



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**USEAN VESIVOIMALAITOKSEN OPTIMAALISEN
YHTEISKÄYTÖN REUNAEHDOT JA KRITEERIT**

Juho Voltti

Ohjaaja: Jukka Hiltunen

Prosessitekniiikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

Helmikuu 2016

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Voltti, Juhon		Työn ohjaaja yliopistolla Hiltunen, J	
Työn nimi Usean vesivoimalaitoksen optimaalisen yhteiskäytön reunaehdot ja kriteerit			
Opintosuunta Systeemitekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Helmikuu 2016	Sivumäärä 25
Tiivistelmä <p>Tässä työssä tarkastellaan usean vesivoimalaitoksen ketjun optimoitua säätöä. Tavoitteena on saada kuvaus usean vesivoimalaitoksen systeemin optimoinnista annettujen reunaehtojen vallitessa. Työn lopputulos on erittäin riippuvainen siitä, että minkälaisia reunaehtoja mallinnuksessa on otettu huomioon ja valitsin käyttämäni lähdekirjallisuuden sen mukaan, että tilanne olisi yleistettävissä suomalaisiin vesivoimalaitossysteemeihin. Ongelmana on seurata että mitkä tekijät vaikuttavat oleellisesti vesivoimalaitossysteemin tuottamaan kokonaistuotantoon. Lisäksi esitän perinteisen vesivoiman toimintaperiaatteet ja veratilen sen käytettävyyttä eri taloudellisin ja ympäristöllisin mittarein ja tutkin vesivoiman tulevaisuudennäkymiä Suomessa.</p> <p>Lähdekirjallisuutena olen käyttänyt Pentti Lautalan ja Jussi Oravan tekemää tutkimusta 1970-luvulta Oulujoen vesivoimalaitosten säädöstä ja optimoinnista. Lisäksi olen käyttänyt alan yritysten internet-sivuilta saatua informaatiota. Kuten jo edellä mainitsin mallinus on erittäin riippuvainen siitä mitä reunaehtoja mallissa haluaa korostaa. Lautalan ja Oravan tukimuksessa etenkin vedenpinnan korkeudella ja veden putoamiskorkeudella on suuri merkitys optimoinnissa. Sen sijaan esimerkiksi virtausnopeuksia ei niinkään olla otettu huomioon. Vesivoimalaitossysteemin tärkein optimointiin vaikuttava tekijä on optimointiin käytettävän marginaalihinnan laskeminen tarpeeksi lähelle oikeaa marginaalihintaa. Tämä toteuttaa koko systeemin optimin ja sen avulla lasketaan tuotantoaikataulu koko ketjulle. Taloudellisesti mitattuna vesivoima on edullisin ja tehokkain säätövoiman muoto, joka perustuu sen nopeaan käyttövalmiuteen. Vesivoiman tulevaisuudennäkymät Suomessa ovat hyvät, vaikkakin sille on asetettu lainsäädännöllisiä haasteita. Sen käyttö tuskin vähenee tulevaisuudessa, mutta uuden ydinvoiman rakentaminen Suomeen vaikuttaa varmasti myös vesivoiman käyttöön.</p>			
Muita tietoja			

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	5
2 Yleistä vesivoimasta.....	6
2.1 Vesivoima	6
2.2 Tehokkuus	7
2.3 Taloudellisuus	8
2.4 Ympäristövaikutukset	9
3 Vesivoimalaitoksen mallintaminen.....	11
3.1 Vesivoimalaitoksen mallintaminen.....	11
3.2 Joen virtauksen mallintaminen.....	13
3.3 Usean vesivoimalaitoksen ketjun mallintaminen.....	14
4 Usean vesivoimalaitoksen optimaalinen käyttö	17
4.1 Lyhyen aikavälin optimointi	17
4.2 Taloudellinen näkökulma.....	18
4.3 Reaaliaikainen optimointi	19
5 Yhteenveto	22
6 Lähdeluettelo.....	24

MERKINNÄT JA LYHENTEET

P = Vesivoimalaitosketjun tuottama sähkövoima

P_i = Vesivoimalaitoksen i tuottama sähkövoima

u_i = Veden putoamiskorkeus voimalaitoksessa i

x_i = Varastoaltaan pinnankorkeus voimalaitoksessa i

x_{i+1} = Laskuvesialtaan pinnankorkeus voimalaitoksessa i

v_{i+1} = Varastoaltaan sisäänvirtaama voimalaitoksessa i

q_1 = Joen virtaama

J = Kustannusfunktio

1 JOHDANTO

Tämän työn aiheena on tarkastella usean vesivoimalaitoksen optimaalisen yhteiskäytön reunaehtoja ja kriteerejä. Tarkoituksena on selvittää miten usean voimalaitoksen syteemiä voitaisiin käyttää optimaalisesti, eli taloudellisesti ja tehokkaasti ympäristöä kuormittamatta. Työssäni tutkin esimerkiksi veden pinnankorkeuden ja virtaaman vaikutusta energian saantoon ja näiden vaikutusta vesivoimalaitosketjun säätöön. Työssäni käyttämä tieteellinen tutkimus on peräisin 1970-luvulta ja sitä voidaan pitää edelleen relevanttina tietona, sillä peruseriaatteet vesivoiman tuotannossa eivät ole muuttuneet pitkiin aikoihin. Myös se, että aiheesta ei sen jälkeen ole juurikaan tehty tutkimusta herätti mielenkiintoni perehtyä aiheeseen syvällisemmin. Akateemisten julkaisujen lisäksi olen käyttänyt työssäni paljon alan yritysten ja järjestöjen internet-sivuja ja julkaisuja.

Työni on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa esittelen vesivoiman perusteet ja perinteisen vesivoimalaitoksen toimintaperiaatteen. Tarkastelen myös vesivoiman tehokkuutta, taloudellisuutta ja ympäristövaikutuksia ja lisäksi vertaan niitä toiseen yleiseen hiilidioksidivapaaseen energianlähteeseen eli tuulivoimaan. Seuraavassa luvussa esittelen Pentti Lautalan ja Jussi Oravan tekemää tutkimusta vesivoimalaitossysteemin matemaattisesta mallinnuksesta. Mallissa on käytetty pohjana Oulujokea ja sen voimalaitoksia. Vaikka tämä tutkimus toteutettiin 1970-luvulla, sen akateeminen asema on edelleen kiistämätön. Kuten aikaisemmin huomautin; uutta tutkimusta vesivoiman tutkimuksesta on tehty valitettavan vähän. Neljännessä luvussa tarkastelen edellämainitun vesivoimalaitosketjun optimointia ja taloudellista käyttöä. Eli kuinka voimalaitossysteemiä voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti. Lisäksi Yhteenvedossa käsittelemäni tuloksia olen aiheesta saanut. Tavoitteenani on saada tarkka kuvaus vesivoimalaitossysteemin mallintamisesta ja optimoinnista, sillä haluan kartoittaa alan tulevaisuudennäkymät ja pohtia millaiset käyttömahdollisuudet energianlähteellä on tulevaisuudessa.

2 YLEISTÄ VESIVOIMASTA

2.1 Vesivoima

Vesivoimalla on ollut Suomessa perinteisesti vakaa asema ja suurimmillaan sen osuus suomalaisesta energiantuotannosta on ollut aikaisemmin noin 90 prosenttia. Nykyään osuus vaihtelee vesitilanteen mukaan, mutta vuonna 2014 sen osuus oli 20,2 prosenttia koko maan energiantuotannosta, joka oli myös suurin osuus uusiutuvista energianlähteistä. (Energiateollisuus, 2015) Vaikka tuotannon osuus on pienentynyt suuresti viimeisten vuosikymmenten aikana, on vesivoimalla silti vielä vankka asema suomalaisilla energiamarkkinoilla. Suomen ensimmäinen sähköä tuottava vesivoimalaitos valmistui vuonna 1891 Tammerkoskeen. Yleisin sähköntuotannon energianlähde Suomessa on ydinvoima, joka oli yli 30% vuonna 2014 ja määrä tulee luultavasti kasvamaan tulevien vuosien aikana. Etenkin fossiilisten polttoaineitten määrää on pyritty vähentämään ja tällainen ajattelumalli tuokin vesivoimalle uusia mahdollisuuksia, koska Suomessa on vielä käyttämätöntä vesivoimapotentiaalia.

Vesivoiman lisäämisen haasteena on EU:n vesipolitiikan puitedirektiivi, joka suosii tuulivoiman käyttöä vesivoiman sijasta. Direktiivin tarkoitus on suojella eurooppalaisen veden laatua, mutta samalla se asettaa rajoituksia uuden vesivoiman rakentamiselle. Myös kotimaisessa lainsäädännössä on velvoitteita uusien vesivoimalaitosten rakentamiselle. Tällaisia lakeja ovat muun muassa vesilaki, ympäristönsuojelulaki, luonnonsuojelulaki ja koskiensuojelulaki. Etenkin koskiensuojelulaki, joka määrittelee erikseen suojellut vesistöt haittaa suomalaista vesivoimakapasiteetin hyödyntämistä, sillä koskiensuojelulla suojeltuihin vesistöihin ei ole mahdollista rakentaa vesivoimaa. Vesivoimapotentiaalın optimaalisen hyödyntämisen kannalta tämä on haasteellista, koska etenkin koskiin olisi mahdollista rakentaa uudenlaista pienvesivoimaa ympäristöä kuormittamatta. (Energiateollisuus, 2015) (Kemijoki OY, 2015)

Maailmanlaajuisesti vesivoima on suurin uusiutuva energianlähde ja kaikista energianlähteistä se on viidenneksi suurin. energianlähde yhteensä. Sen hyödyntämisellä

voitaisiin mahdollistaa sähkösaanti alueille, joissa ei vielä ole sähköä. Esimerkiksi Saharan eteläpuoleinen Afrikka ja Etelä-Aasia, joissa sähkösaannin tarve on suuri ja lisäksi alueilla on myös potentiaalia vesivoiman rakentamiselle. Maailman pankin raportista käy ilmi, että häiriöttömällä sähkösaannilla on myös suora yhteys taloudelliseen kasvuun ja hyvinvointiin. Vesivoiman rakentamiselle kyseisille alueille on myös haasteita, sillä se saattaa aiheuttaa tulvia, ekosysteemin muutoksia ja edellisistä johtuvia asuinalueiden siirtoja. (The World Bank 2015) Tästä huolimatta vesivoimaa voidaan pitää yhtenä ekologisimmista energiantuotannon muodoista, jolla pystytään vaikuttamaan tehokkaasti sekä kehittyneiden että kehittyvien alueiden taloudelliseen kehitykseen ja energiapulaan.

Vesivoimalaitoksen peruserätyksessä hyödynnetään kahden eri vesitason välistä korkeuseroa. Sadevesi ja sulanut lumi varastoidaan järviin ja vesivoimalaitosten varastoaltoiin. Tämän jälkeen vesi pudotetaan vesivoimalaitoksen läpi padon alapuolelle, jolloin se pyörittää turbiinia. Turbiini pyörittää generaattoria, joka muuttaa veden liike-energian sähköksi, jonka jälkeen sähkö johdetaan muuntajan kautta jakeluverkkoon. Voimalaitosten varastoaltilta pyritään vastaamaan sähkön kulutuksen päivittäisiin vaihteluihin, joka tekee vesivoimasta erityisen tehokkaan säätövoiman muodon, jota käsitellen yksityiskohtaisemmin alaluvussa 2.3. (Energiaresurssit, 2015) Korkeimmillaan varastoaltilta vesi on yleisesti aamupäivällä ja matalimmillaan illalla. Tämä johtuu siitä että vettä juoksetaan erityisesti päivisin, jolloin sähkönkulutus on suurimmillaan. (Kemijoki OY, 2015)

2.2 Tehokkuus

Energiatehokkuudella on nykyisin suuri merkitys ympäristökysymysten ratkaisemiseksi. Tämän vuoksi jo olemassa olevia energianlähteitä on pyritty tehostamaan ja etenkin uusiutuvat energianlähteet ovat tässä tilanteessa avainasemassa. Kilpailukykyisellä energiatehokkuudella yhteiskunta pystyy säästämään pienkuluttajiensa varoja. Lisäksi vientivoittoinen maa kuten Suomi saa täten myös tuotannossaan säästöjä. Suomessa on yli 200 vesivoimalaitosta ja niiden yhteenlaskettu teho on 3100MW, jotka jaotellaan

kokoluokkiin niiden nimellistehon mukaan. Suurvesivoimalaitoksilla tarkoitetaan yli 10MW:n voimalaitoksia, pienvesivoimalla 1-10MW ja minivesivoimalaitoksella alle 1MW:n voimalaitoksia. Erityisesti pienemmille vesivoimalaitoksille olisi Suomessa hyödyntämätöntä kapasiteettia, mutta kannattavuus ja hankkeiden kesto tuottaa ongelmia potentiaalın käyttämislle. Myös lainsäädännöllisiä ongelmia uuden vesivoiman rakentamiselle on olemassa. (Energiateollisuus, 2015)

Vesivoima on verrattaen tehokasta verrttuna tuulivoimaan, jolla katetettiin 0,9% Suomen sähkönkulutuksesta vuonna 2014. Vertailu tuulivoimaan on mielekäästä, koska molemmat energianlähteet ovat hiilidioksidivapaita ja uusiutuvia energianlähteitä. Tuulivoimaloiden nimellisteho on 2-3MW, mutta myös 5MW laitosten myynti on yleitymässä. Ongelmana tuulivoiman hyödyntämisessä on sen ajallinen vaihtelevuus. Sen sähköntuotanto vaihtelee tuulisuuden mukaan, jolloin tuonnossa voi olla suuria muutoksia vuorokauden sisällä. Myös vesivoima on riippuvainen sääolosuhteista kuten sadannasta ja lumen määrästä, mutta voidaan olettaa että vedenpinnan korkeus ei vaihtelee yhtä nopeasti vuorokauden sisällä kuin tuulen määrä. Tuulen määrän vähentyessä on lisättävä säätövoiman määrää energiankulutuksen mukaan, mikä johtaa esimerkiksi muiden tuulivoimaloiden tehon nostamiseen tai muiden energianmuotojen käyttöön. Tuulivoiman säädettävyyttä voidaan lisätä rakentamalla lisää tuulivoimaloita suuremmalle alueelle olettaen, että jossain päin rakennetulla alueella tuulee varmasti. (Energiateollisuus, 2015)

2.3 Taloudellisuus

Taloudellisuuden näkökulmasta vesivoima on edullinen sähköntuotannon muoto. Sen raaka-ainekustannukset ovat minimaaliset ja suurin osa kustannuksista tulee rakentamisvaiheessa. Tosin rakentamisvaiheen kustannukset saattavat olla erittäin suuria. Tämän jälkeen kustannukset ovat lähinnä käyttö- ja kunnossapitokustannuksia, jotka ovat myös yllättävän pieniä esimerkiksi voimalaitosten turbiinien pitkäikäisyyden vuoksi. Alhaisista käyttökustannuksista huolimatta suuret investointi- ja rakennuskustannukset ovat vähentäneet uusien vesivoimalaitosten rakentamista. Tämä näkyy etenkin yli 10MW

voimalaitosten rakentamisen vähentymisenä ja uusimmat voimalaitokset ovat nimellisteholtaan pieniä alle 1MW:n voimalaitoksia.

Vesivoima on myös taloudellisesti tehokkain säätövoiman muoto. Säätövoimalla tarkoitetaan sähköntuotantoa, joka pystyy reagoimaan sähkön kulutuksen ja tuotannon välisiin vaihteluihin. NykYTEKNIKALLA EI KYETÄ VARASTOIMAAN SÄHKÖÄ SUURIA MÄÄRIÄ, JOTEN SITÄ PITÄÄ TUOTTA VERKKOON SAMAN VERRAN KUIN SITÄ KULUTETAAN. Säätövoiman tarve kasvaa Länsi- ja Pohjois-Euroopassa, sillä yhteiskunnan sähköntarve on kasvussa ja myös säiden mukaan vaihtelevien aurinko- ja tuulivoimaloiden määrä on lisääntynyt. Säätövoimalla pystytään lisäksi tasaamaan kysynnän hintapiikkejä, joka tukee elinkeinoelämän kilpailukykyä. Kun sähkön hinta pysyy tasaisena, niin pienkuluttajien menot eivät nouse. Tasainen sähkönsaanti on myös yhteiskunnan toimivuuden kannalta oleellista, sillä nykyaikainen yhteiskunta on erittäin sähköistynyt. (Energiateollisuus, 2015)

Vesivoiman tehokkuus säätövoimana perustuu siihen, että vesivoimalaitokset voidaan pysäyttää ja käynnistää nopeasti ja niiden tehoa voidaan sähkön kulutuksen mukaan säätää. Vettä voidaan kerätä varastoaltaisiin, joita voidaan käyttää myös kuivina aikoina ja talvella. (Kemijoki OY, 2015) Tuulivoimalla säännön mahdollisuus on huomattavasti pienempi, sillä tuulta on mahdotonta varastoida. Tuulen vähentyessä muiden tuulivoimayksiköiden tehoa voidaan nostaa, mutta tarvittaessa sähkö on hankittava muualta. Sähköä varastoivien akkujen käyttöä on harkittu, mutta niiden teho on vielä verrattaen pieni. Tuulivoiman raaka-ainekustannukset ovat vesivoiman tavoin minimaalisen pieniä. (Energiateollisuus, 2015)

2.4 Ympäristövaikutukset

Vesivoima on lähes päästötön energianmuoto ja siksi vettä pidetään yleisesti hyvänä energianlähteenä. Vesivoiman tuotannon ympäristövaikutukset ovat yleensä täysin paikallisia ja vaikuttavat vain valjastetun vesistön ja voimalaitoksen yhteyteen rakennettavan tekoaltaan alle jääneen maa-alueen ekologiseen systeemiin. Vesivoimalaitoksella on myös maisemavaikutus, joka saattaa muuttaa jokimaiseman

enemmän järvimaiseman kaltaiseksi ja lisäksi itse pato ja sähkölinjat jäävät näkyville avoimille paikoille. Myös osa jokivarren elinympäristöstä muuttuu vedenpinnan korkeuden vaihteluiden vuoksi, joka saattaa vaikuttaa joidenkin lajien esiintymiseen alueella. Itse vesivoiman tuotantovaiheesta ei synny päästöjä. Vesi ei pilaannu eikä vähene virratessaan voimalaitoksen läpi. Lisäksi tuotantovaiheesta ei synny kiinteää jätettä, jota jouduttaisiin käsittelemään sähköntuotannon jälkeen. Vesivoiman ympäristövaikutuksille on asetettu lakeja ja säädöksiä, esimerkiksi edellämainitut koskiensuojelulaki ja EU:n vesipolitiikan puitedirektiivi. (Motiva, 2015)

Suurimmat haittavaikutukset ovat kuitenkin alueen kalakannan ja etenkin vaelluskalojen selviämässä, joita voidaan vähentää esimerkiksi hyvin sijoitetuilla kalaportilla, kalanistutuksilla ja kalanhoitotoimenpiteillä. Suomen kalatiestrategiassa todetaan, että mieluisampi tapa vaelluskalakantojen vahvistamiselle on uusien kalateiden rakentaminen istutusten sijaan. (Luonnonvarakeskus, 2015) Kalaportaat tosin vähentävät voimalaitoksen läpi virtaavaa vettä, joka on otettava vesivoiman tuotannossa huomioon. Toinen alueellinen haitta on tekoaltaan alle jääneen maa-alueen raskasmetallien liukeneminen veteen, josta ne kertyvät kaloihin ja muuhun eliöstöön. Tuotannon aikaiset ympäristövaikutukset johtuvat veden säännöstelyn aiheuttamista virtauksen ja vedenpinnan vaihteluista. Tällä on ekologisia ja ympäristöllisiä vaikutuksia. (Energiateollisuus, 2015)

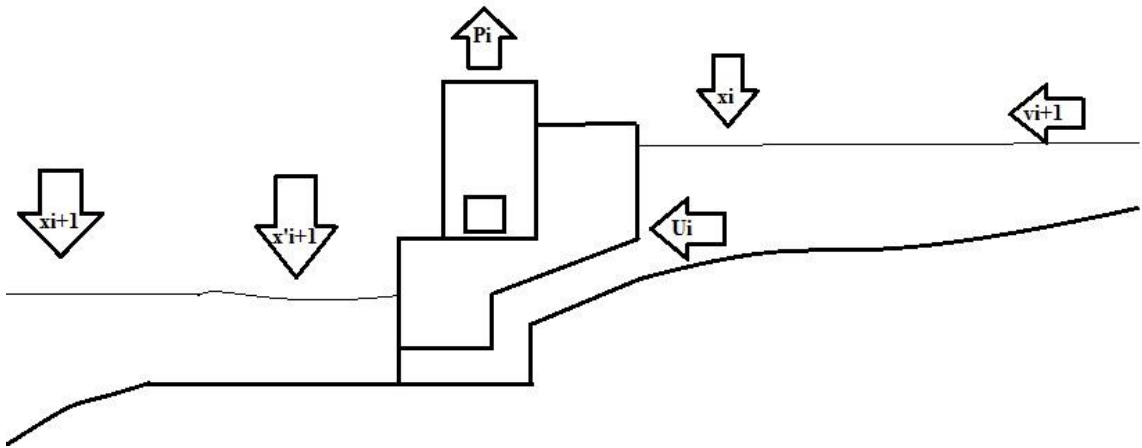
Verrattuna vesivoimaan tuulivoiman ympäristövaikutukset ovat hyvin samankaltaisia. Tuulivoiman tuotantovaiheessa ei aiheudu päästöjä maahan, veteen tai ilmaan ja sen ympäristövaikutukset ovat paikallisia. Nykyiset teolliset tuulivoimayksiköt ovat verrattaen isoja ja siksi niiden maisemavaikutusta yritetään vähentää sijoittamalla niitä syrjäseuduille ja rannikolle. Vesivoiman ja tuulivoiman vastakkainasettelu työssäni on siltä määrin tarpeetonta, että vesivoimalla tuotetulla säätövoimalla voidaan auttaa tuulivoimalla tuotettua sähköä, koska tuulivoimalle on suomessa huomattavasti enemmän käyttämätöntä potentiaalia. Tällaisella ajattelumallilla voidaan vähentää huomattavasti hiilidioksidipäästöjä ja voidaan saavuttaa kasvihuonekaasujen vähennyksiä. (Energiateollisuus, 2015)

3 VESIVOIMALAITOKSEN MALLINTAMINEN

3.1 Vesivoimalaitoksen mallintaminen

Vesivoimalaitoksen mahdollisimman tarkka matemaattinen mallintaminen on optimoinnin onnistumisen kannalta tärkeää. Malleista voi tulla hyvin erillaisia riippuen, että mitä reunaehtoja ja kriteerejä voimalaitoksen tai joen mallinnuksessa otetaan huomioon. Seuraavissa malleissa ei oteta esimerkiksi huomioon minkälainen turbiini tai generaattori voimalaitoksessa on, vaikka se todellisuudessa vaikuttaa voimalaitoksen tuottamaan kokonaisvoimaan.

Ennen kuin voidaan tarkastella usean voimalaitoksen ketjua, on tarpeellista tutkia yhden vesivoimalaitoksen systeemiä. Pentti Lautala ja Jussi Orava esittävät tutkimuksessaan (On short-term optimal scheduling of hydro-electric power plant chains, 1976) Suomalaisia voimalaitosketjuja kuvaavaa mallia. Mallin pohjana on käytetty Oulujokea ja sen seitsemää vesivoimalaitosta. Mallissa olevan vesivoimalaitoksen systeemin oletetaan koostuvan varastoaltaasta, turbiinista, generaattorista, laskuvesialtaasta ja seuraavalle voimalaitokselle virtaavasta joesta. (Lautala ja Orava, 1976)



Kuva:1 Vesivoimalaitos

Kuvassa u_i on veden putoamiskorkeus, v_{i+1} on varastoaltaan sisäänvirtaama, ja x_i , x_{i+1} , x'_{i+1} ovat vedenpinnan korkeuseroja. Virtaus laskuvesikanavaan oletetaan olevan turbulenttista, sillä joen pohja ei ole sileä. Pinnanmuutos laskuvesikanavaan x'_{i+1} kuvaa vastusta seuraavalle voimalaitokselle virtaavan veden korkeuseroon x_{i+1} ja niillä on seuraavanlainen yhteys.

$$x'_{i+1} = x_{i+1} - d'_i u_i^2. \quad (1)$$

P_i on vesivoimalaitoksen i tuottama sähkövoima. Veden putoamiskorkeus vaikuttaa voimantuotantoon seuraavanlaisesti,

$$P_i = E_i(u_i) + k_i(x'_{i+1} - x_i)u_i. \quad (2)$$

jossa E_i on annettu kokeellinen funktio ja k_1 on positiivinen parametri. Yhdistämällä yhtälöt 1 ja 2 saadaan yhden vesivoimalaitoksen i sähköntuotannoksi P_i .

$$P_i = E_i(u_i) - k_i d'_i u_i^3 + k_i(x_{i+1} - x_i)u_i. \quad (3)$$

Yhtälöstä (3) saadaan termejä avaamalla

$$P_i = e_i + c_i u_i - d_i u_i^2 + k_i (x_{i+1} - x_i) u_i. \quad (4)$$

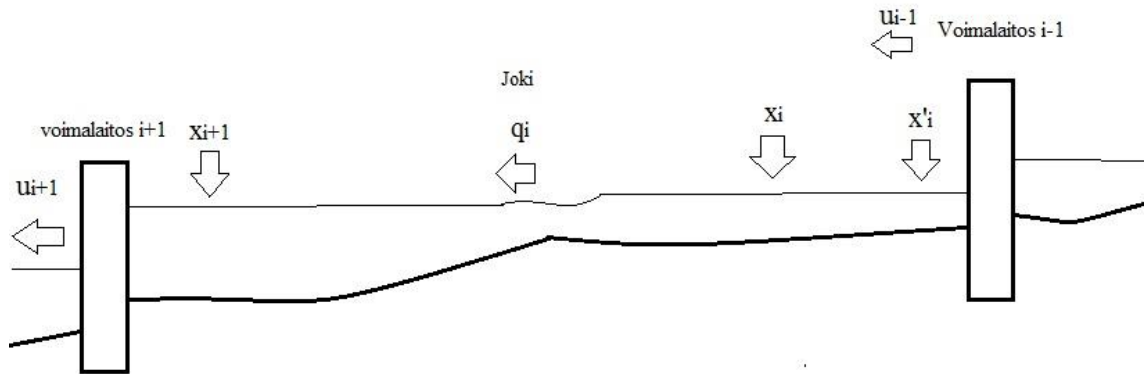
jossa c_i ja d_i ovat positiivisiä vakioita. (Lautala ja Orava, 1976)

3.2 Joen virtauksen mallintaminen

Joen virtauksen mahdollisimman tarkka mallintaminen on tärkeää varsinkin kun malli yleistetään usean voimalaitoksen systeemiin. Virtauksen liian yksinkertainen mallintaminen voi tehdä kaavasta käyttökelvottoman ja tämä johtaa kokonaisoptimoinnin epäonnistumiseen. Joen virtausnopeuden tai veden määrään ei pystytä juurikaan vaikuttamaan, mutta niiden tarkastelu on tärkeää mallien rakentamisen kannalta. Säädön näkökulmasta virtausolosuhteilla joen keskivaiheilla voimalaitosten välissä ei ole juurikaan merkitystä. Sen sijaan virtausolosuhteilla joen alku- ja loppupäissä, eli voimalaitosten kohdalla on suuri merkitys. (Lautala, 1978)

Joissain tapauksissa vain voimalaitosten välinen aikaviive on otettu huomioon joen virtauksen mallintamisessa. Tosin tämän kyseisen mallin mukaisessa joessa pelkkä aikaviiveen tarkastelu ei riitä. Pelkkällä aikaviiveen tarkastelulla ei oteta huomioon, että joen virtauksen vastus on riippuvainen joen syvyydestä ja se vaikuttaa monella eri tavalla voimalaitoksen laskuvesialtaan pinnankorkeuteen. (Lautala ja Orava, 1976)

Orava ja Lautala olettavat voimalaitosten välisen joen koostuvan kahdesta altaasta, joiden vedenpinnan muutosta kuvaavat aiemmin esitetyt parametrit x_i ja x_{i+1} . Joen virtaus q_1 on riippuvainen vedenpinnan korkeuseroista ja joen syvyydestä. Tarkempia arvoja saataisiin, jos joen malliin lisättäisiin useampia altaita, mutta tämä kyseinen malli pidättyy vain kahdessa. Joen virtauksen oletetaan olevan myös turbulენტtista.



Kuva 2 Joen virtaus

Tällaisilla reunaehdoilla Orava ja Lautala päätyivät tulokseen, jossa joen virtauksen, vedenpinnan korkeusrojen ja joen syvyyden välillä on seuraavanlainen riippuvaisuus.

$$x_{i+1} - x_i = \frac{q^2}{g[1 - h(x_i + x_{i+1})]}. \quad (5)$$

Missä g ja h ovat joitain positiivisia parametreja, x_i ja x_{i+1} ovat vedenpinnan korkeuseroja ja q_i kuvaa joen virtaamaa. Ratkaisemalla yhtälö virtaaman q suhteen saadaan voimalaitoksen välisen virtauksen malliksi

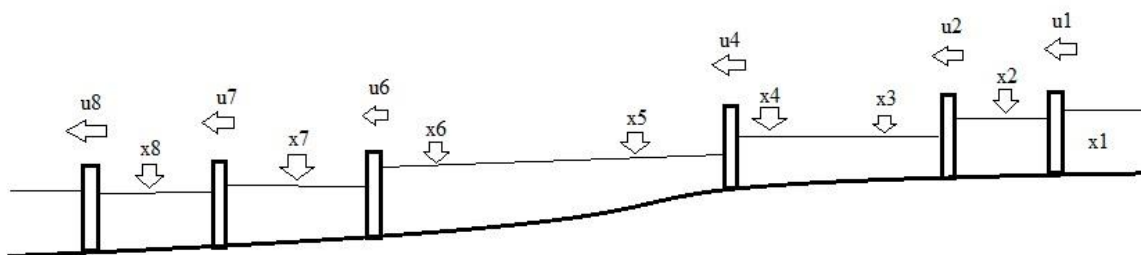
$$q_i = \sqrt{g_i(x_{i+1} - x_i)[1 - h(x_i + x_{i+1})]}. \quad (6)$$

3.3 Usean vesivoimalaitoksen ketjun mallintaminen

Usean vesivoimalaitoksen ketjuille on tehty matemaattisia malleja ja ne poikkeavat toisistaan riippuen, mitä reunaehtoja ja tekijöitä mallissa on otettu huomioon. Tämän vuoksi malleja kannattaa yleistää varauksella, vaikka joitain yleisiä malleja on myös

olemassa. Lautala ja Orava (1976) esittävät tutkimuksessaan mallia, jota voidaan käyttää usean vesivoimalaitoksen systeemille seuraavanlaisin oletuksin. Mallin vaatimuksina on, että voimalaitosten välisten jokien virtausnopeus on tarpeeksi pieni, voimalaitoksilla on pienet varastoaltaat ja vesitasojen välinen korkeusero on tarpeeksi pieni. Tällainen tilanne johtaa myöhemmin esiteltävään lyhyen aikavälin optimoidun säädön ongelmaan, joka johtuu vahvasta riippuvuudesta voimalaitosten virtaamien välillä. Tilanne voidaan yleistää suomalaisiin vesivoimalaitosketjuihin, sillä mallin lähteenä on käytetty Oulujokea ja virtausolosuhteet Suomessa ovat verrattaen lähellä toisiaan. (Lautala, 1978)

Voimalaitosten ketjun malli saadaan yhdistelemällä aiemmin saatuja komponentteja. Orava ja Lautala jättivät omassa tutkimuksessaan matalimman varastoaltaan omaavan vesivoimalaitoksen pois, koska sen varastoaltaan muutoksella ei ollut vaikutusta seuraavan voimalaitoksen laskuvesialtaan vedenpinnan korkeuteen. Voimalaitokset on hahmoteltu kuvaan 3.



Kuva 3 Usean vesivoimalaitoksen ketju.

Ensimmäisen vesivoimalaitoksen varastoaltaan korkeus x_1 on määrällinen muuttuja, mutta sitä seuraavat x :n arvot toimivat samalla tavalla kuin aiempien lukujen tapauksissa. Virtaus v_4 on itsenäinen veden sisäänvirtaus systeemiin. Määrällinen muuttuja x_1 on tärkeä mallin muodostuksen kannalta, sillä vedenpinnan korkeuden muutosta muiden voimalaitosten kohdalla verrataan tähän arvoon. Kuvan 3 mukaiselle systeemille saadaan muodostettua täten x :n arvot:

$$x_1 = u_1$$

$$x_2 = a_2(u_2 - u_1)$$

$$x_3 = a_3\sqrt{g_3(x_4 - x_3)[1 - h(x_3 + x_4)]} - u_2$$

$$x_4 = a_4\left(u_4 - \sqrt{g_3(x_4 - x_3)[1 - h_3(x_3 + x_4)]}\right) \quad (7)$$

$$x_5 = a_5\left(\sqrt{g_5(x_6 - x_5)[1 - h_5(x_5 + x_6)]}\right)$$

$$x_6 = a_6\left(u_6 - \sqrt{g_5(x_6 - x_5)[1 - h_5(x_5 + x_6)]}\right)$$

$$x_7 = a_7(u_7 - u_6)$$

$$x_8 = a_8(u_8 - u_7).$$

Muuttujien määrittelyn jälkeen ne voidaan yhdistää yhtälöön (4) ja täten koko voimalaitosketjun tuottaman voiman matemaattiseksi malliksi saadaan. (Lautala ja Orava, 1978)

$$P = \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3,5}}^8 e_i + c_1 u_1 - d_1 u_1^2 \right\} + k_1 x_2 u_1 + \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3,5}}^7 k_1 (x_{i+1} - x_i) u_i \right\} - k_8 x_8 u_8. \quad (8)$$

4 USEAN VESIVOIMALAITOKSEN OPTIMAALINEN KÄYTTÖ

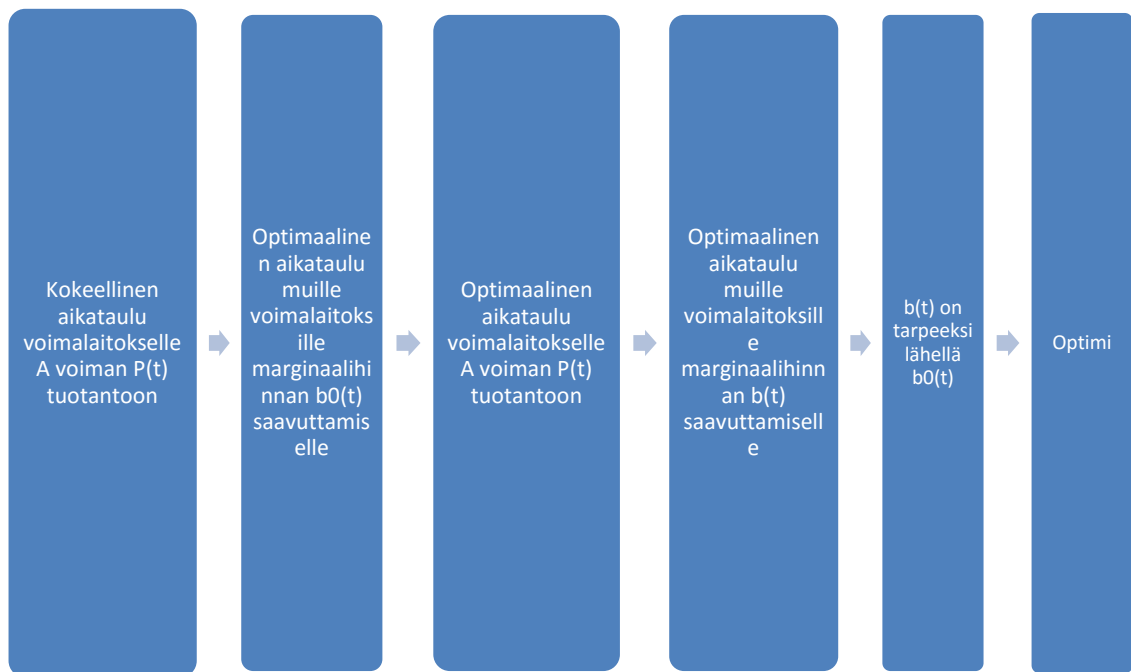
4.1 Lyhyen aikavälin optimointi

P.A.J. Lautala esittää raportissaan (On the modelling and solving of an optimal control problem of hydro-electric power plant systems 1978) lyhyen aikavälin optimoidun säädön ongelman. Lyhyen aikavälin optimoidulla säädöllä tarkoitetaan tuotetun ja ostetun sähkön vastaamista sen hetkiseen kysyntään, joka on tänä päivänäkin sähköntuotannon tärkeimpiä taloudellisia tehtäviä. Lyhyen aikavälin optimoitu säätö on osa koko voimalaitossysteemin optimointia ja siitä voidaan johtaa sekä lyhyen, että pitkän aikavälin optimaalinen voimantuotannon aikataulu. (Lautala, 1978)

Ongelma kokonaisuudessaan on erittäin vaikea selvittää ja siksi se onkin hajaannutettu useampaan osaongelmaan. Näiden osaongelmien optimaalinen ratkaisu voi teoriassa johtaa koko ketjun lyhyen aikavälin säädön ratkaisuun. Yleinen tapa ratkaista lyhyen aikavälin optimaalisen säädön ongelma on voimantuotannon suhteuttaminen ostetun ja myydyin voiman kanssa. Optimointiin käytetään tällaisessa tapauksessa sähkön sen hetkistä marginaalihintaa, joka lasketaan useasti yhden päivän aikana. Toinen mahdollisuus on käyttää sähköntuotannon pitkän aikavälin optimaalista aikataulua. (Lautala, 1978)

Marginaalihintaa käytämällä voidaan päätyä koko ketjun kokonaisoptimiin vain, jos oikea marginaalihinta löydetään. Marginaalihinta lasketaan voimalaitokselle A, jolle tehdään kokeellinen voimantuotantoaikataulu. Voimalaitoksen A tuottama voima on huomattavan pieni koko ketjun tuottamaan voimaan nähden ja täten muutokset sen aikataulussa eivät vaikuta koko ketjun tuottaman voiman hintaan b. Kokeellisen voimantuotantoaikataulun jälkeen tehdään muille voimalaitoksille aikataulut, joiden päämääränä on saavuttaa haluttu marginaalihinta b. Kokeellisten aikataulujen muodostamisen jälkeen tehdään voimalaitokselle A optimaalinen aikataulu halutun voiman $P(t)$ tuottamiseksi, jonka jälkeen voidaan muodostaa optimaaliset aikataulut

lopuille voimalaitoksille halutun sähkön hinnan tuottamiseksi. Jos haluttu marginaalihinta $b(t)$ on tarpeeksi lähellä todellista marginaalihintaa $b_0(t)$, niin voimalaitosketju on saavuttanut optiminsa. Jos haluttu marginaalihinta poikkeaa liian paljon todellisesta hinnasta, palataan muodostamaan uutta optimaalista halutun voiman funktiota. Tällainen optimoinnin algoritmi on esitetty kuvassa 4. (Lautala ja Orava 1976)



4.2 Taloudellinen näkökulma

Lyhyen aikavälin optimointi siis suoritetaan tiettyä marginaalihintaa käyttäen. Mallissa tietty katefunktio siis maksimoidaan tietyn aikavälin T asettamien reunaehtojen avulla. Koordinointiin käytettävä marginaalihinnan funktio $b(t)$ oletetaan annetuksi. Marginaalihinnan funktio ja voimantuotannon funktio, jota käytetään siis ensimmäisessä vaiheessa kokeellisen tuotantoaikataulun muodostamiselle yhdistetään marginaalihinnan funktion kanssa ja muodostetaan kustannusfunktio J

$$J = \int_0^T -b(t)P(t)dt \quad (9).$$

Tämä kustannusfunktio siis minimoidaan mahdollisimman suuren katteen saamiseksi. Eli annetuilla reunaehdoilla, dynaamisilla muuttujilla ja säädön ja tilan rajoituksilla pitäisi maksimoida koko voimalaitossysteemin kate. Kustannusfunktion ratkaisemiseen voidaan käyttää ”rangaistusmenetelmää”, jossa haluttuun algoritmiin lisätään ns. rangaistusfunktio. (Lautala ja Orava, 1976)

Voidaan oletetaan, että ensimmäinen säädön tila olisi annettu, mutta itse asiassa päivittäisen optimaalisen tilan ratkaiseminen on yksi parametri, joka tulee optimoida. Lyhyen aikavälin optimoinnin ratkaisu on itseasiassa välivaihe lyhyen aikavälin voimantuotannon aikataulutuksesta pitkän aikavälin aikataulutukseen. Oravan ja Lautalan mukaan olemassa on kaksi mahdollisuutta ratkaista pitkän aikavälin tuotannon optimaalinen tuotantoaikataulu. Ensimmäinen ja yleisin tapa on säätää aikajakson aikana käytetyn veden määrää. Toinen on säätää käytetyn veden määrää suhteessa voimantuotantoon eli tuottaa enemmän energiaa vähemmällä vesimäärällä. Molemmat ratkaisut ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta järkevästä pidetään yleisesti tärkeämpänä. (Lautala ja Orava, 1976)

Optimoinnin tavoitteisiin päästyä voidaan muodostaa pitkän ajan vesivoiman tuotannon aikataulu. Toki pelkkä tuotantoaikataulun tekeminen ei riitä, vaan tuotantomäärät saattavat muuttua päivän aikana aivan kuten muissakin tuotantolaitoksissa. Tosin optimoinnin algoritmi helpottaa selvittämään päivittäisen säädön ongelmia ja luo kuvan hintalähtöiselle koko systeemin säädölle. Algoritmi myös selkeyttää voimalaitosten välistä yhteyttä esimerkiksi paljonko voimalaitoksella x voidaan tuottaa energiaa, jos voimlaitos y tuottaa tämän verran. Tosin koko ketjun optimointi perustuu veden määrälle ja eri voimalaitosten putoamiskorkeuksille, eikä ota esimerkiksi kantaa veden virtausnopeuteen.

4.3 Reaaliaikainen optimointi

Jotta saisin työhöni laajemman ja nykyaikaisemman näkökulman vesivoimalaitossysteemien optimointiin, tarkastelen lopuksi aiheesta tehtyä ulkomaista

tuoreempaa tutkimusta. Tutkimuksessa Online optimal power distribution between units of a hydro power plant [Abreu, Bastos, Bortoni ja Kawkabani, 2014] esitetään vesivoimalaitossysteemin reaaliaikaisen optimoinnin periaate. Tutkimus ottaa kantaa jo edellä esitettyyn klassiseen kustannusfunktioon perustuvaan säätöön ja esittää, että säätö toimii niin pitkään kuin kustannusfunktio olettaa veden kulutuksen olevan tuotetun kokonaisvoiman funktio. Tällainen säätö toimii niin pitkään kun vedellä ei ole mitään suoraa kustannusta. Tutkimuksessa todetaan kustannusfunktioon perustuvan säädön haitaksi sen, että se olettaa systeemin jokaisen yksikön olevan samanlaisia. Vaikka kaikki yksiköt olisi tilattu samalta toimittajalta, olisi niillä joka tapauksessa omia piirteitään, jotka lopulta vaikuttaisivat koko systeemin säätöön. Tämän korjaamiseksi tutkimuksessa todetaan, että muodostamalla systeemin jokaisesta yksiköstä tehokkuuskäyrät, jotka kertovat kyseisen yksikön tuottaman voiman eri ajan hetkillä. Tehokkuuskäyrissä on kuitenkin otettava huomioon, että ne kertovat vain tietyn hetken tilanteen eivätkä näytä pitkän aikavälin tehokkuutta.

Reaaliaikainen optimointi ottaa edellisiä paremmin huomioon joen virtausparametreja, jotka tutkimus esittää pelkkään kustannusfunktioon perustuvan säädön toiseksi ongelmaksi. Virtausparametrien tarkka mallintaminen on erittäin vaikeaa, sillä jos koko systeemin säätö perustuu virtausparametreille niin pelkkä tarkkojen mittauslaitteiden asennus tulee erittäin kalliiksi. Virtausmittauksen sijaan taloudellisesti tehokkaampi tapa olisi mitata veden syötön painetta paineanturilla. Paine-ero mitattaisiin veden syötön alkupäästä ja verrattaisiin syötön loppupään paineeseen. Reaaliaikaisessa optimoinnissa on erittäin tärkeää, että säätö suoritetaan tarpeeksi nopeasti jottei systeemi muutu epästabiiliksi. Optimoinnissa ei myöskään ole matemaattista mallia ennen kuin ensimmäiset tehokkuuskäyrät on voitu laskea ja ongelma on lisäksi luonnostaan kombinatorinen. Heuristiikkojen käyttöä suositellaan optimoinnin ratkaisemiseksi, joilla on helpompi löytää sopiva ratkaisu tarpeeksi nopeasti globaalin optimin ratkaisemisen sijasta. Reaaliaikaisen optimoinnin etuna on se, että se ei vaadi aikaisempaa tietoa voimalaitoksen tehokkuudesta vaan algoritmi aloitetaan arvaamalla, että jokaisella yksiköllä on samanlaiset kustannusfunktiot. Eli toisin sanoen jokainen voimalaitos käyttää saman verran vettä tuotettua kilowattituntia kohden. Kustannusfunktiot oletetaan

niin pitkään samoiksi kunnes heuristiikkojen avulla löydetään paras operointipiste, eli paras veden syöttöpaine. Reaaliaikainen optimointi siis perustuu oletukselle, että veden syötön loppupaine on kääntäen verrannollinen syötetyn veden määrään ja että tehokkuusfunktiota maksimoimalla saadaan koko voimalaitoksen optimi. Tutkimuksen mukaan säästöjä saadaan jo pelkästään sillä että virtausta mitataan pelkästään paine-erona. [Abreu, Bastos, Bortoni ja Kawkabani, 2014]

5 YHTEENVETO

Vesivoima energiantuotantomuotona on erittäin kilpailukykyinen ratkaisu varsinkin nykyisessä maailmantilanteessa, jossa energiatehokkuuden ja päästöjen määrää mitataan entistä enemmän. Kotimaisena energianlähteenä sen lisääminen toisi kilpailuetua ja parantaisi suomalaista energiastrategiaa. Tästä hyötyisivät sekä yritykset että pienkuluttajat. Fossilisten polttoaineiden käytön vähentyessä niiden jättämän tuotantovajeen täyttämiseen tarvitaan hyviä kotimaisia energiantuotantomuotoja, sillä muuten sähkö joudutaan ostamaan ulkomailta. Tosin vaikka vesivoimalla on käyttämätöntä potentiaalia Suomessa, niin etenkin nykyisten laitosten hyötysuhteen tehostaminen olisi luultavasti parempi ratkaisu kuin uusien voimalaitosten rakentaminen. Tosin alle 1MW:n laitosten lisääminen koskiin tai pienempiin virtoihin voisi olla käyttökelpoinen ratkaisu varsinkin pienemmille paikkakunnille. Tällainen malli tosin toisaalta vaatisi jo lainsäädännöllistä muutosta. Maailmanlaajuisesti vesivoimalla olisi paljon enemmän hyödyntämätöntä potentiaalia.

Työssäni esittelemät mallit vesivoimalaitoksesta, joesta ja useamman vesivoimalaitoksen systeemistä ovat varmasti vain yksi tapa monesta eri mahdollisuudesta. Lähdekirjallisuudenkin perusteella mallit muuttuvat sen mukaan mitä eri reunaehtoja siinä otetaan huomioon sekä joidenkin, esimerkiksi joen pohjan karheuden tarkka matemaattinen mallinnus, on lähes mahdotonta. Tosin tutkimukseni perusteella vedenpinnan korkeuseroja ja voimalaitoksessa käytettävää putoamiskorkeutta voidaan pitää systeemin mallinnuksen tärkeimpinä reunaehtoina. Kiinnostavaksi jää miten esimerkiksi kalaportaan lisääminen laitoksen viereen tai erillaisten turbiinien käyttö vaikuttaisi koko ketjun säätöön. Huomioitavaa on myös, ettei joen virtausnopeutta oteta myöskään mallissa huomioon.

Marginaalihintaisella optimoinnilla saadaan taloudellisesti tehokkaasti toimiva systeemi. Marginaalihintaa seuraamalla päivän sisällä voidaan pitää systeemi tehokkaana lyhyenkin aikavälin sisällä. Koska malliin on sisällytetty veden pinnankorkeuden ja joen virtauksen parametrit, voidaan ajatella, että se ottaa myös joen ympäristön ja ekosysteemin jollain

tasolla huomioon. Tosin hyvällä säädölläkään ei välttämättä pystytä vaikuttamaan, jos veden määrä vähenee huomattavasti tai tuotanto-olosuhteet ovat muuten heikot.

6 LÄHDELUETTELO

Energiateollisuus., 2015. Sähköntuotanto. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto> [viitattu 3.11.2015]

Energiateollisuus., 2015. Säättövoima. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto/saatovoima> [viitattu 5.11.2015]

Energiateollisuus., 2015. Tuulivoima. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/tuulivoima> [viitattu 5.11.2015]

Energiateollisuus., 2015. Vesivoima. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima> [viitattu 3.11.2015]

Kemijoki OY., 2015. Sääntely ja velvoitteet. Julkaisupaikka: Rovaniemi Saatavissa: <http://www.kemijoki.fi/vesivoima/saantely-ja-velvoitteet.html> [viitattu 20.11.2015]

Kemijoki OY., 2015. Vesivoima. Julkaisupaikka: Rovaniemi Saatavissa: <http://www.kemijoki.fi/vesivoima.html> [viitattu 5.11.2015]

Kemijoki OY., 2015. Vesivoiman tuotanto. Julkaisupaikka: Rovaniemi Saatavissa: <http://www.kemijoki.fi/vesivoima/vesivoiman-tuotanto.html> [viitattu 5.11.2015]

Luonnonvarakeskus., 2015. Kalatiestrategia. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: http://www.rktl.fi/kala/rakennetut_joet/vaelluskalakantojen_palauttaminen_kalatiet/kalatiestrategia.html (viitattu 1.12.2015)

Motiva., 2015. Vesivoima, Ympäristövaikutukset. Julkaisupaikka: Helsinki Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/vesivoima [viitattu 20.10.2015].

On the modelling and solving of an optimal control problem of hydro-electric power plant systems, Lautala, P.A.J., 1978

On short term optimal scheduling of hydro-electric power plant chains, Pentti Lautala ja Jussi Orava, 1976

Online optimal power distribution between units of a hydro power plant, Edson C. Bortoni, Guilherme S. Bastos, Thiago M. Abreu, Basile Kawkabani, 2014

Some mathematical techniques for the solution of dynamical optimization problems; application to hydro-electric power plant systems, Pentti Lautala, 1978

The World Bank, 2015. Hydropower overview. Julkaisupaikka: Washington DC
Saatavissa: <http://www.worldbank.org/en/topic/hydropower/overview> [viitattu 3.12.2015]