

Sähkömarkkinoiden ennusteita

Stefan Jakobsson, Juha Forsström, Göran Koreneff

TEKES

TEKNOLOGIAN KEHITTÄMISKESKUS

 **VTT**

TESLA-raportti nro 15/99

Sähkömarkkinoiden ennusteita

Stefan Jakobsson
VTT Automaatio
PL 1301, 02044 VTT
puh. (09) 4561, telefax (09) 456 6752

Juha Forsström
VTT Energia
PL 1606, 02044 VTT
puh. (09) 4561, telefax (09) 456 6538

Göran Koreneff
VTT Energia
PL 1606, 02044 VTT
puh. (09) 4561, telefax: (09) 456 6538

Espoo, 6.5.1999



AUTOMAATIO

Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT Automaatio, Teollisuusautomaatio PL 1301 02044 VTT	Tilaaaja	
Projektipäällikkö Tutkija Göran Koreneff/VTT Energia	Tilaaajan yhdyshenkilö	
Diaarinumero	Tilaus- tai viitenumero	
Projektin nimi ja suoritetunnus Sähkökaupan tietojärjestelmien kehittäminen	Raportin numero ja sivumäärä TESLA-raportti nro 15/99, 22 sivua	Päiväys 6.5.1999

Raportin nimi ja tekijät SÄHKÖMARKKINOIDEN ENNUSTEITA STEFAN JAKOBSSON, JUHA FORSSTRÖM, GÖRAN KORENEFF

Tiivistelmä Raportissa kuvataan malli, jonka avulla on mahdollista laskea keskipitkän tähtäimen ennusteita sähkön spot-markkinoilla. Oletuksena on että markkinat ovat täydelliset. Mallin avulla voidaan kuvata useita alueita, joiden välillä on siirtorajoituksia. Alueen lämpövoimatuotanto kuvataan marginaalikustannusten odotusarvokäyrällä, vesivoima kuvataan vesialtailla joiden dynamiikka on myös huomioitu. Vaihto ulkopuolisten alueiden kanssa on myös mahdollista. Mallin ratkaisu generoi useita suureita, joista yksi on marginaalinen tuotantokustannus. Malli on formuloitu LP-muotoon, joten ratkaisu onnistuu helposti standardiohjelmistoilla. Muutama esimerkinomainen laskentatulokset esitetään lyhyesti.
--

Raportin päävastuullinen laatija Tutkija Stefan Jakobsson	Tarkastanut
Hyväksynyt	Julkisuus julkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	4
1.1 SAMKJØRINGSMODELLEN	4
1.2 MARS	5
2. PERUSMALLI - TEORIA	6
2.1 SAARIMALLI	6
2.2 MONEN ALUEEN MALLI - TASAINEN KULUTUS	8
2.3 MONEN ALUEEN MALLI - KOLME KULUTUSTASOA	10
3. MALLIELEMENTIT	11
3.1 KUORMA	11
3.2 LÄMPÖVOIMATUOTANTO	13
3.3 JÄÄNNÖSVESI	15
3.4 VESIVOIMATUOTANTO	16
4. ESIMERKKIMALLI	17
4.1 LÄHTÖTIEDOT	17
4.2 ESIMERKKIAJO	18
5. TOTEUTUS	20
6. JATKOKEHITYS	20
7. VIITTEET	21

1. JOHDANTO

Sähkömarkkinoiden perustuote on 1 MWh:n energia vaihdettuna spotmarkkinoilla /1/. Kaikki muut sähkötuotteet ovat jossain suhteessa tämän tuotteen hintaan. Markkinoiden spothinta voidaan tulkita markkina-alueen muuttuvaksi tuotantokustannukseksi. Täten sähkövoimajärjestelmässä, jossa on suuri osuus vesivoimaa, kuten pohjoismaissa, marginaalihintaan vaikuttaa voimakkaasti vesialtaiden sisältö ja ennustettu tulovirtaama. Koska Suomi on nyt kiinteä osa pohjoismaisia sähkömarkkinoita, on vesialtaiden vaikutus välttämättä huomioitava sähkön hintaennusteen laadinnassa.

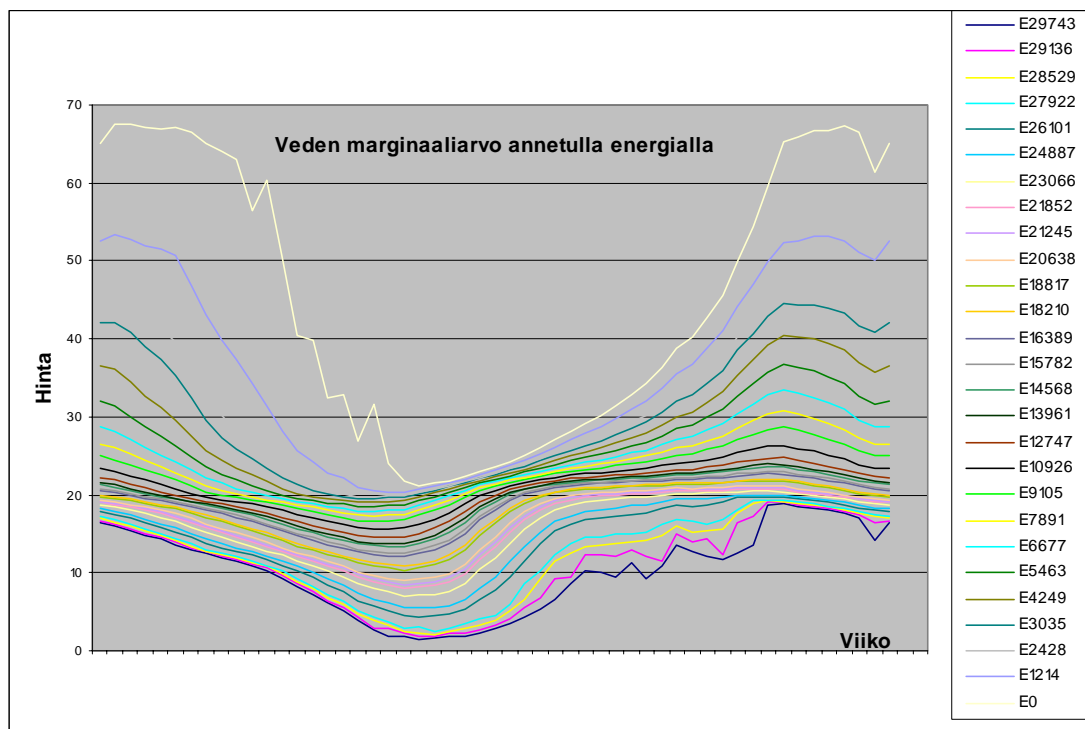
Hintaennusteita voidaan tehdä eri aikavälille. Lyhyen aikavälin hintaennuste voidaan laskea tilastollisin menetelmin muutamaksi viikoksi eteenpäin /2/. Keskipitkän aikavälin ennusteet, kuukausi - muutama vuosi eteenpäin, voidaan laskea eri menetelmillä. TESLA-projektissa on kokeiltu ekonometrisia malleja tähän tarkoitukseen /3/. Norjassa kehitetty Samkjøringsmodellen (tai EMPS-malli) /4/ on esimerkki raskaasta mallista, jonka avulla voi suunnitella vesivoiman optimaalista käyttöä ja sivutuotteena syntyy hintaennuste.

1.1 SAMKJØRINGSMODELLEN

Samkjøringsmodellen on stokastinen malli, joka optimoi ja simuloi systeemin käyttöä sähkövoimajärjestelmissä, jossa vesivoiman osuus on suuri. Malli generoi optimaalisen vesivoiman käyttösuunnitelman epävarmassa tilanteessa, missä veden tulovirtaama, sähkön kysyntä, lämpövoiman käyttö ja vienti/tuonti-arvot ovat epävarmoja.

Mallissa on kaksi osaa:

- Vesiarvojen laskentaosa laskee veden marginaalisen arvon joukolle alueellisia alijärjestelmiä. Yksinkertaistettu esimerkki tämän vaiheen yhdestä tuloksesta on kuvassa 1. Kuva esittää erään osa-alueen marginaaliset vesiarvot. Esimerkiksi toinen käyrä ylhäältä kertoo yhden MWh:n arvon kun alueen altaissa on 1214 GWh vettä vuoden eri viikkojen aikana. Tämä arvo on tietenkin riippuvainen ympäröivän maailman markkinatilanteesta. Samalla se kuvaa myös sitä, miten altaiden tulovirtaaman odotetaan muuttuvan. Sen takia yhden MWh:n arvo on paljon korkeampi talvella kuin keväällä.
- Simulointiosa laskee veden optimaalisen käytön joukolle hydrologisia vuosia (= joukolle tulovirtaamasarjoja) sovittamalla vesi- ja lämpövoiman käyttö yhteen vesiarvotaulukoiden avulla. Jokaisen alueen yhteenlaskettu vesivoimatuotanto jaetaan tuotantolaitosten kesken kullekin viikolle. Tämä edellyttää, että vesivoimajärjestelmä on tarkoin kuvattu.



Kuva 1. Esimerkki alueellisista vesiarvodiagrammeista.

1.2 MARS

VTT Automaatiossa on aikaisemmin kehitetty sähkömarkkinasimulaattori Mars. Mars simuloi norjalaistyyppisiä sähkömarkkinoita ja laskee spotmarkkinahinnan osto- ja myyntitarjoukseyrien leikkauspisteenä. Kaikki osto- ja myyntitarjoukset esitetään sähkön ostettavan tai myytävän määrän ja hinnan yhteyttä kuvaavina käyrinä - samalla tavalla kuin NordPoolin tarjoukset. Mars generoi nämä tarjoukset käyttämällä hyväksi tietoa tuotantojärjestelmän ja kulutuksen rakenteista. Kulutus ja osa tuotannosta (yhteistuotanto, pakkovesituotanto, osa tuonnista) muuttuu vuoden- ja vuorokaudenajan mukaan historiatietoihin perustuvien tyyppi-profiilien mukaisesti.

Mars-simulaattorin vesivoimakuvauks on puutteellinen. Itse asiassa Mars ei selviä kunniallisesti pohjoismaisten markkinoiden simuloinnista. Tämän takia ryhdyttiin tutkimaan, miten vesivoiman ja varsinkin veden varastointikapasiteetin mallittamista voitaisiin parantaa. Ensimmäiseksi ajateltiin Samjøringsmodellenin, tai ainakin sen tulosten, liittämistä Marsiin. Samjøringsmodellenin on kuitenkin hyvin raskas ohjelmisto, joka vaatii suurta laskentakapasiteettia ja suuria määriä syöttötietoja. Sen takia tästä ajatuksesta luovuttiin. Samjøringsmodellenin tulosten ostaminen ei myöskään liene realistista Suomessa. Ratkaisuna ryhdyttiin kehittämään mallia, joka olisi Samjøringsmodellenia yksinkertaisempi ja helpokäyttöisempi, mutta joka kuitenkin sisältäisi vesivoiman käyttöön liittyvän dynamiikan: yhtenä hetkenä tuotettu energiamäärä vaikuttaa sen jälkeen tuotettavissa olevaan määrään. Seuraavassa kuvataan laaditun mallin rakenne.

2. PERUSMALLI - TEORIA

Vapilla sähkömarkkinoilla tuottajat pyrkivät voiton maksimointiin /5/. Täydellisen kilpailun vallitessa tämä on ekvivalenttinen oletus sen kanssa, että kokonaisjärjestelmässä pyritään tuotantokustannusten minimointiin /17/. Oligopolistisessa kilpailutilanteessa asia ei välttämättä ole näin. Asian yksinkertaistamiseksi oletetaan jatkossa, että kilpailu on täydellinen.

2.1 SAARIMALLI

Tässä esitetty yhden eristetyn alueen malli, saarimalli, perustuu lähteessä /6/ esitettyyn malliin.

Sähköntuotantojärjestelmässä optimaalinen tapa käyttää vesivoimaa on korvata sillä marginaalikustannuksiltaan kallein lämpövoima. Tämän periaatteen johdonmukainen noudattaminen Suomessa johtaisi vesivoiman käyttöön pelkästään talven korkeimman kulutuksen aikana. Käytännössä kuitenkin erilaiset rajoitukset – vesialtaiden kapasiteetti, asennettu vesivoimateho, minimivirtausten ylläpitäminen ym. – estävät tämänkaltaisen vesivoimatuotannon ajoituksen.

Lämpö- ja vesivoimaa yhdistämällä pyritään tuotantokustannusten minimointiin annettujen rajoitusten sallimissa rajoissa. Sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen yhtäsuuruus

$$L_k = W_k^H + W_k^T \quad (1)$$

on oltava voimassa joka ajanhetkellä k .

L_k on kuorma,
 W_k^H on vesituotanto ja
 W_k^T on lämpövoimatuotanto.

Aikaindeksi k edustaa tässä viikon pituista jaksoa.

Tuotantokustannusten minimointi voidaan esittää muodossa

$$\min C = \sum_{k=1}^K \{ C_k^T(W_k^T) + C_k^H(W_k^H) \} - F_K^H(X_K^H), \quad (2)$$

missä

- C_k^H on vesivoiman tuotantokustannukset viikon k aikana,
 C_k^T on lämpövoiman tuotantokustannukset viikon k aikana.
 K on suunnitteluhorisontti eli viimeinen viikko, jonka yli lasketaan.
 X_K^H on vesialtaan energiasisältö viikon K lopussa.
 F_K^H on vesialtaiden sisällön arvo suunnitteluhorisontilla.

Kokonaiskustannusten määrä ei sinänsä ole tässä kiinnostava suure, sillä kustannusminimoinnilla halutaan vain kuvata markkinoiden toimintaa: kunkin tuottajan maksimoidessa oman voittonsa täydellisen kilpailun vallitessa, on seurauksena kokonaiskustannusten minimoituminen. Vesivoiman tuotantokustannukset ovat vakiot, minkä takia ne voidaan jättää tavoitefunktiosta pois. Jos jäännösveden arvo sen sijaan jätetään huomiotta, niin lopputulos on, että altaat ajetaan tyhjiksi; sehän säästää lyhyellä tähtämellä tuotantokustannuksia. Yhtälö (2) yksinkertaistuu siis muotoon

$$\min C = \sum_{k=1}^K C_k^T (W_k^T) - F_K^H (X_K^H) \quad (3)$$

Rajoituksina on vesialtaan tase, vesialtaan koko ja vesituotantorajoitukset:

$$X_{k+1}^H = X_k^H + Q_k^H - W_k^H \quad (4)$$

$$0 \leq X_k^H \leq \bar{X}^H \quad (5)$$

$$\underline{W}^H \leq W_k^H \leq \bar{W}^H \quad (6)$$

missä

Q_k^H on tulovirtaama altaaseen viikon k aikana.

\bar{X}^H on altaan sisällön yläraja energiana.

\underline{W}^H on vesituotannon minimiraja.

\bar{W}^H on vesituotannon kapasiteetti.

Yllä kuvatulla mallilla voi siis laskea yhden alueen tuotantojakautuma (vesivoima/ lämpövoima), jos siirtorajoituksia ei esiinny, eikä yhteyksiä ulkomaailmaan ole. Lisäksi oletetaan, että kuorma on tasaisesti jakautunut viikon jokaiselle tunnille. Jos tavoitefunktio (3) on lineaarinen, niin kyseessä on LP-malli, jonka ratkaisemiseksi on olemassa tehokkaita ohjelmistoja. Sähkötuotannon marginaalihinta syntyy tällöin kuormarajoituksen, yhtälö (1), duaalina. Se ilmaisee, kuinka paljon tavoitefunktion arvo muuttuu, jos kuormaa lisätään yhdellä yksiköllä. Tämä voidaan tehdä oletuksilla katsoa spotmarkkinahinnan alarajaksi.

2.2 MONEN ALUEEN MALLI - TASAINEN KULUTUS

Yhden alueen malli on kykenemätön huomioimaan pohjoismaisten sähkömarkkinoiden oleellisia piirteitä, mm. sitä, että se koostuu useasta eri alueesta. Sen vuoksi mallia laajennettiin useita erillisiä alueita yhteenkytkeväksi kokonaisuudeksi, jossa jokaisella alueella on oma tuotanto- ja kulutusrakenteensa. Alueiden välillä voi esiintyä siirtorajoituksia ja myös ulkopuolisten, malliin kuulumattomien, alueiden kanssa on mahdollista käydä sähkökauppaa.

Tavoitefunktio (3) pitää muokata sellaiseksi, että se sisältää jokaisen mallitetun alueen tuotantokustannukset ja jäännösveden arvot. Kustannuksista pitää lisäksi vähentää ulkopuolisille alueille viedyn sähkön arvo sekä lisätä ulkopuolelta tuodun sähköenergian kustannus. Näin mallitetuilla alueilla kulutetaan mahdollisimman halpaa sähköä. Tavoitefunktio muuttuu muotoon

$$\min C = \sum_{i \in \Gamma} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\{ C_{k,i}^T(W_{k,i}^T) - \lambda_i^E E_{k,i}^X + \lambda_i^I I_{k,i}^X \right\} - F_{K,i}^H(X_{K,i}^H) \right\} \quad (7)$$

missä

- i on mallitettu alue
- Γ on kaikkien mallitettujen alueiden joukko
- $W_{k,i}^T$ on alueen i lämpövoimatuotanto viikon k aikana (energia)
- $C_{k,i}^T$ on lämpövoiman tuotantokustannukset viikon k aikana alueella i
- $X_{K,i}^H$ on alueen i vesialtaan energiasisältö suunnitteluhorisontilla
- $F_{K,i}^H$ on alueen i vesialtaan sisällön arvo suunnitteluhorisontilla
- λ_i^E on alueelta i ulkopuolisille (ei mallitetuille) alueille viedyn sähkön arvo / energiayksikkö
- $E_{k,i}^X$ on alueelta i ulkopuolisille (ei mallitetuille) alueille viety sähköenergia
- λ_i^I on alueelle i ulkopuolisilta (ei mallitetuilta) alueilta tuodun sähkön arvo / energiayksikkö
- $I_{k,i}^X$ on alueelle i ulkopuolisilta (ei mallitetuilta) alueilta tuotu sähköenergia.

Saarimallin yhtälöt (4)-(6) pitää valita koskemaan yhtä aluetta kerrallaan seuraavasti:

$$X_{k+1,i}^H = X_{k,i}^H + Q_{k,i}^H - W_{k,i}^H, \forall k, i \quad (4')$$

$$0 \leq X_{k,i}^H \leq \bar{X}_i^H, \forall k, i \quad (5')$$

$$\underline{W}_i^H \leq W_{k,i}^H \leq \bar{W}_i^H, \forall k, i \quad (6')$$

Käytännön laskennassa on valittu vesituotannon minimiarvoksi 30 % ylärajasta. Kuorma/tuotantotasapaino (1) muuttuu nyt muotoon

$$W_{k,i}^H + W_{k,i}^T - E_{k,i} + I_{k,i} - E_{k,i}^X + I_{k,i}^X = L_{k,i}, \forall k, i \quad (8)$$

missä

- $E_{k,i}$ on vienti alueelta i muille mallitetuille alueille viikon k aikana
 $I_{k,i}$ on tuonti muilta mallitetuilta alueilta alueelle i viikon k aikana
 $L_{k,i}$ on kuorma alueella i viikon k aikana.

Tässä voidaan vielä määrittellä vienti ja tuonti seuraavasti:

$$E_{k,i} = \sum_{\substack{j \in \Gamma \\ i \neq j}} E_{k,i,j}, \forall k, i \quad (9)$$

$$I_{k,i} = \sum_{\substack{j \in \Gamma \\ i \neq j}} I_{k,i,j}, \forall k, i \quad (10)$$

missä

- $E_{k,i,j}$ on vienti alueelta i alueelle j viikon k aikana
 $I_{k,i,j}$ on tuonti alueelle i alueelta j viikon k aikana.

Olisi luontevaa asettaa $E_{k,i,j} = I_{k,j,i}$. Rajakustannusten ollessa samat tämä johtaa kuitenkin tilanteisiin, joissa sekä $E_{k,i,j} > 0$ että $E_{k,j,i} > 0$, eli siirto tapahtuu molempiin suuntiin yhtä aikaa samaa siirtoyhteyttä käyttäen. Tämän estämiseksi on otettu käyttöön vientivero tai häviö ja asetettu

$$I_{k,i,j} = 0,99 * E_{k,j,i}, \forall i, j, k \quad (11)$$

mikä poistaa ongelman. Lisäksi on varmistettava, että siirtokapasiteetti ei ylitä, eli

$$I_{k,i,j} \leq \bar{T}_{i,j}, \forall i, j, k \quad (12)$$

$$I_{k,i}^X \leq \bar{T}_{i,X}, \forall i, k \quad (13)$$

$$E_{k,i}^X \leq \bar{T}_{X,i}, \forall i, k \quad (14)$$

missä

- $\bar{T}_{i,j}$ on siirtokapasiteetti alueelta i alueelle j
 X edustaa ulkopuolista, ei mallitettua aluetta

Tämän lisäksi markkina-alueen ulkopuolisten kanssa käytävää sähkökauppaa on ohjattava energia- ja tehorojoituksin. Nämä on määriteltävä erikseen kullekin kauppaa käyvän alueelle seuraavasti:

$$0 \leq \sum_{k=1}^K E_{k,i}^X \leq \bar{E}_i^X, \forall i \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^K I_{k,i}^X \leq \bar{I}_i^X, \forall i \quad (16)$$

$$E_{k,i}^X \geq \underline{E}_i^{X,P}, \forall i, k \quad (17)$$

$$I_{k,i}^X \geq \underline{I}_i^{X,P}, \forall i, k, \quad (18)$$

missä

\bar{E}_i^X on alueelta i ulkopuolisille alueille viedyn energian yläraja kaikkien laskentaviikkojen aikana

\bar{I}_i^X on alueelle i ulkopuolisilta alueilta tuodun energian yläraja kaikkien laskentaviikkojen aikana

$\underline{E}_i^{X,P}$ on alueelta i ulkopuolisille alueille viedyn tehon alaraja

$\underline{I}_i^{X,P}$ on alueelle i ulkopuolisilta alueilta tuodun tehon alaraja

Yhteenvedon voidaan siis sanoa että monialuemalli muodostuu seuraavista osista:

- kustannusfunktio (7)
- energiayhtälöt (4'), (5'), (15), (16)
- tehoyhtälöt (6'), (8)-(14), (17), (18)

2.3 MONEN ALUEEN MALLI - KOLME KULUTUSTASOA

Yllä kuvatussa mallissa kuorma on sama viikon kaikilla 168 tunnilla. Tästä seuraa väistämättä tietty "tasapaksuus", eli vaihtelua ei kovin paljon esiinny hinnoissa eikä muissakaan suureissa. Realistisempi kuvaus saadaan, kun kuormitusvaihteluita kuvataan kolmiportaisella pysyvyyskäyräapproksimaatiolla. Portaat kuvaavat viikon huippu-, keski- ja pohjakulutusta. Tuntien määrä kussakin portaassa on vapaasti valittavissa.

Tämä lähestymistapa johtaa laskentamallin kolminkertaistumiseen. Lisäksi, koska jaksot ovat nyt eripituisia, joudutaan tavoitefunktiossa painottamaan jaksot eri tavalla. Tästä seuraa että kuorman duaali ei enää suoraan kuvaa marginaalihintaa, vaan tarvitaan LP-mallin tulosten jälkiprosessointia, joka skaalaa duaalin arvot hinnaksi.

Lähteessä /6/ on esitetty tapa laskea sähkön tuntihintoja viikoittain saarimallissa. Vesivoiman tuotanto sijoitetaan aina viikon huippukuorman ajaksi pyrkien pitämään lämpövoimatuotannon marginaalikustannus vakiona. Jos vesivoimakapasiteetti ei kuitenkaan välttämättä riitä tähän, vaan huippukulutuksen aikana joudutaan myös käyttämään marginaalikustannuksiltaan kalliimpaa lämpövoimaa, niin viikon keskihinta lasketaan tuntihintojen painotettuna keskiarvona.

3. MALLIELEMENTIT

3.1 KUORMA

Sähkön kulutukselle on ominaista jaksollinen vaihtelu. Jaksoja on eripituisia, sekä vuoden mittaisia että lyhyempiä, viikon ja vuorokauden mittaisia. Kuormituksen mallinnus on Suomessa hyvin tutkittu alue. On olemassa joukko indeksisarjoja /7/, joiden avulla on kuvattu erityyppisten kuluttajaryhmien keskimääräistä käyttäytymistä. Tätä mallinnustapaa on tässä käytetty hyväksi.

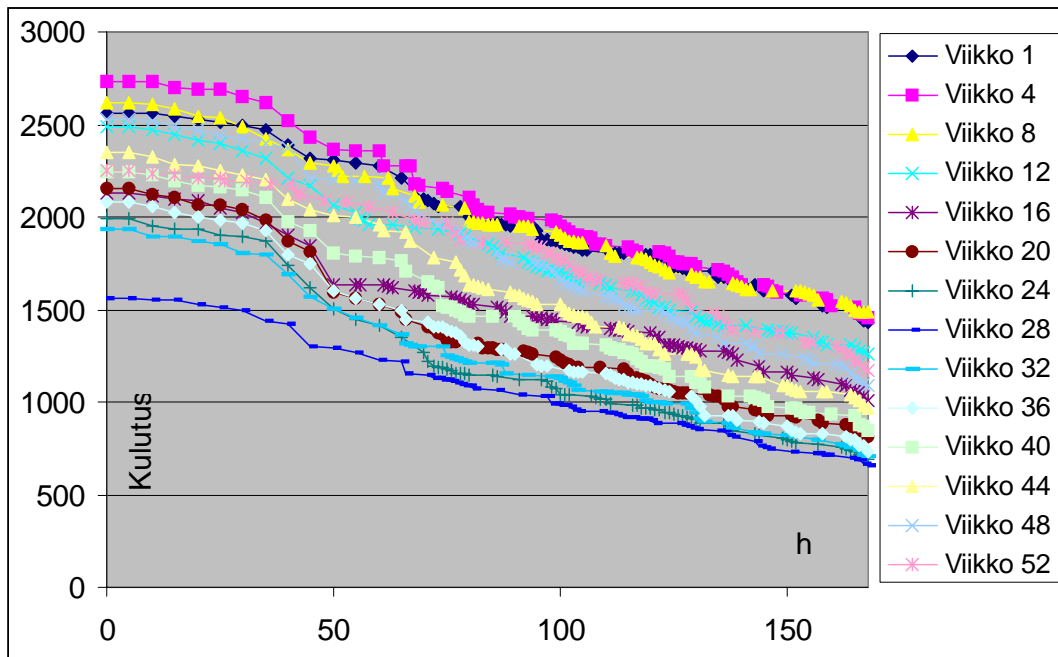
Indeksisarjoja on lähteessä /7/ laskettu yhteensä 18 eri kuluttajatyypille. Se on liian hienosyinen tarkastelu tähän tarkoitukseen, joten niitä on yhdistetty siten, että lopputuloksena on seuraavat viisi sarjaa:

- Kotitaloudet
- Sähkölämmitys
- Palvelusektori
- Teollisuus
- Prosessiteollisuus

Prosessiteollisuuden sarjat perustuvat lähteeseen /8/. Jokaiselle mallitetulle alueelle voidaan käyttää omia aluekohtaisia indeksejä, mutta toistaiseksi vain Suomelle laaditut indeksit ovat olleet käytettävissä. Niitä on käytetty siis kaikilla alueilla. Syöttötietoina malleja rakennettaessa on paitsi indeksisarjat (sisäiset ja ulkoiset) myös vastaavat vuosienergiat.

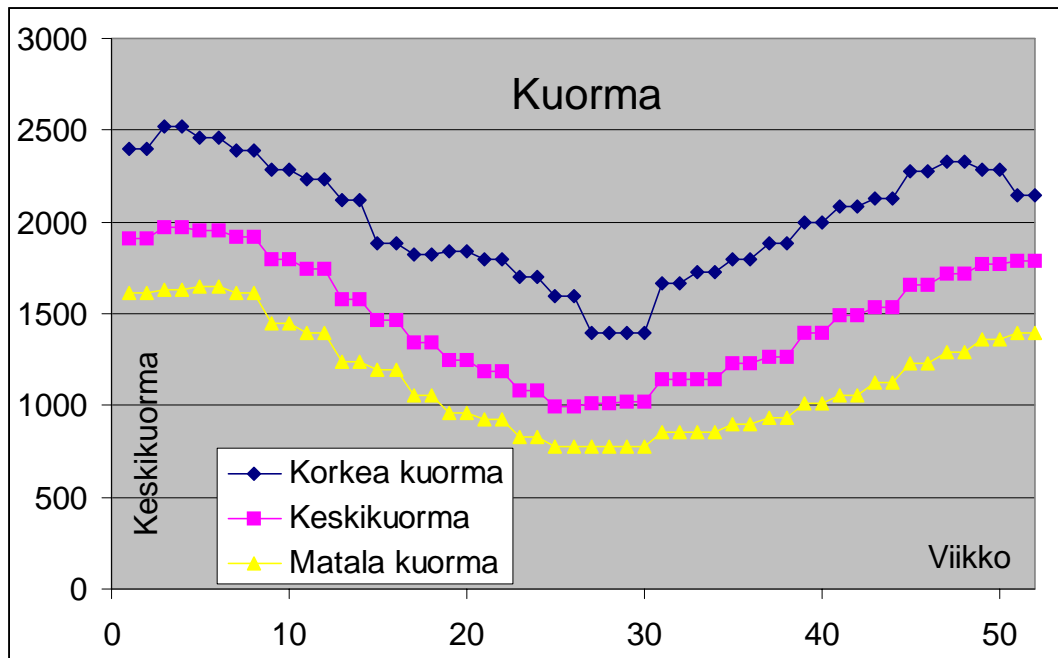
Laskenta-algoritmi on seuraava:

1. Lasketaan alue kerrallaan kulutuksen yhden viikon tuntitehot.
2. Lasketaan kaikkien alueiden vastaavat tuntikohtaiset arvot yhteen.
3. Muodostetaan tästä sarjasta kuormituksen pysyvyyskäyrä (kuva 2).
4. Valitaan pysyvyyskäyrästä m tuntia huippu-, n tuntia keski- ja p tuntia pohjakulutusta ($m + n + p = 168$). Pidetään kirjaa valituista tunneista.
5. Lasketaan vastaavien tuntien keskikulutus alueittain.
6. Toistetaan vaihteet 1-5 jokaiselle viikolle.



Kuva 2. Esimerkki yhden alueen pysyvyyskäyristä.

Esimerkki näin lasketusta yhden alueen kulutusrakenteesta on kuvassa 3. Huomioitava on, että esimerkiksi yhden alueen huippukulutuksen tunnit eivät välttämättä osu yhteen kaikkien alueiden yhteenlaskettujen huipputuntien kanssa. Kappaleessa neljä esitetty pohjoismaiden malli käsittää viisi eri aluetta, joiden kulutus rakenne poikkeaa melko paljon toisistaan. Indekseinä on kuitenkin toistaiseksi käytetty pelkästään Suomea kuvaavia indeksejä.



Kuva 3. Esimerkki erään alueen kuorman jakautumisesta 156 laskentajakson yli.

3.2 LÄMPÖVOIMATUOTANTO

Lämpövoimatuotanto kuvataan mallissa (marginaalihinta, tuotantoteho) -pareista muodostettuna askelkäyränä. Koska tässä on tavoitteena spotmarkkinoiden hintaennuste, jätetään kiinteät kustannukset huomiotta ja käytetään pelkkiä muuttuvia kustannuksia. Puhdas marginaalikustannuskäyrä ei kuitenkaan ole riittävä kustannusten kuvaustapa. Sen lisäksi on jollain tavalla otettava huomioon laitosten käytettävyys. Lopputuloksena pitää olla yksi aggregoitu lineaarinen kustannusfunktio.

Tähän päästään laskemalla marginaalikustannusten odotusarvokäyriä (EIC, Expected Incremental Cost curve) /4/. EIC-käyrä kuvaa marginaalikustannuksia lämpövoimatehon funktiona. Se määritellään seuraavasti:

$$EIC_n(P) = (1 - \eta_n)EIC_{n-1}(P) + \eta_n \{ C_n(P) + EIC_n(P - P_n) \}, \quad (19)$$

missä

P	on teho
P_n	on yksikkö n :n teho
$EIC_n(P)$	on EIC-käyrä sen jälkeen kun yksikkö n on lisätty
$EIC_0(P)$	on $\begin{cases} c_0, & P > 0 \\ 0, & P \leq 0 \end{cases}$
η_n	on yksikkö n :n käytettävyys
$C_n(P)$	on $\begin{cases} c_n, & 0 \leq P \leq P_n \\ 0, & \text{muuten} \end{cases}$
c_n	on yksikkö n :n muuttuva kustannus.

EIC-käyriä laskettaessa on indeksit valittava siten, että $c_n \geq c_{n+1} \forall n$, eli on aloitettava kalleimmasta yksiköstä. Lähtötaso c_0 on oltava kalliimpi kuin kallein yksikkö. Toteutuksessa on valittu $c_0 = c_1^* + 10$, jossa c_1^* on kaikkien alueiden kallein yksikkö.

Ensimmäinen termi yhtälössä (19) kuvaa tilannetta kun yksikkö n ei ole käytettävissä, jolloin uusi käyrä on vanha kerrottuna epäkäytettävyydellä. Toinen termi kuvaa miten uusi yksikkö vaikuttaa, kun se on käytettävissä. Käytettävyysluvut vaikuttavat niin, että hinta lähestyy raja-arvoa c_0 , kun käytettävyys lähestyy nollaa. 100 % käytettävyydellä raja-arvo on alkuperäinen marginaalikustannuskäyrä.

EIC-laskenta on raskas toimenpide. Vaikka EIC-käyräkin on askelkäyrä kuten alkuperäinen marginaalikustannuskäyrä askeleita on usein paljon enemmän. Ero

kahden peräkkäisen kulmapisteen välillä saattaa kuitenkin olla hyvin pieni ja tällöin voidaan pisteet yhdistää laskentatarkkuuden kärsimättä. Toteutuksessa on kaksi parametria, joilla voi valita, miten hinnat ja tehot pyöristetään. Varsinkin hinnan pyöristys vaikuttaa voimakkaasti sekä EIC-käyrien laskenta-aikaan että valmiin LP-mallin kokoon ja ratkaisuaikaan.

EIC-käyrät otetaan LP-mallissa huomioon niin, että yhtälöihin (7) ja (8) sijoitetaan kaavojen (20) ja (21) mukaiset kehitelmät. Lisäksi syntyy uusi rajoitusehto (22), joka rajoittaa tehoaskelien kokoa.

$$C_{k,i}^T(W_{k,i}^T) = \sum_{n=1}^N \pi_{k,i,n} P_{k,i,n}, \forall k, i \quad (20)$$

$$W_{k,i}^T = \sum_{n=1}^N P_{k,i,n}, \forall k, i \quad (21)$$

$$P_{k,i,n} \leq \Pi_{k,i,n} - \Pi_{k,i,n-1}, \forall k, i, n, \quad (22)$$

missä

n on EIC-käyrän askeleet alkaen halvimmasta hinnasta. Lisäksi oletetaan, että EIC-askel (hinta, teho) on (0,0) kun $n = 0$.

N on EIC-käyrän askeleiden lukumäärä

$\pi_{k,i,n}$ on EIC-askeleen hinta

$P_{k,i,n}$ on muuttuja, joka kuvaa kuinka paljon askeleen n lämpötuotannosta on käytössä

$\Pi_{k,i,n}$ on EIC-askeleen teho.

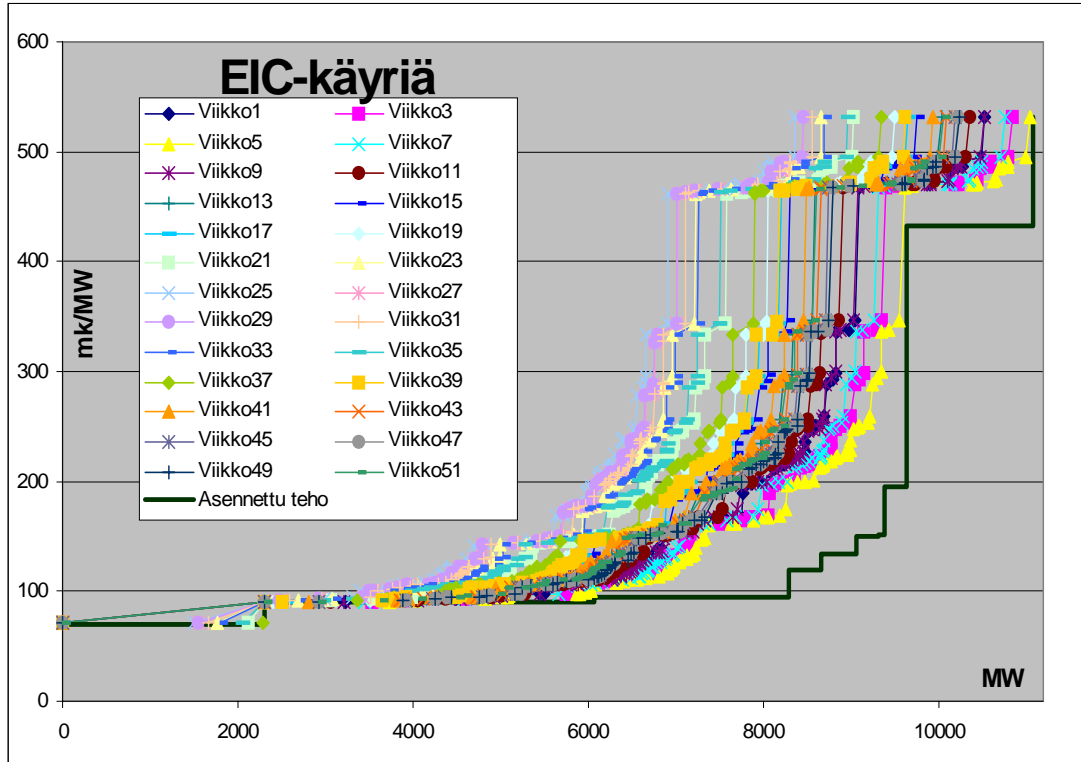
Yhtälö (20) kuvaa tilannetta, jossa viikko on skaalattu tunnin pituiseksi, kuten toteutuksessa on tehty kaikkien yhtälöiden suhteen. Kolmen kulutustason mallissa jokainen termi (20):ssä on vielä painotettava tekijällä $m/168$, jossa m on k.o. tehoportaan pituus tunneissa.

EIC-tekniikkaa käyttäen ei voida sanoa mitään siitä, kuinka paljon milläkin tuotantoyksiköllä on tuotettava. Sen avulla voidaan ainoastaan laskea, kuinka paljon lämpövoimalaitoksilla on tuotettava yhteensä.

Lauhdutusvoiman tuotantokyky on miltei riippumaton vuodenaajasta. Sen sijaan vastapainetuotanto vaihtelee vuodenaikojen mukana. Tämän takia on kaikki tuotantoyksiköt sijoitettu luokkaan, joka kertoo, minkä indeksin avulla tuotantokyky skaalataan. Luokat ovat

- Kaukolämpö
- Prosessivastapaine
- Vakio.

Kuvassa 4 on esimerkki yhden alueen joka toisen viikon EIC-käyristä. Indekseillä skaalaaminen vaikuttaa tehoaskeleen pituuteen ja käytettävyys sen korkeuteen. Kaikki EIC-käyrät ovat askelkäyriä, vaikka kuvassa ei siltä näytä - tämä johtuu visualisointivälineen puutteista.



Kuva 4. 26 EIC-käyriä.

3.3 JÄÄNNÖSVESI

Tavoitefunktiossa (7) jäännösvesitermillä $F_{K,i}^H(X_{K,i}^H)$ yritetään estää, että malli ajaa altaat tyhjiksi lyhytjänteisen kustannussäästön nimessä. Saarimallissa on asetettu

$$F_{K,i}^H(X_{K,i}^H) = \lambda_i^H X_{K,i}^H, \forall i \quad (23)$$

jossa

λ_i^H on annettu hinta/energiayksikkö.

Oikea λ_i^H -arvo voidaan laskea lähteessä /12/ esitettyjen periaatteiden mukaan. Saarimallissa on kuitenkin vain yksi alue i . Kokeilut monialuemallissa ovat osoittaneet, että vesivoima-alueiden vuorovaikutus tekee mallin erittäin herkäksi pienille λ_i^H :n muutoksille. Neljännen desimaalin muutos saattaa heittää viikon K vesimäärä altaan ylärajalta alarajalle. Jos suunnitteluhorisontti K on kaukana tule-

vaisuudessa (4-5 vuotta) ei $X_{K,i}^H$:n arvolla ole juurikaan merkitystä eniten kiinnostavaan jakson alkupään tilanteeseen. Laskenta-ajat venyvät kuitenkin tällöin pitkiksi.

Tähän ongelmaan on etsitty pragmaattinen ratkaisu: syöttötiedossa voidaan antaa paitsi altaiden sisältö alussa myös altaiden sisältö lopussa (molemmat prosentteina maksimisisällöstä). Tällöin tulostiedoissa vastaava veden jäännösarvo saadaan vesialtaan suunnitteluhorisontin vesitason duaalina. Vaihtoehtoisesti on myös säilytetty mahdollisuus antaa λ_i^H suoraan (kunhan kaikille alueille käytetään samaa menetelmää).

3.4 VESIVOIMATUOTANTO

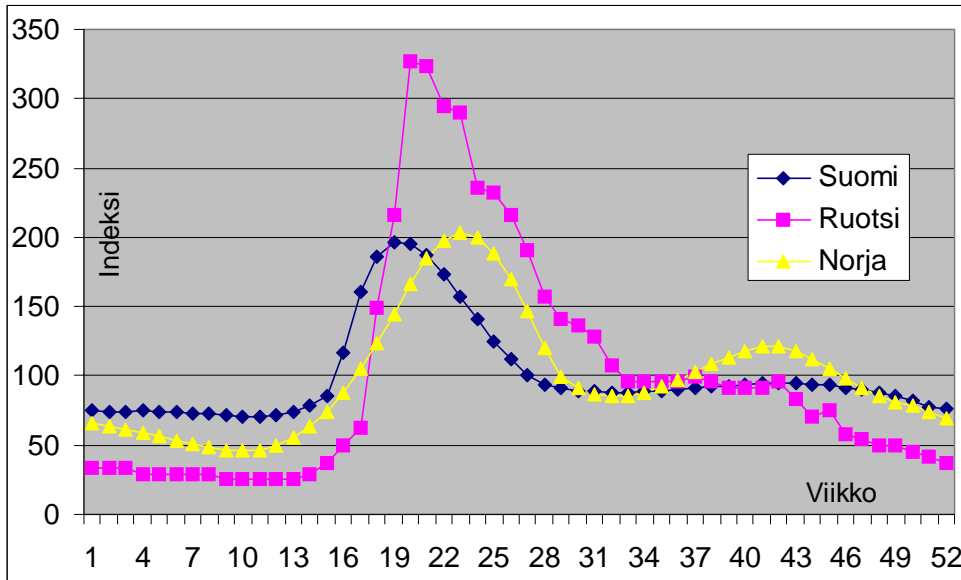
Vesialtaan dynamiikkaa kuvaavassa yhtälössä (4') on Q-termi ratkaisevan tärkeä. Se kuvaa tulovirtaamaa vesivarastoihin, ja johtuu siis perimmältään sadannasta, lumen sulamisesta, haihtumisesta ym. Nämä ovat asioita, joita ei kovin hyvin voi ennustaa pitkälle tulevaisuuteen. Sen takia on käytettävä historiallisia arvoja. Ensi vaiheessa on yritetty selvittää keskimääräisiä arvoja – keskimääräinen tulovirtaama voimalaitosaltaihin viikossa – 52 numeron aikasarjoina. Seuraavassa on lyhyt kuvaus niistä tiedoista, joihin kunkin maan nykyiset virtaamatiedot perustuvat.

1. **Suomi.** Viikko on yksikkö, jota Suomen hydrologisissa tilastoissa ei käytetä. Saatavana on päivä- ja kuukausipohjaisia arvoja. Päiväkohtaisten arvojen saaminen edellyttäisi hydrologisen tietorekisterin (HYDTREK) ostamista Suomen ympäristökeskukselta. Kuukausikohtaisia virtausarvoja on julkaistu hydrologisissa vuosikirjoissa /9/. Arvot eivät kuitenkaan millään tavalla kuvaa vesivoimaloille tulevaa virtaamaa, vaan lähteessä on luetteloitu mittaustuloksia eri joilta Suomesta. Ensimmäiseksi approksimaatioksi on laskettu yhteen kaikki lähinnä merta tai maarajoja olevat mittapistet (keskiarvot 1961-1990) ja oletettu, että näin syntyvä profiili kuvaa voimalaitosten varastoaltaalle tulevaa virtaamaa. Tämän jälkeen nämä 12 pistettä sovittiin käyrään viikkoarvojen laskemista varten.

2. **Ruotsi.** Svenska kraftverksföreningens kotisivuilla webissä /10/ on kuva "Tillrinningens variation i de kraftproducerande älvarna", ja siinä kuvaaja "Normalårstillsrinning". Sitä on käytetty tulovirtaamana

3. **Norja.** Norges vassdrags- og energidirektoratn kotisivuilla webissä /11/ on joukko vesitilastoja. Datalaatu on (tarkoituksellisesti?) huono, mutta yhdistelemällä, laskemalla ja karsimalla on saatu aikaiseksi uskottavan näköinen käyrä. Aikaresoluutio on kuukausi, joten samalla käsittelyllä kuin Suomen tapauksessa on saatu viikkoarvoja. Mukaan laskettujen jokien edustavuudesta ei ole tietoa.

Tanskan vesivoima on jätetty huomiotta. Kuvassa 5 on tulovirtaaman indeksikäyriä kolmessa maassa. Pyöreät muodot Suomen ja Norjan tapauksessa on seuraus lähtödatasta ja laskentatavasta. Mikään vesivuosi ei ole kuitenkaan keskimääräinen, joten nämä käyrät ovat vain suuntaa antavia.



Kuva 5. Keskimääräiset tulovirtaamat indekseinä.

4. ESIMERKKIMALLI

4.1 LÄHTÖTIEDOT

Esimerkkimallina on käytetty yhteispohjoismaisia markkinoita kuvaavaa mallia, jossa on viisi aluetta: Suomi, Ruotsi, Norja, Itä-Tanska ja Länsi-Tanska. Tanska on jaettu kahtia, koska Tanska on käytännössäkin jaettu kahteen osaan ilman minkäänlaista yhdistävää siirtoyhteyttä. Sähköjärjestelmiä kuvaavat parametrit on yritetty valita mahdollisimman hyvin nykytilanteen mukaisiksi. Lähteinä on käytetty mm. /10, 14, 15, 16/. Erilaiset tilastointi- ja raportointitavat ovat kuitenkin vaikeuttaneet tätä. Lisäksi joitakin tietoja on jouduttu arvioimaan. Esimerkki yhden alueen syöttötiedoista on kuvassa 6.

Perustiedot

Alue: Suomi Tunnus: F

Kulutusrakenne:

	GWh bruttokulutus vuodessa
Kotitaloudet	11853
Sähkölämmitys	7761
Palvelusektori	12000
Teollisuus	6000
Prosessiteollisuus	36000

Tilasto:

Kulutus	73614 GWh/a
Kulutus keskim.	8403 MWh/h
Vesituotanto	2250 MW
Lämpötuotanto	11080 MW
Tuotanto yht.	13330 MW
Ulkop. nettovaihto	4300 GWh/a

Tuotantorakenne:

Vesivoima	
Maks. teho, MW	2250
Altaiden maks. sisältö, GWh	4900

Vaihto ulkopuolisten alueiden kans:

Vienti, GWh/a	0
Vientihinta, mk/MWh	0
Tuonti, GWh/a	4300
Tuontihinta, mk/MWh	80
Min. vienti, MW	0
Min. tuonti, MW	400

Lämpötuotanto Tapa	Maks. teh MW	Muuttuva kustansi mk/MWh	Käytettäv. %	Tyyppi riippuvuus
Kaasuturpiini	1442	431.880	80	vakio
Öljylauhde	258	195.374	90	vakio
Öljyvastapaine	59	151.000	92	kaukolämpö
Kaasulauhde keskiteho	260	150.472	95	vakio
Kaasukombi	400	133.753	95	vakio
Turvelauhde	363	120.000	80	vakio
Hiililauhde	2226	95.000	92	vakio
Prosessivastapaine	1382	90.000	94	prosessi
Muut kaukolämpöpolttoaineet	2380	90.000	95	kaukolämpö
Ydinvoima	2310	70.000	95	vakio

Kuva 6. Esimerkki yhtä aluetta kuvaavista sähköjärjestelmä tiedoista. Sinisiin kenttiin syötetään lähtötietoja.

Siirtorajoitukset alueiden välillä annetaan erillisessä taulukossa, kuva 7.

Sähkön siirtorajoitukset MW							
		Mihin					
		Suomi	Ruotsi	Norja	Tanska W	Tanska E	Muut
Mistä	Suomi		1235	70			60
	Ruotsi	1835		3975	670	1660	600
	Norja	70	4175		1040		50
	Tanska W		630	1040			1400
	Tanska E		1860				600
	Muut	1160	600	50	1400	600	

Kuva 7. Siirtorajoitustaulukko.

Näiden syöttötietojen lisäksi tarvitaan vielä muitakin, kuten erilaisten tiedostojen sijainti, parametreja ym.

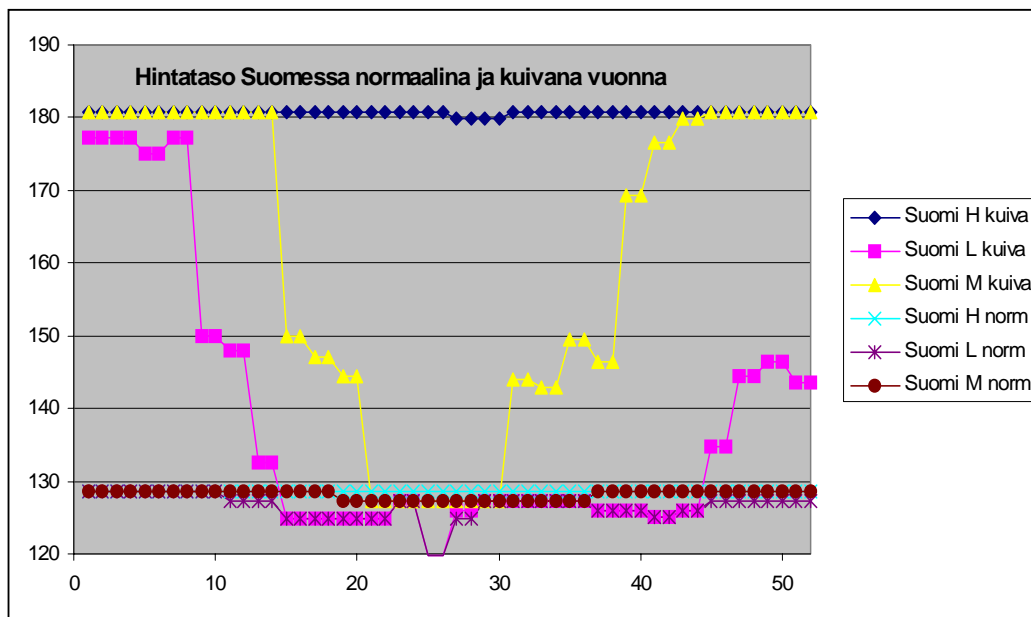
4.2 ESIMERKKIAJO

Kolmitiehommallin laskenta 52 viikolle kestää (166 MHz, 96 MB, Pentium I, Windows NT): LP-mallin generointi 55 s, LP-mallin ratkaiseminen 4 min 30 s, jälkikäsitely 9 s. LP-malli on 1,8 MB:n tekstitiedosto ja se sisältää tavoitefunktion (447 kB) ja n. 37800 rajoitusehtoa.

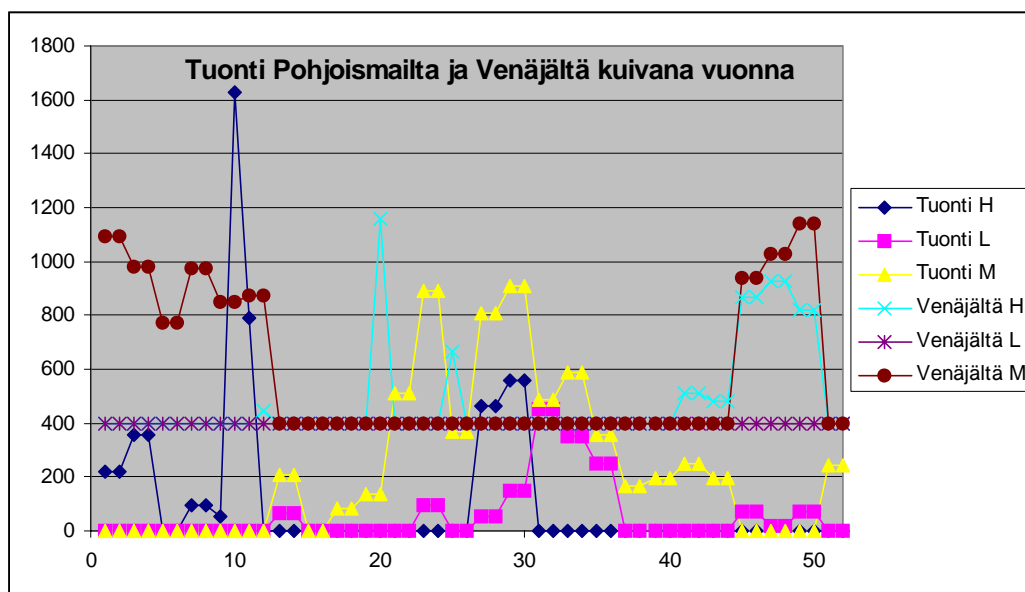
Tulostiedosto sisältää seuraavat aikasarjat, kukin tässä tapauksessa 52 pisteen aikasarjoina:

- hinta (15 sarjaa, 5 aluetta * 3 tehotasoa)
- vesialtaiden taso (5 aluetta)
- vesituotanto (5 * 3 sarjaa)
- lämpötuotanto (5 * 3 sarjaa)
- vienti (5 * 3 sarjaa)
- tuonti (5 * 3 sarjaa)
- vienti ulkopuolisille alueille (5 * 3 sarjaa)
- tuonti ulkopuolisilta alueilta (5 * 3 sarjaa)
- alueiden välinen tuonti (5 * 4 * 3 sarjaa)
- alueiden välinen vienti (5 * 4 * 3 sarjaa)

Kuvat 8 ja 9 ovat esimerkkejä laskentatuloksista. Kuva 8 esittää hintatasoa Suomessa kuivana ja normaalina vuonna. Kuiva vuosi on määritelty niin, että tulovirtaama vesivarastoihin Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa on 80 % keskimääräisestä tulovirtaamasta. Normaalivuoden melko tasaiset käyrät kuvaavat tilannetta, jossa kaikki on mahdollisimman keskimääräistä. Mikään todellinen vuosi ei ole niin keskimääräinen. H viittaa huippukuormaan (70 h/vko), M keskikuormaan (50 h/vko) ja L pohjakulutukseen (48 h/vk).



Kuva 8. Esimerkki laskentatuloksista.



Kuva 9. Tuonti Suomeen kuivana vuonna.

5. TOTEUTUS

Ylläoleva malli on toteutettu samassa ympäristössä, missä Mars-simulaattorikin, eli Smalltalk/V for Win32. Ohjelman nimi on Malp. Kaikki syöte- ja tuloste-toiminnot tapahtuvat Excelin välityksellä. Valmiilla Excel-pohjilla on helppo syöttää data, joka tallennetaan tarvittavassa muodossa painonapin taakse piilotetulla makrolla. Tulostiedot on järjestetty siten, että niiden jatkoanalysointi Excelilla on helppoa.

Smalltalk-ohjelma generoi LP-mallin ratkaisuohjelmiston edellyttämällä tavalla. LP-ratkaisijana on käytetty VTT Energiassa kehitetty MIPkitä /13/.

6. JATKOKEHITYS

Joukko yksityiskohtia on vielä selvittämättä/toteuttamatta:

- vesialtaiden ylivuototermin (kevättulvan aikaan)
- lämpövoiman poikkeamia normaalista, esimerkiksi suunniteltuja huolto-katkoksia tai lisärakentamisen vaikutus ei voi nyt ottaa huomioon
- kaikkien alueiden kulutuksen vuosi- ja viikkoprofiilien selvittäminen
- todellisia tulovirtaamasarjoja

Mahdollistamalla stokastista vaihtelua syöttötiedoissa voisi muodostaa odotushinnan jakautumafunktio. Kulutuksen stokastista vaihtelua huomioimalla tai esimerkiksi laskemalla 30 vuoden todellisilla tulovirtaamatiedoilla syntyy joukko hintakäyriä, joita voi yhdistää hinnan odotusjakautumaksi. Tämä tosin vaatisi että lasketaan mallia monta kertaa läpi hieman eri numeroarvoilla, joten laskenta olisi huomattavan aikaavievää. Hintajakautuma on kuitenkin tärkeä lähtökohta riskien arvioinnissa.

7. VIITTEET

- /1/ Nilsberth A., Söder L: Planning of Electricity Contracts on a Deregulated Market. DA/DSM Euope 96 conference, Vienna, 1996. 17 sivua.
- /2/ Koreneff G., Seppälä A., Lehtonen M., Kekkonen V., Laitinen E., Häkli J., Antila E. 1998. Electricity spot price forecasting as a part of energy management in de-regulated power market. Proc. of EMPD 98, vol. 1, s. 223-228.
- /3/ Lilleberg J.: Nimetön, 1998. Julkaisematon raporttiluonnos, TESLA-ohjelma. Vaasan yliopisto, 49 sivua.
- /4/ Haugstad A., Mo B., Johannesen A, Wangesteen I: System Modelling in a Hydro-Thermal Electrical System. The Norwegian Electric Power Research Institute, 1997. Julkaisematon kurssimateriaali: NORAD, Direktoratet for utviklingshjelp, 22 sivua.
- /5/ Fosso O., Gjelsvik A, Haugstad A, Mo B, Wangensteen. Generation scheduling in a deregulated system. The Norwegian case. IEEE PES Winter Meeting 1998. 6 sivua.
- /6/ Nilsberth A., Söder L.: Managing Electricity Contracts in a Deregulated Market. DA/DSM DistribuTech 97 conferernce, Amsterdam October 14-16 1997, 21 sivua.
- /7/ Sähkön käytön kuormitustutkimus 1992. Suomen sähkölaitosyhdistys r.y. Julkaisusarja 5/1992. Helsinki 1992.
- /8/ Sähkön kulutuksen indeksisarjat. Selvitys tarkistustyöstä 1985. Sähkön-tuottajien yhteistyövaliokunta. Suunnitteluvaliokunta 3/85. 1985.
- /9/ Leppäjärvi R. (toim.): Hydrologinen vuosikirja 1990. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki 1993.197 sivua.
- /10/ Svenska kraftverksföreningen. 1999. KVF Kraftåret. KVF. [Viitattu 30.4.1999]. <http://www.kvf.se/infomtrl/karet.html>.

- /11/ Norges vassdrags- og energidirektorat. 1999. Hydrologiske månedsoversikter. NVE. [Viitattu 30.4.1999]. <http://webben.nve.no/hydrologi/maanedsoversikt/>.
- /12/ Stage S., Larsson Y: Incremental Cost of Water Power. AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems). August 1961. s. 361-305.
- /13/ Lehtilä A: MIPKIT: LP- ja MIP-mallien ratkaisuhjelmisto. VTT Energia, 1998. Julkaisematon raportti. 39 sivua.
- /14/ NORDEL. 1999. NORDEL. [viitattu 30.4.1999]. <http://www.nordel.org/swe/index.html>,
- /15/ ELSAM. 1999. Om Elsam. [Viitattu 30.4.1999]. <http://www.elsam.com/Elsam/frame1.htm>,
- /16/ Energistyrelsen. 1999. Energistatistik. Energistyrelsen. [Viitattu 30.4.1999]. <http://www.ens.dk/statistik/index.htm>,
- /17/ Varian, H.R., Microeconomic Analysis, 2nd edition. W.W.Norton & Company. New York 1984.