



Miten toteutetaan resurssitehokkaampi ja ilmastoneutraali sähköenergiajärjestelmä?

Pami Aalto,^a Pirkko Harsia,^b Juhani Heljo,^c Jari Ihonen,^d Hannele Holttinen,^d Pertti Järventausta,^c Matti Kojo,^a Jukka Konttinen,^c Heidi Krohns-Välimäki,^c Anna Kulmala,^c Pinja Lehtonen,^a Kimmo Lummi,^c Antti Rautiainen,^c Ontrei Raipala,^c Sami Repo,^c Topi Rönkkö,^c Matti Viikko,^c Pasi Toivanen,^a Seppo Valkealahti^c

a = Tampereen yliopisto

b = Tampereen ammattikorkeakoulu

c = Tampereen teknillinen yliopisto

d = Teknologian tutkimuskeskus VTT

ISBN: 978-952-03-0147-7

1. Tiivistelmä

EL-TRAN –konsortion tavoitteena on osoittaa, miten Suomi voi toteuttaa *resurssitehokkaamman ja ilmastoneutraalimman sähköenergiajärjestelmän*. Pyrimme luomaan kokonaisuymmärryksen sähkön *tuotannon, verkon ja kulutuksen* muodostaman sähköenergiajärjestelmän muutoksesta, siinä väistämättä ilmenevistä politiikkaongelmista ja niiden ratkaisemisesta. Tarkastelemme Suomen sähköenergiajärjestelmää osana laajempia energiamarkkina-, teknologia-, ja politiikkaverkostoja erityisesti Pohjois-Euroopassa mutta myös EU- ja globaalitasoilla. Vaikka tarvitsemme Suomen erityisolosuhteisiin pureutuvaa tietoa, voimme myös soveltaa muualla meneillään olevia energiamurroksia koskevaa tutkimustietoa.

Resurssitehokkuus viittaa toimintaan, jossa 'vähemmällä' tehdään 'enemmän'.

Resurssitehokkaamman järjestelmän toteutuksessa on mukana useita toimijoita omine laajempine intresseineen. Tämän moninaisuuden

takia innovoimme tarkastelemalla resurssitehokkuutta koko sähköenergiajärjestelmän ketjun tasolla useine toimijoineen, tuotannosta verkkoon ja kulutukseen. Samalla pyrimme osoittamaan, mitkä resurssitehokkaat ratkaisut parantavat ilmastoneutraaliutta, ilman laatu mukaan lukien. Sähköenergian tuotannossa tutkimme järjestelmää eniten muokkaavien muutostekijöiden eli Suomessa toistaiseksi vähän hyödynnettyjen tuulivoiman, aurinkoenergian ja lämpöpumppujen yleistymisen vaikutuksia unohtamatta bioenergiaa. Sähköverkon tasolla päähuomiomme on uusista tuotantotavoista aiheutuvan tehotasapainon vaihtelussa järjestelmässä. Tarkastelemme tehovaihteluun sopeutuvien 'älykkäiden' sähköverkkojen hallintaa sekä varsin vähälle huomiolle jääneiden mikroverkkojen potentiaalia. Tuotamme uutta tietoa sähkön kuluttajista ja kulutuksen muutoksista. Arvioimme kysynnän joustojen toteuttamista 'älykkäiden' järjestelmien hallinnalla, kiinteistöautomaatiolla sekä autot sähkön jakeluverkkoon ja kodin sähköjärjestelmään liittyvien teknologioiden avulla ('vehicle-to-grid', V2G; ja 'vehicle-to-home', V2H). Kartoitamme myös lämpöverkkojen potentiaalia energiavarastoina.

EL-TRAN –konsortio sijoittaa energiajärjestelmän toimijat monine intresseineen ja tulkintakehyksineen resurssitehokkaamman ja ilmastoneutraalimman sähköenergiajärjestelmän ratkaisuvaihtoehtojen arvioinnin ja optimoinnin keskiöön. Uuden järjestelmän toteutuksen tueksi laadimme erilaisia skenaarioita, koostamme suosituksia eri toimijoille ja esitämme konkreettisen politiikkatiekartan tavoitellun muutoksen toteuttamiseksi.

2. Mihin ongelmaan konsortio hakee ratkaisua? Energia-alan viranomaiset, yritykset ja kansalaisjärjestöt tavoittelevat kukin tahoillaan Suomen sähköenergiajärjestelmän uudistamista energia- ja resurssitehokkaammaksi ja ilmastoneutraalimmaksi. Tämän yhteisen tavoitteen toteuttaminen törmää kuitenkin useisiin ongelmiin.

Ensinnä, vaikka viranomaiset, energia-alan yritykset ja kansalaisjärjestöt omilla tavoillaan toimivat näiden yhteisten tavoitteiden

edistämiseksi, ohjaavat heidän toimintaansa myös laajemmat yhteiskunnalliset ja liiketoiminnalliset tavoitteet. Näiden laajempien tavoitteiden yhteensopivuus ei ole itsestään selvää.

Toiseksi, kun päähuomio on toistaiseksi keskittynyt energian tuotantotapoihin, on jäänyt epäselväksi, kuinka sähköenergiajärjestelmää – eli sähkön tuotannon, verkon ja kulutuksen muodostamaa kokonaisuutta – jatkossa hallitaan. Uudet, teholtaan ennakoimattomat ja vaihtelevat sähköntuotantotavat kuten tuuli- ja aurinkovoima yleistyvät. Uudet lämmitysratkaisut – esimerkiksi omakotitalojen lämpöpumput – muuttavat sähkön kulutusrakennetta. Erityisen vähän tiedämme sähkön kuluttajien tarpeista, valmiuksista ja käyttäytymisestä jatkossa. Teollisuuden rakennemuutos ja datakeskusten kasvu muuttaa kulutusta. Suomelta puuttuu kokonaisvaltainen näkemys uudenlaisen sähköenergiajärjestelmän toteuttamisesta, yhteiskunnan tasolla tarvittavista muutoksista, niiden väistämättä tuottamista uusista ongelmista ja keskinäisistä vaikutuksista.

3. Mikä on toimintaympäristön tiedontaso? Suomen sähköenergiajärjestelmä on sidottu naapurimaihimme. Ostamme sähköä pohjoismaisesta sähköpörssistä ja Venäjältä. Käymme muiden energiatuotteiden kauppaa erityisesti Norjan ja Venäjän kanssa. Poliittisena tavoitteena on vähentää riippuvuutta tuontisähköstä ja rajat ylittävistä sähkönsiirtoyhteyksistä vuoteen 2050 mennessä (TEM 2014). Silti Suomen järjestelmään vaikuttavat jatkossakin EU-tason energiapolitiikka, Unionin kautta välittyvät globaalien energiamarkkinoiden, ilmastopolitiikan ja teknologian trendit. Tämän vuoksi tarkastelemme tiedontasoa Suomen lisäksi tässä laajemmassa toimintaympäristössämme.

Tätä laajempaa kontekstia koskeva tieto ei kuitenkaan sellaisenaan kerro, millainen resurssitehokkaampi ja ilmastoneutraalimpi sähköenergiajärjestelmä Suomeen on realistista rakentaa ja miten se käytännössä toteutetaan. Tiedon soveltuvuutta arvioitaessa huomioimme Suomen erityisolosuhteet. Suomen kylmäkö ilmasto, vuodenaikojen vaihtelu, hajautunut yhdyskuntarakenne, sekä vikaherkkyyttä lisäävät

metsäisyys ja lumikuormat poikkeavat jopa monista naapurimaista. Lämpötilan suuri vaihtelu vuoden aikana ja uudet lämmitysratkaisut aiheuttavat vaihtelua sähkön tarpeessa ja myötävaikuttavat suuriin tehovaihteluihin sähköenergiajärjestelmässä. Vaikka jopa tuntitason energiabalanssia on tutkittu (Kiviluoma 2013; Child et al. 2015), puuttuu Suomesta tarkempi sähköverkon tasapainon tarkastelu, samoin kuin sähkön tehojen ja tehon vaihtelun tietoa ja tilastointia.

Suomen järjestelmää erottavat naapureistaan myös ydinvoimapäätökset. Uusien voimaloiden valmistuttua lähes 40 % valtakunnallisesta kuormitushuipusta (15GW) katetaan lähimmän vuosikymmenen aikana ydinvoimalla. Loviisan yksiköiden sulkemisen jälkeen ydinvoiman osuudeksi jää noin kolmannes. Kokonaisvuosi-energiasta ydinvoima muodostaa vielä suuremman suhteellisen osuuden.

Toimintaympäristöömme verrattuna Suomi on edelläkävijä sekä tietotaidon ja vientituotteiden tuottaja joillakin sähköenergiajärjestelmän osaluilla. Näihin lukeutuvat älykkäät verkot, etäluettavat energiamittarit, kuorman ohjauspotentiaali, lämmön ja sähkön yhteistuotanto sekä bioenergia. Toisilla osaluilla Suomi kulkee jälkijunassa, kuten uusiutuvien tuuli- ja aurinkoenergian sekä hajautetun järjestelmän mahdollisuuksien hyödyntämisessä. Tietoisuutta ja ymmärrystä toimintaympäristömme energiamurroksista ja niiden väistämättömistä vaikutuksista Suomen energiajärjestelmään on vahvistettava. On arvioitava lähialueilla tehtyjä ratkaisuja koskevaa tietoa uudistaessamme Suomen järjestelmää sekä kehittäessämme tuotteita ja ratkaisuja globaaleille markkinoille. Kun osaamme soveltaa tietoa ketterämmin, voimme kehittää uutta vientiliiketoimintaa joillakin alueilla ja uudistaa teollista rakennettamme.

EL-TRAN –konsortio tutkii systemaattisesti näitä Suomea lähiympäristöönsä toisaalta sitovien ja toisaalta erottavien resurssien, teknologioiden ja infrastruktuurin sekä energiamarkkinoiden ja liiketoiminnan rakenteita. Niiden ohella huomioimme, kuinka muualla kerätty tietotaito ei välttämättä tuota samoja lopputuloksia Suomessa ilman instituutioiden ja

kansalaisyhteiskunnan rakenteiden huomiointia (Araújo 2014: 119).

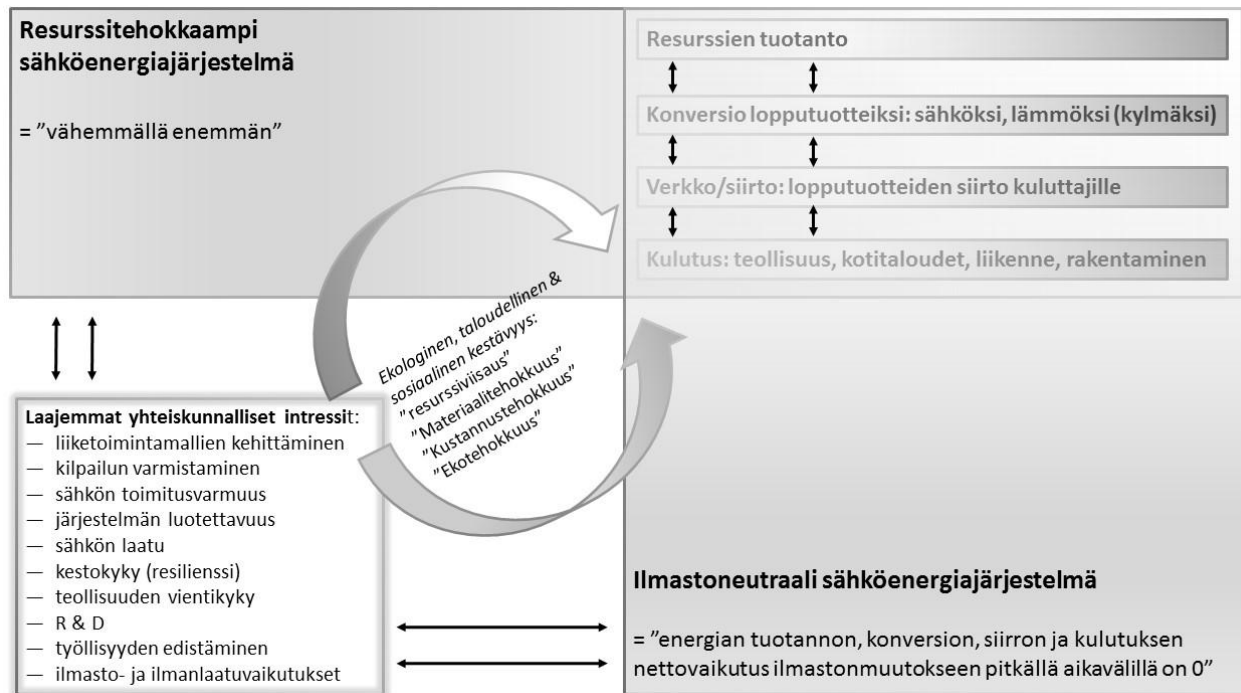
3a. Miksi puhumme resurssitehokkuudesta ja miten sen ymmärrämme?

Resurssi- ja energiatehokkuus ovat monimerkityksisiä käsitteitä, joita analysoimalla pyrimme osoittamaan uusia tutkimusongelmia ja ratkaisumalleja.

Suomalaiset toimijat käyttävät usein resurssi- ja energiatehokkuuden käsitteitä synonyymeinä. Ajoittain viittaamme myös esimerkiksi kustannustehokkuuden, investointitehokkuuden, materiaalitehokkuuden, ekotehokkuuden ja resurssiviisauden käsitteisiin (kts. esim. Energiateollisuus 2010; TEM 2013, 2014; VTT

2011). Näillä käsitteillä viittaamme toimintaan, jossa 'vähemmällä' tehdään 'enemmän' (UNEP 2011). Samalla kun kartoitamme vaatimuksia sähköenergiajärjestelmälle, joka tekee 'vähemmästä enemmän', sisällytämme niihin mitä erilaisimpia laajempia tavoitteita (mm. VTT 2011). Näitä ovat esimerkiksi kilpailukyky, liiketoimintamallien kehittäminen, sähkön toimitusvarmuus, järjestelmän luotettavuus, sähkön laatu, yhteiskunnan kestävyys kriiseissä (resilienssi), teollisuuden vientikyky, tutkimus ja kehitys (R & D), työllisyyden edistäminen sekä ilmasto- ja ilmanlaatuvaikutukset. Resurssitehokkuudella ei olekaan itseisarvoa ilman yhteiskunnallista tavoitteiden asettelua (Kuvio 1).

Kuvio 1: Sähköenergiajärjestelmän resurssitehokkuus yhteiskunnallisessa kontekstissa



Kansainvälinen energia-alan tutkimus viittaa useimmiten 'energiatehokkuuden' käsitteeseen, jonka se liittyy joko tuotantoon, energian konversioon primääriresursseista lopputuotteiksi kuten sähköksi ja lämmöksi tai näiden lopputuotteiden kulutukseen (esim. Goldemberg 2012: 105-118; Irrek ym. 2008). Nämä tutkimukset tyypillisesti mainitsevat sähkönsiirtoverkon roolin vain ohimennen (Fawkes 2013: 136). Vielä harvemmin ne pohtivat, kuinka tuotannosta, verkosta ja

kulutuksesta muodostuva kokonaisjärjestelmä mitoitetaan optimaalisesti suhteessa tuotannon ja kulutuksen vaihteluihin. Pyrimme korjaamaan nämä puutteet *ymmärtämällä resurssitehokkuuden sähköenergian ja lämmön(kylmän) tuotannon, siirron sekä kulutuksen muodostamana kokonaisuutena*. Resurssien käyttö on optimoitava tämän kokonaisuuden tasolla. Lisäksi huomioimme sähkö- ja lämpöjärjestelmien ristikkäisvaikutukset ja sähköenergian konversiot muiksi

energiamuodoiksi (akkuvarastot, kaasu jne.) sekä tarkastelemme liikenne- ja rakennussektorin energiaratkaisuja. Sähkömarkkina- (2013) mainitulla 'sähkötalouden toimintavarmuudella ja tehokkuudella' voidaan juuri tarkoittaa kokonaisjärjestelmän resurssitehokkuutta.

Resurssitehokkaan sähköenergiajärjestelmän on hyödynnettävä resursseja, joiden käyttö ei uhkaa bioresurssiemme kestävyttä. Näiden resurssien konversio sähköksi ja lämmöksi on perustuttava korkeaan hyötysuhteeseen. Sähköverkon kattavuus ja toimintaperiaate on mitoitettava oikein käyttämättä liikaa raaka-aineita tai hukkaamatta tuotettua sähköä. Kuluttajien on suosittava koneita, laitteita ja liikennevälineitä, jotka siirtävät sähkön tehokkaasti tarvittavaan työhön. On kehitettävä rakentamisen normeja, jotka ohjaavat sähkön tarkoituksenmukaiseen käyttöön ja kulutuksen joustoratkaisuihin. Näillä pienennetään energiantuotannossa tarvittavia huipputehoja ja siten syntyviä päästöjä.

3b. Miten parempi resurssitehokkuus edistää ilman laatua ja ilmastoneutraaliutta?

Ilmastoneutraalius on resurssitehokkuutta huomattavasti selkeämpi käsite. YK:n ilmastopaneeli määrittelee sen hiilineutraalisuutta laajemmaksi käsitteeksi, 'jossa ihmistoimintojen aiheuttama nettovaikutus ilmastomuutokseen määrättyllä ajanjaksolla on nolla. Ilmastoneutraalisuus pitää sisällään myös kaikkien ilmansaasteiden (aerosolit) ja maankäytön muutoksista johtuvat säteilyolosuhteiden (albedo) vaikutukset' (Seppälä ym. 2014: 5-6). Täysin päästötön sähköntuotanto on kuitenkin varsin haastavaa. Siksi päästöjä voidaan varastoida, asettaa niille hinta päästökaupassa tai kuten Suomen tapauksessa, kompensoida niitä hiilinielulla (metsillä). Tarkastelemme näin ymmärretyn *ilmastoneutraalin* sähköjärjestelmän toteuttamismahdollisuuksia aikavälillä 2030-2050.

Resurssitehokkuuden lisääminen energian tuotannossa, siirrossa ja kulutuksessa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja muita päästöjä ja siten edistää ilmastoneutraaliutta. Tuottaessamme sähköenergiaa esim. tuuli-, aurinko- ja vesivoimalla kulutamme vähemmän

fossiilisia resursseja ja tuotamme vähemmän päästöjä ilmakehään. Sähkönsiirrossa uusiutuvien resurssien käyttö yhdessä siirtokapasiteetin ja järjestelmän kokonai-optimoinnin kanssa voi vähentää tehohuippujen ja huonon hyötysuhteen omaavien voimalaitosten tarvetta. Vesivoima tarjoaa jo Suomessa nämä edut. Tuuli- ja aurinkovoima ovat vasta saavuttamassa vastaavan aseman voimakkaan teknologiakehityksen ja kustannusten laskun seurauksena (vrt. Ratinen & Lund 2015).

Kaikki uusiutuvia energianlähteitä ja energian lopputuotteiden varastointia hyödyntävät, ilmastoneutraaliutta edistävät energiaratkaisut eivät silti ole resurssitehokkaita. Lisäksi ilmastoneutraaliuden tavoittelua vaikeuttaa sen julkishyödykkeellinen luonne, joka rohkaisee päästöjen tuottajia vapaamatkustamiseen. Siksi resurssitehokkaammat ja ilmastoneutraalimmat ratkaisut tarvitsevat tietoista ja vahvaa kokonaisuohjausta eli energiapolitiikkaa ja lainsäädäntöä (vrt. Fouquet & Pearson 2012: 4).

3c. Mitä tiedämme resurssitehokkaamman ja ilmastoneutraalimman sähköenergian tuotannosta?

Energiajärjestelmien 14 viimeisintä suurta murrosta – kuten siirtymä uusiutuvasta energiantuotannosta hiileen ja sittemmin hiilestä öljyyn – ovat kestäneet minimissään neljä usein tuskaistakin vuosikymmentä, joskus vuosisatoja. Niiden pontimena on ollut uuden energioresurssin tuomat, aluksi kalliimmat mutta sittemmin edullisemmat ja laajemmat lopputuotteet ja palvelut. Suomen nyt tavoittelema sähköenergiajärjestelmä voi tuottaa yhtä hyvän lopputuloksen. Osa tutkijoista silti epäilee, syntyykö tällä kertaa aiempien murrosten kaltaisia laajempia etuja kansantaloudelle ja energian kuluttajille (Fouquet & Pearson 2012: 2-4). Jotkut odottavat jopa nykyisen läntisen elämäntapamme loppua siirtyessämme laajamittaiseen uusiutuvan energian tuotantoon (Jefferson 2014: 49).

Tiedämme silti, että vuonna 2013 maailmassa rakennettiin jo enemmän uusiutuvaan kuin uusiutumattomaan energiaan perustuvaa sähköenergian tuotantokapasiteettia. Rakennettu uusiutuvan energian tuotantokapasiteetti koostui lähes tasan tuuli-, aurinko- ja vesivoimasta.

Tuulivoiman globaali kumulatiivinen tuotantokapasiteetti on kasvanut keskimäärin yli 20 % vuosittain 2000-luvulla ja aurinkovoiman yli 40 %. Tuuli-, aurinko- ja vesivoiman osuudet globaalista sähköenergian tuotantokapasiteetista olivat vuoden 2014 lopussa 6,1 %, 3,0 % ja 17,5 %. Tuulivoimalla tuotetaan 10 % koko EU:n sähkönkulutuksesta ja aurinkovoimalla miltei saman verran esim. Saksassa, Italiassa ja Kreikassa. Suomessa suurteollisuus ja osa energiayrityksistä karttaa aurinkoenergiaa joidenkin start up-yritysten ja ympäristöjärjestöjen kannattaessa. Poliittinen päättämättömyys sen roolista aiheuttaa epävarmuutta (Haukkala 2015: 56). Kun tämänkaltaisiin polkuriippuvuuksiin lisätään pohjoismaisen sähkön halpuus, siirtyy Suomi uusiutuvan energian hyödyntämiseen viiveellä seuraavien 10 – 20 vuoden kuluessa.

Tanskassa pyritään tuulivoiman 50 % osuuteen sähköstä jo 2020 ja täysin uusiutuvaan energiaan vuoteen 2050 mennessä (tuulivoiman osuus 2014 oli lähes 40 %). Saksassa on tutkittu lähes 100 % uusiutuvaan tuotantoon perustuvaa sähköjärjestelmää sekä paikallisesti (Martensen ym. 2014) että Euroopan tasolla (Brown ym. 2014; Hewicker ym. 2014). Irlannissa on selvitetty sähköverkon toimintaa, kun tuulivoima tuottaa (hetkellisesti) lähes 100% sähköstä pienessä saarisähköjärjestelmässä (Eirgrid, 2013) (huipputeho alle 7 GW; pohjoismaisessa järjestelmässä noin 65 GW ja Euroopan synkronisessa järjestelmässä moninkertainen).

Tutkimus ja uusien toimintatapojen ja työkalujen demonstraatiot osoittavat, että suuri tuuli- ja aurinkoenergian osuus voidaan teknisesti mahdollistaa siirtoyhteyksiä lisäämällä, laajempia alueita balansoimalla (tuulivoima) ja sähköä varastoimalla – jatkossa esimerkiksi 'power to gas' ja 'power to liquids' -teknologioilla (aurinkovoima). Kulutusjoustot ja lämpöjärjestelmän joustot tuovat lisävipua. Sähköjärjestelmän hallintaa helpottavien tulevaisuuden sähkömarkkinat on oltava laajat (jolloin säätöresurssien jakaminen on mahdollista) ja nopeat (jolloin tarjouksia markkinoille tulee lähellä toimitusta, ja siten tuuli- ja aurinkovoiman aiheuttama epävarmuus pienenee). Emme silti vielä tiedä, kuinka synkronisen sähköjärjestelmän luotettavuus

varmistetaan, jos lähes 100 % on ei-synkronista tuotantoa.

Lähivuosikymmeninä oletamme, että lisääntyvä aurinko- ja tuulivoima sekä lämpöpumput tuovat Suomessa suurimman muutoksen. Ydinvoimalle oletamme tasapainottavan roolin sekä vesivoimalle ja biomassalle suuren säätövoimaroolin. Metsäbiomassan (hake, kuitupuu) sekä bioperäisen jätteen kestävä lisäsmahdollisuus yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa voisi olla noin 15 TWh, josta sähköä noin 5 TWh (TEM 2014: 31). Tämä vastaa arvioitua tuulivoiman lisäystä.

3d. Mitä tiedämme tarvittavista sähköverkon uudistuksista?

Aurinkoenergiaa ja muita uusiutuvia resursseja laajalti hyödyntävät maat ovat toteuttaneet erilaisia pilotointi- ja demonstraatioprojekteja. Ne ovat ratkoneet 'älykkäiden' verkkoratkaisujen keinoin näiden voimakkaasti sääriippuvaisten ja hajautettujen sähköntuotantotapojen verkolle aiheuttamia sähkön laadun, tehojen vaihtelun ja tehotasapainon ongelmia. 'Älykkäät' ratkaisut eivät ole vielä saavuttaneet laajaa markkinaosuutta (Mah ym. 2013). Kun tuulivoiman ja aurinkosähkön suhteellinen osuus edelleen kasvaa, lisääntyy sähköenergiajärjestelmän joustoihin liittyvä tutkimustarve (säätövoima, energiavarastot, kysynnän jousto, jne.; laatikko 1).

Laatikko 1: lisää tuuli- ja aurinkovoimaa verkkoon

Vuoden 2014 lopussa Suomessa oli yli 600 MW tuulivoimakapasiteettia ja arviolta 10 MW aurinkokennovoiman tuotantokapasiteettia. Tuulivoiman nykyinen tukimekanismi mahdollistaa noin 2000 MW rakentamisen lähivuosina (noin 6 % sähkönkulutuksesta). On mahdollista, että maalle asennettu tuulivoima lisääntyy jatkossa huomattavasti. Sen kilpailukykyä uusiutuvassa sähköntuotannossa parantaa suotuisa kustannuskehitys. Aurinkoenergian kapasiteetin kaksinkertaistuminen kahden vuoden välein – kuten muualla – tuottaa meille vuonna 2025 noin 450 MW ja vuonna 2035 yli 14 000 MW; vastaavasti tuotettu vuotuinen sähköenergia olisi noin 0,4 ja 12 TWh.

Sähköverkkojen tutkimuksessa on ensinnäkin tarkasteltu erilaisia strategioita 'älykkään' sähköverkon kehittämiseksi. Yhdysvaltain Energiaviraston (Department of Energy) katsaus

alan tietoon erottelee viisi työvaihetta: käynnistäminen, investointi, integrointi, optimointi ja innovointi. Lisäksi se korostaa uudenlaisen verkkoliiketoimintamallin tarvetta ympäristö- ja yhteiskunnallisten hyötyjen aikaansaamiseksi (Mah ym. 2013: 727). Suomessa verkkoliiketoiminnan valvontamalli ei suuntaa erityisiä kannusteita uusille verkon 'älykkyyttä' ja resurssitehokkuutta lisääville investoinneille. Vuoden 2016 uusi valvontamalli ottaa ensimmäisiä askelia vaikkapa Saksan ja Italian mallien suuntaan. Niissä on suoria kannusteita jakelumuuntoautomaation toiminnoille, jotka ratkovat pienjänniteverkkoon sijoittuvien aurinkokennovoimaloiden ongelmia (Vanhanen 2014).

Toinen tutkimushaara tarkastelee 'älykkäiden' verkkojen edellyttämän yhteiskunnallisen muutoksen hallintaa. Muutoksiin lukeutuvat kaksisuuntaisten verkkojen luomat uudet energiayritysten ja kuluttajien väliset suhteet, uudet toimijat kuten pienet itsenäiset energiantuottajat sekä hajautetun tuotannon uudet liiketoimintamallit. Monet empiiriset tutkimukset korostavat valtion roolia muutoksen alkuvaiheen hallinnassa energiayritysten sijaan (Mah ym. 2013: 727-8). Käsittelemmekin sähköenergiajärjestelmää osana yhteiskuntaa ja yritysten sekä kansalaisten toimintaa.

3e. Entä kuluttajat?

Tarvitsemme paljon lisää tietoa eri kuluttajaryhmien ja kansalaisten asenteista ja valmiuksista sähköenergiajärjestelmän murroksessa erityisesti alue- ja paikallistasolla. Tavallisen kansalaisen rooli korostuu, sillä Suomessa asuminen ja maatalous kattoi 27 % energiankulutuksesta vuonna 2014 (Energiateollisuus 2015). Suomalaisista 70 % omistaa itse oman asuntonsa, joiden lämmitysratkaisut ovat siirtymässä polttoainelämmityksestä ja jopa kaukolämmöstä sähköön useimmiten lämpöpumppuja käyttämällä. Rakennusten lämmityksellä ja tulevaisuudessa yhä enemmän sisäolosuhteiden kokonaishallinnalla (ml. jäähdytys) on merkittävä rooli energian käytössä ja vielä suurempi rooli tehon käytössä. EL-TRAN -konsortion vuorovaikutuspaneeli painottaa samoin kuluttajia koskevan tiedon tarvetta. Kansalaisten huomiotta

jättäminen voisi johtaa merkittävään muutosvastarintaan (Mattes ym. 2015).

Vaikka resurssitehokkaamman energiankulutuksen mahdollistavat teknologiset ratkaisut ovat moninaisia ja jo melko hyvin tunnettuja, on niiden hallittu käyttöönotto monimutkaista (Hawkes 2013: 83). Useimmat energian kuluttajat eivät yksinkertaisesti välitä – meillä on muutakin ajateltavaa (Patterson 2007: 12). Suomessa suurin osa kansalaisista ei perehdy aiheeseen, sillä energian hinta on alhainen.

Energiateollisuus (2014) on kartoittanut energia-asenteita vuosittaisilla kyselyillä. Laajemmat akateemiset tutkimukset ovat vertailleet eliitin ja kansalaisten käsityksiä energiapolitiikasta ja -markkinoista (esim. Ruostetsaari 2010). Koska edellinen laajempi kyselyaineisto on vuodelta 2007, on tiedot päivitettävä: ovatko kuluttajat valmiimpia kilpailuttamaan sähköntoimittajaa? Kuinka moni haluaa investoida pientuotantoon? Miten kansalaiset arvottavat energiakysymyksiä, kestävä kehitystä ja ilmastoneutraaliutta tehdessään kulutus päätöksiä? Miten he suhtautuvat kulutusjoustoihin?

Tarvitaankin kokonaisvaltainen näkemys eri kuluttajaryhmiä motivoivista kannustimista, eri toimijoiden ristikkäisistäkin rooleista, liiketoimintaa tukevista markkinamalleista, tiedonsiirtorajapintojen yhteensovittamisesta sekä kysynnän joustoa edistävän lainsäädännön kehittämisestä. Teknisempi tiedontarve koskee toimintavasteiden suurta hajontaa ja kuorman ohjattavuutta, jonka käyttöönotto puolestaan edellyttää kiinteistöjen sähköverkon ja laitevalintojen suunnittelun tavoitteellista ohjausta.

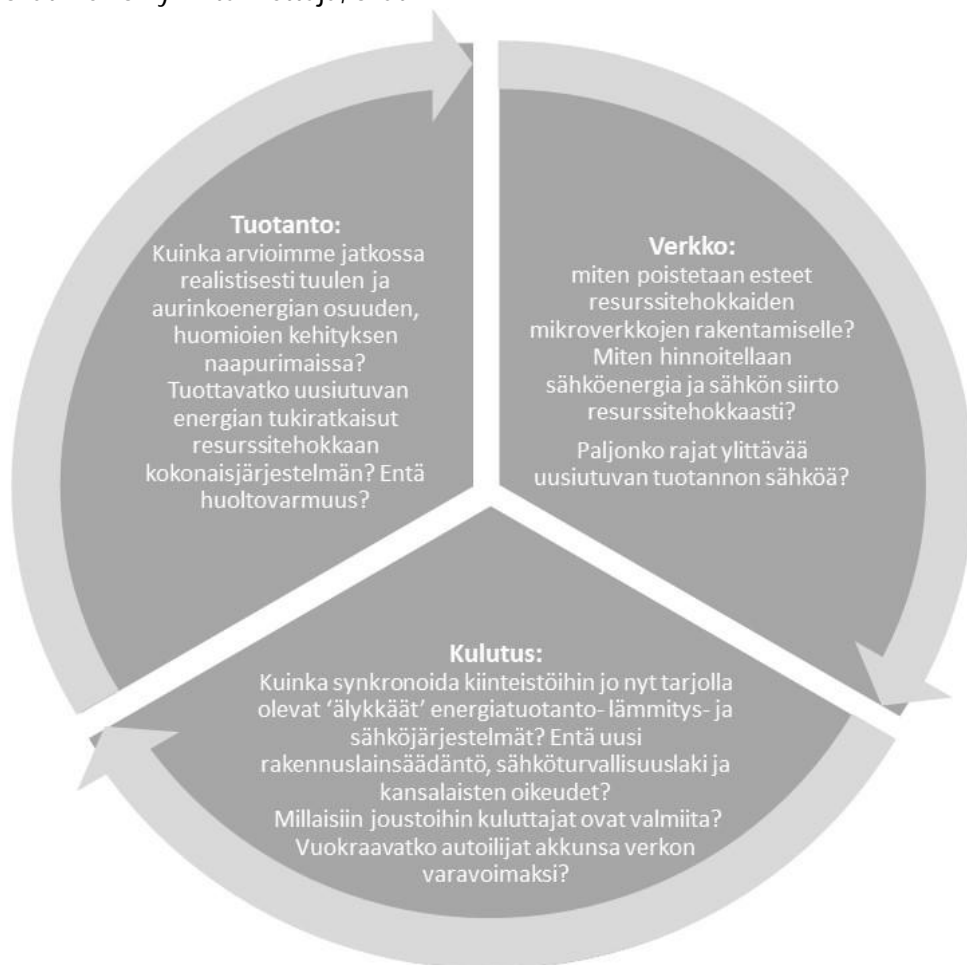
Sähkön kulutuksesta liikenteessä tarvitaan lisätietoa. EU asettaa liikenteelle uusiutuvien polttoaineiden osuuden tavoitteeksi 10 % vuoteen 2020 mennessä; ja 40 % hiilidioksidin päästövähennystavoitteen vuoteen 2021 mennessä 2007 tasosta. Autojen akut sisältävät merkittävän energiavaraston, jota voitaisiin käyttää nopeiden tehovaihteluiden hallintaan sähköenergiajärjestelmässä ('autosta verkkoon' eli 'vehicle-to-grid', V2G-teknologia). Tämän lisäksi myös sähköauton latauksen ohjaus, 'älykäs

lataus', voi lisätä joustoja. Nämä toiminnot parantaisivat sähköautoon tehtävän investoinnin käyttöastetta. Hitaampiin tehovaihteluihin lämpöverkot tarjoavat sähköajoneuvoja enemmän joustopotentiaalia (Kiviluoma 2013). Akkuteknologian kehitys on skenaarioissamme huomioitava avainkysymys sähköautojen yleistymiselle. Toteutuessaan se tekisi myös kiinteistöihin ja sähköverkkoon sijoitettavat stationaariset sähköenergiavarastot kustannustehokkaiksi ratkaisuksi. Kuluttajien halukkuutta vuokrata autonsa akkua tai liikenneyritysten kiinnostusta vuokrata bussien akkua verkon käyttöön sen sijaan ei juuri tunneta. Kiinteistöjen automaatio ja ohjausjärjestelmät ovat samoin vähäisesti tutkittuja.

4. Mikä on hankkeen tuoma lisäarvo tämän ongelman ratkaisuun?
Vaikka teknologiset ratkaisut erityisesti sähkön tuotannossa ovat melko hyvin tunnettuja, ovat

Suomen valinnat eri vaihtoehtojen välillä vielä epäselviä. Vielä avoimempia ovat näiden valintojen vaikutukset verkolle ja kulutukselle, jotka jo itsessään ovat heikommin tunnettuja alueita. Vastatessaan näihin tiedontarpeisiin, EL-TRAN -konsortio tuo eniten lisäarvoa resurssitehokkaamman ja ilmastoneutraalin kokonaisjärjestelmän vaihtoehtojen toteutustapojen arviointiin, kehittämiseen ja optimointiin eri skenaarioissa. Näin voimme osoittaa ja verrata sellaisia Suomeen soveltuvia konkreettisia polkuja, joita poliittisen tason raportit eivät vielä käsittele (TEM 2014) ja joista teollisuus, energiayritykset ja ympäristöjärjestöt eivät vielä ole yksimielisiä. Samalla ratkomme hyvin konkreettisia politiikkaongelmia, joita Suomen hakema murros tuo mukanaan (Kuvio 2).

Kuvio 2: esimerkkejä EL-TRAN –konsortion tutkimista politiikkaongelmista



EL-TRAN –konsortio soveltaa kansainvälistä tutkimustietoa Suomen erityisolosuhteisiin,

tarkastelee aiempaa, valtaosin insinööritieteellistä tutkimusta

yhteiskunnallisemmassa kontekstissa ja suorittaa Suomen järjestelmän monitieteistä perustutkimusta yhdistäen innovatiivisesti insinöritieteitä energia-oikeuteen, tulevaisuudentutkimukseen, politiikan ja poliittisen talouden tutkimukseen.

Koska keskeisten toimijoiden tulee olla mukana uuden järjestelmän toteuttamisessa, tuotamme systemaattista, vertailevaa tietoa viranomaisten, teollisuuden, energiayritysten ja kansalaisjärjestöjen jakamista ymmärryksistä, ratkaisumahdollisuuksista ja ristiriidoista. Vertaamme tätä tietoa kansalaisten energia-asenteiden kehitykseen. Näin luomme realistisen kuvan tarvittavista, toteuttamiskelpoisista ja riittävän laajasti hyväksyttävistä ratkaisuista.

Tarkastelemme eri toimijoita yhdistäviä intressejä ja tavoitteita sähköenergiajärjestelmän mallinnuksessa ja optimoinnissa.

Sähköenergiajärjestelmän optimoinnissa painotamme systeemi- ja jakeluverkkotason hallintaa aiempaa enemmän (Laatikko 2). Innovoimme tutkimalla mikroverkkoja (Laatikko 3). Kuluttajasektorilla tehon hallinnan ja ohjauksen tutkimuksemme kohdistuu erityisesti lämpöpumppuratkaisuihin ja lähes nollaenergiarakentamiseen (Laatikko 4)

Laatikko 2: tehokkaampi verkon hallinta

Perinteisesti siirtoverkko on ylimitoitettu kestäämään kaikki todennäköiset siirtotilanteet. Siksi sen kapasiteetin käyttöaste on erittäin alhainen ja siihen sidotut pääomat suuria. Tyypillinen siirtotehon huippu on erittäin lyhytaikainen. Koska kustannuksista merkittävin osa syntyy kiinteistä investointikuluista, korostamme olemassa olevan verkon kapasiteetin käyttöasteen nostamista erittäin kustannustehokkaana keinona. Jakeluverkon hallinta muuttuu aktiivisemmaksi automaation ja hajautettujen energiaresurssien (pientuotanto, kysynnänjousto ja varastot) ohjauksen avulla. Edelleen tutkimme automaation ja päätöksenteon hajauttamisen mahdollisuuksia lähemmäksi kuluttajaa tehopohjaisten ja dynaamisten siirtotariffien avulla, yhdessä asiakkaiden omien automaatiojärjestelmien hajautettujen energiaresurssien kanssa. Tehopohjaisella hinnoittelulla varmistetaan, että markkinahintapohjaisen (energian hinta)ohjauksen hyöty ei eliminoidu verkon kapasiteettitarpeen kasvuun ja siten siirry asiakkaille korkeampina siirtomaksuina. Näin voidaan ohjata

kulutustottumuksia kohti tasaisempaa kuormitusprofiilia.

Laatikko 3: mikroverkot resurssitehokkaamman järjestelmän osana

Perinteisesti vain erityisen kriittiset kohteet turvataan varavoimalla. Nyt kehitettävässä sähköenergiajärjestelmässä on huomattavan paljon hajautettuja resursseja (pientuotantoa, varastoja ja kysynnän joustoa). Näiden avulla voidaan luoda eri järjestelmätasojille myös verkkovian aikana toimivia ratkaisuja, jotka eivät edellytä isoa määrää korkeilla huipputehoilla toimivia suurvoimaloita, resurssitehottomia energiavarastoja tai verkon varasyöttökapasiteettia. Tällainen hallittu saarekekäyttö voi toimia osana jakeluverkkoa tai kiinteistötasolla.

Laatikko 4: tehon hallinta ja kysynnän joustot kulutuksessa

Valmisteilla olevat määräykset vähentävät primaarienergian kokonaiskulutusta, mutta aiheuttavat hetkellisiä sähköenergian kulutushuippuja. Vastaava ilmiö voi toistua liikenteen siirtyessä polttomoottorikäyttöisistä autoista sähköautoihin, joiden luonnollinen lataustarve ajoittuu iltaan ja yöhön. Nykyiset sähkön hinnoittelumallit eivät juurikaan kannusta tehon hallintaan. Kiinteistöjen sähköjärjestelmien ratkaisuja ei ohjata säädöspohjaisesti samalla laajuudella kuin muuta rakentamista. Tällöin yksittäisessä kohteessa optimoidaan vain sen kohteen ratkaisuja ottamatta huomioon kokonaisvaikutuksia. Osaoptimointi tulee todennäköisesti lisääntymään entisestään, ellei hinnoittelumalleja muuteta kiinteistökohtaisen sähkön tuotannon (aurinkoenergian) myötä. Sähkötehojen ja niiden vaihteluiden tietoa ja tilastointia tarvitaan lisää.

Emme sulje pois yllättäviä murroksia – joita viimeisen vuosikymmenen aikana on nähty energiapolitiikan saralla useita – sillä tarkastelemme rinnakkain useita eri skenaarioita. Eri toimijoiden intressiristiriitojen parempi ymmärtäminen mahdollistaa energiapolitiikan ja lainsäädännön kehittämisen resurssitehokkuudeltaan kokonaisuoptimoivaksi. Näin voimme vertailla suomalaisten toimijoiden raporteissa mainittuja, useita keskenään kilpailevia resurssitehokkaampia ja ilmastoneutraalimpia ratkaisuja.

Mallinamme myös koko yhteiskunnan toimintaa innovatiivisen energiapolitiikan strukturaatiomallin avulla (Aalto ym. 2014). Mallissa tarkastellaan eri toimijoiden intressien ja tulkintakehysten toteutumisen mahdollisuuksia neljän eri EL-TRAN konsortion tutkiman rakenteellisen ulottuvuuden kautta: 1) resurssit, infrastruktuuri ja teknologia; 2) kustannukset, liiketoimintamallit ja markkinat; 3) instituutiot; 4) ekologia, ilmasto ja ilman laatu. Malli tarjoaa yhteiskuntateoreettisesti vankan, käytännön tutkimustarpeisiin operationalisoitavan työkalun. Käytämme sitä rinnan energiapolitiikan skenaarioiden sosio-tekniisten systeemien tutkimustyökalujen kanssa (Miller ym. 2015). Oletamme, että toimijoiden tulee tuntea hyvin kukin neljästä rakenteellisesta ulottuvuudesta, jotta tavoitellun järjestelmän optimoitu toteutus on realistista.

5. Millä keinoilla konsortio tekee tämän? Hyödynnämme avaintoimijoiden vertailevaa pienryhmätutkimusta Q-metodologian keinoin (Aalto 2003), kyselytutkimusta ja erilaisia energiajärjestelmän mallinnustekniikoita. Nivomme näin tuotetun tiedon yhteiskuntatieteellisiin kokonaisteorioihin (strukturaatioteoria), muotoilemme vaatimukset suomalaisille energiapolitiikan toimijoille tavoitellun sähköenergiajärjestelmän murroksen toteuttamiseksi ja laadimme julkisen sektorin toimijoille tiekartan prosessin tukemiseksi. Muodostamme tiekartan askel askeleelta toteutettavien politiikka-analyyysien pohjalta (Taulukko 1).

Taulukko 1: konsortion suomenkieliset tiedotteet ja politiikka-analyytit 2015-17:

<p>WP 1-2 politiikka-analyytit 2016-17:</p> <ul style="list-style-type: none">§ Nordpool 2030: ovatko pohjoismaiden tavoittelemat sähköenergiajärjestelmät samasta vai eri muotista? (06/16)§ EL-TRAN 2030 visio (09/16)§ Resurssitehokkaampi sähköenergiajärjestelmä, mutta miten? Suomalaiset avaintoimijat vastaavat 06/16)§ Pohjoismaiset energiatransiitot: yhdyntävän maakaasumarkkinan vai oman biokaasun kera? (09/16)§ Resurssitehokkaampi sähköenergiajärjestelmä meillä ja naapurimaissa: kuljemmeko samaa latua? (12/16)§ Tukevatko suomalaiset resurssitehokkaampaa ja ilmastoneutraalimpaa sähköenergiajärjestelmää? (12/16)§ Ovatko eliitit ja kansalaiset yksituumaisia Suomen energiapolitiikasta? (05/17)§ Vihreä raportti: uuden sähköenergiajärjestelmän osaratkaisusta toteutukseen (05/17)§ Ovatko suomalaiset hyväksymässä resurssitehokkaamman ja ilmastoneutraalimman sähköenergiajärjestelmän? (09/17)§ Vihreä raportti: uuden sähköenergiajärjestelmän toteuttamisvaatimukset – kuinka muokkaamme koko yhteiskunnan rakenteita? (09/17)
<p>WP3-4 politiikka-analyytit 2015-17:</p> <ul style="list-style-type: none">§ Aurinko (pv)- ja tuulivoiman potentiaali Suomessa§ Mikroverkot osana verkkoliiketoimintaa§ Bioenergian rooli mikroverkkoratkaisuissa§ Bioenergian rooli yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa§ Sähköjärjestelmän (suur)häiriöiden ja riskien hallinta:§ mikroverkot laajan kaapeloinnin tukena vai vaihtoehtona?§ V2G ja V2H hyödyntämismahdollisuudet§ Suomen tie kohti resurssitehokkaampaa liikennettä? Biopolttoaineet, sähköautot ja kannusteet§ Biopolttoaineiden käytön vaikutukset sähköntuotannon ja liikenteen pienhiukkaspäästöihin§ Millä hinnalla CHP:n joustoja jatkossa?§ Maakaasumootorilaitos varavoimana: päästöt?§ Hajautetut energiareсурssit (PV, EV, kuormat, varastot) sähköjärjestelmän joustoreserveinä§ Tehopohjaiset siirtotariffit resurssitehokkaan sähköjärjestelmän lähtökohtana§ Rakennusten energiatehokkuussäädösten arviointi sähköjärjestelmän näkökulmasta§ Fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvan tuotannon tukijärjestelmien vertailu§ Resurssitehokkuus ja sähköintensiivisen prosessiteollisuuden tulevaisuus§ Tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmän resurssien optimaalinen hyödyntäminen

WP5 politiikka-analyysit 2015-17:

- § Sähköenergiajärjestelmäämme muokkaavat voimat: keskeisten muutosajurien ristivaikutusanalyysi
- § Suomen sähköenergiajärjestelmän tulevaisuuden skenaariot: keskeiset muutosvoimat ja toimijoiden näkemykset

Viitteet

Aalto, P. (2003) 'Q-metodologia politiikan tutkimuksessa: Esimerkkinä EU:n pohjoisen ulottuvuuden asiantuntijakeskustelu', *Politiikka*, vol. 45(2), pp. 117-32.

Aalto, P. Dusseault, D., Kennedy, M.D., Kivinen, M. (2014) 'Russia's energy relations in the East and West: Towards a social structurationist approach to energy policy formation', *Journal of International Relations and Development* 17(1): 1-29 (doi:10.1057/jird.2012.29).

Araújo K. (2014) 'The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities', *Energy Research & Social Science*, vol. 1, pp. 112-121.

Brown, T., Schierhorn, P-P., Tröster, E. & Ackermann, T. (2014) 'Optimising the European transmission system for 77% renewables by 2030', *Energynautics*, <http://www.energynautics.com/publications/projects/>

Child, M., Haukkala, T., Breyer, C. (2015) 'The role of solar photovoltaics and energy solutions in a 100% renewable energy system for Finland in 2050', 31st EU PVSEC, September 2015, Hamburg.

EirGrid (2013) 'All island TSO facilitation of renewable studies', <http://www.eirgrid.com/media/FacilitationRenewablesFinalStudyReport.pdf>.

Energiateollisuus ry. (2010) *Haasteista mahdollisuuksia – sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050*. http://energia.fi/sites/default/files/haasteista_mahdollisuuksia_ja_hiilineutraali_visio_vuodelle_2050_20091112.pdf

Energiateollisuus (2014) 'Suomalaisten energia-asetteet 2014', http://energia.fi/sites/default/files/energiateollisuus_-_energia_asetteet_2014_final.pdf.

Energiateollisuus ry. (2015) 'Energia vuosi 2014: sähkö', <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2014-sahko-0>.

Fawkes, S. (2013) *Energy efficiency: The definitive guide to the cheapest, cleanest, fastest source of energy*. Gower.

Fouquet, R., Pearson, P.J.G. (2012) 'Past and prospective energy transitions: Insights from history', *Energy Policy*, vol. 50, pp. 1-7.

Goldemberg, J. (2012) *Energy: What everyone needs to know*. Oxford University Press.

Haukkala, T. (2015) 'Does the sun shine in the High North? Vested interests as a barrier to solar energy deployment in Finland', *Energy Research & Social Science* vol. 6, pp. 50-58.

Hewicker C, Hogan M., Mogren, A. (2011) 'Power perspectives 2030: On the road to a decarbonised power sector 2050', www.roadmap2050.eu.

Irrek, W. ym. (2008) 'Defining energy efficiency', Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, GmbH. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/energy_efficiency_definition.pdf

Jefferson, M. (2014) 'Closing the gap between energy research and modelling, the social sciences, and modern realities', *Energy Research & Social Science*, vol. 4, pp. 42-52.

Kiviluoma, J. (2013) 'Managing wind power variability and uncertainty through increased power system flexibility', VTT Science: 35, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/science/2013/S35.pdf>.

Mah, D.N., Wu, Y., Ip, J.C. & Hills, P.R. (2013) 'The role of the state in sustainable energy transitions: A case study of large smart grid demonstration projects in Japan', *Energy Policy*, vol. 63, pp. 726-737.

Martensen ym. , E. Tröster, T. Brown, T. Ackermann, S. Geidel, S. Langanke (2014) 'Wind power in a 100% renewables scenario for Rhineland-Palatinate', *Energynautics*. <http://www.energynautics.com/publications/projects/>

Mattes, J., Huber, A. & Koehrsen, J. (2015) 'Energy transitions in small-scale regions - What we can learn from a regional innovation systems perspective', *Energy Policy*, vol. 78, pp. 255-264. 10.1016/j.enpol.2014.12.011

Miller, C.A., Richter, J., O'Leary, J. (2015) 'Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions', *Energy Research & Social Science* 6: 29-40.

Patterson, W. (2007) *Keeping the lights on: Towards sustainable electricity*. Earthscan.

Ratinen, M. & Lund, P. (2015) 'Policy inclusiveness and niche development: Examples from wind energy and photovoltaics in Denmark, Germany, Finland, and Spain', *Energy Research & Social Science*, vol. 6, pp. 135-46.

Ruostetsaari, I. (2010) *Energiavalta: Eliitti ja kansalaiset muuttuvilla energiemarkkinoilla*. Tampere University Press.

Seppälä, J., Alestalo, M., Ekholm, T., Kulmala, M., Soimakallio, S. (2014) 'Hiilineutraalisuuden tavoittelu – mitä se on missäkin yhteydessä', Ilmastopaneeli 22.4.2014,

<http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/Hiilineutraalisuuden%20tavoittelu%20-%20mit%20se%20on%20miss%20kin%20yhteydess%20.pdf>.

Sähkömarkkinalaki, 588/2013, annettu 9.8.2013, <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013. *Energia- ja ilmastostrategia*. http://www.tem.fi/files/36730/Energia-ja_ilmastostrategia_2013_SUOMENKIELINEN.pdf

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2014. *Energia- ja ilmastotiekartta 2050*. https://www.tem.fi/energia/energia-ja_ilmastostrategiat/energia-ja_ilmastotiekartta_2050

UNEP International Resource Panel. 2011. *Decoupling*. http://www.unep.org/resourcepanel-old/decoupling/files/pdf/Decoupling_Report_English.pdf

Vanhanen, T. (2014) *The evolving requirements for smart secondary substations in three European regulatory market environments*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.

VTT (2011) *Measuring energy efficiency – Indicators and potentials in buildings, communities and energy systems*. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2581.pdf>

EL-TRAN– konsortio tutkii, mitä resurssitehokas sähköjärjestelmä tarkoittaa, miten se toteutetaan, millaisia politiikka-ongelmia sen toteutuksessa kohtaamme ja kuinka lopulta ratkomme niitä. Hanketta koordinoi Tampereen yliopisto, ja siinä ovat mukana Itä-Suomen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto, Turun yliopisto, VTT ja Tampereen ammattikorkeakoulu.