



LUT Energia

Energiatekniikka

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

VOIMALAITOSGENERAATTOREIDEN JÄÄHDYTYS

COOLING OF POWER PLANT GENERATORS

Lappeenrannassa 22.4.2009

0278721 Kalevi Kankkunen Ente 4

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO	2
1 JOHDANTO	4
2 GENERAATTORIN TOIMINTA	5
3 GENERAATTORIN HÄVIÖT	7
4 JÄÄHDYTYSMENETELMÄT	10
4.1 STAATTORIN JÄÄHDYTYS	10
4.1.1 Epäsuora jäähdytys	10
4.1.2 Suora jäähdytys	11
4.2 ROOTTORIN JÄÄHDYTYS	12
4.3 JÄÄHDYTTÄMINEN KAASULLA	13
4.4 JÄÄHDYTTÄMINEN VEDELLÄ	15
4.5 AKSELITIVISTEIDEN ÖLJYJÄÄHDYTYS	16
5 LÄMMÖNSIIRTO GENERAATTOREIDEN JÄÄHDYTYKSESSÄ	17
5.1 JÄÄHDYTYSAINIEN VERTAILUA	21
5.2 SÄHKÖERISTEET	24
6 GENERAATTOREIDEN JÄÄHDYTYKSEN NYKYTILANNE	25
7 YHTEENVETO	28
LÄHTEET	30

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala	m^2
c_p	ominaislämpökapasiteetti	$J/(kgK)$
D	karakteristinen mitta	m
f	taajuus	Hz
h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2K)$
k	lämmönjohtavuus	$W/(mK)$
L	pituus	m
n	pyörimisnopeus	$1/s$
P	pätöteho	W
p	napapariluku	-
PF	tehokerroin	-
pH	pH-arvo	-
S	nimellisteho	VA
T	lämpötila	$K, ^\circ C$
w	nopeus	m/s
x	pitoisuus	g/l

Dimensiottomat luvut

Nu	Nusseltin luku	-
Pr	Prandtlin luku	-
Re	Reynoldsin luku	-

Kreikkalaiset aakkoset

μ	dynaaminen viskositeetti	Ns/m^2
-------	--------------------------	----------

ρ	tiheys	kg/m ³
σ	sähkönjohtavuus	S/m
ϕ	lämpövirta	W

Alaindeksit

Cu	kupari
D	putki
f	fluidi
H2O	vesi
in	meno
out	ulostulo
s	pinta

1 JOHDANTO

Suurin osa maailman sähköstä tuotetaan voimalaitoksissa. Generaattori muuttaa voimalaitoksessa turbiinin tuottaman mekaanisen akselitehon sähköenergiaksi, joten ilman generaattoreita ei olisi sähköä. Vaikka nykyaikaisten generaattorien hyötysuhteet ovatkin todella hyviä, noin 98–99 prosentin luokkaa, muuntoprosessissa tapahtuu aina lämpöhäviöitä. Mitä suurempitehoisesta generaattorista on kyse, sitä tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä joudutaan ottamaan käyttöön, jotta generaattorien lämpötilat saadaan pidettyä haluttuina ja vältetään ylikuumentumisen aiheuttamat rikkoutumiset. Jäähdytysratkaisujen kehittyminen vuosien saatossa on myös merkittävä syy generaattoreiden hyötysuhteen ja tehokkuuden paranemiseen.

Lähtökohtana työhön oli selvittää voimalaitosgeneraattoreiden jäähdytysratkaisuiden perusteita, koska aihetta on käsitelty vain harvoissa julkaisuissa. Suomenkielisiä julkaisut aiheesta ovat vielä harvemmassa, sillä tätä tutkimusta tehdessä niitä ei löytynyt lainkaan. Työn alkuosassa tutustutaan voimalaitosgeneraattoreiden perusteisiin ja selvitetään, mistä lämpö generaattoreissa syntyy sekä miten niiden jäähdytys toteutetaan, kun käytössä on erilaisia jäähdytysaineita ja -tekniikoita. Tarkastelun kohteena ovat yleisesti käytössä olevat voimalaitosgeneraattoreiden jäähdytysaineet: ilma, vety ja vesi. Näiden aineiden lämmönsiirtokykyä generaattoreissa vertaillaan yksinkertaistettujen esimerkkien avulla. Tutkimuksen loppuosassa tarkastellaan voimalaitosgeneraattorien jäähdytyksen nykytilannetta ja sen kehitystä. Lisäksi tutkitaan tämän hetken voimalaitosgeneraattorimarkkinoita jäähdytyksen kannalta.

Generaattorit ovat voimalaitoksien tärkeimpiä komponentteja. Niiden jäähdytys on toimintaa ylläpitävä osa sähköntuotantolaitoksia ja ratkaiseva osa ketjua, jolla ihmiset saavat sähköä.

2 GENERAATTORIN TOIMINTA

Generaattori on sähkömoottoria muistuttava sähkökone, mutta toimii aivan päinvastoin. Siinä missä sähkömoottori kuluttaa sähköä synnyttäen liike-energiaa, generaattori tuottaa sähköä siihen tuodusta liike-energiasta. Voimalaitosgeneraattorit ovat suuria laitteita, jotka ovat pituudeltaan jopa 20 metriä pitkiä ja painoa niille kertyy useita kymmeniä tonneja. Generaattorit sijaitsevat yleensä voimalaitoksissa turbiinin kanssa turbiinihalleissa. Kuvassa 1 on tavallisimmin voimalaitoksissa nähty järjestely. Oikealla sijaitsee liike-energiaa luovuttava turbiini ja keskellä kuvaa itse generaattori.

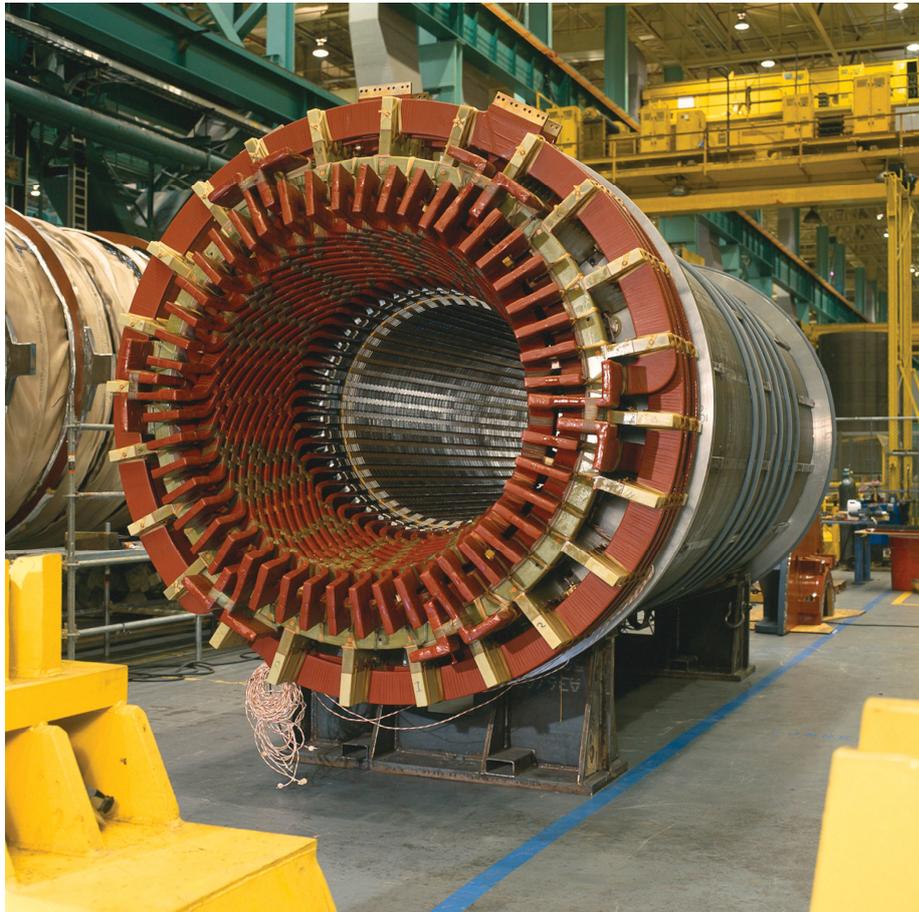


Kuva 1. 500 MW:n turbogeneraattori. (Neville 2008)

Generaattorin toiminta perustuu siihen, että johdin liikkuu magneettikentässä leikaten magneettikentän voimaviivoja. Johtimen leikatessa magneettikentän voimaviivoja johtimeen indusoituu sähkömotorinen virta. Johtimesta tehtyä silmukkaa pyöritettäessä magneettikentässä siihen indusoituu vaihtovirta, koska johdinsilmukan kääntyessä 180° indusoituneen jännitteen suunta muuttuu. Suurissa sähkökoneissa johtimia on yhdistetty suuriksi vyyhdeiksi ja generaattorin pyöriessä indusoituvaa virtaa voidaan kasvattaa kytkemällä näitä vyyhtejä sarjaan. (Pöyhönen et al. 1980, 313.)

Generaattorin teoreettisen toiminnan pääkomponentit ovat roottori ja staattori. Roottori on generaattorin pyörivä osa, joka voi olla sitä pyörittävän turbiinin kanssa samalla akselilla tai niiden välissä voi olla vaihteisto. Roottoria voi pyörittää muukin kone, esimerkiksi diesel-moottori, mutta suuren kokoluokan generaattoreita pyörittävät pääasiassa turbiinit. Staattori taas on se osa generaattorista, joka pysyy paikallaan pyörivän roottorin ympärillä.

Voimalaitosgeneraattoreissa johdinvyyhdit, joihin virta synnytetään, ovat yleisimmin staattorissa. Nämä käämivyhdyt ympäröivät staattoria, kuten kuvassa 2 näkyy. Kuvan staattori on Siemensin valmistamasta ilmajäähdytyksellä toteutetun sarjan (SGen5-1000A) generaattorista, joita on saatavilla nimellistehoilla 165–350 MVA. Itse staattorin fyysisestä koosta mittakaavana voi käyttää kuvan taustalla näkyvää pöytää.



Kuva 2. Siemensin valmistaman generaattorin staattori (Siemens Power Generation a)

Roottorikin on ympäröity käämityksillä. Johtamalla näihin käämeihin tasavirtaa saadaan muodostettua roottorin pinnalle magneettisia napoja. Tasavirta saadaan roottoriin

magnetointigeneraattorista, joka on useimmiten samalla akselilla itse voimalaitosgeneraattorin kanssa (Pöyhönen et al. 1980, 355). Roottorin pyöriessä näiden syntyneiden napojen magneettikentät pyyhkivät staattorin johtimia, jolloin staattorin johtimiin syntyy jännite. (Elliot et al. 1998, 4.5.)

Magneettisten napojen määrä ilmoitetaan pareittain niin sanottuna napaparilukuna. Tahtigeneraattoreissa tuotetun vaihtovirran taajuus riippuu napapariluvusta ja generaattorin pyörimisnopeudesta yhtälöllä (Pöyhönen et al. 1980, 321)

$$f = pn . \quad (1)$$

f on vaihtovirran taajuus [Hz]

p on roottorin napapariluku [-]

n on roottorin pyörimisnopeus [1/s]

Sähköverkkojen taajuudet siis määrittävät voimalaitosgeneraattorien pyörimisnopeudet. Voimalaitossovelluksissa käytetään yleisesti suurnopeusgeneraattoreita, joiden roottoreissa on napoja kaksi tai neljä. Suomessa verkkosähkön ollessa 50 Hz taajuista, yhtälön 1 mukaan käytetään Suomessa yleisimmin generaattoreita, joiden pyörimisnopeus on 3000 tai 1500 kierrosta minuutissa. Yhdysvalloissa käytössä on 60 Hz sähköverkko, jolloin siellä käytettävät generaattorit eroavat Suomessa käytettävistä. Yhdysvalloissa vallitsevat generaattoreiden pyörimisnopeudet ovat 3600 ja 1800 kierrosta minuutissa. Suurimpien generaattorien roottorien halkaisijoiden lähestyessä jo kahta metriä myös roottorien kehänopeudet ovat erittäin suuria. Esimerkiksi rakenteilla olevan ydinvoimalan Olkiluoto 3 generaattorin (yksi maailman suuritehoisimmista) roottorin kehänopeus on miltei 230 m/s. (Elliot et al. 1998, 4.12; Anonyymi 2009)

3 GENERAATTORIN HÄVIÖT

Voimalaitosgeneraattoreiden hyötysuhteet ovat parantuneet generaattoreiden kehittyttyä. Niiden hyötysuhteet ovat nykyään luokkaa 98–99 prosenttia. Suurimmat voimalaitosgeneraattorit ovat kuitenkin niin suuritehoisia, että jäähdytystehontarve on

suuri, vaikka hyötysuhde olisikin huippuluokkaa. Häviöt vaihtelevat tietenkin generaattoreittain ja näiden häviöiden kehittyminen sekä niiden synnyttämän lämmön jäähdyttäminen ovat valmistajien yrityssalaisuuksia. Voidaan kuitenkin olettaa, että miltei kaikki energia, jota ei saada muunnettua sähköenergiaksi, muuttuu lämmöksi. Syntyvää häviölämpöä on joissain laitoksissa käytetty hyödyksi voimalaitoksen syöttöveden lämmittämässä, mutta nykyään näitä häviöitä ei hyödynnetä monimutkaisuuden vuoksi (BEI 1991, 491).

Esimerkkinä tarkastellaan British Electricity Internationalin (1991, 536) tekemää erittelyä 660 MW:n, 98,6 prosentin hyötysuhteella toimivan generaattorin häviöistä. Generaattori on teholuokaltaan suuri, vaikka maailman suurimmat generaattorit ovat teholtaan miltei kolme kertaa isompia. Tämän kokoluokan generaattoreissa on kuitenkin yleisin tehokkain jäähdytysratkaisu eli vetyjäähdytetty roottori ja vesijäähdytetyt staattorin käämit. Lisäksi laakereita ja akselitiivisteitä jäähdytetään öljyllä. Häviötehot ovat listattuna taulukkoon 1 kilowatteina ja prosentiosuuksina kokonaishäviöistä. Taulukosta käy myös ilmi häviötehon jäähdyttävä aine.

Taulukko 1. 660 MW:n generaattorin häviöiden erittely. (BEI 1991, 536)

vakiohäviöt	jäähdytysaine	häviöteho [kW]	häviöteho [%]
puhallinhäviö	vety	600	6,5
roottorin kaasukitkahäviöt	vety	350	3,8
kaasukitkahäviöt muualla	vety	150	1,6
rautahäviö	vety	950	10,2
laakerihäviö	öljy	600	6,5
häviöt akselitiivisteissä	öljy	100	1,1
pyörivän magnetointigeneraattorin häviöt	ilma	100	1,1
apujärjestelmät, kuten pumput	-	100	1,1
muuttuvat häviöt			
staattorin kuparihäviöt	vesi	1600	17,2
pyörrevirtahäviöt käämeissä	vesi	600	6,5
lisärautahäviöt	vety	1600	17,2
kuparihäviöt roottorissa	vety	2400	25,8
muuttuvat magnetointigeneraattorin häviöt	ilma	150	1,6
yhteensä		9300	100,0

Häviöt generaattorissa jaetaan kahteen ryhmään: vakiohäviöihin ja muuttuviin häviöihin. Vakiohäviöt pysyvät samana generaattorin kuormasta huolimatta. Muuttuvat häviöt taas ovat yksinkertaistettuna verrannollisia staattorin virran neliöön. Taulukon muuttuvien häviöiden arvot on saatu ajettaessa kyseistä generaattoria täydellä teholla. (BEI 1991, 536.)

Puhallinhäviöt syntyvät roottorissa päädyissä olevista tuulettimista, jotka kierrättävät kaasumaista jäähdysainetta, tässä tapauksessa vetyä, generaattorin rungon sisällä. Kaasukitkahäviöt syntyvät kaasun vastustaessa pintojen liikettä generaattorin sisällä. Nämä häviöt ovat huomattavia suurissa nopeuksissa, esimerkiksi roottorin pyöriessä 50 kierrosta sekunnissa kehänopeus on luokkaa satoja metrejä sekunnissa. Myös jäähdyttävän kaasun tiheys ja viskositeetti vaikuttavat kaasukitkahäviöön. Vedyn tiheys ilmanpaineessa on noin yksi neljästoistaosa ilman tiheydestä (BEI 1991, 491), eli käytettäessä ilmaa jäähdyttävänä kaasuna, tuuletin- sekä kitkakaasuhäviöt ovat suurempia.

Rautahäviöt sisältävät pyörrevirta- ja hystereesihäviöt, jotka lämmittävät tarkasteltavaa kappaletta. Pyörrevirrat syntyvät magneettivuon tiheyden vaihdellessa ja tämä indusoi kappaleeseen virtasilmukoita, jolloin se lämpenee resistanssin takia. Lämpenemisen toinen syy on magnetoitavan aineen sisäisen kitkan synnyttämät hystereesihäviöt. Rautahäviöt staattorissa pyritään minimoimaan rakentamalla staattorit ohuista toisistaan eristetyistä teräslevyistä. Kuparihäviöt taas johtuvat käämien resistiivisyydestä. Johdinten resistanssin takia virran kulkiessa niiden läpi ne lämpenevät. Muuttuvien häviöiden lisärautahäviöt muodostuvat muun muassa korkean magneettivuon tiheyden takia, häviöistä käämien päädyissä ja generaattorin päätylevyissä sekä rungossa. Lisäksi roottorin pinnalla syntyy häviöitä. (BEI 1991, 536,473; Pöyhönen et al. 1980, 89, 270, 371.)

Roottoria kannattelevien laakerien ja generaattorin päätylevyissä olevien akselitiivisteiden lämpeneminen johtuu kitkasta ja väliaineen vastuksesta. Näitä komponentteja jäähdyttää ja voitelee useimmiten sama öljyjäähdytysjärjestelmä. (BEI 1991, 472.) Myös roottorille magnetoinnin synnyttämiseen tasavirtaa syöttävä magnetointigeneraattori tarvitsee jäähdytystä. Tämä jäähdytyksentarve on kuitenkin pieni ja se voidaan toteuttaa omalla ilmajäähdytyksellä. Häviötehoa kuluu myös generaattorin apujärjestelmiin, joita ovat esimerkiksi jäähdytysaineita kierrättävät pumput.

4 JÄÄHDYTYSMENETELMÄT

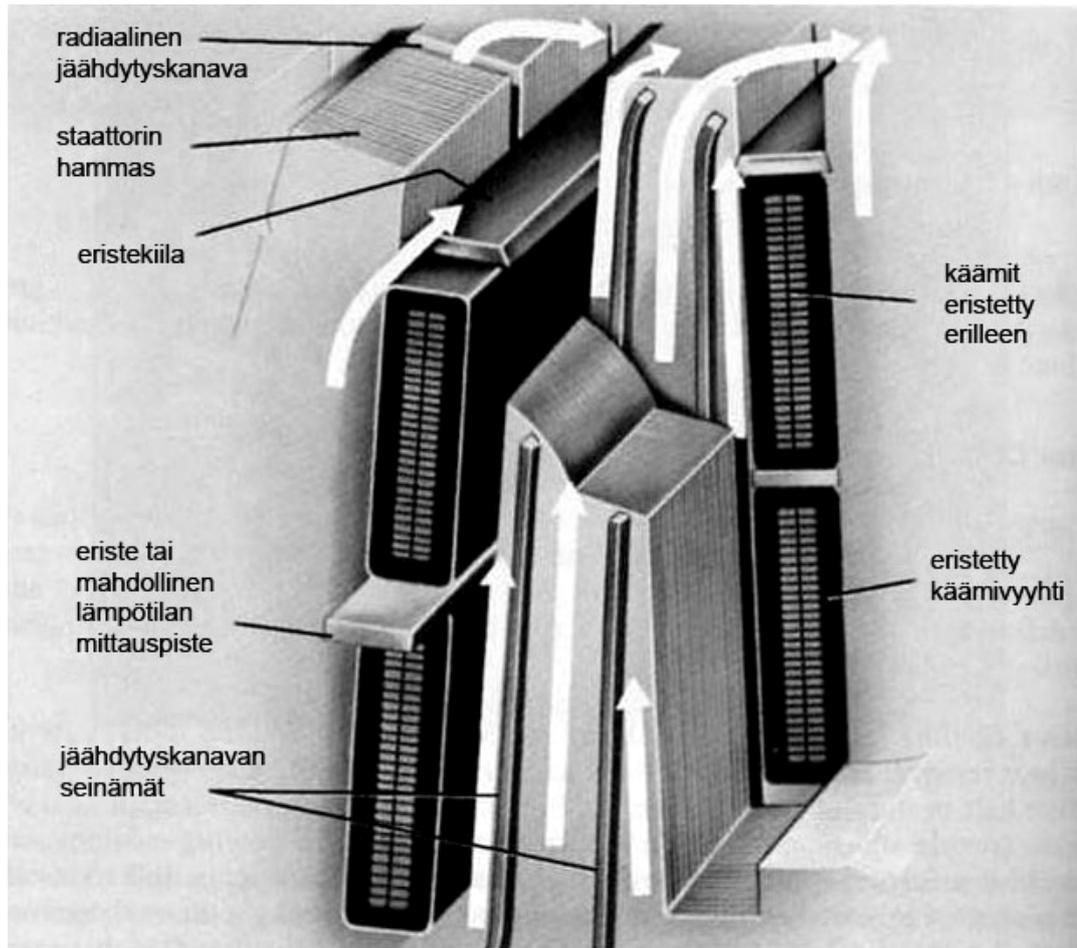
Tässä kappaleessa käydään läpi tekniikoita, joilla voimalaitosgeneraattoreita jäähdytetään. Näiden generaattoreiden staattorien ja roottorien jäähdytysaineina käytetään kaasuja (ilmaa ja vetyä) ja vettä. Akselitiivisteiden jäähdytys taas hoidetaan öljyllä.

4.1 Staattorin jäähdytys

Voimalaitosgeneraattorien staattoreita jäähdytetään sekä nesteillä että kaasuilla. Myös niiden tarkat jäähdytystavat vaihtelevat tietenkin valmistajittain, mutta staattorin käämien jäähdytys voidaan karkeasti jakaa epäsuoraan ja suoraan jäähdytykseen.

4.1.1 Epäsuora jäähdytys

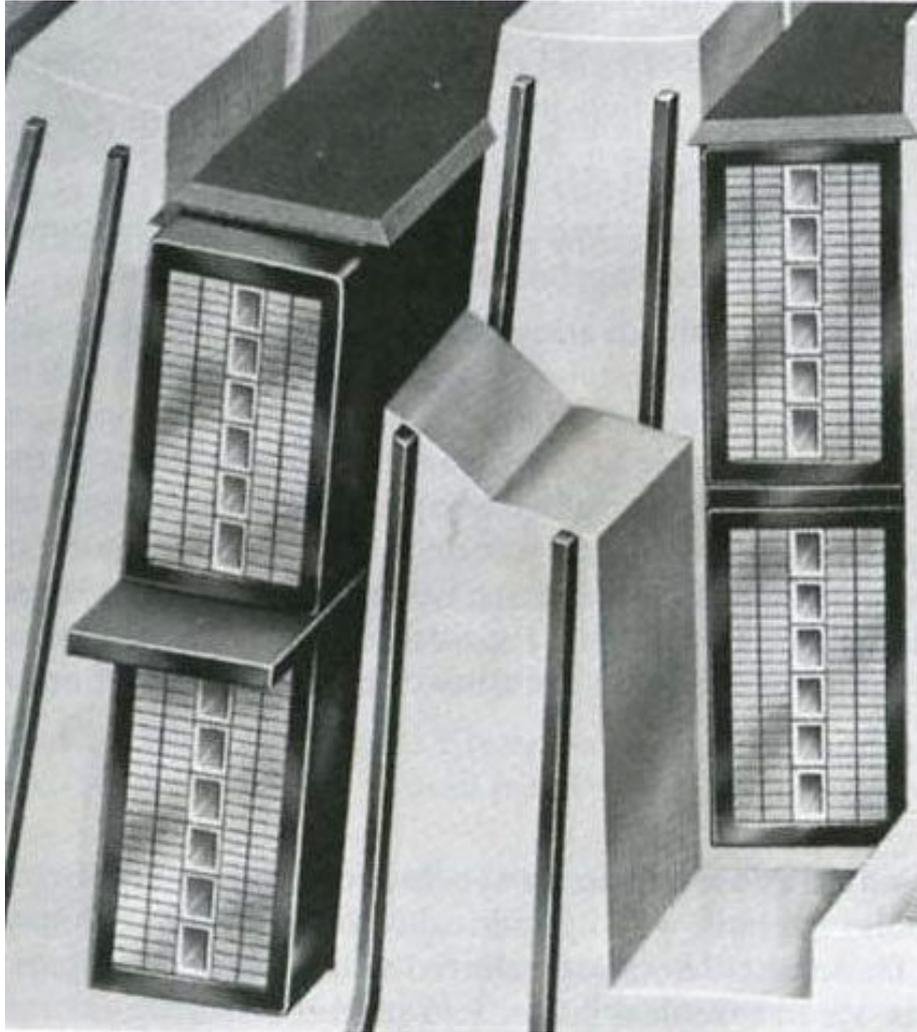
Tämä jäähdytystapa on ollut käytössä jo varhaisimmissa voimalaitosgeneraattoreissa ja sitä kutsutaankin perinteiseksi jäähdytykseksi. Perinteisesti jäähdyttävä aine on vain johdettu kulkemaan erilaisten kanavien läpi staattorissa. Tällä tavoin toteutetussa jäähdytyksessä käämivyhytteihin syntyvän lämmön pitää kulkea sekä sähköeristeen että ympäröivän metallin läpi, ennen kuin se saavuttaa virtaavan jäähdytysaineen. (Elliot et al. 1998, 4.8.)



Kuva 3. Epäsuora jäähdytys. Valkoiset nuolet kuvaavat jäähdytysainevirtaa. (Elliot et al. 1998, 4.10)

4.1.2 Suora jäähdytys

Jäähdytystehon tarpeen kasvaessa otettiin käyttöön jäähdytystapa, jossa jäähdytysaine vietiin lähemmäs kuumenevia käämejä. Suorassa käämien jäähdyttämisessä jäähdytysaine johdetaan käämivyhtien sisällä kulkeviin jäähdytyskanaviin kuvan 4 mukaisesti. Kanavat ovat kuitenkin sähköeristetty käämeistä eikä niihin indusoidu virtaa. (Elliot et al. 1998, 4.10)



Kuva 4. Vetykaasulla toteutettu suora jäähdytys. (Elliot et al. 1998, 4.11)

Jäähdytyskanavien sijoittelu käämin sisällä ja niiden koot riippuvat jäähdytystehon tarpeesta ja jäähdyttävästä aineesta. Myös staattorin hampaissa voi olla jäähdytyskanavia aksiaalisuunnassa.

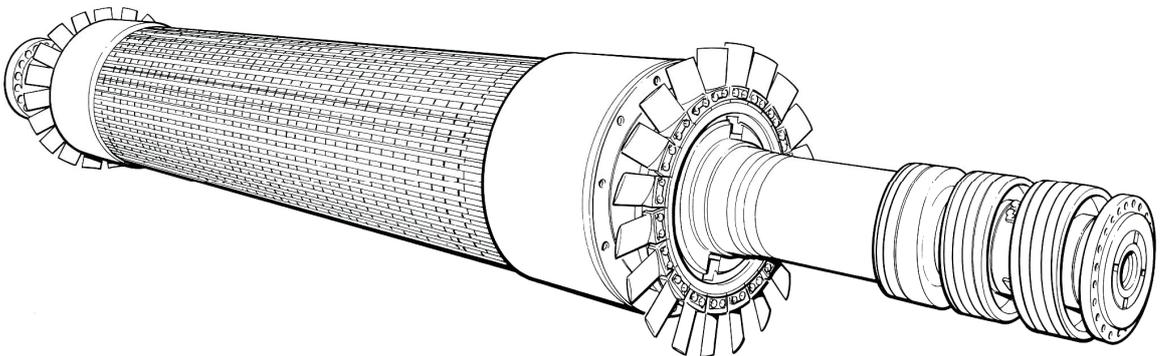
4.2 Roottorin jäähdytys

Roottorin käämejä jäähdytetään samoin keinoin kuin staattorinkin eli käytössä on sekä suoraan että epäsuoraan toteutettuja roottorin jäähdytyksiä. Jäähdytysaineena voidaan käyttää ilmaa, vettä tai vetyä. (Elliot et al. 1998, 4.10) Kätevämpänä vaihtoehtona voisi kuitenkin pitää jäähdyttämistä kaasulla, koska veden johtaminen pyörivään

sähkökoneeseen tuo mukanaan rakenteellisia ja toiminnallisia hankaluuksia. Tällaisia ovat muun muassa veden kierrätyksestä aiheutuvat suuret vedenpaineet ja mahdolliset vuodot. (BEI 1991, 491)

4.3 Jäähdyttäminen kaasulla

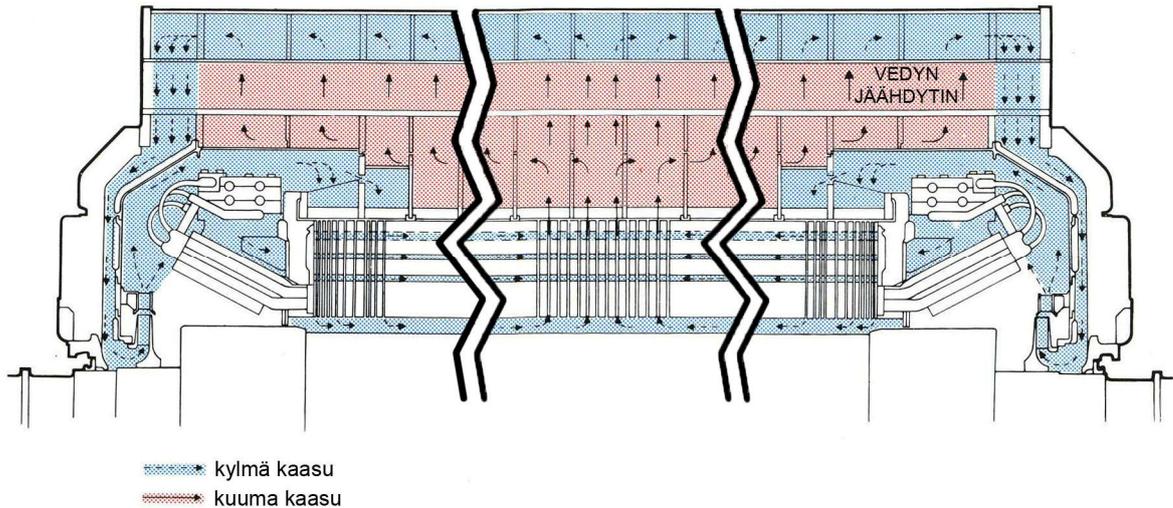
Kaasua kierrätetään tyypillisesti generaattorissa roottorin akselin toisessa tai molemmissa päissä olevien puhaltimien avulla. Nämä puhaltimet voivat olla joko aksiaalipuhaltimia, kuten kuvassa 5, tai kuvassa 6 näkyviä radiaalipuhaltimia. Myös monivaiheisia puhaltimia käytetään paljon ja joissain sovelluksissa puhallinta tarvitaan vain generaattorin toisessa päässä. Puhaltimien avulla kierrätettävä kaasu kulkee generaattorin rungon sisällä jäähdyttäen itse runkoa, roottoria sekä käämien päitä staattorin päädyissä. (Klempner ja Kerszenbaum 2004, 86; BEI 1991, 470, 488.)



Kuva 5. Jäähdytyskaasua kierrättävät tuulettimet roottorin akselilla. (BEI 1991, 470)

Kaasun virtauskanavia on itse staattorissa generaattorin rungossa sekä aksiaalisina että radiaalisina, joten itse virtauskanavistot ovat erittäin monimutkaisia. Näillä virtauskanavilla varmistetaan taulukossa 1 mainittujen syntyvien häviöiden jäähdytys.

Kun kaasujäähdytys on toteutettu suljetulla kierrolla, kiertoaineen jäähdyttimet ovat generaattorin rungon sisällä. Kiertävä kaasu jäähdytetään yleensä lämmönsiirtimissä vedellä (Klempner ja Kerszenbaum 2004, 90). Suljettuja kiertoja toteutetaan sekä ilmalla että vedyllä. Kuvassa 6 on havainnollistettu kaasun kiertoa generaattorin sisällä.



Kuva 6. Katkaistu poikkileikkaus vetyjäähdytetystä generaattorista. Kaasun kiertosuunta merkitty nuolin. (BEI 1991, 479)

Kuvassa näkyy, miten jäähdyttävä kaasu kiertää vetyjäähdytetyssä generaattorissa. Kaasua kierrättää roottorin molemmissa päissä olevat radiaaliset puhaltimet. Vety kiertää kuvan mukaisesti jäähdyttäen ensin roottoria ja staattoria, jonka jälkeen kaasu vielä jäähdyttää runkoa. Tämän jälkeen vety kiertää vesijäähdyttimien kautta uudelleen viilenneenä kiertoon. Kiertävän kaasun tasainen lämpeneminen generaattorin rungon sisällä taataan jakamalla virtaukset erillisiin aksiaalisiin kammioihin rungossa. Voimalaitosgeneraattorit voivat olla pituudeltaan yli kymmenmetrisiä, joten jäähdyttävää kaasua kierrätetään niiden keskiosaan käyttämällä hyödyksi roottorin sisäisiä virtauskanavia ja staattorin radiaalisia kanavia. (Joho 2001)

Voimalaitosgeneraattoreiden vakiintuneet kaasumaiset jäähdytysaineet ovat siis vety ja ilma. Ilmalla jäähdytetyt generaattorit ovat edustavat pienempää kokoluokkaa kuin vetyjäähdytteiset. Vetyjäähdytteiset generaattorit vaativat kuitenkin paljon monimutkaisempia järjestelyjä kuin ilmalla jäähdytetyt. Vetyä käytetään generaattoreissa yleensä noin 5 baarin paineessa, joten generaattorin rungon pitää olla painetta kestävä ja sen päädyissä olevien akselitiivisteiden jyrkeviä. Lisäksi vetyjäähdytteisissä generaattoreissa tarvitaan tarkkoja sensoreita vedyn laadun tarkkailuun, kaasun kuivaimia, öljyjärjestelmä akselitiivisteille, itse vetykaasua sekä huuhteluun hiilidioksidia. Hiilidioksidihuuhtelua tarvitaan esimerkiksi otettaessa generaattoria pois käytöstä revisioiden aikana. Huuhtelulla varmistetaan, etteivät vety ja ilma muodosta keskenään räjähdysaltista seosta. (Joho 2001, BEI 1991, 491)

Kokoluokaltaan pienempiä generaattoreita jäähdytetään myös avoimella ilmakierrolla, jossa jäähdyttävä ilma otetaan kiertoon käsittelemättömänä generaattorin ulkopuolelta ja kierrettyään generaattorin jäähdytyskanavien läpi se palautuu ilmakehään lämmentyneenä. Avoin ilmakierto ei kuitenkaan sovellu paikkoihin, joissa ilma sisältää liiaksi hiukkasia tai rikkiä. (Smith 2001; Klempner ja Kerszenbaum 2004, 84.)

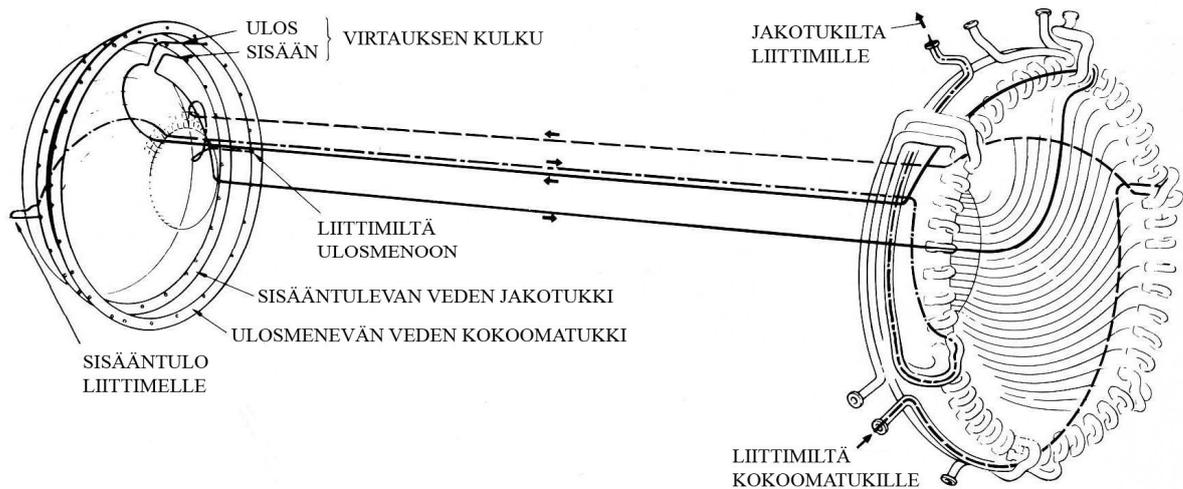
4.4 Jäähdyttäminen vedellä

Generaattorin jäähdytystä tarkasteltaessa mikään kirjallisuuslähde ei maininnut muuta nestemäistä jäähdytysainetta kuin veden. Vesi onkin jäähdytysominaisuuksiltaan ja saatavuudeltaan hyvä jäähdytysaine. Sitä käytetään pääasiassa suurimpien generaattorien staattorin käämien jäähdytykseen. Käytettävän veden täytyy olla erittäin puhdasta ja kaasutonta, ettei se johda sähköä eikä aiheuta korroosiota sitä ympäröivälle kuparille. Veden laatua tarkkaillaan aina käytön aikana. British Electricity International (1991, 485) on antanut seuraavat ohjeet generaattorissa kierrätettävän veden laadulle:

Sähkönjohtavuus	$\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \mu\text{S/m}$
Liunneen hapen maksimi	$x_{\text{O}_2} = 200 \mu\text{g/l}$
Kuparipitoisuuden maksimi	$x_{\text{Cu}} = 150 \mu\text{g/l}$
Veden pH-arvon maksimi	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 9$

Edellä mainituilla arvoilla kiertävä vesi ei aiheuta kämmivyyhtien kuparille korroosiota. Vettä ei voida kierrättää yhtä nopeilla virtausnopeuksilla kuin kaasuja, koska veden nopea virtausnopeus saattaa aiheuttaa eroosiokorroosiota virtauskanavistossa. Eroosiota tarkkaillaan veden kuparipitoisuudesta. (BEI 1991, 485, 500)

Vettä kierrätetään staattorin käämien sisällä generaattorin ulkopuolisilla pumpuilla. Myös muut vesijäähdytysjärjestelmän laitteet, kuten kaasunpoisto, erilaiset mittalaitteet ja jäähdyttimet ovat generaattorin ulkopuolella. Vesijäähdytys voidaan toteuttaa monin eri tavoin, mutta näistä yleisimpiä ovat yhden ja kahden läpiviennin tavat. (BEI 1991, 500) Kuvassa 7 on esitetty kahdella läpiviennillä toteutettu staattorin käämien jäähdytys.



Kuva 7. Staattorin suoran vesijäähdytyksen kieropiiri. (BEI 1991, 488)

Kuvassa jakotukilta lähtevä vesi kulkee staattorin käämin sisällä staattorin päästä päähän. Päädyissä virtaus jäähdyttää kääminpäitä ja kierrettyään kierroksen vesi palaa kokoomatukin kautta veden käsittelyjärjestelmään, josta vesi palaa kiertoon jäähdytyksen ja analysoinnin jälkeen. Osa vesivirrasta johdetaan jäähdyttämään liittimiä, joissa staattorin käämit liittyvät sarjaan. Kahdella läpiviennillä toteutetun jäähdytyksen painehäviö on suurempi kuin yhdellä johtuen virtauskanavan pituudesta. Kahden läpiviennin jäähdytykseen tarvitaan siis enemmän painetta kierrättämään vettä, jolloin myös tarvittava pumppausteho kasvaa.

4.5 Akselitiivisteiden öljyjäähdytys

Akselitiivisteet sijaitsevat generaattorien päätylevyissä. Ne ovat päätylevyn ja roottorin akselin välissä varmistamassa, ettei generaattorin rungon sisällä korkeassa paineessa oleva jäähdytysaine pääse karkaamaan. Generaattorin kaasumaisen jäähdytysaineen, esimerkiksi vedyn, karkaamisen estämiseksi pitää jäähdyttävän öljyn olla korkeammassa paineessa kuin kaasun. Akselitiivisteet muistuttavat toiminnaltaan nestelaakereita ja niiden kiertoaineena käytetään samaa öljyä kuin roottorin laakereissa. (BEI 1991, 497).

Akselitiivisteiden öljy johdetaan tiivisteeseen tavallisesti akselin voimalla toimivalla öljypumpulla tai pysähdysten aikana moottoroiduilla pumpuilla. Lämmennyt öljy valuu

akselitiivisteestä molemmin puolin kouruihin. Generaattorin sisäpuolelle ei kuitenkaan saisi valua liikaa öljyä, koska siitä voi vapautua ilmaa tai vettä, jotka taas voivat pilata generaattorin kiertokaasun ja vahingoittaa näin generaattoria. Öljy johdetaan kouruista sitä jäähdyttäviin lämmönsiirtimiin, joissa jäähdyttävä aine on tavallisesti vesi. Jäähdyttimistä öljy johdetaan takaisin öljysäiliöön ja sieltä takaisin kiertoon. (BEI 1991, 497)

5 LÄMMÖNSIIRTO GENERAATTOREIDEN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Lämmön siirtymistapaa voimalaitosgeneraattoreiden jäähdytyspiirin pinnalta kiertävään aineeseen (nesteeseen tai kaasuun) kutsutaan pakotetuksi konvektioksi, koska kierto näissä tapauksissa tapahtuu ulkoisista syistä. Vapaassa konvektiossa jäähdyttävä fluidi virtaa itsestään tiheyseroista johtuen (Fagerholm 1986, 257), mutta sen synnyttämä lämmönsiirto ei kuitenkaan ole riittävää puhuttaessa voimalaitosgeneraattoreista. Fagerholm on esittänyt konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen suuruusluokat erilaisille tapauksille taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Suuntaa antavia konvektiivisia lämmönsiirtokertoimia (Fagerholm 1986, 258)

	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin h [W/(m ² K)]
vapaa konvektio	3,5...50
pakotettu konvektio, ilma	10...500
pakotettu konvektio, neste	100...5000
kiehumiskonvektio, vesi	1000...100000
lauhtuminen, höyry	500...25000

Vapaa konvektio olisi toteutukseltaan helpoin, koska erillisiä jäähdytysaineen kiertopiirejä ei tarvittaisi, mutta sillä ei päästä yhtä korkeaan jäähdytystehoon kuin pakotetulla konvektiolla. Nesteellä konvektio on vielä paljon tehokkaampaa kuin ilmalla. Kiehumiskonvektiolla ja lauhtumisella aikaansaadut konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet ovat erittäin hyviä, mutta näiden jäähdytystapojen toteuttaminen olisi vaikeaa. Kiehumista olisi vaikea hallita ja lauhtumisessa pienetkin epäpuhtaudet muodostaisivat lämmönsiirtopinnalle lämmönsiirtoa haittaavan kerroksen. (Fagerholm 1986, 258)

Tarvittavat jäähdytystehot ovat generaattorista riippuen noin 1–2 prosenttia sen pätehostä. Kun nyt käsiteltävät voimalaitosgeneraattorit ovat teholuokaltaan satoja tai jopa tuhansia megawatteja, jäähdytystehon tarve on noin kymmenen megawatin suuruusluokkaa.

Konvektiolla siirtynyt lämpövirta voidaan laskea yksinkertaisesti seuraavalla yhtälöllä (Incropera et al. 2007, 353)

$$\phi = hA_s(T_s - T_f). \quad (2)$$

ϕ on lämpövirta [W]

h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²K)]

A_s on lämpöä siirtävän pinnan ala [m²]

T_s on pinnan lämpötila [K]

T_f on fluidin lämpötila [K]

Yhtälöstä kaksi voidaan huomata selvästi jäähdytyksen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät. Siirtyvään lämpöön vaikuttaa pinta-ala, jolla lämpö siirtyy ja tätä kautta myös lämmönsiirtopintojen geometria. Kuitenkaan lämmönsiirtopintojakaan generaattorin sisällä ei voida suunnitella kovin suuriksi. Jäähdytykseen käytettyä lämpövirtaa voisi myös tehostaa moninkertaiseksi pelkästään jäähdyttämällä jäähdytysainetta mahdollisimman kylmäksi. Tämä ei kuitenkaan olisi missään tapauksessa taloudellista. Lämmönsiirtokerroin on siis tärkein konvektiiviseen lämmönsiirtoon vaikuttava muuttuja.

Konvektiivista lämmönsiirtokerrointa virtaukselle selvittäessä täytyy määritellä lämmönsiirrollisesti hyvin tärkeitä dimensiottomia lukuja. Nämä luvut ovat Reynoldsin luku, Prandtin luku ja Nusseltin luku.

Reynoldsin luku määritellään (Incropera et al. 2007, 361)

$$\text{Re} = \frac{\rho w D}{\mu}. \quad (3)$$

ρ on fluidin tiheys [kg/m^3]

w on fluidin nopeus [m/s]

D on karakteristinen mitta [m]

μ on fluidin dynaaminen viskositeetti [Ns/m^2]

Reynoldsin luku on virtauksen liikettä vastustavien voimien suhde virtauksen viskooseihin voimiin ja sen suuruus kertoo virtauksen laadusta. Suurella Reynoldsin luvulla virtaus on turbulenttinen ja pienellä laminaarinen. Esimerkiksi putkivirtauksella laminaari virtaus muuttuu turbulenttiseksi Reynoldsin luvun ollessa noin 2300. Karakteristinen mitta riippuu laskentaan liittyvästä geometriasta. Putkivirtaukselle se on putken hydraulinen halkaisija.

Prandtlin luku määritellään (Incropera et al. 2007, 376)

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k_f}. \quad (4)$$

c_p on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$]

k_f on fluidin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]

Prandtlin luku kuvaa aineen liikemäärän ja termisen diffuusion suhdetta. Luku koostuu pelkästään virtaavan aineen ominaisuuksista ja on siten itsessäänkin aineominaisuus.

Nusseltin luku määritellään (Incropera et al. 2007, 371)

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k_f}. \quad (5)$$

Tämä luku on kokeellisesti määritelty erilaisille virtausgeometrioille yleensä Reynoldsin ja Prandtlin luvun funktiona. Korrelaatioita erilaisille geometrioille löytyy kirjallisuudesta. Nämä korrelaatiot voivat sisältää muitakin muuttujia, esimerkiksi myöhemmin käytettävän kitkakertoimen.

Voimalaitosgeneraattorien jäähdytyksessä jäähdytysaineen virtauskanavat ovat monimutkaisia ja ne koostuvat monista erilaisista osioista. Tutkitaankin nyt yksinkertaistetusti konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen muodostumista putkivirtaukselle.

Putkivirtaukselle yleispätevin Nusseltin luvun korrelaatio on Gnielinskin korrelaatio (Incropera et al. 2007, 514)

$$\text{Nu}_D = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}_D}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (6)$$

f on kitkakerroin

D viittaa putkivirtaukseen

Gnielinskin korrelaatio pätee kun $0,5 < \text{Pr} \leq 2000$ ja $3000 < \text{Re}_D \leq 5 \cdot 10^6$. Lisäksi voidaan olettaa tarkasteltava putki sileäksi ja käyttää kitkakertoimelle Petukhovin kehittämää yhtälöä (Incropera et al. 2007, 490)

$$f = (0,79 \ln \text{Re}_D - 1,64)^{-2} \quad (7)$$

Edellä mainittujen yhtälöiden 3 – 7 avulla saadaan laskettua eri aineiden putkivirtauksille konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, kun tiedetään kiertävän aineen aineominaisuudet ja nopeus sekä virtauskanavan halkaisija. Yhdistämällä yhtälöt 5 ja 6 saadaan konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle monimutkainen yhtälö

$$h = \frac{k_f}{D} \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}_D}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (8)$$

Tästä yhtälöstä voidaan kuitenkin huomata, että fluidin lämmönjohtavuudella ja putken halkaisijalla on suuri vaikutus virtauksen lämmönsiirtokertoimeen.

5.1 Jäähdytysaineiden vertailua

Ensimmäisissä rakennetuissa voimalaitosgeneraattoreissa jäähdytysaineena oli ilma. Jäähdytystehon tarpeen kasvaessa pohdittiin siirtymistä tehokkaampiin jäähdytyskaasuihin, kuten heliumiin ja vetyyn. Kustannussyistä ja saatavuutensa kannalta vety kuitenkin vakiintui yleisenä jäähdytysaineena. Myöhemmin käyttöön tuli myös vesi, joka on jäähdytystehonsa ja saatavuutensa kannalta kiinnostava aine tähän käyttöön. (Elliot et al. 1998, 4.9 ja BEI 1991, 447)

Yleisimpien generaattorin jäähdytykseen käytettyjen aineiden aineominaisuuksia ilmakehän paineessa (1,013 bar) ja 50 °C lämpötilassa on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Voimalaitosgeneraattoreiden jäähdytysaineiden ominaisuuksia. (Incropera et al. 2007, 941, 943 ja 949)

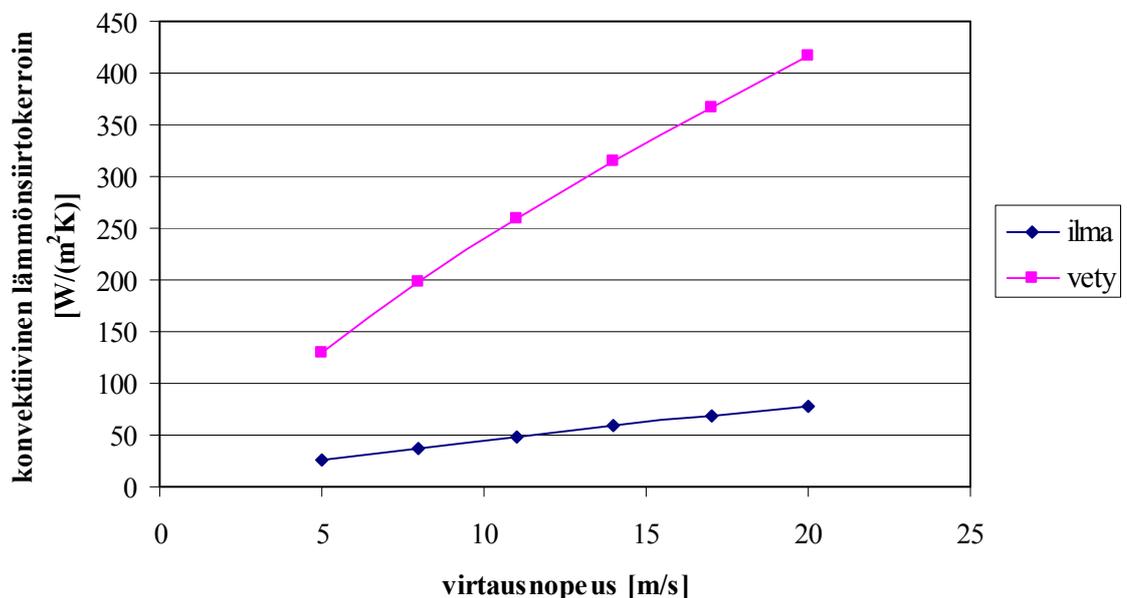
	ilma	vety	vesi
lämmönjohtavuus k_f [W/(mK)]	0,028	0,193	0,645
tiheys ρ [kg/m ³]	1,085	0,076	987
ominaislämpökapasiteetti c_p [J/(kgK)]	1008	14370	4182
dynaaminen viskositeetti μ [Ns/m ²]	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$0,94 \cdot 10^{-5}$	$52,8 \cdot 10^{-5}$

Taulukosta nähdään, että lämmönjohtavuus, joka todettiin edellisessä kappaleessa jäähdytystehon kannalta tärkeäksi ominaisuudeksi, on vedyllä noin seitsemän kertaa suurempi kuin ilmalla ja vedellä sitäkin suurempi. Ilman nähdään myös olevan paljon vetyä tiheämpää. Veden tiheys on tietenkin erittäin paljon kaasuja suurempi. Ominaislämpökapasiteetti on aineen kyky varastoida lämpöä itseensä. Vety on ilmaan verrattuna tässä ominaisuudessa ylivoimainen ja vedenkin ominaislämpökapasiteetti on noin nelinkertainen ilmaan verrattuna. Viskositeetti on ominaisuus, joka kertoo miten aine vastustaa muodonmuutoksia. Sen arvoissakin on suuria eroja, jotka vaikuttavat esimerkiksi jäähdytyskanavistossa syntyvään painehäviöön ja aineen kierrättämiseen vaadittavaan tehoon. Mitä pienempi viskositeetin arvo on, sitä vähemmän aineen virtauksessa syntyy painehäviötä ja sitä vähemmän sen kierrättämiseen kuluu tehoa.

Lasketaan seuraavaksi konvektiivisia lämmönsiirtokertoimia jäähdytysainevirtauksille yhtälöiden 3–7 avulla. Oletetaan putken sijaitsevan generaattorin käämin sisällä, jonka

tarkasteltava pituus $L = 15$ m. Oletetaan lisäksi jäähdytysaineiden lämpenevän tulolämpötilasta $T_{in} = 40$ °C ulostulolämpötilaan $T_{out} = 60$ °C, jolloin voidaan kyseessä oleville aineille käyttää taulukon 3 aineominaisuuksia. Lämpötilat ovat kirjallisuudessa mainittujen lämpötilojen mukaisia (BEI 1991, 537). Aineominaisuuksista poiketen vedyn tiheys on viisinkertainen, koska voimalaitosgeneraattorien jäähdytyskiertoissa käytetyn vedyn paine on luokkaa 5 bar. Suuremmalla paineella saadaan paremmin hyödynnettyä vedyn lämmönsiirto-ominaisuuksia. Ilman paineen voidaan olettaa olevan ilmakehän paineessa, koska ilman paineen tarvitsee vain ylittää syntyneet painehäviöt, jotka ovat tämäntyyppisille virtauksille kymmenien kilopascaleiden luokkaa. Ilman paineen kasvattaminen nostaisi liikaa väliaineen vastuksen ja kitkan muodostamia häviöitä, mutta vedyn painetta pystytään korottamaan alhaisen tiheyden ja viskositeetin takia. (Klempner ja Kerszenbaum 2004, 82)

Kuvassa 8 on esitetty ilman ja vedyn konvektiivinen lämmönsiirtokerroin virtausnopeuden funktiona. Vedylle arvot ovat käytetyssä 5 barin paineessa ja ilman arvot ilmanpaineessa. Kuvan arvot on saatu putkikoon ollessa vakio (halkaisija $D = 20$ mm).

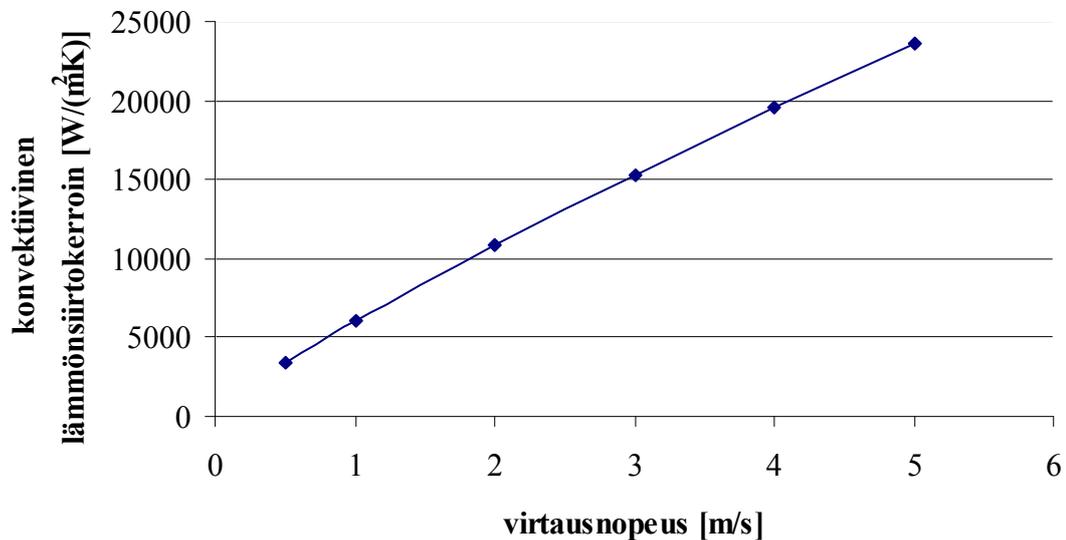


Kuva 8. Vedyn ja ilman konvektiivinen lämmönsiirtokerroin virtausnopeuden funktiona

Yllä olevasta kuvasta huomataan, että vedyn konvektiivinen lämmönsiirtokerroin saa huomattavasti suurempia arvoja samoilla virtausnopeuksilla kuin ilman. Kertoimien

prosentuaalinen kasvu on kuitenkin samaa luokkaa. Virtausnopeuden kasvaessa 5 m/s ... 20 m/s eli nelinkertaiseksi, kaasujen konvektiiviset lämmönsiirtokerroimet kasvavat noin kolminkertaisiksi.

Tarkasteltaessa veden putkivirtauksen konvektiivista lämmönsiirtokerrointa huomataan veden lämmönsiirrollinen ylivoimaisuus edellä mainittuihin kaasuihin nähden. Kuvassa 9 on kyseisiä arvoja virtausnopeuden funktiona. Laskennassa käytetty putkikoko, -pituus ja lämpötilat ovat samoja kuin kaasuja tarkasteltaessa. Virtausnopeudet ovat selvästi pienempiä kuin kaasuilla käytetyt kuten kappaleessa 4.4 mainittiin.



Kuva 9. Veden konvektiivinen lämmönsiirtokerroin virtausnopeuden funktiona.

Myös veden virtausnopeuden vaikutus konvektiiviseen lämmönsiirtokerroimeen on lähes lineaarinen. Virtausnopeuden nelinkertaistuessa kerroin kasvaa hieman yli kolminkertaiseksi. Vaikka tarkastelussa veden virtausnopeudet ovat pienempiä kuin kaasuilla, veden kyky jäähdyttää on silti paljon parempi. Vertailemalla kuvia 4 ja 5 voidaan todeta, että vedellä jäähdytettäessä konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen arvot ovat kymmeniä kertoja suurempia kuin vedyllä ja jopa satoja kertoja suurempia kuin ilmalla jäähdytettäessä.

Tarkasteltaessa putkikoon halkaisijan vaikutusta jäähdytysaineiden konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen voidaan todeta, että putkikoon vaikutus on kohtalaisen pieni. Käytettäessä yhtälön 8 mukaista korrelaatiota konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle putkikoon nelinkertaistuessa, konvektiivinen lämmönsiirtokerroin pieneni kaikilla jäähdytysaineilla vain noin viidesosan. Tietenkin putkikoon kasvaessa myös lämmönsiirtopinta-ala kasvaa, jolloin myös jäähdytysteho kasvaa. Toisaalta putkikoon muuttaminen vaikuttaa myös painehäviöön. Putkikoon kasvaessa painehäviö putkessa laskee.

Voidaankin todeta, että staattorin käämien jäähdyttämiseen tarkoitetun putkikoon valitseminen on monimutkainen optimointikysymys, jonka tärkeimpinä suunnitteluparametreinä ovat jäähdytyskanavien pituus ja niiden lukumäärä, jäähdytysaine ja sen lämpötila, jäähdytysaineen virtausnopeus ja suurin sallittu painehäviö sekä tietenkin tarvittu jäähdytysteho.

Tässä kappaleessa tarkasteltu putkivirtaus on hyvin yksinkertaistettu esitys staattorin käämien jäähdytyksestä. Todellisuudessa jäähdytyskanavat ovat monimutkaisia ja sen takia laskentakin on vaikeampaa.

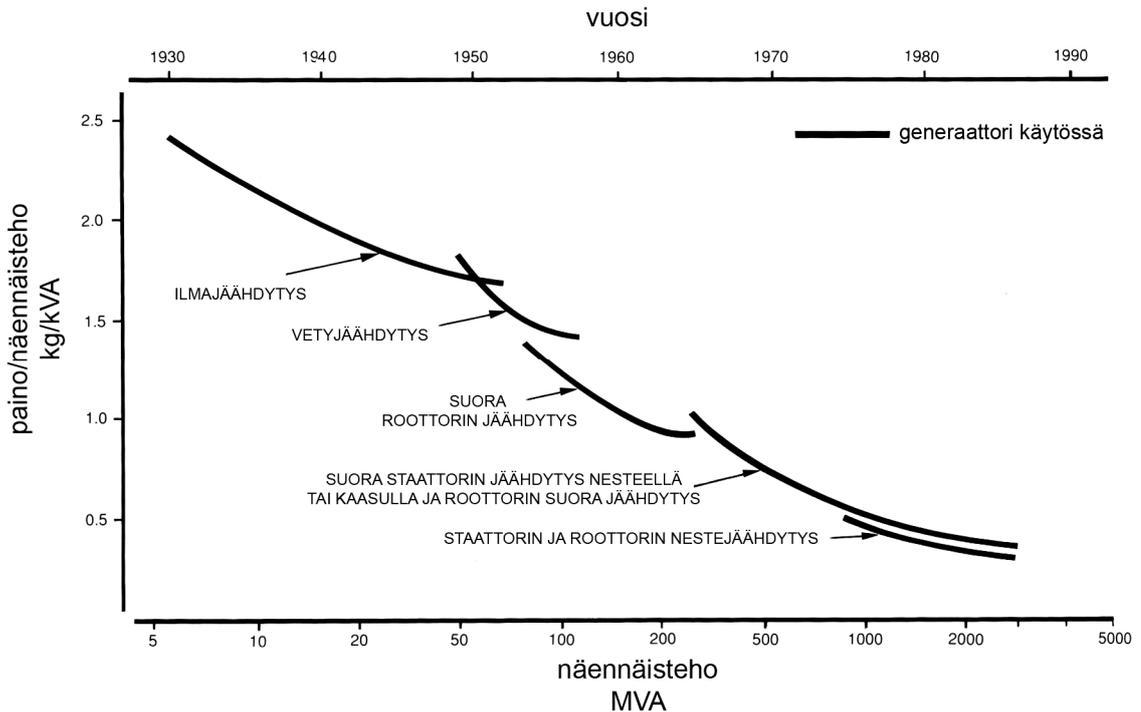
5.2 Sähköeristeet

Sähköeristyksen on tarkoitus eristää sähköä kuljettava johdin muista johtimista ja estää sitä pääsemästä kosketuksiin esimerkiksi jäähdytysaineen kanssa. Voimalaitosgeneraattorin roottorissa sekä staattorissa on paljon näitä eristeitä ja onkin tärkeää, että nämä sähköeristeet johtavat hyvin lämpöä. Mitä parempi lämmönjohtavuus sähköeristeillä on, sitä pienempi jäähdytystehon tarve generaattorilla on. Sähköeristeiden lämmönjohtavuus siis parantaa välillisesti myös generaattorin hyötysuhdetta.

Ensimmäisissä voimalaitosgeneraattoreissa virrat olivat niin pieniä, että sähköeristeinä käytettiin vain kankaita ja paperia. Kun generaattorien tehot alkoivat kasvaa, tarvittiin myös parempia sähköeristeitä. Sähköeristeinä alettiin käyttää kiillettä ja lasikuitua. Nykyään sähköeristeet ovat jo oma tieteenalansa ja generaattoreissa käytetyt eristeet ovat monimutkaisia seoksia. (Elliot et al. 1998, 4.7)

6 GENERAATTOREIDEN JÄÄHDYTYKSEN NYKYTILANNE

Voimalaitoksissa käytettyjen generaattorien teholuokat ovat kasvaneet jo miltei sadan vuoden ajan. Generaattoreille pätee sääntö: mitä suurempi laite, sitä suurempi teho. Kuitenkin jäähdytysratkaisujen ansiosta generaattorien koot suhteessa tehoon ovat pienentyneet, kuten kuvasta 10 käy ilmi.



Kuva 10. Generaattorien painon kehitys tehon ja ajan suhteen. (BEI 1991, 450)

Kuvasta nähdään, että pienimpiin paino-näennäisteho-suhteisiin päästään vain monimutkaisimmilla jäähdytysratkaisuilla. Huomataan myös, että 1970-luvulla rakennettu suoralla staattorin nestejäähdytyksellä ja roottorin suoralla kaasujäähdytyksellä varustettu ratkaisu saattaa olla kaksi kertaa painavampi kuin uusi vastaava. Näin jäähdytysratkaisujen ja muidenkin ominaisuuksien kehittyminen säästää sekä voimalaitosten hallitilaa että kustannuksia perustusten rakennuksessa.

Generaattoreiden jäähdytyksen kehitys jatkuu koko ajan. Kehityksen suunnan määrää tietenkin markkinat. Vahvin kehityksen suuntaus on tällä hetkellä TEWAC-generaattoreiden teholuokan kasvu. TEWAC (Totally Enclosed water-air cooling) on

yleisesti käytetty käsite epäsuorasti jäähdytetyllä suljetulla ilmakierrolla ja vesijäähdyttimillä varustetuille generaattoreille. Perinteisesti tällä jäähdytysratkaisulla jäähdytettiin vain pienemmän teholuokan generaattoreita, mutta ratkaisun yksinkertaisuus on ohjannut kehitystä suurempitehoiseen suuntaan. Neljän vuosikymmenen aikana näiden generaattorien teholuokka on kasvanut 90 MVA:sta yli 300 MVA:iin ja valmistaja Alstom on kehittänyt jo 500 MVA:n yksikön (Smith 2001). Ilmajäähdytteisten generaattorien teholuokan kasvun on mahdollistanut roottorin halkaisijan suurentaminen ja generaattorin pituuden kasvattaminen sekä jäähdytysjärjestelmien ja sähköeristeiden kehittäminen. Nämä ilmajäähdytteiset generaattorit syövät siis vetyjäähdytteisten markkinoita, koska niiden käyttö- ja kiinteät kustannukset ovat saman kokoluokan vetyjäähdytteistä pienemmät. (Joho 2001)

Ilmajäähdytteisten generaattorien teholuokan kasvu ei kuitenkaan voi jatkua loputtomiin. Roottorin kasvattamista rajoittavat roottorien materiaalien kesto, sillä sen halkaisijan kasvaessa pyörimisnopeus aiheuttaa suurempia voimia roottoriin. Myös generaattorin pituuden kasvattaminen aiheuttaa hankaluuksia dynamiikassa ja jäähdytyksen järjestelyissä. (Joho 2001)

Voidaan siis todeta, että epäsuorasti vedyllä jäähdytetyilläkin generaattoreilla on paikkansa markkinoilla. Teholuokan kasvaessa vetyjäähdytteisistä vielä suuremmaksi yleisin jäähdytystapa on käyttää sekä suoraa vesijäähdytystä staattorin käämeille että epäsuoraa vetyjäähdytystä roottorin käämeille ja muualle runkoon. Nämä generaattorit ovat teholuokaltaan markkinoiden suurimpia.

Hyvä kuva generaattoreiden tämän hetken jäähdytysratkaisuista saadaan tarkastelemalla suurimpien voimalaitosgeneraattorien valmistajien verkkosivuja (Alstom, GE Energy, Siemens Power Generation b). Sivullaan valmistajat ovat ilmoittaneet generaattoriensa jäähdytysratkaisuja ja niille määritellyjä tehoja. Osa valmistajista antoi generaattorien tehot nimellistehona ja osa pätötehona. Nimellistehot saadaan muutettua pätötehoksi generaattoreille ominaisen tehokertoimen avulla, jonka yhtälö on

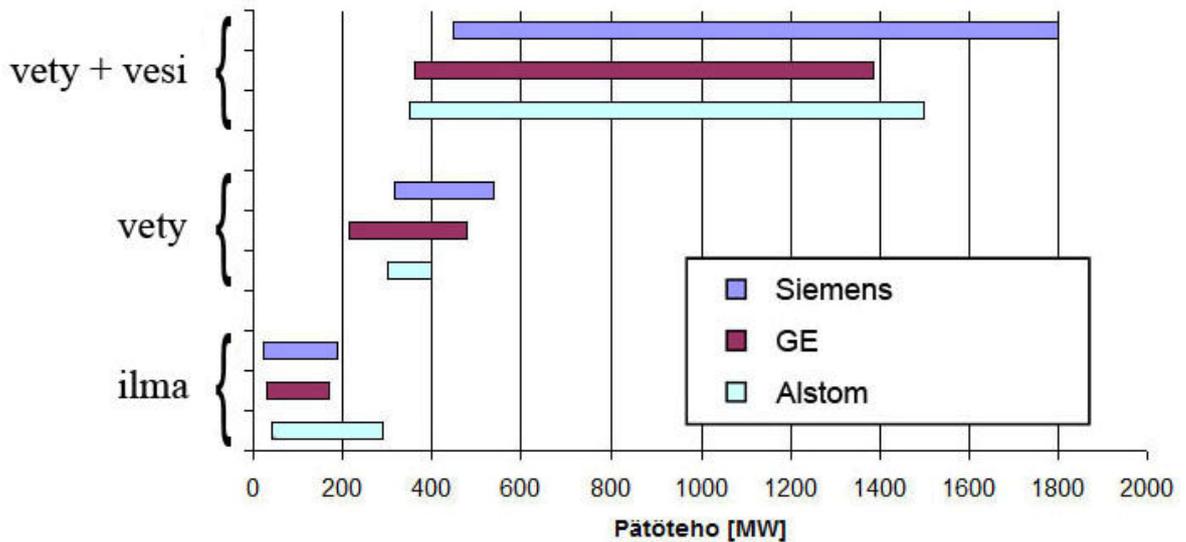
$$PF = \frac{P}{S}. \quad (9)$$

P on pätöteho [W]

S on näennäisteho [VA]

Valmistajien antamat arvot generaattoreiden tehokertoimille vaihtelevat välillä 0,8 ... 0,9.

Kuvassa 11 on esitetty kolmen suurimman voimalaitosgeneraattorien valmistajan tarjoamat generaattorityypit jäähdytystavan mukaan. Kaikki tarjotut generaattorit olivat 50 Hz sähköverkkoon tarkoitettuja. Kuvassa näkyy myös mille tehovälille valmistajat tarjoavat eri tavoin jäähdytettäviä generaattoreitaan. Kaikki tehot on ilmoitettu pätötehoina, joiksi lähteissä ilmoitetut nimellistehot on muutettu käyttäen hyväksi yhtälöä 9 ja tehokertoimelle vakioarvoa 0,9.



Kuva 11. Kolmen suurimman valmistajan voimalaitosgeneraattoritarjonta. (Alstom, GE Energy, Siemens Power Generation b)

Yllä olevasta kuvasta nähdään, että yhdistetyllä vety- ja vesijäähdytyksellä on dominoiva rooli generaattorimarkkinoilla. Yli 500 MW generaattoria valittaessa ei jäähdytysvaihtoehdoksi jää muita kuin tämä. Rakennettavan laitoksen teholuokan ollessa noin 400 MW, vaihtoehtoja ovat joko vetyjäähdytys tai yhdistetty vedyn ja veden käyttö.

Noin 300 MW:n laitoksen rakentajalle vaihtoehtoina ovat vety- ja ilmajäähdytys, joista jälkimmäinen taloudellisempina vaihtoehtona on kannattavampi. Aikaisemmin mainittu ilmajäähdytyksellisten generaattoreiden teholuokan kasvu syö siis hieman vetyjäähdytyksellisten markkinoita, mutta samat rakenteelliset kehitykset mahdollistavat myös vetyjäähdytteisten generaattoreiden teholuokan kasvun. Tällöin pelkällä vedyllä jäähdytetyt generaattorit vievät puolestaan markkinoita sekä vedellä että vedyllä jäähdytetyiltä. (Joho 2001) Kaikki kolme nykyaikana yleisesti käytössä olevaa jäähdytystekniikkaa säilyttävät siis asemansa markkinoilla tulevaisuudessakin.

7 YHTEENVETO

Voimalaitosgeneraattorit ovat elintärkeitä sähköntuotannossa. Niiden jäähdytysjärjestelmien kehitys on mahdollistanut teholtaan suurempien yksiköiden rakentamisen ja parantanut generaattorien hyötysuhteita. Lisäksi generaattorien fyysiset koot ovat jäähdytyksen kehityksen myötä pienentyneet. Mitä enemmän jäähdystehoja generaattoreissa on tarvittu, sitä parempia jäähdytysaineita on otettu käyttöön. Nykyisiksi jäähdytysaineiksi ovat vakiintuneet ilma, vety ja vesi. Ilma on taloudellisin jäähdytyskeino, mutta sillä saadaan jäähdytettyä vain pienimmän teholuokan voimalaitosgeneraattorit. Teholuokan kasvaessa ilman jäähdytysaineena korvaa vety ja siirryttäessä teholtaan kaikista suurimpiin generaattoreihin käytetään jäähdytyksessä sekä vetyä että vettä.

Aineiden ominaisuuksien tarkastelun perusteella yleisesti käytettyjen jäähdytysaineiden hyödyntäminen nykyisten voimalaitosgeneraattoreissa on järkevää. Vedyn lämmönsiirrolliset ominaisuudet ovat ilmaan verrattuna moninkertaiset ja veden kyseiset ominaisuudet ovat vielä paljon mainittuja kaasuja paremmat. Vedyn tai veden käyttö jäähdytysaineena tuo mukanaan hankaluuksia verrattuna ilmalla toteutettuun jäähdytykseen. Nykyiset voimalaitosgeneraattorien kehitysnäkymät ovat jäähdytysjärjestelmien kehittämässä. Myös ominaisuuksiltaan optimaalisiksi kehitettyjen jäähdytysnesteiden käyttö saattaisi olla mahdollista, mutta saatavuudeltaan ja hinnaltaan nykyiset käytössä olevat aineet ovat ylivertaisia.

Generaattoreiden sisällä tapahtuvan lämmönsiirron syvällisempi tutkiminen olisi mielenkiintoista, mutta tarkat jäähdytystekniikat ovat tietenkin generaattoreita valmistavien yritysten salaisuuksia. Laskentaa tuskin nykypäivänä suoritetaankaan kokeellisten korrelaatioiden avulla vaan kriittisten kohtien suunnittelussa käytetään hyväksi CFD-laskentaa. Generaattoreiden jäähdytyksen tutkiminen on haasteellista, koska siinä tarvitaan osaamista sekä sähkö- että virtaustekniikan alalta.

LÄHTEET

Alstom Power, Turbogenerators from 40MW to 1700MW. [verkkosivu] Saatavissa: http://www.power.alstom.com/home/equipment___systems/generators/turbogenerators/7425.EN.php?languageId=EN&dir=/home/equipment___systems/generators/turbogenerators/ [viitattu 30.3.2009]

Anonyymi, Lappeenrannan teknillinen yliopisto – Sähkömoottori [verkkosivu] Saatavissa: http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/Sivut/Default.aspx [viitattu 9.4.2009]

British Electricity International Ltd. (BEI) 1991, Modern power station practice, Volume C Turbines, Generators and Associated plant, Third edition, Oxford, Pergamon press, ISBN 0-08-040513-4

Elliot, Thomas C., Chen, Kao, Swanekamp, Robert C. 1998. Standard handbook of powerplant engineering, Second edition, New York, McGraw-Hill, ISBN 0-07-019435-1

Fagerholm, Nils Erik. 1986. Termodynamiikka, Jyväskylä, Gummerus Oy, ISBN 951-671-327-0

GE Energy, Generator products [Verkkójulkaisu] Saatavissa: http://www.gepower.com/prod_serv/products/generators/en/downloads/generators.pdf [viitattu 30.3.2009]

Incropera, Frank P. et al. 2007. Fundamentals of heat and mass transfer, Sixth edition, Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, ISBN 0-471-45728

Joho, Reinhard E. 2001. Air cooled Turbogenerators Superseding Hydrogen-cooling Domaine. Teoksessa: IEEE International, Electric Machines and Drives Conference, Cambridge, MA, USA, sivut 565-570, ISBN: 0-7803-7091-0 [verkkójulkaisu] Saatavissa: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=939367 [viitattu 25.3.2009]

Klempner, Geoff; Kerszenbaum, Isidor, 2004. Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators. John Wiley & Sons. [verkkojulkaisu] Saatavissa: http://knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2084&VerticalID=0 [viitattu 18.3.2009]

Neville, Angela 2008. Boryeong Thermal Power Complex, Boryeong-Si, Chungcheongnam-do Province, South Korea, Power vol. 152 nro. 10/2008, 34.

Pöyhönen, Otso W. et al. 1980. Sähkötekniikan käsikirja 1, Kuudes painos. Helsinki, Tammi, ISBN 951-30-2488-1

Siemens Power Generation a, Charlotte generator. [verkkosivu] Saatavissa: <http://www.powergeneration.siemens.com/press/press-pictures/generators/charlotte-generator-1.htm> [viitattu 25.2.2009]

Siemens Power Generation b, Industrial Development and Service [verkkosivu] Saatavissa: <http://www.powergeneration.siemens.com/products-solutions-services/products-packages/generators/> [viitattu 30.3.2009]

Smith, Douglas J. 2001. Upgraded electric generators are more efficient and reliable, Power Engineering, Vol. 105, 34, [verkkojulkaisu] Saatavissa: <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=76081631&Fmt=4&clientId=23486&RQT=309&VName=PQD> [viitattu 30.3.2009]