rakennusvirtaaman suhdetta keskivirtaamaan nimitetään rakennusasteeksi. Laitoksen rakennusvirtaama Q_R määritellään seuraavasti. (<http://server.perlasoft.fi/vesivoima/images/Pienvesivoimaopas.pdf>):

$$Q_R = MQ \cdot R \quad (1)$$

missä:

MQ = keskivirtaama

R = rakennusaste

Turbiinin tilavuusvirralla tarkoitetaan vesimäärää, joka virtaa turbiinin läpi aikayksikköä kohden. Turbiinin tilavuusvirta Q :

$$Q = \frac{Q_R}{\text{koneistojen lukumäärä}} \quad (2)$$

(Keskinen 1981,69)

2.2 Teho

Vesivoimalaitoksesta saatava teho on verrannollinen vesimäärään ja putouskorkeuteen. Ne ovat muuttuvia tekijöitä, vaihteluja aiheuttavat:

1. Jokeen ei ole tehty sopivia säännöstely altaita.
2. Vuosittaiset sademäärät vaihtelevat.
3. Sadealueen suuruus voi olla liian pieni.

Kaikki tekijät yhdessä tai erikseen voivat aiheuttaa suuria muutoksia vesimäärään. Vesiturbiinit voidaan ajatella keskipakopumppuihin nähden käänteislaitteina. Pumppuja ja turbiineja koskevat yhtälöt ovat periaatteessa samanlaisia. Turbiineja tarkasteltaessa pitää ottaa huomioon vastakkainen veden liikesuunta ja se, että vesi antaa energiaa. (Muilu 2006,14)

Vesivoimalaitoksen tehon tarkka laskeminen on hyvin vaativaa, kuten Perttula kirjassaan toteaa ”Todellisuudessa osavirtaamia rajoittavat virtauspinnat ja 3-ulotteisen virtauksen laskenta on hyvin vaativa ongelma”. (Perttula 2008,103)

Voimalaitoksen teho watteina on laskettavissa kaavasta (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 265):

$$P = Q * H * \rho * g * \eta. \quad (3)$$

missä:

P = teho (W)

Q = putouksessa virtaava vesimäärä (m³/s)

H = putouskorkeus (m)

ρ = veden tiheys (kg/m^3)

η = turbiinin hyötysuhde

TAULUKKO 1. Esimerkki vesivoimalaitoksen tehon määrittämisestä Haapakosken voimalaitoksesta pyhäjoessa.

Suure	Tunnus	Lukuarvo	Yksikkö
Virtaama	Q	20,0	m^3/s
Putouskorkeus	H	3,20	m
Veden tiheys	ρ	1000	kg/m^3
Putouskiihtyvyys	g	9,81	m/s^2
Hyötysuhde	η	0,830	%
Voimalaitoksen teho	P	521 kW	kW

Teho voidaan laskea myös Eulerin turbiiniyhtälöä käyttäen.

$$\Delta P = \Delta q_v * \rho * (C_{u1} * U_1 - C_{u2} * U_2) \quad (4)$$

missä:

Δq_v = Pieni osuus virtaamasta

ΔP = Δq_v .n tuottama teho

C_1 = Veden todellinen nopeus ennen juoksupyörää

C_2 = Veden todellinen nopeus juoksupyörän jälkeen

C_{u1} = Todellinen u_1 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

C_{u2} = Todellinen u_2 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

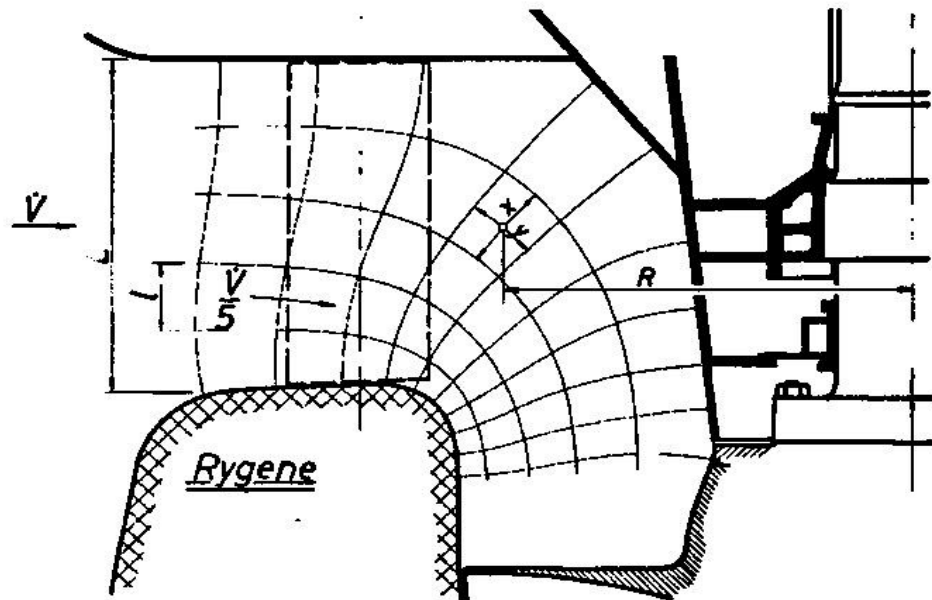
u_1 = juoksupyörän kehänopeus

u_2 = juoksupyörän kehänopeus

w_1 = veden suhteellinen nopeus ennen juoksupyörää

w_2 = veden suhteellinen nopeus juoksupyörän jälkeen

(Perttula 2008,103)



KUVIO 1. Virtaaman jakautuminen Rygenen Kaplan-turbiinissa. (Perttula 2008,104)

2.3 Putouskorkeus

Putouskorkeus on merkittävä tekijä, kun halutaan määrittää vesivoimalaitoksesta saatavissa oleva teho. Putouskorkeus vaikuttaa myös oleellisesti turbiinityypin valintaan. Pelton-turbiinia käytetään yleensä suurille putouskorkeuksille. Pelton-turbiinin toiminta alue on jopa 15-1800 metriä. Francis-turbiinia on käytetty 20-70 metrin putouskorkeuksilla. Kaplan-turbiinia käytetään pienillä putouskorkeuksilla.

$$H = H_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (5)$$

missä:

H = kokonaisputous korkeus

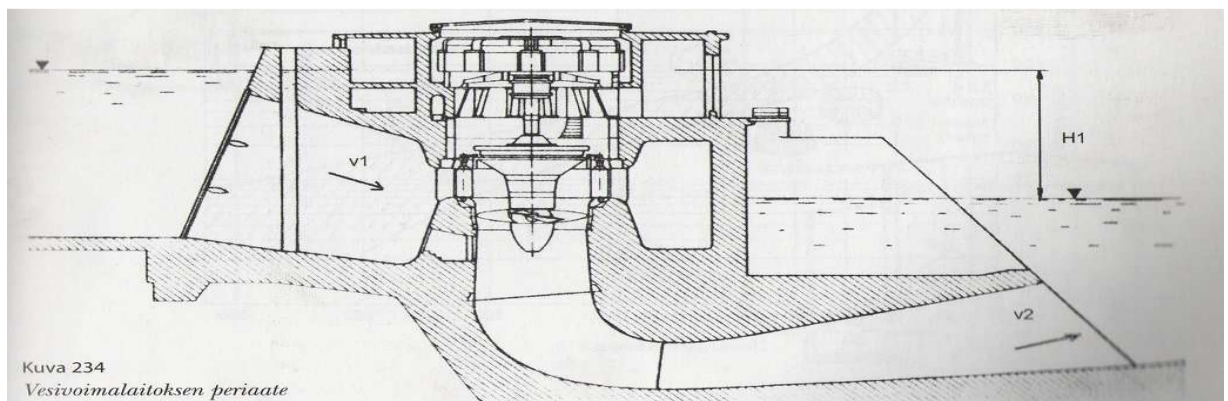
H_1 = ylaveden ja alaveden pinnankorkeuden ero metreinä

g = painovoiman aiheuttama kiihtyvyys m/s^2 (noin $9,81 \text{ m/s}^2$)

v_1 = turbiiniin virtaavan veden nopeus metreinä sekunnissa (m/s)

v_2 = turbiinista poistuvan veden nopeus metreinä sekunnissa (m/s)

(Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 265)



KUVIO 2. Vesivoimalaitoksen putouskorkeus (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 265)

2.4 Pyörimisnopeus

Turbiinin nopeusolosuhteita kuvastaa ominaiskierto- n_s , joka on laskettavissa jos teho ja putouskorkeus tunnetaan. (Perttula 2008,105)

$$n_s = n * \frac{P^{0,5}}{H^{1,25}} \quad (6)$$

Ominaiskierto- n_s arvot ovat lähes vakiota, vaikka virtaamat vaihtelevat. Kytettäessä turbiini synkronigeneraattoriin täytyy pyörimisnopeus sovitaa synkronisiin pyörimisnopeuksiin. (Keskinen 1980, 70)

Generaattorin pyörimisnopeus on laskettavissa yhtälöstä:

$$n = \frac{f}{p} \quad (7)$$

missä:

n = pyörimisnopeus

f = taajuus

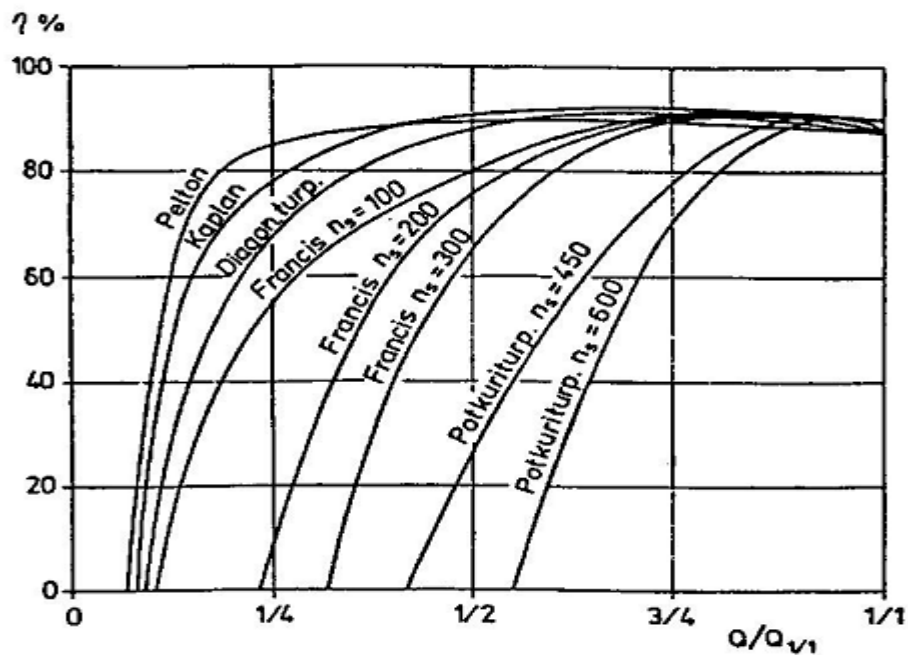
p = napapari-iluku

(Keskinen 1980, 70)

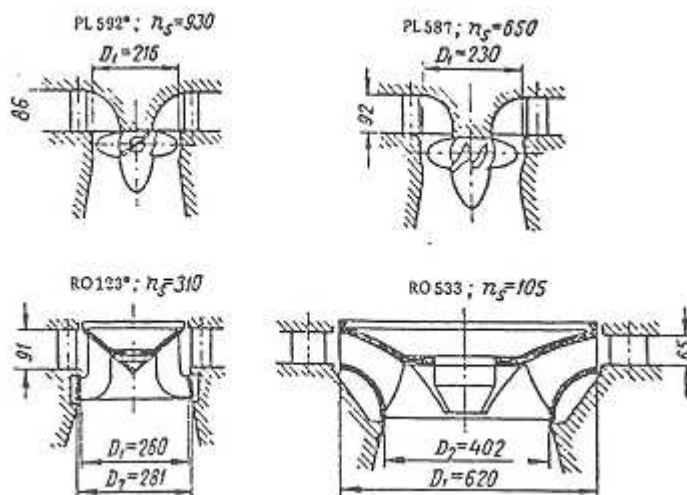
TAULUKKO 2. Yleisen sähköverkon taajuudella käytettäviä pyörimisnopeuksia.

f = taajuus Hz	p = napapariluku	n = pyörimisnopeus k/min
50	2	1500
50	3	1000
50	4	750
50	5	600
50	6	500
50	7	428
50	8	375
50	10	300
50	12	250
50	14	214
50	16	187
50	18	167
50	20	150
50	21	143
50	22	136
50	23	130
50	24	125
50	26	115
50	28	107
50	30	100
50	32	94
50	34	88
50	36	83
50	38	79
50	40	75

(Keskinen 1981,70)



KUVIO 3. Hyötysuhdekäyriä eri turbiini tyypeillä ja ominaispyörimisnopeuksilla virtaaman funktiona. (Perttula 2008,106)



KUVIO 4. Ominaispyörimisnopeuden vaikutus juoksupyörän kokoon. Kaikissa $H = 1\text{ m}$ ja teho $P = 0,735\text{ kW}$ (Perttula 2008, 106)

2.5 Imukorkeus

Kaplan-turbiinissa staattisella imukorkeudella h_s tarkoitetaan korkeuseroa juoksupyörän keskiöstä alavedenpintaan. Lukuarvo on aina positiivinen, jos turbiini on sijoitettu alavesipinnan yläpuolelle. Turbiinin valmistajat voivat käyttää imukorkeuden mitoituslaskelmissaan lähtökohtana pistettä, jossa kavitaatio on vähäinen tai sitä ei esiinny lainkaan. (Keskinen 1981,70)

2.6 Kavitaatio

Kun veden paine laskee liian alas se saavuttaa höyrystymispisteen ja veteen alkaa muodostua ilmakuplia, tätä ilmiötä kutsutaan kavitaatioksi. Kuplien iskeytyessä turbiinin juoksupyörän siipiin alentavat ne eroosion myötä turbiinin tehoa. Voimakas eroosio voi kuluttaa juoksupyörän käyttökelpottomaksi.

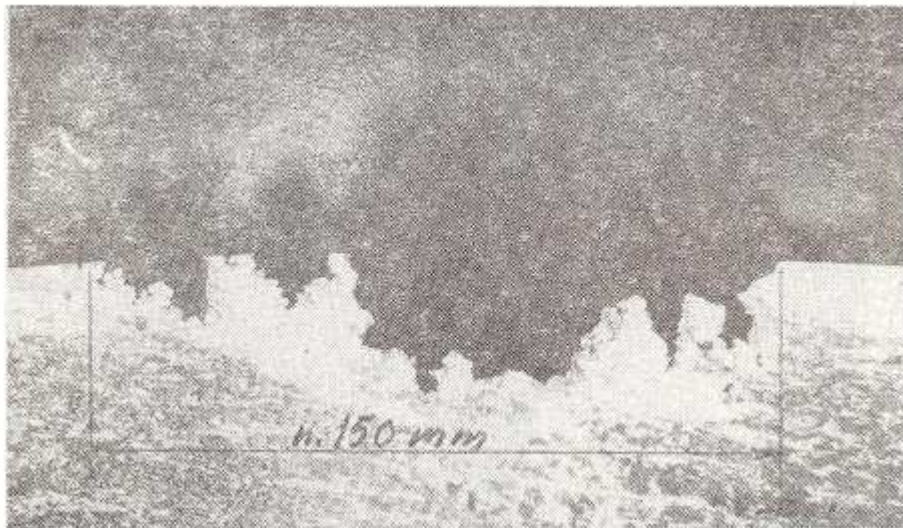
Kavitaatiosta aiheutuvan äänen voi kuulla terävinä iskuina tai ritinä turbiinin sisältä. Äänen voi aiheuttaa liian suuri vesimäärä, joka virtaa turbiinin läpi tai liian suuri imukorkeus. Kavitaatio voi aiheuttaa kulumista monissa eri paikoissa kuten juoksupyörässä, juoksupyörän kammiossa ja joissakin tapauksissa myös johtosolukkeissa ja imuputken levyverhouksessa. (Autio 1981, 316)

Kuluneet paikat tulisi aina korjata mahdollisimman nopeasti. Liiallinen kavitaatiolle altistuminen voi kuluttaa aineen paksuuden niin huokoiseksi (esim. juoksupyörän siivissä), että sitä ei voi enää korjata. Korjaus tapahtuu yleensä hitsaamalla. Siipiin käytetty aine on yleensä ruostumatonta terästä 13 % Cr-terästä, jonka nikkeli- ja hiilimäärä vaihtelee konekohtaisesti. Aine on vaikeasti hitsattavaa joten korjauksen suorittavat yleensä ammattilaiset. Yleensä

korjaustyö pystytään suorittamaan turbiinia purkamatta. Laitoksissa, joissa joudutaan irrottamaan osa juoksupyörän kammiosta, voidaan korjaustyötä helpottaakseen ottaa irti osa juoksupyörän kammiosta ja pyöräyttää korjattava siipi aukon kohdalle. (Autio 1981, 316)

Joissakin tapauksissa voi kavitaatiota ilmetä myös Kaplan-turbiinin juoksurenkaaseen. Useimmiten kavitaation aiheuttaman syöpymisen ilmentymispaikka on juoksusiipien laakerointikorkeudella. Ilmiö esiintyy yleisimmin koneissa, joiden kammiot on valurautaa. Korjaus työn helpottamiseksi korjaus on suoritettava mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. (Autio 1981, 316-319)

Eräissä laitoksissa tilanne on päästetty niin pahaksi, että on pohdittava betoniin valetun valurautakammion irti ottamista ja korvaamista ruostumattomasta teräksestä valmistetulla kammiolla. Tällaisiin tilanteisiin on ajautettu, koska tarkastustyöstä ei ole huolehdittu vuosikymmeniin. On tapauksia, joissa hoidettunakin tilanne pahenee koko ajan valuraudan huonon hitsattavuuden takia. (Autio 1981, 319)



KUVIO 5. Kavitaation aiheuttamaa kulumista Kaplan-turbiinin siivessä. (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 318)

Kavitaatioon johtava paineen aleneminen aiheutuu, juoksupyörän siiven paine-erosta Δp ja relatiivisen nopeuden epätasaisesta jakautumisesta w . Tämä paineen alenema on laskettavissa kaavalla.

$$\Delta p = \frac{\lambda * (w_2)^2}{2 * g} \quad (8)$$

Dynaamisesta imukorkeudesta h_d .

$$h_d = \frac{\eta_s * c_2^2}{2 * g} \quad (9)$$

Staattisesta imukorkudesta h_s ,joka on alaveden pinnankorkeus juoksupyörästä. (Keskinen1981, 75)

Juoksupyörän siivissä tapahtuva paine-ero, relatiivisen nopeuden epätasainen jakautuminen ja dynaamisesta imukorkeudesta johtuva paineen aleneminen ovat turbiinista johtuvia tekijöitä. Nämä tekijät saavat aikaan dynaamisen paineen alenemisen joka on laskettavissa kaavalla.

$$\Delta h = \eta_s * \frac{(c_2)^2}{2 * g} + \lambda * \frac{(w_2)^2}{2 * g} \quad (10)$$

(Keskinen 1981, 75)

Turbiinin ominaisuuksia kuvaamaan on määritelty Thoman kavitaatio kerroin.

$$\sigma_T = \frac{\Delta h}{H} \quad (11)$$

(Keskinen 1981, 75)

Kun turbiini toimii kavitaatorajalla, voidaan juoksupyörässä esiintyvä alin paine eli hyörystymispaine laskea.

$$P_{min} = \rho * g * h_v \quad (12)$$

$$\frac{P_{min}}{\rho * g} = h_b - h_s - \Delta h = h_v \quad (13)$$

(Keskinen 1981, 75)

Tästä voidaan johtaa lauseke $\Delta h'$: kuvaamaan dynaamista paineen alenemaa.

$$\Delta h' = h_b - h_v - h_s \quad (14)$$

(Keskinen 1981, 75)

Tämä kertoo staattisen imukoreuden h_s vaikutuksen. Vaikutukset eivät johdu turbiinin arvoista vaan siitä miten turbiini on sijoitettu laitteen sisällä. Tästä voidaan johtaa laitoksen kavitaatiokerroin.

$$\sigma_L = \frac{\Delta h'}{H} = \frac{h_b - h_v - h_s}{H} \quad (15)$$

(Keskinen 1981, 76)

Kavitaatio on poistettavissa turbiinin oikealla sijoittamisella poistovesiputkeen ja alavesipintaan nähden. Tarkoituksena on luoda olosuhteet tarpeeksi korkealle paineelle, jotta kavitaatiota ei esiinny. Turbiinin sijoituspaikka voidaan määrittää seuraavalla tavalla. Kavitaatio rajalla $\sigma_L = \sigma_T$ vapaantoiminnan ehto on $\sigma_L > \sigma_T$ eli $h_s < h_b - h_v - \sigma_T * H$. Jotta kavitaatiota ei ilmenisi täytyy juoksupyörän etäisyys alaveden pinnasta olla tämän ehdon mukainen. (Keskinen 1981, 76)

3 VESIVOIMALAITOKSEN RAKENNE

3.1 Juoksupyörä

Juoksupyörän tehtävänä on vääntömomentin kehittäminen. Tämä tapahtuu seuraavan lausekkeen mukaisesti: momentti = massavirran sekä impulssimomentin muutos.

$$M = Q\rho * (R_1 * c_{u1} - R_2 * c_{u2}) \quad (16)$$

missä:

M = momentti

$Q\rho$ = massavirta

R_1, R_2 = säde juoksupyörän tulo- ja lähtöreunassa

c_{u1} = todellinen u_1 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

c_{u2} = todellinen u_2 :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

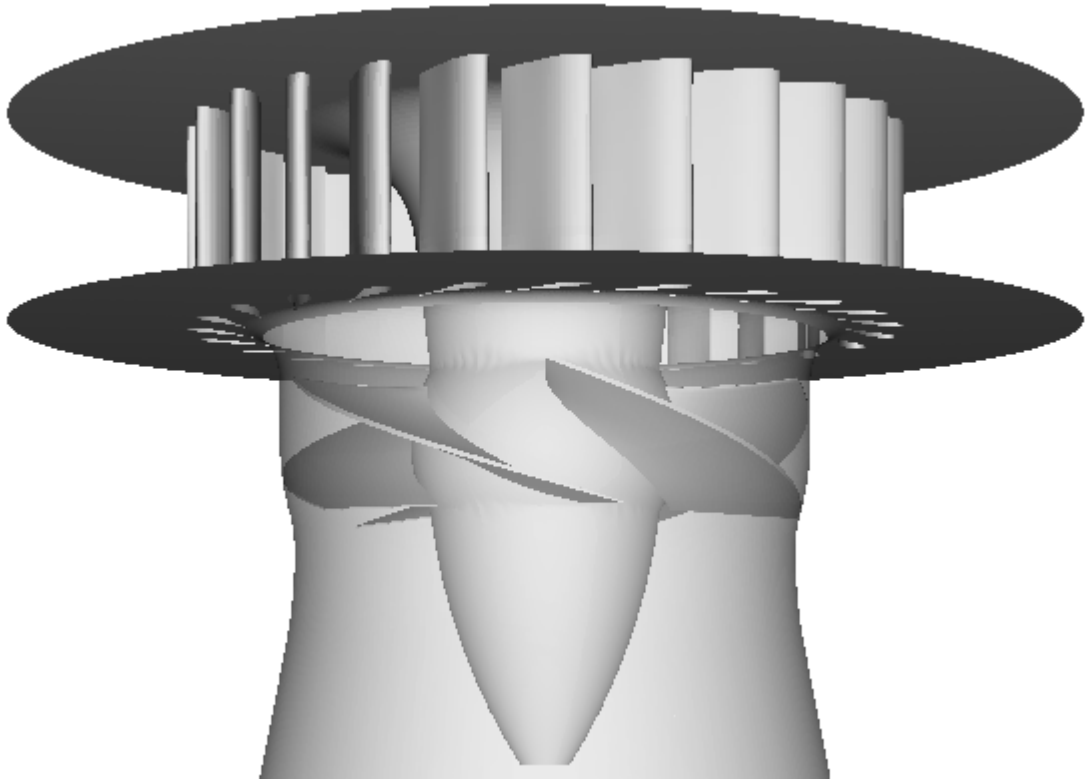
(Keskinen 1981, 70)



KUVIO 6. Kaplan-turbiinin juoksupyörä

3.2 Johtopyörä

Johtopyörän tehtävä on tulovirran säätäminen, sekä toimia tilavuusvirtaa säätävänä osana. Laite sisältää 12-24 kiertyvää johtosiipeä, sekä säätövivut ja lenkit, joiden avulla säätörenkaan liike välitetään johtosiipiin. Juoksupyörässä vaadittu tulo dralli täyttyy kehittää johtopyörässä. (Keskinen 1981,71)



KUVIO 7. Kaplan-turbiinin johtopyörä ja juoksupyörä.

(http://www.tfd.chalmers.se/~hani/phdproject/holle_all_geom.gif)

3.3 Imuputki

Imuputken tehtävänä on ottaa talteen juoksupyörän läpivirtaavan veden liike-energia, joka muuten kuluisi hukkaan. Turbiinissa, joka on asennettu alavesipinnan yläpuolelle imuputken tarkoitus on ottaa talteen staattinen imukorkeus. (Keskinen 1981, 72)



KUVIO 8. Kaplan-turbiinin imuputki ja juoksupyörä, imuputken suunnasta nähtynä.

3.4 Spiraali

Suurille pystyturbiineille käytetään betonispiraalia noin 30 metrin putouskorkeuteen asti. Yli 30 metrin putouskorkeuksilla on lujuussyistä käytettävä teräksistä pyöreä poikkipintaista levyspiraalia. Betonispiraaleissa ylä- ja alakartion pyörästys alueet ovat usein verhoiltu teräslevyllä. (Keskinen 1981, 148)



KUVIO 9. Kaplan-turbiinin spiraali (<http://www.travaini.it/Images/p14-spirale-turbina.jpg>)

4 SUOMESSA YLEISESTI KÄYTETYT VOIMALAITOSTYYPIT

4.1 Säännöstelyyn ja käyttötapaan perustuva jaottelu

4.1.1 Jokivoimalaitos

Jokivoimalaitoksessa on oma padolla aikaan saatu allas, jolla pystytään hoitamaan lyhytaikaista säätöä. Joskus säännöstely toimii kuitenkin puutteellisesti. (Keskinen 1981, 65)

4.1.2 Säännöstelyvoimalaitos

Säännöstelyvoimalaitosta kutsutaan myös nimellä allasvoimalaitos. Rakennuspaikka on suurten vuosisäännöstely altaiden yhteydessä. (Keskinen 1981, 65)

4.1.3 Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalaitoksen toiminta perustuu siihen, että halpaa yösähköä käyttäen pumpataan vettä varastona toimivaan altaaseen. Kun sähkön hinta on korkeampi se ajetaan vesiturbiinin läpi alas. Pumppuvoimalaitoksia ei ole käytössä Suomessa. (RENEWABLE ENERGY CONVERCION, TRANSMISSION AND STORAGE 2007, 263)

4.2 Rakenteellisiin ratkaisuihin perustuva jaottelu

4.2.1 Patolaitos

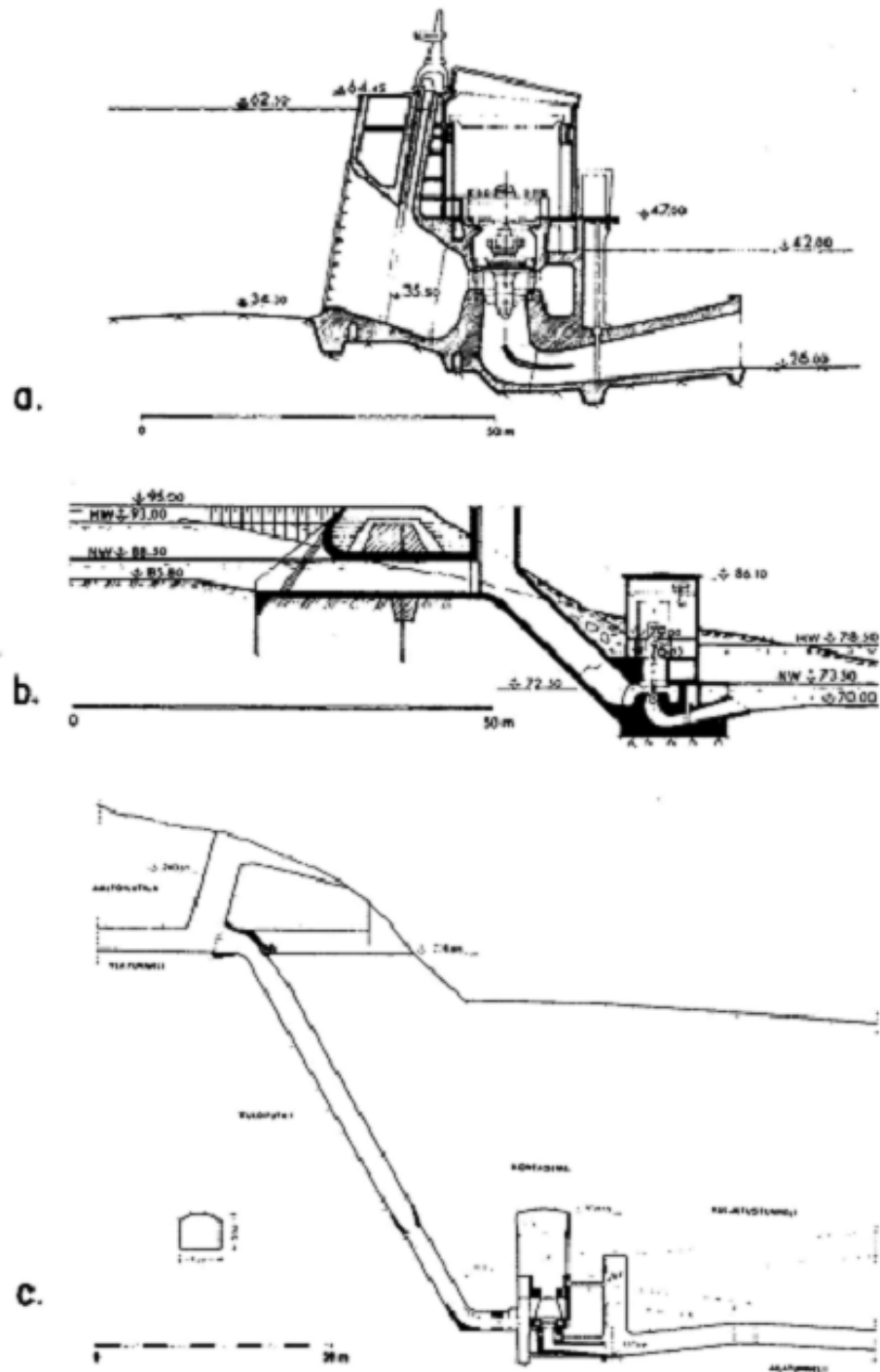
Laitokselle, joka on sijoitettu jokiuomaan tai sitä varten kaivettuun kanavaan on ominaista, että koneasema vesiteineen toimii koneen osana. (Keskinen 1981, 66)

4.2.2 Paineputkilaitos

Koneasema on sijoitettu teräksestä, betonista tai puusta valmistetun paineputken pituuden mukaan. Sijoituspaikka on välittömästi padon takana, osittain padon sisällä tai erillään alempana. (Keskinen 1981, 66)

4.2.3 Tunnelilaitos

Koneasema on sijoitettu kokonaan kallion sisään, tai muodostaa ylhäältä avoimen pystykuilun, johon tuloputki ja alakanavan alkuosa on liitetty tunnelina. Avokuilu ratkaisua käytettäessä suositaan pitkää akselikonetta, jolloin generaattori sijoitetaan maanpinnalle. (Keskinen 1981, 66)



- a. Patolaitos H=20,5m
- b. Putkilaitos H=15m
- c. Tunnelilaitos H= 96m

KUVIO 10. Vesivoimalaitoksen rakenteellinen jaottelu (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 67)

4.3 Putouskorkeuden mukaan tapahtuva jaottelu

4.3.1 Pienpainelaitokset

Yleisesti käytetty turbiini malli on putkiturbiini, joskus pienissä laitoksissa käytetään myös pysty-Kaplania tai Francis-turbiinia. Pienpainelaitoksilla putouskorkeudet ovat tavallisesti noin 2-15 m. (Keskinen 1981, 68)

4.3.2 Keskipainelaitokset

Turbiinityyppinä käytetään pystyakselista Kaplan-turbiinia. Pienissä laitoksissa on käytetty vaaka-akselista Francis-turbiinia. Keskipainelaitoksilla käytetyt putouskorkeudet ovat 10-40 m. (Keskinen 1981, 68)

4.3.3 Keskikorkeapainelaitokset

Turbiinina käytetään Francis-turbiinia. Alueen alarajalla voidaan käyttää myös diagonaaliturbiinia. Keskikorkeapainelaitoksilla putouskorkeudet alkavat noin 40 metristä, ja suurimmat putouskorkeudet ovat noin 400 metriä. (Keskinen 1981, 68)

5 KAPLAN-TURBIINI

Kaplan-turbiinin kehittäjä on itävaltalainen TkT Viktor Kaplan. Viktor Kaplan ryhtyi työskennellessään yliopiston professorina suunnittelemaan turbiinia, jolla olisi mahdollisimman suuri pyörimisnopeus. Vuonna 1912 hänen teoreettiset tutkimukset ja kokeet johtivat uuteen juoksupyörätyyppiin, missä juoksupyörä oli potkurityyppiä. Juoksupyörä oli varustettu kääntyvillä siivillä. Kaplanilla meni vuosia ennen kuin valmistajat hyväksyivät hänen keksintönsä toteuttamiskelpoiseksi. Vuonna 1918 rakennettiin ensimmäinen Kaplanin nimeä kantava turbiini. (Perttula 2008,109)

Kaplan-turbiinit sopivat mainiosti Suomen oloihin. Kaplan-turbiini on suosittu Suomessa, koska niiden putouskorkeus alue on laaja, se vaihtelee jopa 2 metristä noin 70 metriin. Kaplan-turbiinin juoksupyörä muistuttaa muodoltaan hieman laivan potkuria, siinä on 4-5 siipeä joiden asentoa voi säätää. Siipien valmistukseen käytetään ruostumatonta terästä, joka sisältää kromia sekä nikkeliä. Nikkelipitoisuutta on nostettu ja hiilipitoisuutta vähennetty, että materiaalille saataisiin parempi hitsattavuus ja enemmän väsymislujuuutta. Juoksupyörän siivet laakeroidaan napaan kiinnitettyihin pronssiholkkeihin. Voitelu on toteutettu öljyllä, jolla koko napa on täytetty. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 269)

Pienissä Kaplan-turbiineissa siipi ja laakeritappi on valmistettu samasta kappaleesta. Suurissa juoksupyörissä siipi kiinnitetään laakeritappiin ja vipurenkaaseen ruuveilla. Näin siivestä saadaan kevyempi ja valuteknisesti helpommaksi valmistaa. Tässä rakenne ratkaisussa laakeritappi voidaan valmistaa materiaalista, jolla on paremmat laakerointi ominaisuudet. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 269)

Siipiin asennettujen tiivisteiden tehtävä on estää napaöljyn vuotaminen ulos navasta, sekä estää veden tunkeutuminen napaan. Öljyn paine navassa pidetään korkeampana kuin alaveden

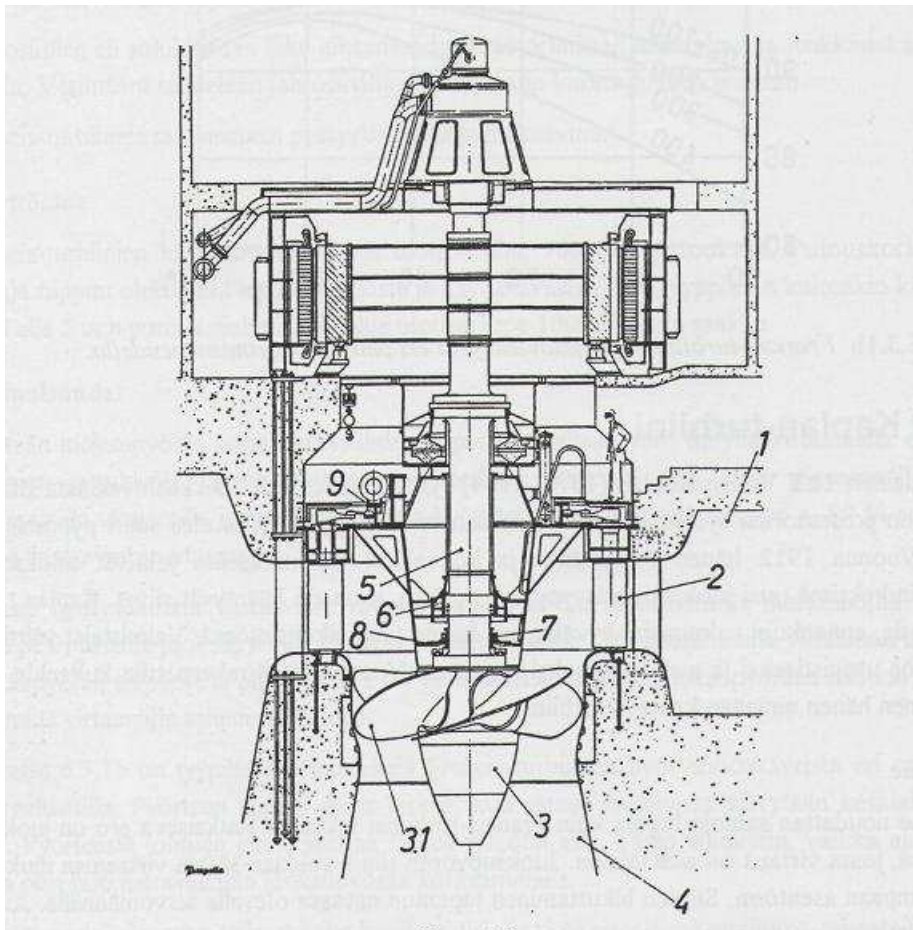
staattinen paine. Tiivisteiden sijoittelu toteutetaan siten, että tiivisteet voidaan vaihtaa uusien siipeä irrottamatta poistamalla tiivisteiden osiin jaettu peiterengas. Navan valmistukseen käytetään hiiliterästä tai lujaa valurautaa. Napa on valmistettu yhdestä kappaleesta. Servomoottori, joka sijoitetaan napaan voi olla osana runkoa tai erillinen hitsaamalla valmistettu kappale. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 269)

Kaplan-turbiinissa juoksupyörän kammion muotoilu on oleellisessa osassa koneen hyötysuhteen ja toiminna kannalta. Juoksupyörän kammio altistuu suurille rasituksille. Rakohäviöitä pyritään vähentämään muotoilemalla kammio juoksupyörän keskiökorkeuden alapuolelta pallomaiseksi. Joissakin tapauksissa voi olla tarpeellista muotoilla myös kammion yläosa pallomaiseksi. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 269)

Kavitaatio ja paineen vaihtelut aiheuttavat kammioon suuren rasituksen, joten hiiliterästä käytetään ainoastaan pienissä tubiineissa, joilla on matala putouskorkeus. Käytettäessä hiiliterästä rakenne on hitsattu. Suurissa pystyyn asennetuissa Kaplan-turbiineissa on hieman keskiön yläpuolelta alkaen kammion valmistus materiaalina käytettävä ruostumatonta terästä. Ruostumattomia pinnoitteita ei voida käyttää valmistus- ja lujuusteknisistä syistä. Hiiliteräksestä voidaan valmistaa rivat ja tukirakenteet, jos ne eivät joudu kosketuksiin veden kanssa. Värähtely ja väsymismurtumien estämiseksi suuret kammiot täytyy tehdä paksuseinäisiksi ja rivoittaa vahvasti, jos kammiota ei ole valettu betoniin. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 269)

Kaplan-turbiinin osat:

1. Spiraali ja tukirengas
2. Johtopyörä
3. Juoksupyörä
4. Imuputki
5. Akseli
6. Ohjauslaakeri
7. Akselitiiviste
8. Kansi
9. Säätörengas

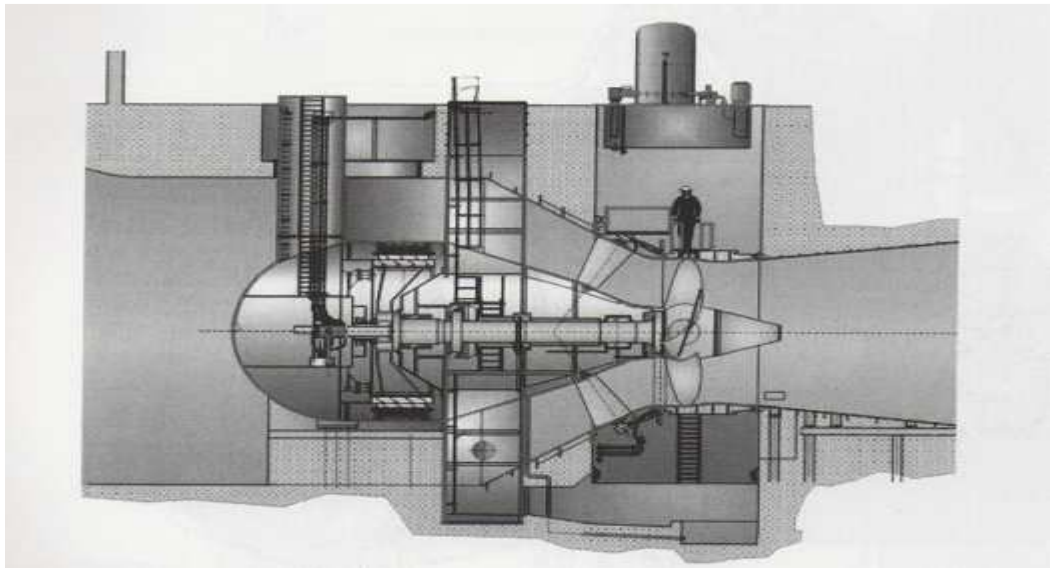


KUVIO 11. Kaplan-turbiini (Perttula 2008, 110.)

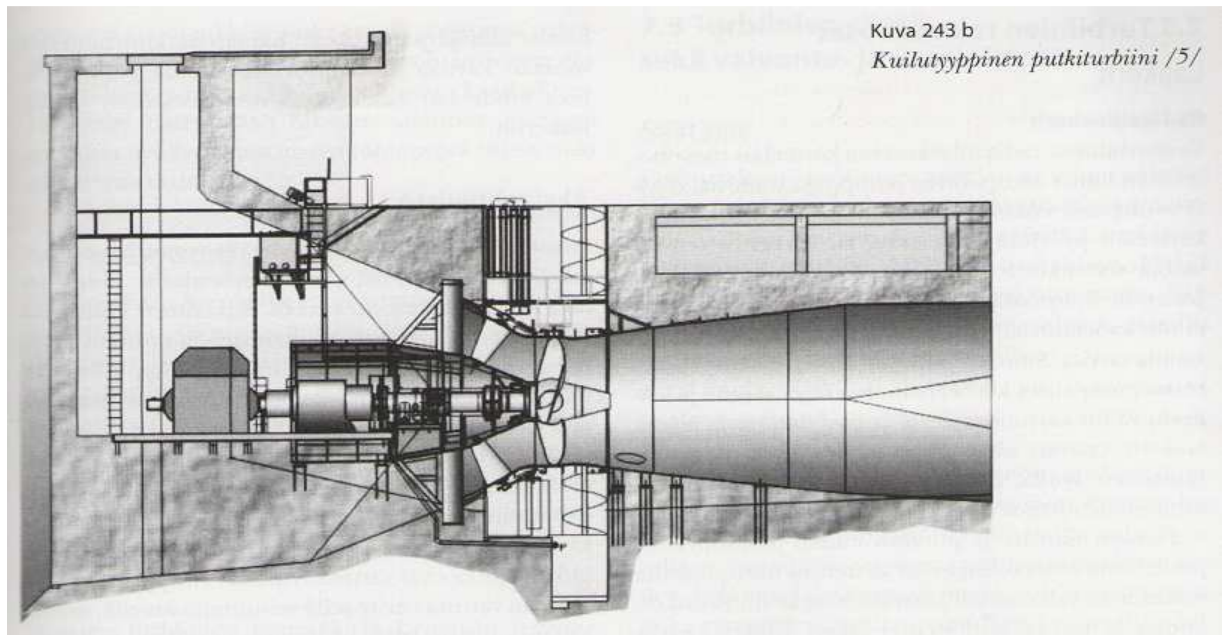
6 PUTKITURBIINIT

Putkiturbiinit voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin kotelotyypinen putkiturbiini, kuilutyypinen putkiturbiini ja putkityypinen putkiturbiini. Putkiturbiineissa juoksupyörä ratkaisuna käytetään Kaplan tyyppistä juoksupyörää tai potkuria. Turbiinin sijoitus paikkana käytetään suoraa tai lähes vaakasuorassa olevaa putkea. Putkiturbiinit sopivat loistavasti matalille putouskorkeuksille ja ovatkin pienen virtaaman takia lähes ainoa käytetty koneistotyyppi.

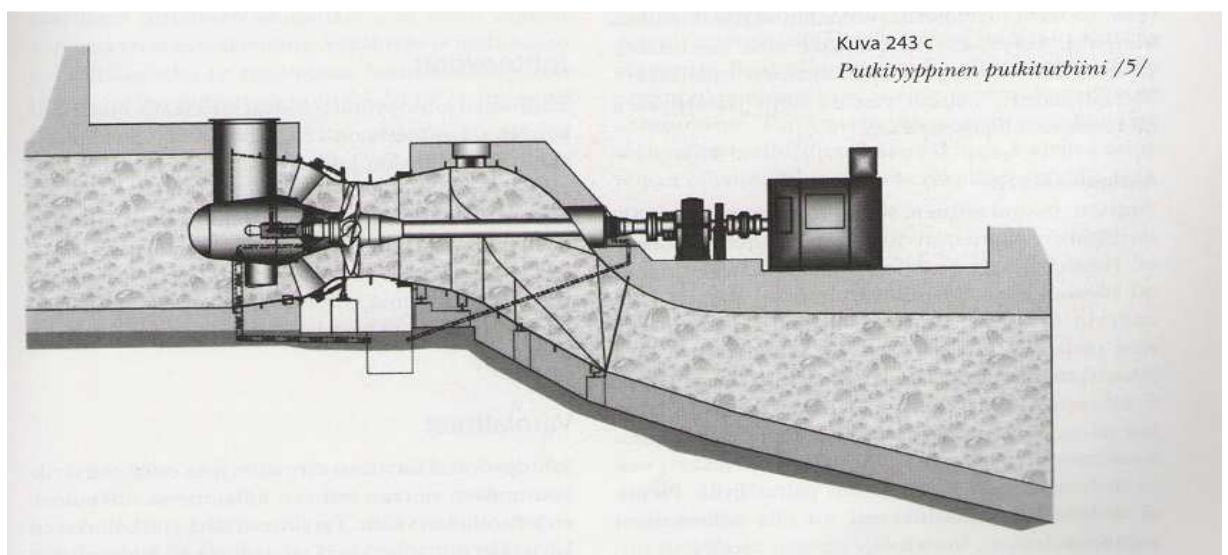
Putkiturbiineissa johtosiivet sijaitsevat kartiopinnalla ja muodoltaan ne ovat kiilamaisia, spiraali puuttuu täysin ja imuputki on suora. Kiinteillä johtosiivillä varustettuja putkiturbiineja kutsutaan puoli-Kaplaneiksi, vain juoksupyörän siivet kääntyvät. Samat asiat pätevät myös pysty-Kaplaneihin. Putkiturbiinien ominaispyörimisnopeudet ovat yleensä korkeampia kuin tavanomaisilla Kaplan-turbiineilla. (Perttula 2008,111)



KUVIO 12. Kotelotyypinen putkiturbiini / Bulb-turbine (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 272)



KUVIO 13. Kuilutyypinen putkiturbiini / Pit-turbine (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 273)



KUVIO 14. Putkityypinen putkiturbiini / S-turbiini (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 273)

6.1 Potkuriturbiini

Potkuriturbiineissa juoksupyörä muistuttaa potkuria. Juoksupyörässä on 3-8 napaa kohti paksuuntuvaa siipeä. Siivet voivat olla joko samaa kappaletta navan kanssa tai napaan ruuveilla kiinnitettyjä. Jos kiinnitys on toteutettu ruuveilla, voidaan siipien asentoa muuttaa, kun virtaamaan on odotettavissa muutoksia. Potkuriturbiineja voidaan pitää pikakäyntisinä. (Nevalainen 1980, 612)

7 TURBIININ SÄÄTÖLAITTEET

Vesiturbiinien pyörimisnopeuden ja tehon säätöön käytettävät laitteet on tapana jaotella ohjaussäätäjän toimintaperiaatteen mukaan sähkö-hydraulisiin ja mekaanis-hydraulisiin säätäjiin. (Salovaara 1981, 150)

7.1 Sähköhydrauliset säätäjät

Turbiineissa on 1950-luvulta lähtien Suomessa käytetty sähköhydraulisia säätäjiä. Sähköhydraulisten säätäjien etuja ovat hyvä soveltuvuus vaikeisiin säätöolosuhteisiin, automatisointiin, laitoksen koneiden yhteiskäyttöön, ulkopuoliseen ohjaukseen jne. Haitaksi voidaan lukea kalliin hinnan lisäksi käyttö- ja huoltohenkilöstölle asetettavat korkeat pätevyys vaatimukset. (Salovaara 1981, 150)

Kehitys elektroniikan ja säätötekniikan alalla johtaa todennäköisesti nykyistä halvempiin, varmatoimisempiin ja helpommin korjattavissa oleviin säätörakenteisiin. (Salovaara 1981, 150)

7.2 Mekaanis- hydrauliset säätäjät

Mekaanis-hydrauliset säätäjät soveltuvat varsin hyvin pienille turbiineille yksinkertaisen rakenteensa ansiosta. Aivan pienille turbiineille on saatavissa ns. työsäätäjiä, joissa yhdeksi kokonaisuudeksi on rakennettu ohjaussäätäjä, säätöventtiili, pumppukoneisto ja servomoottori. (Salovaara 1981, 150)

7.3 Johtopyörän säätö

Johtopyörän servomoottorin asennon ohjaamiseen käytetään pääsäätöventtiiliä, jota ohjataan säätäjällä vipuvälityksen kautta. Venttiilin luistin liikkeen rajoittamisen avulla voidaan johtopyörän sulkuaikaa säädellä. Servon takaisinkytkentä toteutetaan mekaanisesti palautustankojen avulla. (Salovaara 1981, 151)

Säätöventtiilin yhteyteen asennetaan useasti myös käynnistystä ja pysäytystä ohjaava magnetointiventtiili sekä tarvittaessa releventtiili. Releventtiilin tehtävänä on estää paineen tulo servoon ennen kuin johtopyörän lukko avautuu. (Salovaara 1981, 151)

7.4 Juoksupyörän säätö

Kaplan- turbiineissa juoksupyörän siivet pyritään säätämään sellaiseen kulmaan, joka on johtopyörän asennolle optimaalinen. Tämä toteutetaan siirtämällä johtopyörän servon asema kaarilaitteen välityksellä juoksupyörän servolle. Kaarilaite on tapana sijoittaa pääsäätöventtiilin yhteyteen ja kombinaattoriksi nimetään vaihteen tai generaattorin akselin päähän sijoitettua paineöljykeskusta, jonka avulla säätö-öljy johdetaan akseliin. Suurissa turbiineissa ohjaus toteutetaan sähköisesti, tässä tapauksessa kombinaatiokaarta seuraa vipuvälityksen sijasta induktiivinen asema-anturi. (Salovaara 1981, 151)

Johto- ja juoksupyörän asentojen optimaalinen säätö on yhteydessä putouskorkeuteen. Putouksen vaihtelu otetaan huomioon käyttämällä vaihdettavia kombinaatiokaaria tai muodostamalla rinnakkain sijoitetuista kaarista jatkuva pinta. Kun oikea kombinaatio on saatu valittua, se voidaan automatisoida. (Salovaara 1981, 151)

7.5 Pumppukoneistot

Säätöjärjestelmä tarvitsee paineöljyä, joka saadaan pumppukoneistosta. Työpaine on suhteellisen alhainen, uudemmissa laitoksissa 40 bar. Vaadittavat tilavuusvirrat ovat suuria. Pumppuina käytetään ruuvipumppuja, jotka toimivat vaihtovirralla, varalla tavallisesti käytetään pientä tasasähköpumppua. Käyttövarmuuden ylläpitämiseksi Suomessa on myös usein käytössä pääöljypumppuja, jotka saavat käyttövoimansa hammaspyörillä suoraan turbiinin akselilta. Jokaisessa pumpussa on vapaakierto- eli kevennysventtiili. (Salovaara 1981, 153)

Paineöljyä varataan ilmakelloon, näin toimimalla varaudutaan nopeita säätöliikkeitä ja häiriötilanteita varten. Ilmakello täytyy mitoittaa sillä tavalla, että kaikissa tilanteissa varastoitua energiaa on riittävästi sulkemaan turbiini kaikissa tilanteissa. Kellon ilmatilavuuden ylläpitäminen, toteutetaan yleensä pumppukoneistoon sijoitetulla automaattisella kompressorilla. Vaadittavien valvonta- ja varolaitteiden, sekä sulkuventtiilien lisäksi pumppukoneiston varusteluun kuuluu öljysiivilä. Tarpeen vaatiessa koneisto varustetaan myös jäähdyttimellä. (Salovaara 1981, 153)

7.6 Vaihteet

Jos turbiinin pyörimisnopeus on alhainen ja teho vähäinen, voidaan generaattorin nopeutta lisätä vaihteen avulla. Suurin teho, millä vaihteen käyttäminen kannattaa, nykytekniikalla on 2 -3 MW. Vaihteen tyyppinä käytetään yksiportaista lieriövaihdetta. Erikoistapauksissa on käytetty kartiovaihdetta, jota käyttäessä suurin mahdollinen teho on 1 MW. (Salovaara 1981, 154)

Vaihteet laakeroidaan vierintälaakereilla. Vaihteissa on myös erillinen kiertovoitelujärjestelmä. Kiertovoitelujärjestelmä sisältää usein myös öljyn jäähdyttimen. Koneiston aksiaalilaakeri on yleensä sijoitettu vaihteeseen. Tässä tapauksessa täytyy turbiiniin ja vaihteen akselit kytkeä jäykästi toisiinsa ja vaihde pitää asentaa tarkasti osana akselilinjaa. (Salovaara 1981, 154)

Kaplan-turbiineissa pitää olla juoksupyörän ohjauslaitteen mahdollistava kiinnitys, sekä ensiö akselin läpi menevä poraus. Generaattorin kytkentäpaikka on vaihteen toisio akseli. Kytkentä voidaan toteuttaa esimerkiksi hammaskytkimellä. Toisioakseli voidaan tehdä läpimeneväksi, jotta akselinpää jää vapaaksi. Vapaata akselinpäätä voidaan käyttää pyörimisnopeusanturin tai säätäjän käyttöön tai siihen voidaan kiinnittää huimapyörä. (Salovaara 1981, 154)

8 VALVONTA- JA VAROLAITTEET

Turbiinin valvottavia kohteita ovat:

1. Pyörimisnopeus

- normaali
- ryntäys

2. Johtopyörän asento

3. Johtopyörän lukon asento

4. Juoksupyörän asento

5. Spiraalin tai tuloputken paine

6. Imuputken paine

7. Säättö-öljy

- paine
- pinnankorkeus säiliössä
- pinnankorkeus ilmakellossa
- lämpötila

8. Aksiaalilaakeri

- öljyn lämpötila
- öljyn pinnankorkeus
- segmenttien lämpötila
- jäähdytysveden virtaus

9. Radiaalilaakeri

- öljyn lämpötila
- öljyn pinnankorkeus
- laakerikuoren lämpötila

10. Akselitiiviste

- lämpötila
- jäähdytysveden virtaus

11. Voitelurasvan paine

12. Vuotoveden pinnankorkeus

13. Vuotoöljyn pinnankorkeus

14. Murtolenkin murtuminen

15. Juoksupyörän säätökaran varolaitteen toiminta

(Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 276)

9 LUUKUT JA VÄLPÄT

Voimalaitoksissa esiintyvät luukut voidaan jaotella käyttötarkoituksensa mukaisesti seuraavalla tavalla:

1. Turbiinin tuloputken sulkuluukut
2. Turbiinin imuputken sulkuluukut
3. Tulva- ja säännöstelyluukut
4. Puutavaran uittoon liittyvät luukku- ja koururakenteet

(Salovaara 1981, 156)

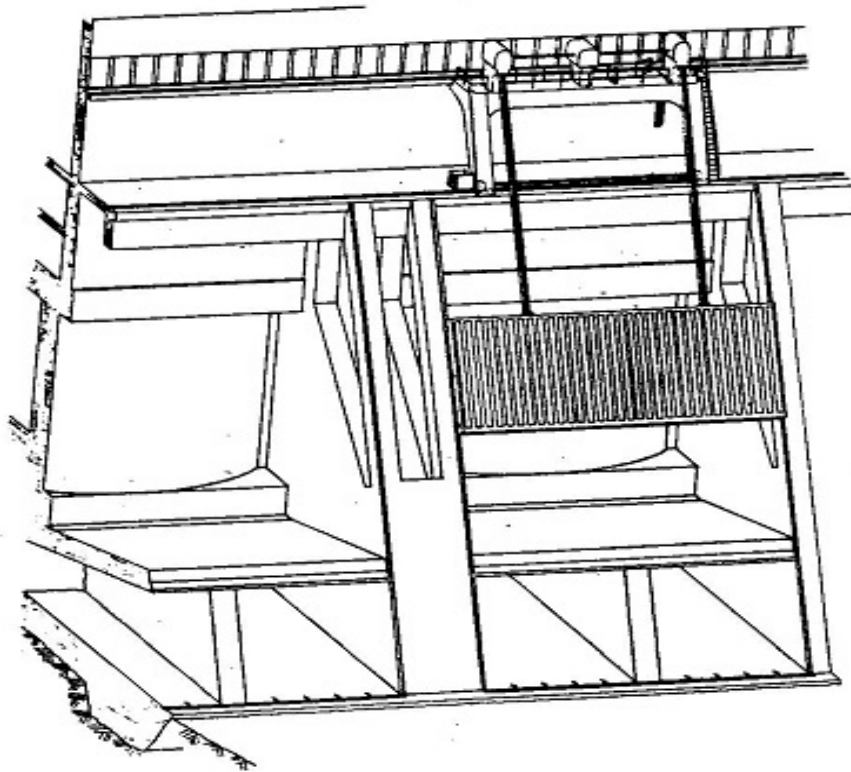
9.1 Tuloputken sulkuluukut

Tuloputken sulkuluukut ovat maassamme yleisesti tasoluukkuja. Sulkuluukkujen tarkoituksena on sulkea turbiinin vesitie, jotta turbiinin huolto ja korjaustyöt pystytään toteuttamaan. Sulkuluukkuja käytetään myös pitkähköjen seisokkien aikana estämään vuotohäviöitä. Luukut on myös tapana varustaa toimimaan hätäsulkulaitteina, jolloin ne turbiinin valvontalaitteiston ohjaamina sulkeutuvat tilanteessa, jossa turbiini ryntää. Luukkujen sulkeutumiseen ei tarvita ulkopuolista apuenergiaa. Sulkeutuminen tapahtuu luukkujen oman painon avulla. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 276)

Suuret voimalaitokset jaotellaan väliseinien avulla kahteen tai kolmeen osaan, jolloin luukkuja on vastaava määrä. Tuloputkien luukkujen jäätymisen estämiseksi ne sijoitetaan siiloihin tai suljettuun luukkukuiluun, joka on auki- asennossakin osittain veteen upotettuna. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 276)

9.2 Imuputken sulkuluukut

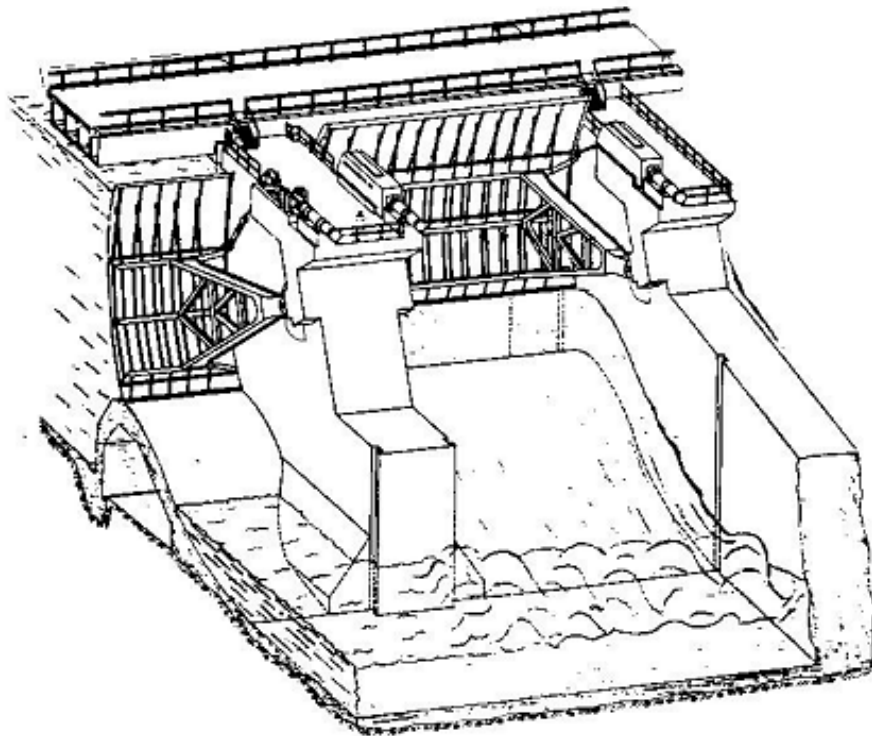
Imuputken sulkuluukut ovat myös tyypiltään tasoluukkuja. Niitä käytetään vain huolto- ja korjaustilanteissa. Näissä tilanteissa luukku lasketaan seisovaan veteen. Ennen kuin luukku nostetaan, tasataan paine-ero täyttämällä imuputki täyttöventtiilin kautta. Laitoksilla joissa on useita turbiineita, käytetään luukun nostokoneistona pukkinosturia, joka pystytään ajamaan suljettavan koneiston kohdalle. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 276)



KUVIO 15. Imuputken sulkuluukku (INSKO JULKAISU 45-78 1981,158)

9.3 Segmenttiluukut

Tulva- ja säännöstelyluukkuna käytetään yleisesti segmenttiluukkuja, jota käytetään myös joissain tapauksissa tuloputkensulkemiseen. Jos luukun rungosta otetaan poikkileikkaus, se on segmentinmuotoinen, joka tukeutuu sivumuureihin aisojen avulla. Tulvaluukun täytyy toimia myös talviolosuhteissa. Luukun toiminnan varmistamiseksi segmentin pieli- ja kynnysteräket lämmitetään pienjännitteisellä sähköviralla. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 277)



KUVIO 16. Segmenttiluukku (INSKO JULKAISU 45-78 1981,159)

9.4 Nostokoneistot

Tasoluukuissa on yleisesti käytössä mekaaninen nostokoneisto. Koneiston muodostaa sähkömoottori, jarru ja alennusvaihde, joka nostaa luukkua hammastangon, vaijerin tai ketjun välityksellä. Segmenttiluukuissa on yleisesti käytössä hydraulinen nostokoneisto. Nostosylinterit voidaan kytkeä luukkuun ketjulla, joka kulkee taittopyörän yli. Toinen tapa on kiinnittää sylinterin männänvarsi suoraan luukkuun. Jos käytössä on useita luukkuja, voidaan käyttää yhteistä hydraulista pumppu koneikkoa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 277)

9.5 Muut sulkulaitteet

Varsinaisten luukkujen lisäksi tarvitaan voimalaitoksen vesiteiden sulkemiseen tilapäisiä sulkulaitteita. Tilapäisiä sulkulaitteita tarvitaan esimerkiksi, kun on tarve korjata luukkuja tai niiden johteita. Tällaisten tapausten varalle vesitiet on varustettu settiurilla, joihin pystytään sijoittamaan pyörätön luukku, joka lasketaan seisovaan veteen tai kootaan seinämä teräksisistä tai betonisista settipalkeista. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 277)

9.6 Venttiilit

Pienissä turbiineissa tuloputkien ja laitosten ohijuokutusputkien sulkulaitteena on käytössä läppäventtiili. Tämän tyylisessä käytössä läppäventtiililtä vaaditaan täyttä toimintavarmuutta kaikissa käyttöolosuhteissa. Venttiilin täytyy olla niin tiivis, että se mahdollistaa huolto- ja korjaustöiden tekemisen suljetun läpän takana. Tuloputken läppäventtiilin hätäsulun toimivuus pystytään takaamaan muotoilemalla läppä virtauksen avulla itse sulkeutuvaksi. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 276)

9.7 Välvät ja välpänpuhdistajat

Voimalaitoksen tuloputkeen on aina sijoitettava välvät turbiinin suojaksi. Välppateräksissä käytettävä vapaa väli vaihtelee välillä 20-100 mm. Pienet välvät on tapana koota lattateräksistä. Suurin väliin voidaan käyttää myös erikoisprofiloituja teräksiä. Tukkeutumisen varalle välppien kannatusrakenteet täytyy mitoittaa täydelle yläveden paineelle. Tukkeutumisen aiheuttaa useimmiten ajelehtiva jää tai hyytymisilmiö. Välppään voi kertyä roskia, joiden poistoon voidaan käyttää koneellista välpänpuhdistajaa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 277)

10 SUPPO

10.1 Supon muodostuminen

Supolla tarkoitetaan veden alijäähtymisestä johtuvaa jäätymisilmiötä. Esiintyessään suppo on erittäin hankala ongelma vesivoimala käytössä. Supon yleinen esiintymisaika on vesistöjen jäätyessä syystalvella, kun vesivoimalaitoksen yläallas ei ole vielä jäätynyt. Supon muodostumisen edellytyksenä on, että veden lämpötila on laskenut lähelle jäätympistettä, noin 0,18 Celsius asteeseen, sekä ilma on muutaman asteen pakkasen puolella. Lisätekijöinä voi esiintyä voimakasta joen suuntaista tuulta sekä lumisadetta. Virtaaman suuruudella on myös merkitystä supon muodostumiselle. Jos virtaama on suuri, se estää jääkannen syntymisen nopean pintavirtauksen takia, edellytykset supon muodostumiseen ovat tällöin suuremmat. Jos virtaama on pieni ja joki saa jää peitteen sopivalla pakkasella, jolloin veden lämpötila on vielä korkea, ei suppo vaihetta pääse muodostumaan. Voimalaitoksen laaja yläallas estää supon muodostumista. (Pousi 1981,278-279)

10.2 Supon vaikutukset

Supon muodostuessa on vedessä kauttaaltaan pieniä jääkiteitä, sekä suurempia hiutaleita, joilla on tapana tarttua kiinni vedenlämpöisiin tai niitä kylmempiin esineisiin. Matalissa koskipaikoissa suppo voi muodostua todella pahaksi ongelmaksi, koska koski voi jäätyä pohjaan saakka. (Pousi 1981,279)

Yleensä ensimmäinen kohde mihin suppo alkaa muodostua ovat välpät. Välppärautojen pinnalle tarttuva jää saattaa tukkia jo parissa tunnissa rautojen välit. Välppiin muodostuva jääseinä voi kasvaa kymmenien senttimetrien paksuiseksi. Jääseinämässä voi olla

aukkopaikkoja tai huokoisempia kohtia, joista vettä pääsee virtaamaan lävitse. Seinämän estäessä virtausta turbiinista saatava teho laskee. Turbiini on pysäytettävä viimeistään siinä vaiheessa, kun virtaus on niin pieni, että turbiini ei anna tehoa lainkaan. (Pousi 1981,279)

Jään muodostumista saattaa esiintyä myös itse turbiinissa. Näin on päässyt tapahtumaan, kun turbiinia on yritetty pysäyttää välppien tukkeutumisen vuoksi, eikä se ole onnistunut solukkeisiin kertyneen jään takia. Turbiini on saatu pysäytettyä sulkemalla tulokammion sulkuluukku. Voimalaitoksen jäähdytysveden ottoaukoissa sijaitsevat välpät ovat, myös herkkiä paikkoja supon muodostumiselle. Myös ne ovat suppokautena tarkkailun alaisena. (Pousi 1981,279)

10.3 Suppohaittojen vähentäminen

Supoista aiheutuvia vaikeuksia ei voida kokonaan poistaa, mutta niiden aiheuttamia haittoja voidaan lieventää. Kun hyytövaara tulee ajankohtaiseksi pitää veden lämpötilan mittauksessa käyttää mittaria, jonka tarkkuus on 0,01°C. Turbiinin välppien tukkeutumista pyritään seuraamaan välppähäviöitä seuraamalla. Häviöiden suureneminen normaali arvoista on merkki siitä, että jäätä alkaa muodostua välppäautoihin. Välppähäviöiden jatkuvasti kasvaessa on turbiini syytä pysäyttää, ennen kuin välpät tukkeutuvat täysin. Näin toimimalla kammio ei tyhjene kokonaan ja supon loputtua saadaan turbiini helpommin käyntiin. Parhaat toimenpiteet supon estämiseksi ovat virtauksen pienentäminen tai laitoksen pysäyttäminen. Mainitut toimenpiteet eivät kuitenkaan ole aina mahdollisia toteuttaa. (Pousi 1981,280)

Joen yli kiinnitetyllä jäädytyspuomilla voidaan pienentää pintavirtausta, joka estää supon muodostumista. Puomi pitää sijoittaa paikkaan, jossa virtaus on suhteellisen rauhallinen. Hyytövaaraa on myös yritetty estää nostamalla joka toinen välppä ylös. Tällainen toimenpide

voi johtaa siihen, että turbiiniin pääsee vieraita esineitä. Turbiinin vioittumisen vaarasta johtuen tämä menettely ei ole suositeltava. (Pousi 1981,280)

Välppiä voidaan lämmittää kuumalla vedellä käytettäessä onttoja välppäautoja, tai vaihtoehtoisesti sähköllä. Näillä menetelmillä laitos pitäisi saada nopeammin käyntiin. Pahoissa hyytötapauksissa on jouduttu turvautumaan radikaaleihin keinoihin ja räjäyttää suppo auki. Räjäytys täytyy toteuttaa erittäin varovasti, ja hyvin pienillä räjähdemäärillä, ettei syntyvä paineaalto aiheuta vahinkoa rakenteille eikä koneistolle. (Pousi 1981,280-281)

Suppokauden päätyttyä välpät tarkistetaan. Vahinkoja löydettyä ne täytyy korjata. Hyydön takia turbiinia pysäyttäessä katkeaa yleensä joitakin murtolenkkejä. Murtolenkit tulisi tarkistaa aina tällaisen pysäyttämisen jälkeen. (Pousi 1981,282)

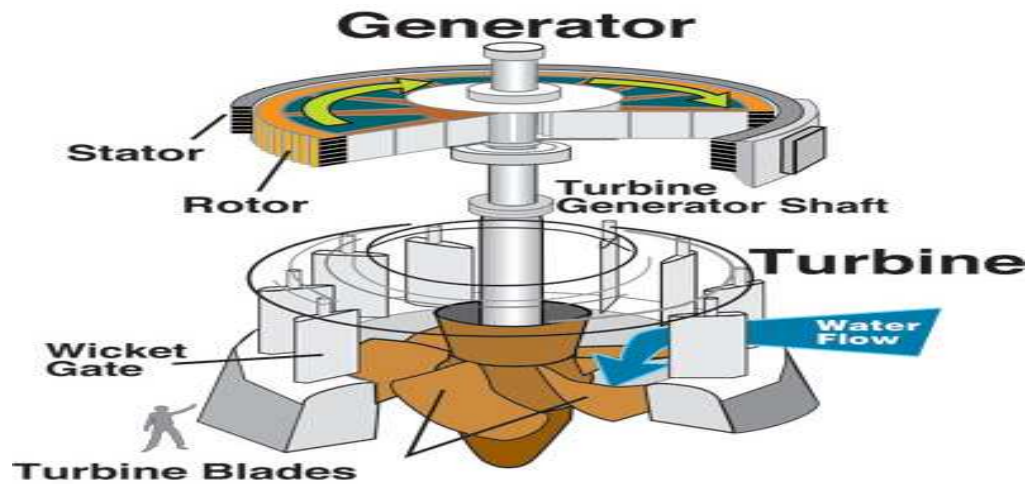
11 VESIVOIMAGENERAATTORIT

Kun lähdetään valitsemaan generaattoria sähkön tuottamiseen vesivoimalla, ovat yleisesti käytössä olevat generaattoryypit tahti- ja epätahtigeneraattori. Epätahtigeneraattori on rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin tahtigeneraattori. Epätahtigeneraattori ei tuota loistehoa verkkoon vaan kuluttaa sitä. (INSKO 68-92 VIII, 1)

Vesiturbiineissa on usein pieni pyörimisnopeus, ja koska taajuus on vakio, tulee generaattorin napapariluvun olla suuri. Tämä tarkoittaa sitä, että koneen läpimitta tulee suureksi, jotta suuri napapariluku voitaisiin toteuttaa koneen valmistuksessa. Lisäksi staattorin halkaisijamittaa voi rajoittaa turbiiniasennuksessa tarvittava tila. Koneen läpimitta ja pituus määrittävät siitä saatavan tehon. (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 166)

Tahtigeneraattorin rakennetyypit ovat umpi- ja avonapainen generaattori. Umpinapaisia tahtigeneraattoreita käytetään yleensä 2-napaisina 3000 rpm (rounds per minute) turbogeneraattoreina. Vesivoimakäytössä avonapaiselle tahtigeneraattorille hyvä toiminta alue on 0,5-25 MVA pyörimisnopeusalueella 150-1500 rpm. (INSKO 68-92 VIII, 3)

Pienen kokoluokan vesivoimalaitokset käyttävät induktio tai synkronisia generaattoreita. Pieni paineisilla turbiineilla on tapana pyöriä hitaammin kuin suuripaineisilla. Pienen pyörimisnopeuden takia on suositeltavaa käyttää vaihdetta tai moninapaista generaattoria. (EMBEDDED GENERATION 2000, 31)



KUVIO 17. Generaattorin toiminta (<http://www.biofuelswatch.com/wp-content/uploads/2009/11/water-turbine.jpg>)

11.1 Tahtigeneraattori

Generaattorissa on roottorissa tasavirran avulla magnetoidut navat. Roottorin liike muodostaa generaattoriin pyörivän magneettikentän. Magneettikentän kulkiessa koneen kiinteisiin osiin asennettujen käämien läpi muodostuu käämeihin vaihtojännite. (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 165)

Magneettikentän positiivisen ja negatiivisen kohdan lävistäessä käämin syntyy jännitteen yksi jakso, joka käsittää positiivisen ja negatiivisen puolijakson. Koneen voi rakentaa sillä tavalla, että yhden kierroksen aikana useampi magneettinapa ohittaa staattorivyyhdän, ja kierroksen aikana muodostuu siten useampia jaksoja. Samassa voimansiirtojärjestelmässä kytkettynä olevat generaattorit käyvät tahdissa, mistä tulee nimitys tahtigeneraattori (synkronigeneraattori). (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 165)

Jännitteen taajuus voidaan laskea kaavalla:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (17)$$

f = taajuus

n = pyörimisnopeus

p = napapariluku

(INSKO JULKAISU 45-78 1981, 165)

Euroopassa käytettävä vaihtovirtajärjestelmän taajuus on 50 Hz = 3000 1/min. Joten generaattorin pyörimisnopeus on:

$$n = \frac{3000}{p} \quad (18)$$

(INSKO JULKAISU 45-78 1981, 165)

Generaattorin jännite valitaan standardijännitteistä 400 V, 3150 V, 6300 V, 10500 V tai 13800 V, joka on suurin Suomessa käytetty vesivoimageneraattorin jännite. Generaattorin valmistuksen kannalta tarkasteltuna pienjännite on edullisin noin 2 MVA tehoon asti, 6300 V tehoalueella noin 2 – 10 MVA ja 10500 V tehoalueella noin 10 – 40 MVA. Vanhemmissa generaattoreissa voi esiintyä myös jännitteitä, jotka eivät ole standardien mukaisia. (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 164-165)

11.2 Epätahtigeneraattori

Myös asynkronikonetta on joissakin tapauksissa käytetty jossain määrin käytetty pienillä tehoilla voimalaitosgeneraattorina. Asynkronigeneraattorin etuina voidaan pitää edullista hintaa ja yksinkertaista rakennetta. Asynkronigeneraattorina voidaan käyttää sellaista oikosulkumoottoria, jonka roottori on vahvistettu turbiinin ryntäysnopeutta vastaavaksi ja laakerointi tarkastettu. Haittana on se, että kone vaatii magnetointi tehonsa ulkoisesta verkosta. Generaattoria ei myöskään voida säätää, joten generaattori ei voi toimia itsenäisesti.

11.3 Kestomagneettigeneraattori

Kestomagneettigeneraattorit edustavat uudempaa teknologiaa, joka tarjoaa kustannustehokkaita ratkaisuja. Generaattorit voidaan sykronisoida suoraan verkkoon tai käyttää taajuusmuuntaja. Kestomagneetti teknologia tarjoaa korkeamman hyötysuhteen verrattuna perinteisiin generaattori ratkaisuihin vaihteen kanssa mutta myös ilman vaihdetta. (<http://www.axcomotors.com/datalehdet/vesiesite.pdf>)

Putouskorkeuksia voidaan pitää Suomessa melko matalina, jolloin myös turpiinin pyörimisnopeus on usein alhainen. Generaattorin fyysinen koko määritellään vaadittavan tehon ja pyörimisnopeuden perusteella, on turpiinin ja generaattorin väliin pienvesivoimalaitoksen koneistoissa perinteisesti asennettu erillinen vaihdelaatikko nostamaan kierroslukua. Näin pystytään käyttämään ulkomitoiltaan pienempää ja samalla edullisempaa nopeamman kierrosluvun komponentti generaattoria.

(http://abb.smartpage.fi/asiakas208/pdf/ABB_asiakas.pdf)

Kestomagneettiteknologiaan perustuvalla vaihteettomalla moottorilla ja taajuusmuuttajalla voidaan generaattoriratkaisun toteutus tehdä yksinkertaisemmin, mikä tuo uusia mahdollisuuksia kustannussäästöihin. Kun voimalalla tuotettu sähköenergia siirretään verkkoon taajuusmuuttajan kautta, turpiinin pyörimisnopeudella ei ole enää niin suurta merkitystä. Siirto voidaan toteuttaa vaikka generaattorijännitteen taajuus on normaalin verkkotaajuuden sijasta vain 10–70 hertsiä. Käynnistyksen ja pysäytyksen voi toteuttaa hyvin rauhallisesti, jolloin jarrutustehokin voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Taajuusmuuttajan avulla myös loistehoa pystytään tuottamaan lähes koneiston nimellistehon verran jopa ilman, että kone pyörii.
(http://abb.smartpage.fi/asiakas208/pdf/ABB_asiakas.pdf)

Vaihteettomassa kestopagneettigeneraattori ratkaisussa on vähemmän kuluvia ja huoltoa vaativia osia, ja kun otetaan huomioon, että perinteisen vaihdelaatikon sisältämä öljy jää pois, ympäristöystävällisyys paranee. Lisäksi tämä mahdollistaa vesivoimalaitoksen sähköjärjestelmien aiempaa yksinkertaisemman rakenteen. Taajuusmuuttajaa käytettäessä ei tarvita erillisiä tahdistusjärjestelmiä tai generaattorin suojareleitä, koska nämä toiminnot sisältyvät jo vakiona taajuusmuuttajan ominaisuuksiin. Kestomagneettigeneraattori ei myöskään vaadi erillistä magnetointia.

(http://abb.smartpage.fi/asiakas208/pdf/ABB_asiakas.pdf)

12 VESIVOIMAGENERAATTORIN RAKENNE

12.1 Staattori

Staattorin runko valmistetaan hitsatusta rakenteesta, joka voidaan jakaa kuljetusta varten useampaan osaan. Magneettiipiiri on valmistettu erikoisteräksestä meistetyistä ohutlevysegmenteistä. Levysegmentteihin meistetään ulkopuolelle lohenpyrstöä muistuttavat urat, joilla kiinnitettävät levyt on tarkoitus kiinnittää staattorirungossa oleviin vastaaviin lohenpyrstökiiloihin. Levysegmentin sisäpuolelle meistetään urat staattorikämiä varten. Näistä levyistä valmistetaan latomalla levypaketti, joka muodostaa staattorin magneettiipiirin. Levypaketti jaetaan osiin ilmasolilla, joiden kautta jäähdytys ilma kulkee jäähdyttämään levypakettia ja kämiä. Levypaketin kokoon puristamiseen käytetään paketin läpi meneviä pultteja. Staattorikämin vyyhtien valmistamiseen käytetään eristettyjä kuparijohtimia. Vyyhti voidaan jaotella useampaan eristettyyn osavyyhteen. (INSKO JULKAISU 45-78 1981,167)



KUVIO 18. Staattorin käämitys

12.2 Roottori

Pyörivää osaa kutsutaan napapyöräksi tai roottoriksi. Pienehköissä koneissa voi koko roottorin keskus koostua yhdestä valukappaleesta. Suuremmissa koneissa roottori koostuu teräsvalukeskuksesta ja hitsatuista armeista, joihin napapyörän rengas on kiinnitetty. Rengas voi olla valmistettu joko massiivista rautaa tai ohutlevysegmenteistä valettu. Valmistamalla roottorin rengas ohutlevysegmenteistä lievennetään ongelmia, joita suurten kappaleiden käsittely ja kuljetus aiheuttavat. Renkaan rakenne ei vaikuta koneen sähköisiin ominaisuuksiin. (INSKO JULKAISU 45-78 1981,168)

Napojen kiinnitykseen käytetään lohenpyrstöliitosta. Myös pulteilla toteutettu kiinnitys on mahdollinen. Napasydän kootaan meistetyistä levyistä, jotka kiristetään läpimenevillä pulteilla yhteen lujaksi paketiksi. Napakäämitys toteutetaan, joko muotokuparista taivuttamalla tai käämillä kuparilangasta. Vaimennuskäämityksen muodostavat navan pinnassa oleviin uriin asennetut kuparisauvat. Sauvat on oikosuljettu kummassakin päässä kuparisella oikosulkurenkaalla. (INSKO JULKAISU 45-78 1981,168-169)

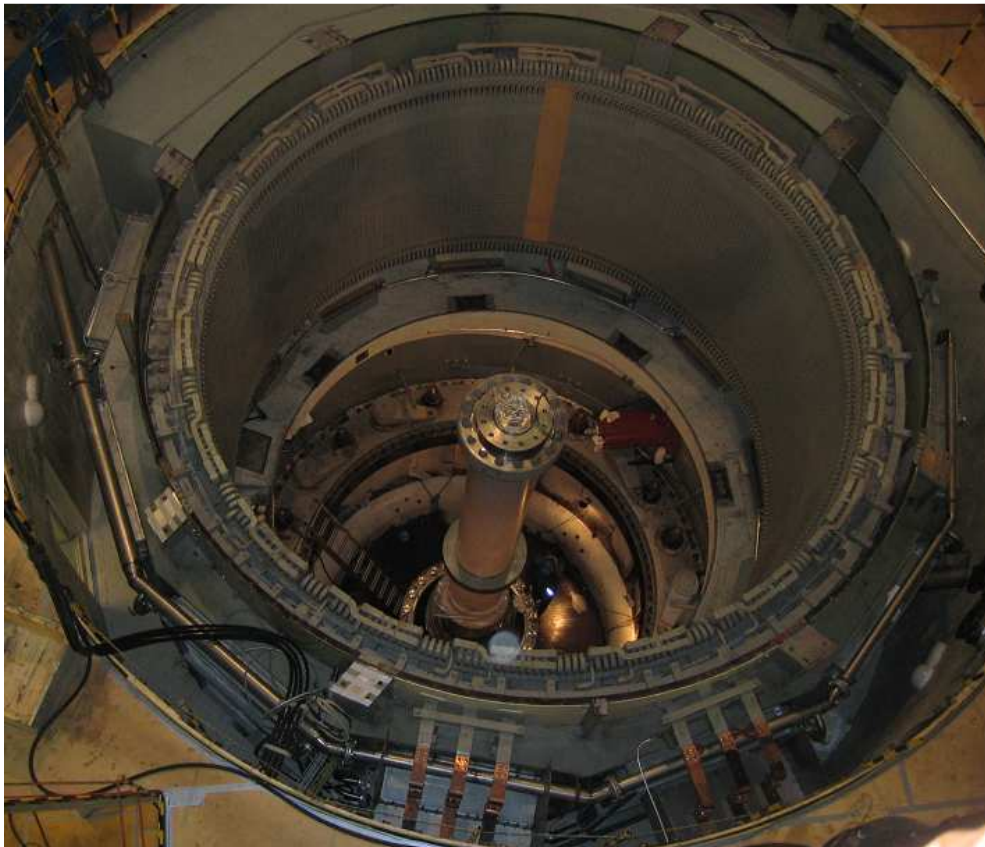
Roottorin mekaanisen mitoituksen määrittävät ryntäysnopeus, sekä turbiiniin säädön edellyttämä hitausmomentti. Hitausmomenttivaatimus voi johtaa raskaampaan roottori ratkaisuun kuin muuten olisi tarpeen. Ryntäysnopeus saattaa Kaplan-turbiinilla olla kolme kertaa nimellinopeuden suuruinen, jonka asettama lujuusvaatimus roottorin on täytettävä. (INSKO JULKAISU 45-78 1981,169)



KUVIO 19.
Generaattorin roottori.

12.3 Akseli

Akselin tehtävä on välittää turbiinilta tuleva vääntömomentti generaattorille. Akseli on mitoitettava kestämään normaalikäytössä, sekä ennalta arvioitavissa olevissa vika- ja häiriötilanteissa esiintyvät vääntö- ja taivutusrasitukset. Kaplan-turbiineilla akselissa on läpimenevä poraus säätölaitteita varten. (INSKO JULKAISU 68-92 1992,5)



KUVIO 20. Roottoriin kiinnitettävä akselinpäätty.

12.4 Laakerointi

Laakerointiratkaisuihin vaikuttavat monet eri tekijät ja ovat aina tapauskohtaisia. Osa laakereista saattaa kuulua generaattori toimitukseen ja osa turbiini toimitukseen. Generaattori voidaan toimittaa myös täysin ilman laakereita. Jos generaattori toimitetaan ilman laakereita, huolehtii turbiinin toimittaja laakeroinnista. (INSKO JULKAISU 45-78 1981, 169)

Generaattorin laakeroinnin täytyy kantaa generaattorin roottorin paino, roottorin sallituissa rajoissa olevasta epäkeskeisyydestä aiheutuva magneettinen radiaalivoima, sekä joissakin tapauksissa turbiinin juoksupyörän paino ja turbiinin juoksupyörältä tulevat radiaali- ja aksiaalivoimat. (INSKO JULKAISU 68-92 1992, 6)

Laakereiden valitaan vaikuttavat seuraavat tekijät:

1. Akselin pienin sallittu laakeripinnan halkaisija
2. Laakerivoimat
3. Nimellispyörimisnopeus
4. Ryntäysnopeus ja –aika

(INSKO JULKAISU 68-92 1992, 6)

Generaattoreissa yleisesti käytetyt laakerointiratkaisut ovat rasvavoidellut eurakuula- tai rullalaakerit, jotka ovat riippumattomia ulkoisesta voiteluöljynsyötöstä. Käytössä ovat myös syöttövoidellut liukulaakerit, jotka kestävät paremmin ryntäystä kuin vierintälaakerit. (INSKO JULKAISU 68-92 1992, 6)

12.5 Muut varusteet

Generaattorin riittävän jäähtymisen vaatima ilmakierto voidaan saada aikaan akselille asennetuilla tuulettimilla. Jos generaattorissa on suljettu ilmankierto, täytyy siihen asentaa lämmönvaihdin siirtämään häviöteho ulkoiseen jäähdytysaineenkiertoon. Useissa tapauksissa käytetään ilma/vesilämmönvaihdinta asennettuna generaattorin yläosaan. (INSKO JULKAISU 68-92 1992, 6)

13 YHTEENVETO

Opinnäytetyössäni on perustietoa vesivoimaloista ja niihin liittyvistä ominaisarvoista. Teoksesta saa kuvan vesivoimalaitosten toiminnasta ja niiden rakenteesta. Opinnäytetyössä käsiteltäviä turbiinityyppejä ovat Kaplan- ja potkuriturbiinit. Nämä turbiinityypit soveltuvat hyvin Suomen olosuhteisiin.

Suomen vesivoimaloissa käytetään myös Francis-turbiineita, mutta niitä ei ole käsitelty tässä opinnäytetyössä. Pelton-turbiineja käytetään suurilla putouskorkeuksilla, joten niitä ei ole käytössä Suomessa eikä tästä syystä käsitelty tässä opinnäytetyössä.

14 POHDINTA

Tätä opinnäytetyötä tehdessäni olen oppinut paljon vesivoimasta. Aloittaessani opinnäytetyön tekemistä, minulla oli hieman hankaluksia löytää materiaalia. Halusin käyttää mahdollisimman vähän internetistä löytyviä lähteitä, koska suhtautumiseni niihin on aika kriittinen. Opinnäytetyön valvojaltani sain hyviä vinkkejä alaan liittyvistä kirjallisista julkaisuista. Riittävän materiaalin saatuaani on opinnäytetyön tekeminen ollut mielekästä, koska olen ollut aidosti kiinnostunut työn aiheesta.

LÄHTEET

Kirja

Allan, Ron. Jenkins, Nick. Crossley, Peter. Kirchen, Daniel. Strbac, Goran. 2000. EMBEDDED GENERATION. London, United Kingdom : The Institution of electrical Engineers

Huhtinen, Markku. Korhonen, Risto. Pimiä, Tuomo. Urpalainen, Samu. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.

Rauhala Tapio. 1992. PIENVESIVOIMAGENERAATTORIT INSKO JULKAISU 68-92. Kuusankoski: ABB Störmborg drives Oy

Määttänen Martti, Koskinen Matti, Pulkkinen Pertti, Soini Martti ja Silvan Heikki. 1981. INSKO JULKAISU 45-78. 2 painos. Helsinki: Insinööritieto Oy

Perttula, Jarmo. 2000. Energia tekniikka. Helsinki: WSOY.

Sørensen, Bent. 2007. RENEWABLE ENERGY CONVERCION, TRANSMISSION AND STORAGE. Burlington, USA: Elsevier inc.

Muilu Yrjö 2006. Vesi- ja tuulivoimalaitos kurssin opintomuistiinpanot.

Sähköinen julkaisu

Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.axcomotors.com/datalehdet/vesiesite.pdf>. Luettu: 15.2.2011

Www-dokumentti. Saatavissa:

http://abb.smartpage.fi/asiakas208/pdf/ABB_asiakas.pdf. Luettu: 15.2.2011

Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.travaini.it/Images/p14-spirale-turbina.jpg>. Luettu: 8.3.2011

Www-dokumentti. Saatavissa:

http://www.tfd.chalmers.se/~hani/phdproject/holle_all_geom.gif. Luettu: 8.3.2011

Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.biofuelswatch.com/wp-content/uploads/2009/11/water-turbine.jpg>

Luettu: 8.3.2011