

Taastuvelektri tootmise ja elektritarbimise koostoime analüüs.

Analüüsitakse Eesti 2030 a **taastuvelektri tootmiskava** insenerlikust vaatevinklist lähtudes. Peetakse silmas eesmärkki, toota aastal 2030 kogu tarbitav (elektri) energia (Etar) taastuvalt.

Taastuvallikad võivad olla mittejuhitavad ja juhitavad. Nendel kahel liigil on oluline vahet teha, sest nende mõju süsteemi funktsioneerimisele ning tarbijate toitmisele on täiesti erinev. Kuna seni ametlikes käsitlustes eristust ei ole tehtud, ning perspektiivis Eesti mastaabis juhitava taastuva maht saab olla üpris väike (CHP-d), siis järgnevalt on kogu planeeritav tootmiskaht võetud mittejuhitavaks = varieeruvaks (Variable renewable energy, VRE), vastav tootmine on tähistatud VarT, ning selle **võimekused** $\{P(t)_{var}, t=1 \div 8760 \text{ ja } E_{var}\}$.

Järgnevates käsitlustes peetakse silmas, et VarT tootmine on

- **mittejuhitav** (varieeruv), tekivad tootmise - tarbimise balanseerimisraskused
- võrguühendus toimub **jõuelektroonika seadmete** (konverterite) vahendusel, mille tõttu ei oma inertsit, ei tekita lühisvoole, omab lühikesi ajakonstante jne, mis omakorda VarT suuremate osakaalude puhul, tekitavad süsteemis palju erinevaid **funktsioneerimisraskusi**, eriti talitluse stabiilsus, aga ka konverterite endi funktsioneerimine ja süsteemi releekaitse toimimine.

Tootmise-tarbimise koostoimet analüüsitakse nn **jääkkoormuse** (residual load) karakteristikate alusel.

Analüüsi sisu:

- Pkt 1. [Refereeritakse taastuvelektri tootmise ja kasutamisega seotud põhimõisteid](#) ja teemakäsitlust erialases kirjanduses.
- Pkt 2. [Käsitletakse Eesti VarT tootmise ja tarbimise karakteristikate omadusi](#) ja määratakse aastaste realisatsioonide stabiilsed näitajad (koostoime karakteristikad).
- Pkt 3.
- 3.1. [Simuleeritakse 2030a eesmärgile vastavat varieeruvat tootmis võimekust](#) („toota tuule/päikese energia abil...“), selle süsteemseid karakteristikaid ja võimet varustada tarbijaid.
 - 3.2. [Koostatakse võrdlusvariant](#), kus tootmissegu (ToSe) sisaldab püsivõimsusega tootmiskomponenti, ning VarT osakaal on seetõttu tunduvalt väiksem, leitakse selle variandi olulised süsteemsed karakteristikad.
 - 3.3. [Variantide võrdlus ja üldkokkuvõte](#).

Koostas:
Vello Zupsmann
elektriinsener

1.0 Mittejuhitava elektritootmisega seotud põhimõisteid.

Põhiprobleem (üleilmselt vaadatuna) - kuidas asendada primaarenergia muundamise protsessis CO₂ -te emiteerivad tootmisviisid sellistega kus seda ei toimu. Seega asendamist vajavateks on fosiilkütustel soojusjaamad. Käesoleval ajal, üleilmselt võttes, toodetakse elektrienergia ~2/3 mahus just taolistes jaamades (Eurostati andmetel toodeti EL-s 2021s fosiilsetest kütustest 41,9%, ja tuul+päike 19.5% elektrienergiast). Sellise tootmismahu asendamine CO₂ -e mittetootvatega on seotud väga suurte, nii tehniliste kui majanduslike probleemidega, tegelikult ka põhimõtteliste probleemidega ja seda üleilmselt.

Nagu mainitud tuleks tutvuda valdkonnas üleilmselt toimuvaga, nii rakenduse kui teaduse valdkonnas (loomulikult väga üldiselt).

Tähelepanu tuleks pöörata ka mõningatele valdkonna **spetsiifilistele mõistetele**:

Rohelisuse käsitluses räägitakse taastuvenergia tootmisest: tuul, päike, sobivad koostootmisjaamad, hüdrojaamad, tuumajaamad (CO₂ -ga seoses) jne.. Elektrisüsteemi talitluse käsitluses on taastuvenergia vajalik jagada kaheks - **mittejuhitav ja juhitav**, sest nende toime elektrisüsteemi funktsioneerimisele on täiesti erinev (mõiste taastuvenergia ei oma elektri-süsteemi talitluse käsitluses üldse mõtet).

Mittejuhitava taastuvenergia (tuul/päike) kasutamisel tuleb eristada mõisteid **tootmisvõimekus ja toodang**. Tootmisvõimekus $\{P(t)_{var}, t=1..8760; E_{var}\}$ on määratud muundusseadmete installeeritud võimsuse Pinst ja vastava mittejuhitava pr.energia kasutada olekuga vaadeldaval ajahetkel, kuna mittejuhitava en. toodang $\{P(t)_{ve}, t=1..8760; E_{ve}\}$ saab ainult olla võrdne tarbimisega, siis tootmine $\leq$ tootmisvõimekus $P(t)_{ve} \leq P(t)_{var}$. Nendel suurustel tuleks vahet teha, kasvõi sellepärast et õigesti hinnata VarT seadmete efektiivsust.

Elektrisüsteemi käsitlustes on rida aspekte mis erinevad tavapärasest, ning milliseid ei saa eirata ka üldisemates analüüsides, arengukavades jne.

- Elektrisüsteem (passiivselt) on seadmete kogum mis on ette nähtud el. energia tootmiseks ülekandmiseks ja tarbimiseks, st funktsioonide alusel ekvivalenteerituna koosneb kolmest komponendist: **tootmine, ülekanne, tarbimine**; ühe komponendi olulistel muutustel (näit tootmine), tuleb kontrollida kogu terviksüsteemi funktsioneerimisvõimet.
- Elektrisüsteem peab funktsioneerima pidevalt, rahuldavate tagavaradega ja seda ∞ ajahorisondiga, kuna ahelas puudub salvestus, siis kehtib nõue: **tootmine = kaod + tarbimine** igal ajamomendil, selle asjaolu mittearvestamine on üks üldkäsitluste põhipuudusi.
- Elektrisüsteem=ühendatud elektrisüsteem on suur dünaamiline süsteem või nn „süsteemide süsteem“, st väga keerulise struktuuriga süsteem, mille käsitlemine tervikuna on üldjuhul võimatu, seepärast on möödapääsmatu mitmesuguste **ositi käsitluse** ja ekvivalenteerimisvõtete kasutamine. Osasüsteemide piiritlus sõltub käsitluse eesmärgist (reeglina eesmärgi suhtes tugevasti seotud osad tuleb siduda osasüsteemiks)
- Veel struktuurist. Paratamtu tuleb eristada horisondalseid ja vertikaalseid kihte (tasemeid). Vertikaalses lõikes 1. kõige alumine oleks tasand, kus toimuvad nn el.en ülekande primaarprotsessid, ka reaajas juhtimine ja releekaitse 2. oleks operatiivjuhtimise tasand ja selle kohal 3. mitmesugused spetsiaalsed juhtimised, ka börsimehhanism 4. tasand nn administratiiv ja riikliku juhtimise tasand (kasutatakse ka detailsemaid eristusi). Seejuures eri tasandite struktuuriosade piirid ei pruugi ühtida. Kui 2. tasand on täpselt informeeritud 1-sel tasandil toimuvast (juhib seda) jne, siis kahjuks 4. tasand ei pruugi teada allpool toimuvast, samal ajal on see kaugeleulatuvate otsuste tasand, tulemusena võib juhtuda et kujundatav otsus ei toimi piirkonnas kus mõeldud või vastupidi hoopis laiemalt (näit börsi kaudu).

Elektrisüsteemi (võrgu) arengu planeerimisel on aluseks tarbimise asukohad ja kasvu hinnangud, millele peavad vastama tootmisviiside ja mahtude arendamise kavad, vajalike reservidega. Tootmise arendamine eraldiseisvana, tarbimist silmas pidades ei vasta ratsionaalsele tehnilis-majanduliku käsitluse loogikale, millesse võib mõningaid mõõndusi tuua ainult energia müük osasüsteemide ülese börsi kaudu.

1.1 Elektrivarustusest tervikuna.

Klassikaline elektrisüsteem

Klassikaliselt toimub el.en tootmine (muundamine) **sünkroongeneraatoritega** (SG), millised oma omadustega määravad oluliselt kogu elektrisüsteemi funktsioneerimise (dünaamika), teiseks, primaarenergia muundusprotsess nendes jaamades on **juhitav** (seda küll erineval määral).

Elektrisüsteemi pideva funktsioneerimise tagamiseks peab olema kindlustatud tootmise-tarbimise võrdsus ($P(t)_{\text{toot}} = P(t)_{\text{tar}}$), summaarselt kogu süsteemi ulatuses. Viimast ülesannet teostab **aktiivvõimsuse juhtimise süsteem**, Oma olemuselt on see nn järgivsüsteem kus tootmisvõimsus peab järgima tarbimise (=koormuse) muutusi mis võivad olla tingitud nii tarbimisvõimsuse muutustest kui ka süsteemi talitus häiretest.

Aktiivvõimsuse juhtimise süsteem on välja kujunenud SG omadustest lähtuvalt, on spetsiifiline keerukas juhtimissüsteem, mis juhib koordineeritult kogu el. süsteemi aktiivvõimsuste tootmist, eesmärgiga hoida seda võrdsena pidevalt muutuva kogukoormusega (kaod +tarbimine), ning mis koosneb nn automaatjuhtimise (primaar ja sek. reguleerimine), ja opertiivjuhtimise osadest jne. Automaatjuhtimise osa põhineb asjaolule, et **to-ta** ebalanss vastab sageduse **f** kõrvalekaldele nimisagedusest **fn**, st võimsuse juhtimine taandub sageduse hoidmisele mingis **fn** lähedases piirkonnas, ning mis sageduse primaar reguleerimise osas taandub agregadi kiiruse reguleerimisele, hoidmisele **wn** ümbruses. Klassikaline süsteem talitleb ajaperioodil häire tekkimisest kuni pr.reguleerimise toimima hakkamiseni **vastavalt süsteemi pöörlevate masside inertsile**, piisava inerts korral tekkivad sageduse kõrvalekalded on regulaatoritega kompenseeritavad. Kogu aktiivvõimsuse juhtimise süsteem on üles ehitatud selliselt et elektrisüsteem tuleks to-ta balanseerimisega toime kõikides situatsioonides (nii koormuse järgimine kui häirete neutraliseerimine).

VarT kasutuselevõtt toitesegus (ToSe) ning selle osakaalu suurenemine tähendab elektrisüsteemi inerts vähenemist, sageduse muutumise kiiruse RoCoF (häire tekkimise momendil) suurenemist ning sageduse kõrvalekalde suurenemist jne. mida pr. reguleerimine ei pruugi rahuldavalt kompenseerida, ning tulemuseks võivad olla väga rasked sageduse stabiilsuse häired. Seega, see on koht kus VarT konverterlingi tehnilised omadused hakkavad segama võimsuse juhtimissüsteemi tööd. Kuna inerts vähenemise mõju on teada suhteliselt ammu, siis on selle kompenseerimiseks välja töötatud rida abinõusid, laias laastus: a.kunstliku inerts variandid ja b. kiire sagedustoetuse (FFR) variandid (hakkavad tööle enne kiirusregulaatoreid).

VarT komponendiga elektrisüsteem

Kitsamalt võttes VarT komponent lisandub elektrivarustuse ahelas elektritootmise plokki, tootmissegusse (ToSe).

Kuna tarbimisvõimsus $P(t)_{\text{tar}}$ on täpselt võrdne VarT ja SG tootmisvõimsusega, siis mida suurem $P(t)_{\text{var}}$ seda väiksem sünkronaatorite osa $\{P(t)_{\text{juh}}\}$, ning kogu süsteemi käitumise määravad üha suuremal määral VarT seadmete parameetrid. VarT ja SG vahekorda (toodang) iseloomustatakse nn VarT **osakaaluga** (VRE penetration) millel on väga oluline tähendus võrgu käitumisomaduste hindamisel, kuigi osakaalu ja täpsemate hinnangute, nagu sageduse muutumise kiirus RoCoF või võrgu tugevus, vahekord on sageli hägus.

Mittejuhitava tootmise VarT käsitlemisel tuleks eristada kahte probleemide ringi:

- VarT primaarenergia (tuul/päike) **mittejuhitavus** ja kõik see mis võimaldab sellist mittejuhitavat primaarenergiat kasutada tarbijate toiteks (balanseerimine).
- VarT tootmisseadmete sünkroonmasinatest oluliselt erinevad **karakteristikad** ja kõik see mida need el.süsteemi funktsioneerimises esile kutsuvad ja kõik see mida on vaja ette võtta süsteemis, et selle funktsioneerimine ja el en. ülekanne toimuks nõutud tasemel.

Primaarenergia muundamine toimub tuulegeneraatorite (TG) ja päikesepaneelidega (PP), nende tootmisvahendite võrguühendused on jõuelektroonika lingid = konverterpõhised lingid (KL) (power electronic interface), millised **ei oma inerts** (asünkroonne sidestus), **ei tooda lühisvoole** ja on **tunduvalt kiiretoimelisemad** kui sünkroongeneraatorid = SG lingid. Seega olenevalt VarT (st KL seadmete) osakaalust süsteemis olenevad ka sumarse energiatootmise

komponendi (tootmisegu ToSe) omadused, sealt omakorda kogu süsteemi käitumisomadused (stabiilsus, releekaitse toimimine jne).

VarT mittejuhitavus väiksemate osakaalude puhul kutsub esile ToSe juhitava komponendi tootmistingimuste raskenemise, kiiremad võimsuste muutused jne, ning lisaks nende majanduslike näitajate halvenemise. Suurematel osakaaludel ($\text{kop} > 0.6$) hakkavad domineerima KL omadustest tulenevad erisused ja tekivad hoopis laiemad probleemid, milledest väljapääsu nähakse KL seadmete täiustamises.

VarT tehnilistest karakteristikatest (konverterlinkidest KL)

VarT seadmetes kasutatakse nn pingeallikas (VSC) konvertereid, mida juhitakse kahel viisil:

- Vooluallikas konverteritena (CSC), nimetatakse võrku järgivad konverterid (GFL), mis on võimelised töötama ainult „tugevasse“ võrkku (lühisvõimsuse mõttes).
- pingeallikas konverterina (VSC), nn võrkku formeerivad konverterid (GFM), mis on võimelised iseseisvalt formeerima väljundi sagedust ja pinget ja emuleerima SG tööd jne, ning mille juhtimissüsteemi on võimalik täiendada väga mitmesuguste vajalike võimekustega. GFM konverteritele pannakse suuri lootusi, loodetakse juhtimissüsteemi arendada nii, et nad oleksid võimelised asendama SG-eid, praegu loetakse neid suure VarT osakaaluga võrkude jaoks arengujärgus olevateks [K6,K35,K22]

Käesoleval ajal töötavad VarT seadmed peaaegu eranditult **GFL** juhtimissüsteemiga, st VarT osakaal peab olema selline et tootmiseadme liitumispunkt oleks tugev võrk, ning süsteemides kus VarT inst võimsused on suured (Iiri, Suurbrit jne) piiratakse KL seadmete hetkosakaalu tasemeni $K(t)_{op} < 0.6-0.7$

KL omadused väikestel osakaaludel ei mõjuta oluliselt süsteemi tööd, kuid osakaaludel kus orienteeruvalt $K(t)_{op} > 0.6$ tekivad olulised raskused nii KL seadmete endi funktsioneerimisvõimega kui kogu võrgu siirdeprotsesside stabiilsusega, nii sageduse, pinge kui nurgastabiilsuse osas. Lisaks ka süsteemi releekaitse korrektse funktsioneerimisega.

Vaata ka **Lisa 1**

Mõlema aspekti mõjud (nii mittejuhitavus kui KL omadused) elektrisüsteemile, on VarT suurematel osakaaludel nii suured, et nõuavad süsteemi käsitlemisel täiesti uusi lähenemisi [K29,K36,K40].

VarT osakaalust eraldi

VarT osakaalu (VRE penetration) mõistet kasutatakse väga laialt ja ka erinevalt, seetõttu mõned kommentaarid.

Skeemil **1ü** on kujutatud fragmenti kahest võimalikust VarT muundusvõimekusest, mis vastavad installeeritud võimsustele P_{inst} ja $3 \cdot P_{inst}$, ning mis on võimelised tootma erinevat mittejuhitavat energiat võimsustega $P(t)_{var}$, st nende osakaal kogutootmises on erinev, ning ka koostoime tarbimisega on erinevad.

Kõverale **1** vastav P_{inst} on selline et muundusvõimekuse kõver $P(t)_{var}$ asub tarbimiskõverast (pruun) täielikult allpool st kogu võimekus on võimlik muundada elektrienergiaks, lisaks igal aja momendil on **toot=tar** võrdsuse saamiseks vaja lisada veel mingi juhitud võimsus $P(t)_{jh}$

Kõverale **2**, vastab $3 \cdot P_{inst}$ mille muundusvõimekuse kõver $P(t)_{var}$ teatud ajaperioodidel lõikub tarbimise kõveraga st tootmisvõimekus $P(t)_{var}$ on periooditi suurem kui tarbimine $P(t)_{tar}$. Kuna süsteemi funktsioneerimiseks (balanseerimise vaatevinklist) on vajalik et $P_{toot} = P_{tar}$ st mitte kogu võimekust ei ole võimalik muundada el.energiaks vaid muundamist tuleb piirata=alla reguleerida (curtail). Niisiis see on tootmistase mille käsitlemine ja kasutamine on palju probleemsem, kuid üldjuhul tulebki koostoimet sellisena vaadelda.

Eelnev selgitab miks tuleb üldjuhul vahet teha muundamises (tootmis) **võimekusel** ja mittejuhitavalt toodetud el.energia **tootmisvõimsusel**, esimene on määratud P_{inst} ja momendi tuuleoludega, teine aga lisaks momendi tarbimisega (elektriline võimsus on $\leq$ võimekus).

Siit tuleneb ka **võimekuse kasutusteguri** (energia järgi) **Kvk** mõte.

Võimekuse kasutustegur on VarT tootmisvõimekuse **Evar** ja elektitoodangu **Eve** suhe

$$Kvk = Eve/Evar = (Evar - Erg)/Evar$$

kus Erg - allareguleeritud, piiratud võimekus (aastase energiana)

Edasi, **Evar** **väärtuse hindamisel** kasutatakse vastava varieeruva en. liigi seadmete inst võimsust P_{inst} ja vastavat kasutustegurit **Kkas**, nii et **Evar** = **Kkas** * **Pinst** * 8760.

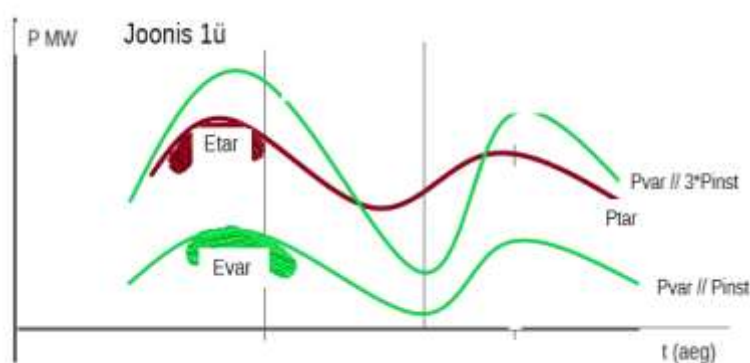
Taoliselt arvatud **Evar** suurus ei ole toodetud el.en hulk, vaid võimekus seda toota, toodetud energia oleks see juhul, kui Pinst ja selle võimekuskõver oleks asendis 1, mis käesoleval ajal enamuses ongi nii.

Suurtel Pinst osakaaludel nagu 2030 perspektiivplaanis, see nii ei ole (nagu nägime) vaid toodetav el.energia **Eve** tuleb arvutada järgmiselt

$$\mathbf{Eve=Kvk*Evar=Kvk*Kkas*Pinst *8760}$$

Nagu **järgnevalt** selgub $Evar=Etar$ puhul $Kvk \sim 0.7$, st Pinst tegelik tootmisvõime ja Eve on oluliselt madalamad.

Jooniselt on näha veel üks asjaolu mida sageli käsitletakse vastupidiselt, nimelt VarT võimekuse $P(t)var$ varieeruvus. Pinst suurendamisel x korda varieeruvus suureneb x korda, mis raskendab VarT balanseerimist Pinst suurenemisel. Joonisel kõver 1 vastab näit mingile Pinst -le, kõver 2 vastab juhule kui meil oleks vaadeldaval aastal olnud installeeritud 3 korda rohkem tuulikuid, st ületootmispiirkonnad suurenevad kiiremini kui vähenevad defitsiidipiirkonnad, seega Pinst suurendamisel võimekuse kasutustegur Kvk väheneb.



Veel, suure Pinst st suure VarT võimekuse ülejäägi korral, nagu Eesti 2030 tootmiskava ($Evar=Etar$) ette näeb, räägitakse selle ülejäägi ekspordist. Juhusliku tootmisvõimekuse ülejäägi muundamine elektri, „eksporti“ alusel on üsnagi hägus mõte.

Tegelikult „eksport“ toimub ju börsi kaudu ja selle ulatus sõltub börsipiirkonna võrgu põhisedemete läbilaskevõimest (st piirangute puudumisest), ning edasi, pakkumiste- tarbimise vahetusest selles piirkonnas. Kui oletada et Eesti süsteem on situatsioonis 2 kuid Lä,Le on olukorras 1, siis on võimalik et piirkonna summaarne seis vastab situatsioonile 1 ja meie pakkumised tarbitakse mujal naabrite juures (sest läbilaskevõime on piisav).

Kui aga summaarselt jääb alles mingi ülepakkumisega piirkond siis tuleb paratamatult alla reguleerida (muundada=toota ilma tarbimiseta ei saa). Kuna vahendajaks on börs, siis selline olukord tähendabki negatiivse hinna piirkonda, ning kui selliseid ajavahemikke on vähe siis saab lahendada konflikti formaalselt negatiivse hinnaga, kui aga VarT tootmine on suur ja ülepakkumine tihe, siis on selge, et pidevat konflikti tootjate hulgas neg. hinnaga ilmselt ei lahenda. St VarT kaalutlemata suurendamine muudab selle tootmisviisi ja ühtlasi ka taolise börsimehhanismi väga probleemikaks. Tegelikult elektitootmise **piiramine** võimekusega võrreldes on tõsine arutlusprobleem, ning suure osakaaluga VarT kasutamist ilma allareguleerimisega=piiramiseta ei kujutata ette [K5,K7].

Eelnev oli VarT osakaalu üldine käsitus, VarT tootmise taseme ja ulatuse iseloomustajana kasutatakse laialt ka arvulisi mõõde ja seda kahes modifikatsioonis: **osakaal energiatootmise järgi - Koe** ja **osakaal hetkevõimsuse järgi - K(t)op**, Seejuures kumbagi on võimalik arvutada nn võimekuse järgi (primaarenergia alusel) ja elektri muundatud, energia või võimsuse järgi.

a. VarT energia tootmise osakaal (penetration) aastast -Koe (aasta integraalne näitaja)

$$Koe= Evar /Etar$$

kus Evar [MWh/a] - aasta jooksul toodetud Var energia

Etar [MWh/a] - aasta jooksul tarbitud energia

Koe iseloomustab põhiliselt Var allikate (tuul/päike) installeeritud võimsusi ja energiatootmise võimekust, 2030 VarT arendamisplaanide järgi $Evar = Etar$, $Koe = 1$

b. VarT võimsuse tootmise osakaal mingil aja hetkel **t** - **K(t)op**

$$K(t)op = P(t)var / P(t)tar$$

kus $P(t)var$ [MW] – VarT võimsus mingil aja momendi t

$P(t)tar$ [MW] – tarbimis võimsus mingil aja momendi t

K(t)op (instantaneous penetration) kannab olulist informatsiooni, suurus **varieerub ööpäeva** jooksul, ilmastikuoludest ja tarbimisest tingituna (ja märgatavalt) jne, mis tähendab ühtlasi seda, et analoogiliselt varieeruvad süsteemi inerts (sageduse **f** stabiilsusnäitajad), lühisvoolud st releekaitse funktsioneerimistingimused jne. [K10].

K(t)op täpsem sisu tuleneb süsteemist (osasüsteemist) mille alusel see on määratud. Kop on hea ja ammendav väikeste süsteemide (sünkroonalade) iseloomustaja, suurte ühendatud süsteemide puhul kus Kop -id arvutatakse osasüsteemide järgi on seosed muude täpsemate näitajatega (näit inertsiga ja RoCoF-iga) tunduvalt hägusamad. Osasüsteemide Kop-d, näiteks Eesti andmete alusel määratud Kop -id on formaalsed (süsteemi paralleeltööl võib see olla ka üle 100%) ja iseloomustavad ainult selle allsüsteemi mõnda külge, kui aga vaadeldud osasüsteem saarestub siis muutub see saare suhtes oluliseks reaalnäitajaks. Kop on inerts ja süsteemitugevuse vaatevinklist siiski heaks orientiiriks. Balti piirkonna kui elektriliselt tugevasti seotud allsüsteemi Kop-id on tihedalt seotud sama süsteemiosa inerts ja sageduse muutumise kiirusega.

VarT osakaalu laiendatud mõiste SNSP [K42].

VarT kasutuselevõtu seis ja probleemid .

VarT kasutuselevõtt sõltub kõigepealt tootmisseadmete tehnilisest tasemest, eriti võrgukonverteri juhtimisskeemist (GFL või GFR), teiseks VarT tootmisseadmete (tegelikult kõikide konverterseadmete) osakaalust võrgus.

Käesoleval ajal töötavad VarT seadmed peaaegu eranditult **GFL juhtimissüsteemiga**, st VarT osakaal peab olema selline et tootmisseadme liitumispunkt oleks tugev võrk, ning süsteemides kus VarT inst võimsused on suured (Iiri, Suurbrit jne) piiratakse KL seadmete hetkosakaalu tasemeni $K(t)op < 0.6-0.7$.

VarT integreerimisprobleemid ei sõltu mitte ainult VarT enda osakaalust **vaid ka süsteemi**, võrgu **eripärade**st ja konfiguratsioonist: sünkroonala suurus, VarT tootmisühikute (parkide) suurus jne., suure sünkroonala puhul osasüsteemi sidemete tugevusest naaberosadega jne. [K30,K36,K11,K29,K6].

Kuna elektrisüsteemi või selle juhtimispiirkonna funktsioneerimise eest vastutab operaator (TSO) siis nende vajadused ja nõudmised liidetavatele VarT seadmetele väljenduvad **võrgueeskirjades** [K2,K43], tulemusena ongi vastavaid seadmeid täiustatud nõutavate võimekustega.

Ajalooliselt tekkisid esimesed probleemid tuuleparkide kasvades (Saksamaa) [K2], suuri tuuleparke ei ole võimalik probleemideta välja lülitada, sest lühise kõrvaldamisel peaks tuulepark olema töövõimeline (et ei tekiks olulist võimsuse defitsiiti), lahendus tuli nn lühise läbimise FRT võimekuse nõudega ja KL seadmete vastava täiustamisega.

Teiselt poolt, probleemide ees on ka väikesed süsteemid (sünkroonalad) kus VarT osakaal kippub suureks (kui tuuleolud on soodsad), seega inerts ja lühisvõimsus väikesteks, jällegi Iiri ja Suurbrit. sünkroonalad [K43], kus väljapääsuks on VarT osakaalu piiramine (curtailment).

Probleemsed on ka nõrkade sidemetega (v.v.) osasüsteemid, taskud (pockets), kui nendes VarT osakaalud muutuvad suureks. Hea ülevaade [K30].

Üldiselt VarT tootmisseadmeid ehitatakse **hulgalises ja tehnilises vastavuses** TSO nõuetele ja võrgueeskirjadele, **nii et tarbijate energiavarustuse kvaliteet ei kannataks**.

Rida probleeme nõuavad aga ulatuslikke teoreetilisi uuringuid, millega ka tegeletakse üleilmselt ja väga suurte jõududega, mõned allikmaterjalid [K37, K1,K11,K14, K17,K2,K3,K33, K38], vastavaid uuringumaterjale on saadaval suurtes hulkades .

2.0 Eesti elektrisüsteemi varieeruva tootmise (VarT) ja tarbimise koostoime analüüs.

Kasutatud üldpõhimõtteid.

- Üldiselt juhuslike protsesside käsitlustes võib eristada kahte liiki tegevusi ja ülesandeid
- ette vaatavad, mis antud juhul on seotud otseselt stohhastiliste protsesside $P(t)_{tar}$ ja $P(t)_{var}$ jälgimise ja prognoosimisega, defitsiidipiirkonna järgimisega jne.
 - tagasi vaatavad, kus analüüsitakse protsesside salvestatud realisatsioone (statistika) ja nende omavahelisi vahekordi ja seoseid. Eesmärk on leida seoseid mis annaksid informatsiooni nende protsesside **stabiilsete näitajate** kohta, mida oleks võimalik kasutada näiteks vastavate **juhtimissüsteemide kavandamisel**, häälestamisel aga ka järgneval ettevaataval tegevusel.

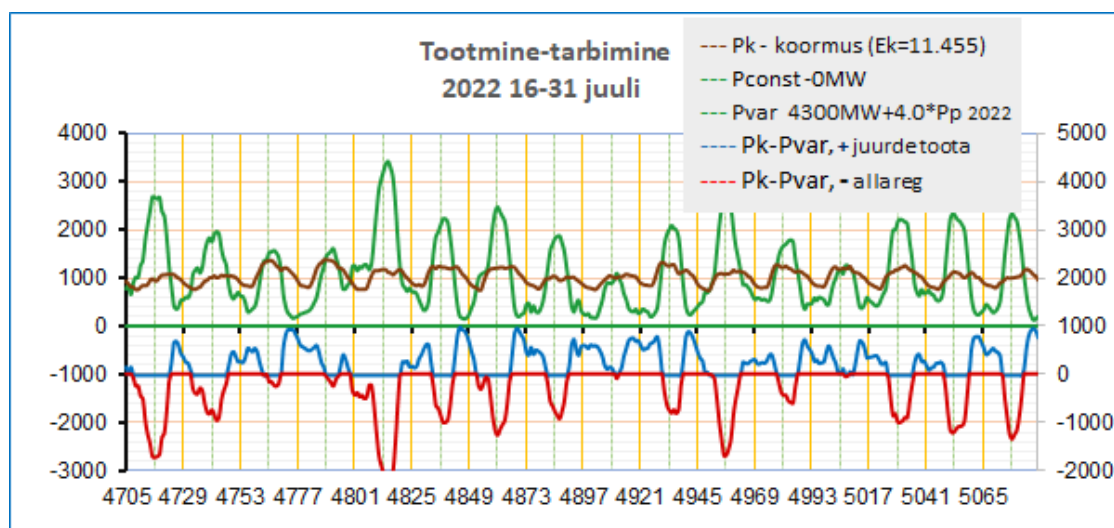
Käesoleval juhul **analüüsimine VarT -d ja koormuskõveraid tagasivaatavalt**, et teada saada võimalikke stabiilseid näitajakomplekte. Tagasivaatav analüüs on olemuselt statistika mis eeldab vajalike andmehulkade olemasolu, kuid seni kahjuks need meil puuduvad. Seetõttu analüüsitakse VarT tuuleenergia osa ja koormuse käitumist nelja aasta 2019- 2022 andmetel kuna sobivad andmerekad on olemas (Elering'i koduleht).

VarT ja tarbimise koostoime iseloomustajaks kasutame nende ebalanssi $P(t)_{eb}$, $t = 1 \div 8760$, kus

$$P(t)_{eb} = P(t)_{tar} - P(t)_{var} \quad (1)$$

Kirjanduses nimetatakse selliselt defineeritud ebalanssi **jääkkoormuseks** (residual load), ilmselt tingituna sellest et käesoleval ajal reaaluhtudel on alati var tootmine väiksem kui koormus, seega siis $P(t)_{eb}$ on positiivne ja näitab seda kuipalju on vaja juhitavalt juurde toota, et oleks täidetud $P(t)_{eb} = 0$.

Suurematel VarT osakaaludel on tootmisvõimekus $P(t)_{var}$ periooditi suurem ja periooditi väiksem kui tarbimine, seega **jääkkoormus** $\equiv$ **koostoime ebalanss** $P(t)_{eb}$ on vastavalt negatiivne ($P(t)_{rg}$) või positiivne ($P(t)_{jh}$). Vaata ka järgnev joonis kus on kujutatud fragmenti (16-31 juuli) variandi V1 kõveratest **$P(t)_{tar}$, $P(t)_{var}$ ja kujunevast ebalansist $P(t)_{eb}$** (sini-punane kõver). Skeemil on tähistatud $P_{tar} = P_k$.



VarT võimekuse $\{P(t)_{var}, t=1-8760\}$ tarbimiskõblikuks tegemisel **tuleb kasutada nii piiramist=allareguleerimist** $\{P(t)_{rg}, t_{rg}, E_{rg}, P_{rgmax}\}$ kui **juhitavalt juudetootmist** (sinised lõigud) $\{P(t)_{jh}, t_{jh}, E_{jh}, P_{jhmax}\}$.

Seega tootmise-tarbimise vahekorra iseloomustajateks on:
 Allarguleerimise **P(t)rg** (VarT ülepakkumise) piirkonnas
 $Erg(TWh)$ – kasutamata jäänud energia(võimekuse suhtes)
 Prg_{max} – allarguleeritud max võimsus MW
 t_{rg} – allarguleerimistundide erv

Juhitava tootmise **P(t)jh** (VarT defitsiidi) piirkonna iseloomustajad
 $E_{jh}(TWh)$ – juhitavalt tootmise energia(TWh)
 $P_{jh_{max}}$ – juhitavalt tootmise max võimsus MW
 t_{jh} – juhitavalt tootmise tundide erv

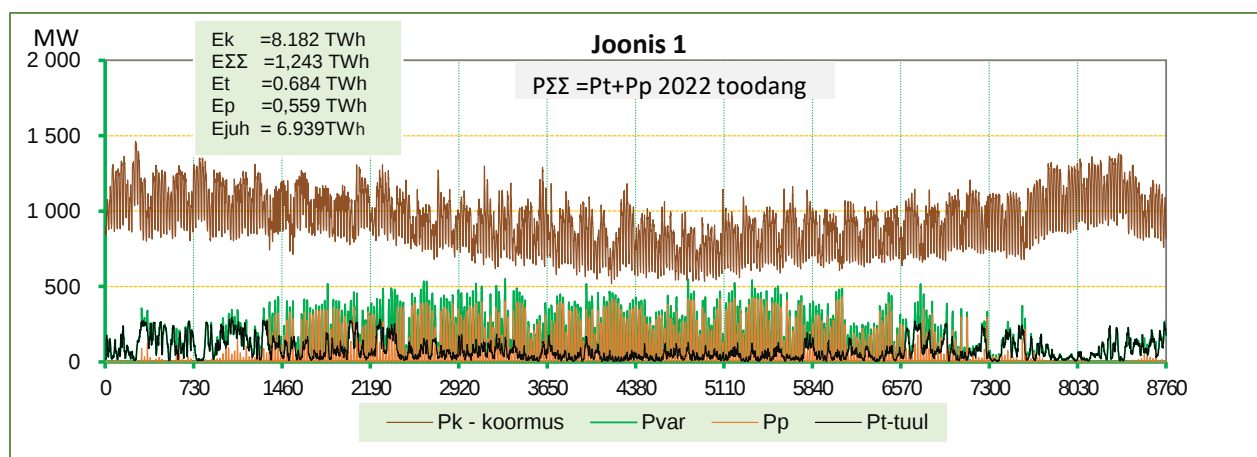
Pkt 2.2 -s analüüsitakse nende näitajate stabiilsust (muutumispiirkonda) aastaste realisatsioonide lõikes.

Veel üks oluline aspekt, nagu näha seosest (1), $P(t)_{eb}$ on määratud tarbimise muutumise protsessiga (realiseering või prognoos), st ka järgnevalt leitavad vajaliku juhitava tootmise näitajad ja analüüs iseloomustavad ainult koormuse balanseerimist ning ei arvesta häirete neutraliseerimiseks vajalikku juhitavat aktiivvõimsust. Mainitud leitavad karakteristikud on vajalikud mingis pikemas planeerimistüklis, praegu näiteks päev-ette börsi planeerimises. Häirete neutraliseerimine (sageduse juhtimine jne) on **süsteemiteenuste** valdkond ja asetub eelnevale.

2.1. Eesti elektrisüsteemi 2022 a varieeruva tootmise (tuul+päike) ja tarbimise võimsuskõverad.

Üldine tootmise- tarbimise (**to-ta**) vahekord on esitatud joonisel 1, tähistus värvide järgi järgmine:

$P(t)_k$ (MW) – koormus (pruun), koormus= tarbimine +kaod
 $P(t)_t$ (MW) - tuuleenergia (must)
 $P(t)_p$ (MW) - päikeseenergia (kollane)
 $P(t)_\Sigma$ (MW)- summaarne (t+p), VarT, (roheline)



Kuigi graafikud ei võimalda näha detaile (8760 punkti), iseloomutavad need üldisi tendentse ja kõverate vastastikuseid asendeid.

Energianäitajad $E_t, E_p, E_{var}, E_{tar}$ on saadud võimsuskõverate ja ajaliste kestuste alusel (toodetud ja tarbitud energia), need erinevad mõnevõrra statistikas antud arvudest, kuid see ei oma antud juhul tähtsust

$E_{tar} = 8.182 \text{ TWh}; P_{tar} = 518 \div 1464 \text{ MW}, \Delta P_{tar} = 946 \text{ MW}$

$E_t = 0.684 \text{ TWh}; E_p = 0.559 \text{ TWh}; E_{var} = 1.243 \text{ TWh}, P_{var} = 2 \div 549 \text{ MW};$

$E_{juh} = 6.939 \text{ TWh}; P_{jh} = 137 \div 1447 \text{ MW}, \Delta P_{jh} = 1310 \text{ MW}$ (juhitavalt juurde toota = jääkkoormus)

VarT osakaal: $Koe = 1.243 / 8.182 = 0.15$

Tabeli suurused:

Erg - VarT allareguleerimise vajadus [TWh/a]

trg - allareguleerimisperioodide summaarne pikkus t/a

Prgmax – maksimaalne allareguleerimisvõimsus

Ejh - Juhitava energia juurdetootmise vajadus [TWh/a]

tjh - juhitavalt juurdetootmisperioodide summaarne pikkus t/a

Pjhmax - maksimaalne juurdetootmisvõimsus

Ejh* - Juhitava energia juurdetootmise vajadus %des kogutarbimisest (Ejh/Ek)

Kvk - VarT võimekuse kasutustegur (energia järgi)

On näha et leitud karakteristikad {Ejh, tjh, Pjhmax} muutuvad aastate lõikes vähe (on stabiilsed), mis tähendab et maismaatuule ja tarbimise „koostoime“ on aastate lõikes stabiilne, vähemalt oluliste koormuse iseloomu muutusteni ja neid karakteristikaid (suhtelisel kujul) võib aluseks võtta VarT kasutusefektiivsuse iseloomustamiseks tulevikustsenaariumide koostamisel.

Keskmissed maimaatuule ja tarbimise koostoime näitajad: juhitavalt **tuleb juurde toota ~30% tarbitavast energiast**, seejuures **ajaliselt (56 -61) % tundidest**, st üle poole ajast on vaja võimsust juurde toota, kusjuures **juurdetoodetava võimsuse max** on üsna lähedane tarbimisvõimsuse max -ile, st juhitavat primaarenergiat (kütust) on vaja ~30% kogu tarbitavast energiast, kuid vastavat võimsust ~ 100% koormusmaksimumist.

VarT seisukohast vaadatuna: kui VarT võimekus **Evar =Etar**, siis koormuse ja tuulevõimekuse omavaheline suhe näitab et: ~30% tuuleenergia võimekust tuleb alla reguleerida (aasta keskmisena) st ~70 % tuule võimekusest on võimalik kasutada.

Kui täiendada VarT-s tuuleenergiat päikeseenergia P(t)p -ga (2022a andmed) ja võtta aluseks samuti Evar =Etar, on võimalik Ejh % mõnevõrra vähendada, teisiti tuule ja päikeseenergia omavahelisel proportsioonil on märgatav mõju VarT **to-ta** koostoime majandusnäitajatele.

Tootmissegu kujundamise vaatest näitab koostoime P(t)eb balanseerimiseks vajaliku tootmissegu mittejuhitava komponendi ja juhitava komponendi **vahekorda**, ning see on leitav jääkkoormuse võrrand (2) alusel

$$P(t)_{eb} = P(t)_{tar} - P(t)_{var} = 0 \quad (2)$$

kus $t = 1 \div 8760$

P(t)eb negatiivsed väärtused moodustavad allareguleerimisjärgnevuse P(t)rg mille iseloomulikud näitajad {Erg, Prgmax, trg} ja positiivsed väärtused moodustavad juurdetootmisjärgnevuse P(t)jh mille iseloomulikud näitajad {Ejh, Pjhmax, tjh}.

Eelnev näitab, et nende näitajate suhtelised väärtused ei muutu erinevate tarbimiste Etar jaoks, kui aluseks VarT võimekutase Evar=Etar.

3.0 2030 aastaks planeeritud Var tootmise taseme (Evar=Etar) analüüs.

Kuna poliitilise taseme plaanides on kavandatud väga suured varieeruva taastuenergia eesmärgid, siis tekib küsimus et kuidas sellised kavad ja retoorika võiksid välja näha elektroenergeetika poolt vaadatuna. Niisiis,

1. **Evar** ei tähenda elektrienergiat vaid primaarenergiat, mida olemasolevad tootmisseedmed (Pinst) on võimelised muundama el. energiaks, st tootmisvõimekus, kui palju tegelikult toodetakse sõltub tarbimisest (täpsemalt var tootmise ja tarbimise koostoimest).
2. Leitavad allareguleerimise ja juhitavalt juurdetootmise näitajad **tulenevad tarbimisest** (prognoos) st need iseloomustavad ainult koormuse balanseerimist ning ei arvesta häirete neutraliseerimiseks vajalikku juhitavat aktiivvõimsust. Mainitud näitajad on vajalikud mingis pikemas planeerimistükis, praegu näiteks päev-ette börsi planeerimises. Juhitavalt juurdetootmise võimsused peavad olema kasutatavad börsil balanseerimiseks ilma igasuguste kitsendusteta, ning need määravad ka börsihinna. Kogu sageduse reguleerimise ja stabiilsuse temaatika st automaat ja operatiivjuhtimise tsükli balanseerimine on erinev valdkond.

Järgnevalt analüüsitakse kahte varianti V1 ja V2:

1. V1 – 2030 aastaks ettenähtud VarT võimekuse ja tarbimise koostoimet; leitakse vajalikud VarT allareguleerimise (piiramise) näitajad ja vajaliku juhitava võimsuse näitajad
2. V2 - 2030 aastaks ettenähtud tarbimise tootmist püsivõimsuse Pc (AEJ) ja vähendatud VarT –ga, nii et $E_c + E_{var} = E_{tar}$; leitakse ratsionaalne Pc ja VarT installeeritud võimsuse Pinst kombinatsioon, aga ka vajalikud VarT allareguleerimise näitajad ja vajaliku juhitava võimsuse näitajad.

Modelleerimine – simuleerimine.

Modelleerimine - simuleerimine on realiseeritud Exceli keskkonnas aluseks jääkkoormuse võrrand (2).

3.1. Põhivariant V1

2030 aasta tarbimiseks on võetud $E_{tar} = 11.455 \text{ TWh}$ (erinevad prognoosid),

P(t)tar on ülesskaleeritud 2022a realiseeringu järgi, $P_{tar} = 725 \div 2050 \text{ MW}$

Mittejuhitava tootmise (VarT) võimekus **P(t)var** on üles skaleeritud 2022 realiseeringu järgi, nii et $E_{var} = E_{tar} = 11.455 \text{ TWh}$, mille tagavad installeeritud võimsused:

Tuul: Pinst= 4315MW;	võimekus: Et =9.220TWh;	Pt =24 ÷4000MW
Päike: Pinst= 4.0x Pinst ₂₀₂₂ ;	võimekus: Ep=2.236TWh;	Pp=0÷1728 MW
Tuul/päike: (koostoimes)	võimekus: Evar = 11.455 TWh;	Pvar =24÷ 4482 MW

Simuleerimise tulemused.

3.1.a Tarbimise balanseerimiseks (Ptoot=Ptar, t=1.. 8760) juhitava tootmisega P(t)jh,
on vaja:

VarT võimekust **alla reguleerida** (piirata) mahus:

$E_{rg} = 3.287 \text{ TWh}$, 3798 t/a, max $P_{rg} = 3495 \text{ MW}$;

Juhtavalt **juurde toota** mahus:

$E_{jh} = 3.286 \text{ TWh}$, 4962 t/a, max $P_{jh} = 1860 \text{ MW}$;

VarT hetkvõimsuse osakaal : $K(t)_{op} = 0.027 \div 1.0$

VarT võimekuse kasutustegur : $K_{vk} = (11.455 - 3.287) / 11.455 = 0.71$

Suurused aja funktsioonina graafiliselt: Joon.V1 ($P_k = P_{tar}$, $P_{\Sigma} = P_{var}$),

fragmendid Joon.V1suvi ja Joon.V1talv.

Joonisel V1 on esitatud vastavad näitajad ka suuruse järgi järjestatuna.

3.1.b Tarbimise balanseerimine (silumine) salvestusseadmetega SS.

Alternatiivina P(t)jh -ga tasakaalustamisele (silumisele) hinnatakse SS seadmetega tasakaalustamist.

Teostatud on SS seadmete silumiskäitumise modelleerimine ja on määratud vajalik SS mahtuvus **Ess**.

Silumise all mõistetakse VarT liiaga tootmisvõimekuse perioodidel SS laadimist ja tootmisdefitsiidi esimesel ilmnemisel tarbija toitmist SS tühjendamisega.

Olulised on kaks põhiparameetrit:

Pss= salvestusseadme maksimaalne tühjendamise, laadimise võimsus[MW]

Ess – salvesti mahtuvus [MWh]

Simuleerimine näitab, et $E_{var}=E_{tar}=11.455$ TWh tasandamiseks **on vajalik** SS mahtuvus **Ess= 1.7-1.8 TWh** , **Pss>Prg=3495 MW** (st juhitavat tootmist ei oleks siis vaja) .

Selline SS mahtuvus ei ole käesoleval ajal ettekujutatav. Lisaks, selline süsteem nõuab nn $K(t)_{op}=100\%$ $t=1-8760$, võimaldavat konvertersüsteemi (võrku formeerivad konverterid), mis praegusel arenguetapil ei ole samuti ettekujutatav.

Kui simuleerida mingi salvestusseame, näiteks Paldiski HAJ 550MW, 6000MWh toimeefektiivsust samadel eespooltoodud tingimustel, siis tulemused järgmised:

$E_{rg}=2.491$ TWh, 2677 tundi, $P_{max}=3495$ MW;

$E_{jh}=2.496$ TWh, 3791 tundi, $P_{max}=1860$ MW;

SS: silutud tunde 2292 t/a

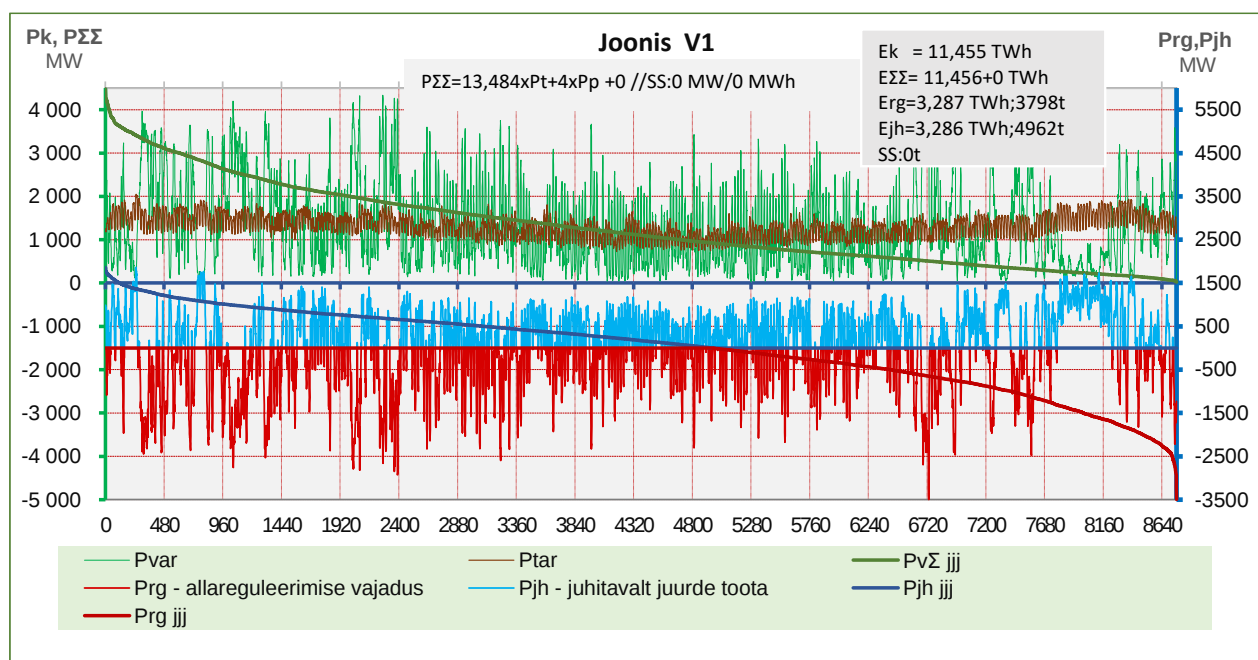
$K_{vk}=(11.455-2.491)/11.455=0.78$ -78% VarT -st muundatakse el.energiaks

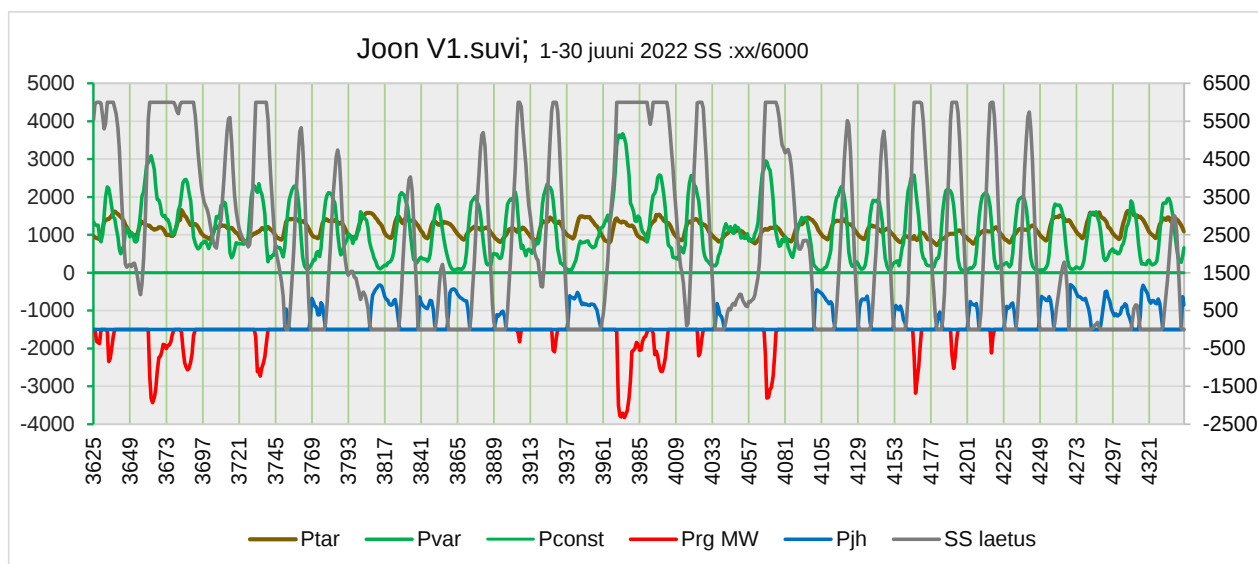
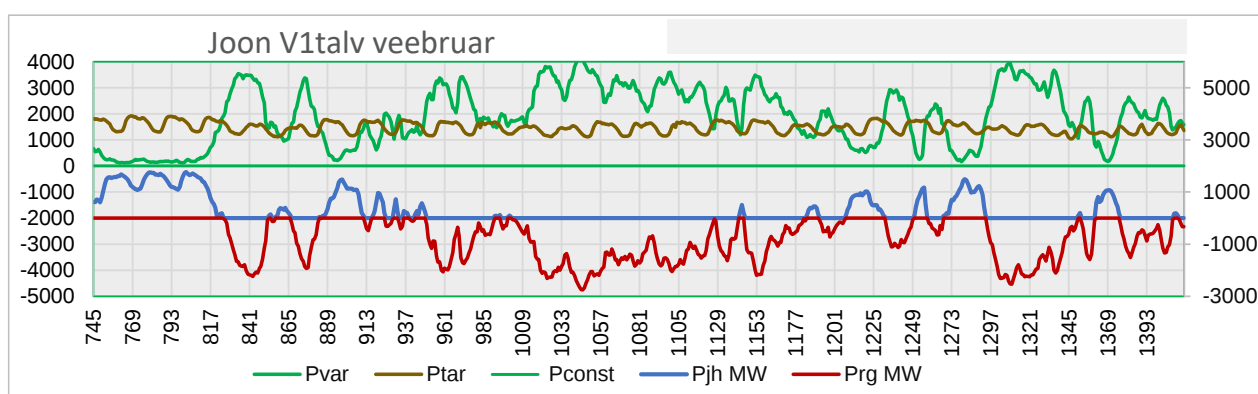
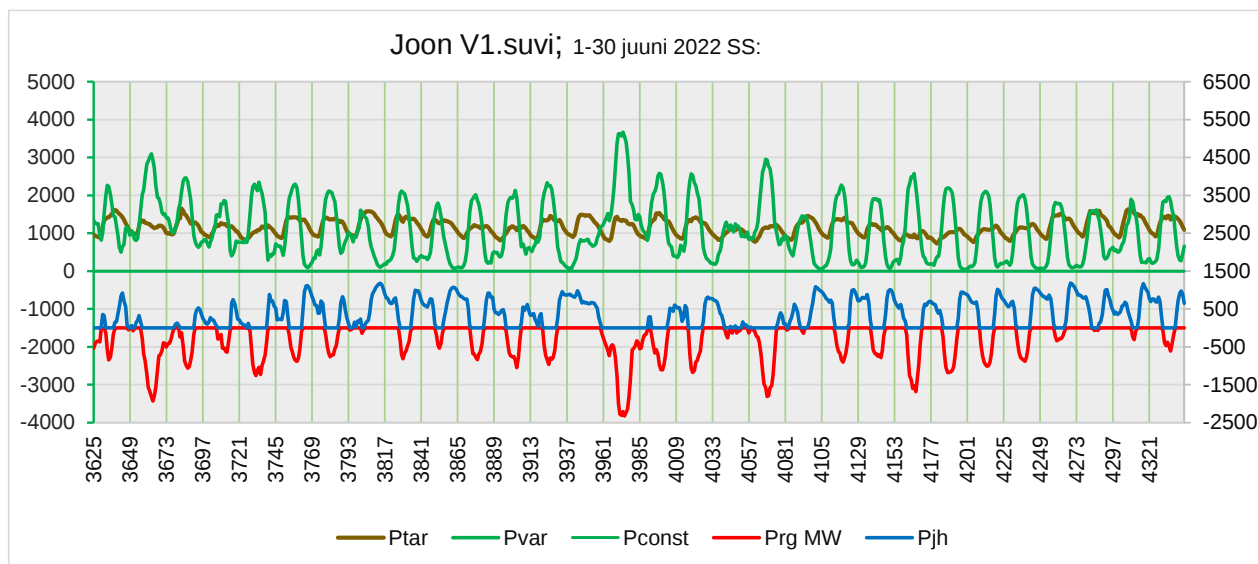
$P_{jh}=2.496/11.455=0.22$ (22% juurde toota)

Silutud perioodi üldkestuseks 2292tundi, ning juhitava energia tootmisvajadus väheneb $3.285-2.496=0.789$ TWh võrra. St Paldiski HAJ silumisrežiimis asendab 0.789TWh juhitavat tootmist. Tundub et selline seadmete kasutamine silumiseks ei ole eriti efektiivne ?

Salvestusseadme $P_{ss}=550$ MW, $E_{ss}=6000$ MWh, juuli 2022, talitluse fragment

vt lisa joon.V1suvi SSxx/6000, laetus Es hall kõver (kõverate tõlgenduslihtsuse mõttes graafik ilma piiranguta Pss)





V1. Järeldusi.

Tarbimimine: **Etar**=11.455 TWh, **P_{tar}max**=2050MW

Toitesegu mittejuhitav komponent võimekusega, **E_{var}**=**Etar**=11.455 MWh

E_{var}=11.455MWh kindlustavad **tuule/päikese pargid, inst võimsusega:**

P_{inst}=4315MW (maismaatuule kasutustegur) + päike **P_{pinst}**= 4.0x **P_{inst2022}**

Balanseerimiseks **P(t)_{var}**= **P(t)_{tar}**, **t**=1..8760 on kaks võimalust (põhimõtteliselt):

- Elektrienergia juhitava juurdetootmisega (3.1.a)

Selle variandi puhul on vajalik nii **VarT** liigvõimekuse perioodidel allareguleerimine, kui defitsiidi perioodidel juurdetootmine, **E_{var}**=**Etar** puhul **E_{ag}**=**E_{jh}**;

E_{var}=**Etar**=11.455 puhul on vajalik

Alla reguleerida: **E_{ag}**= 3.286TWh, võimsusega **P(t)_{rg}**=0-3495MW, **trg**=3798t/a;

Juurde toota : **E_{jh}**= 3.286TWh, võimsusega **P(t)_{jh}**= 0-1860MW, **t_{jh}**=4962 t/a

- Salvestusseadmete SS kasutamise (3.1.b)

vajalik SS mahtuvus **Ess**= 1.7-1.8 TWh , **P_{ss}**>**P_{rg}**=3495 MW

Kuna mahtuvus **Ess**= 1.7-1.8 TWh on käesoleval ajal ebareaalselt suur, siis täielik silumine SS-ga ei ole reaalne, SS kasutamine on ratsionaalne kitsamate allüesannete täitmiseks.

Järgnevalt käsitleme **juhitava juurdetootmisega varianti** detailsemalt, sest taoline balanseerimine toimib käesoleval ajal ja peab toimima ka tulevikus, kuigi **VarT** osakaalu suurenemise tingimustes. Probleemide raskuse iseloomustajaks ongi **VarT** hetkosakaal (**K(t)_{op}**) .

Kuna eelnev analüüs näitas, et juhitava komponendi suurus (iseloomustajad: **E_{jh}**, **P_{jh}max**,**t_{jh}**) ei ole marginaalne nagu sageli väidetakse (energia järgi ~1/3 tarbitavast, maxvõimsuse järgi 80% max koormusest, kasutustundide arvu **t_{jh}** järgi üle poole aastasest perioodist), siis tuleb nii mittejuhitavat tootmiskomponenti (**VarT**) kui **juhitavat juurdetootmist** vaadelda **kui ühte tervikut st tootmissegu**, seejuures eespool leitud suurused on nn ideaaljuht, mis on täpselt vajalik balanseerimiseks, tegelikult juhitaval tootmisel peab olema ka piisavaid reserve, ning leitud juhitav tootmine peab olema kitsendusteta kasutatav börsil (koormuse balanseerimiseks). Vajalikud süsteemiteenused (reservid) on teine, täiendav valdkond.

Eespooltoodud **tootmissegu** on võimeline balanseerima tootmise-tarbimise, kuid taolise toiteseguga süsteem **ei ole võimeline** häirete tingimustes töökindlalt, stabiilselt funktsioneerima, sest süsteem töötab **trg** tundi **VarT** osakaaluga 100% , st süsteem oleks nendel perioodidel nn **nõrk süsteem**. Nõrga süsteemi talitluse stabiilsus ei oleks tagatud, korrektselt ei funktsioneeriks ka konverterid ise (võrku järgivad GFL) ja releekaitse. Kirjanduse alusel **VarT** osakaalud üle 60-70% ei ole võimalikud.

Rahuldavad funktsioneerimisnäitajad võiks saada **kas täiendava VarT allareguleerimisega** (mis tähendab juhitava tootmise suurendamist, **või** nn võrku formeerivate (GFR) konverteite kasutamisega, kuid selleks vajalike juhtimisvõimekustega GFR seadmed on alles arengujärgus [K6,K34,K35,K22] .

Seega stabiilsuse vaatevinklist tulekski süsteemi funktsionaalne käitumine (**VarT** osakaalu järgi) jagada kaheks :

a. **tugev süsteem**, **K_{op}**< 0.6-0.8; klassikaline stabiilsusmehhanism + GFL
konverterid+konventsionaalne releekaitse

b. **nõrk süsteem**, **K_{op}**> 0.8-0.9 ; väike inerts ja väikesed lühisvoolud – kogu dünaamika ja stabiilsusmehhanism täiesti erinev ja uurimisjärgus, vajalik võrku formeerivate konverteite GFR kasutamine jne. Kõige komplekssem nõrga võrgu stabiilsuskäsitlus on tehtud Saksamaa Energiasüsteemile (100%**VarT**) vaata [K8,K9], kust nähtub et taolise stabiilsuskäsitluse realiseeritavus süsteemis kus stabiilsusprobleeme pole märgatud on üsna kauge tulevik.

Seega **tarbijate toitmine üksnes (100%) mittejuhitava taastuenergiaga (tuul/päike)** käesoleval ajal ja ligemas tulevikus **ei ole võimalik**.

VarT installeerimine ilma tehnilis-majandusliku analüüsita võib kaasa tuua määratud majanduslikke kahjusid, lisaks on vaja kontsentreeruda ka toitesegu teisele st juhitavuse aspektile, seda enam et kehtiva börsimehhanismi järgi just see komponent määrab „elektri“ hinna.

Veel mõned võrdluspunktid mis kõik on nii ulatusliku VarT kasutamise suhtes negatiivse iseloomuga:

- a. Tuulikute $P_{inst}=4315\text{MW} + 4 \times P_{päike\ 2022}$, ja juhitavate võimsuste $P_{jhmax}=1860\text{MW}$ vajadus tähendab et 2050 MW max koormuse toitmiseks on vaja ~6400 MW erinevaid generaatoreid st spetsiifilisi elektrimaterjale st üle 3x rohkem kui klassikalisel tootmisel + lisaks päikesepargid.
- b. Kui vaadata VarT tuule osa inst võimsusi (4315MW), siis vähemalt tuuleparkide LP-ni ja ka edasi on vaja samasuguse läbilaskevõimsusega ühendusi (liinid +trafod) mis tuule „hõreduse“ tõttu seisavad tugevalt alakoormatud, kui lisada veel alla reguleerimine, siis seda enam.
- c. Kui loota süsteemi formeerivate (GFR) linkidele, siis kogu süsteem ja selle funktsioneerimine nõuavad suuri muutusi, ka releekaitseks on vaja ilmselt teatud uut tüüpi kaitseid, kogu süsteemi reaalaja juhtimissüsteem muutub palju keerukamaks st ka vähem töökindlaks, kergemini häiritavaks ja küberrünnatavaks.
- d. Selline süsteem kujuneb tõenäoliselt palju kallimaks kui konventsionaalne SG-del baseeruv elektrisüsteem. Tõsi, probleemiks see, et SG-del süsteem peab olema CO2 mittetootev st tuleb välistada fosiilne primaar energia, **tulemusena jääb kasutada sobival määral tuumaenergiat.** Tuuleenergia allareguleerimise-piiramise (curtailment) **probleeme Euroopa mastaabis**, 2050 ajajoonel on põhjalikult käsitletud **[K5]** , kust üks järeldusi on et põhiliselt tabavad allareguleerimise raskused Baltimere, Põhjamere rannikupiirkondi (st seal tekivad mittekasutatavad ülejäägid), tasuks silmas pidada.

3.2 Võrdlusvariant V2.

Kuna põhivarianti (planeeritud) ei saa insenerlikust vaatevinklist pidada ratsionaalseks, aga ligema tuleviku vaates ka realiseeritavaks (lahendatud peaks olema kogu GFR konverteritega seotud probleemistik), siis tekib küsimus kuidas saada tehniliselt realiseeritav variant, mis oleks **lahendatav** käesoleva taseme (st **GFL**) konverterseadmetega, dünaamika käsitus oleks konventsionaalne, ning ei tohiks eeldada kogu süsteemi releekaitse RK ümberehitust jne. Eelnev tähendab et aastases tsüklis **ei tohiks esineda perioode kus $K(t)_{op}$ on üle 0.6-0.7**. $K(t)_{op}$ -i „juhtimine“ on teostatav SG tüüpi parameetrite ja püsiva võimsusega (P_c) tootmiskomponendi lisamisega ToSe-sse. Selle max võimsus sõltub tarbimise aastasest miinimumist, prognoositud tarbimise puhul 725MW.

Tootmissegu ToSe komponendid:

a. ToSe püsikomponent P_c , E_c :

100MW pöörleva reservi min + 2x300MW (AEJ plokid)

$P_c = 700\text{MW} < 725$, $E_c = 0.700 \cdot 8760 = 6132 \text{ GWh} = 6.132 \text{ TWh}$

b. ToSe varieeruv komponent ($VarT$) $P(t)_{var, t=1-8760}$, E_{var} ;

varieeruva komponendi tuule ja päikese inst võimsus P_{ins} valitud nii, et

$E_{var} + E_c = E_{tar}$; $E_{var} = 11.455 - 6.132 = 5.323 \text{ TWh}$

Simuleerimise tulemusena on varieeruv komponent

tuul $P_{inst} = 1603\text{MW}$ (maismaa) + päike $3.4 \cdot P_{inst2022}$

$E_t = 3.426\text{TWh}$; $E_p = 1.90\text{TWh}$

$P_{var} = 9 \div 1483 \text{ MW}$; $E_{var} = 5.323\text{TWh}$;

c. ToSe juhitav komponent $P_{jh}(t)$, $t=1-8760$; E_{jh} , t_{jh} , P_{jhmax} - leitakse simuleerimise teel

Simuleerimise tulemused:

Tarbimine:: $E_{tar} = 11.445\text{TWh}$, $P_{tar} = 725 \div 2050 \text{ MW}$

Tootmine ::

-Püsitootmine: // $P_c = 700\text{MW}$; $E_c = 6.132\text{TWh}$;

-Var tootmine:

$K_{oe} = (5.323 - 1.728) / 11.455 = 0.31$

Erg = 1.728TWh, 3897 tundi, $P_{max} = 1874 \text{ MW}$

- allareguleerimise näitajad

$K_{vk} = (E_{var} - E_{rg}) / E_{var} = (5.323 - 1.728) / 5.323 = 0.675$

-Juhitav tootmine;

$P(t)_{jh}$, $t=1-8760$, vt JoonV2

E_{jh} = 1.725TWh, 4863tundi, $P_{max} = 1270 \text{ MW}$;

- juhitava tootmise näitajad

Leitud tootmissegu **balanseerib tarbimise** igal ajahetkel, aastasel perioodil.

2x300MW püsitootmise (+pöörleva reservi min) lisamisest, saadakse järgmised **eelised**:

- $VarT$ hetkosakaal $K(t)_{op} = 0.01-0.628$, tulemuseks on inertne suurte lühisvooludega võrk

- $VarT$ võib olla ühendatud võrguga nn **võrku järgivate konverterite (GFL) abil**

- **inerts** ja **lühisvoolude** suurendamiseks pole vaja eri meetmeid

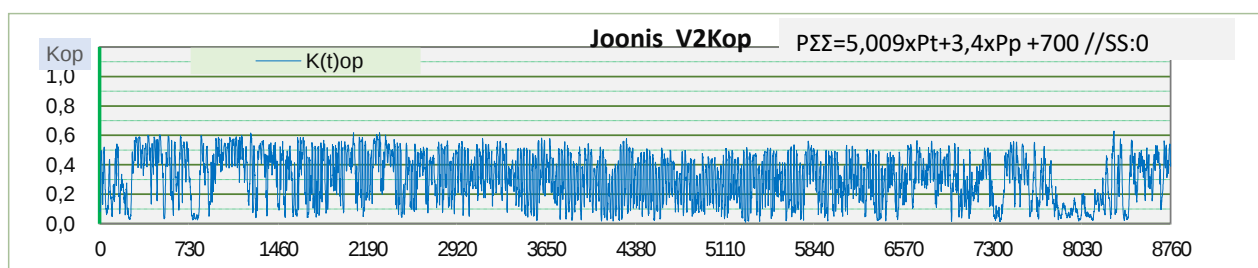
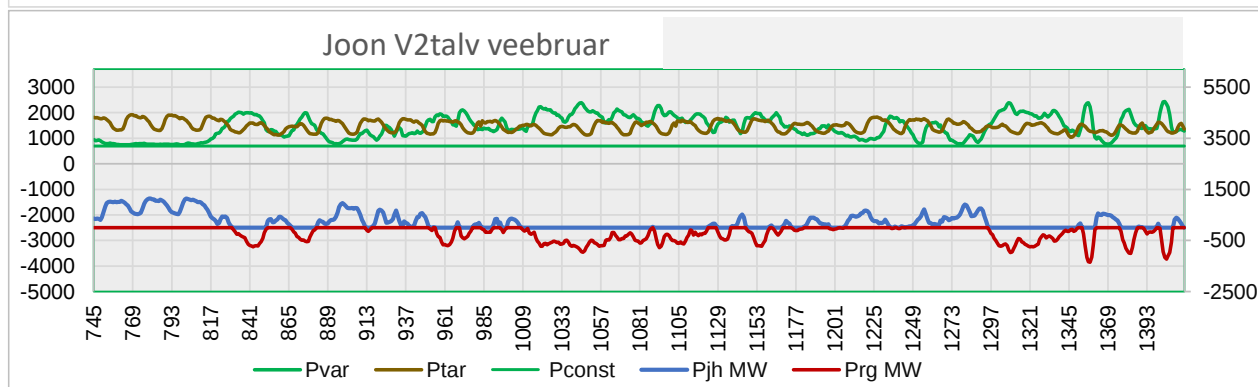
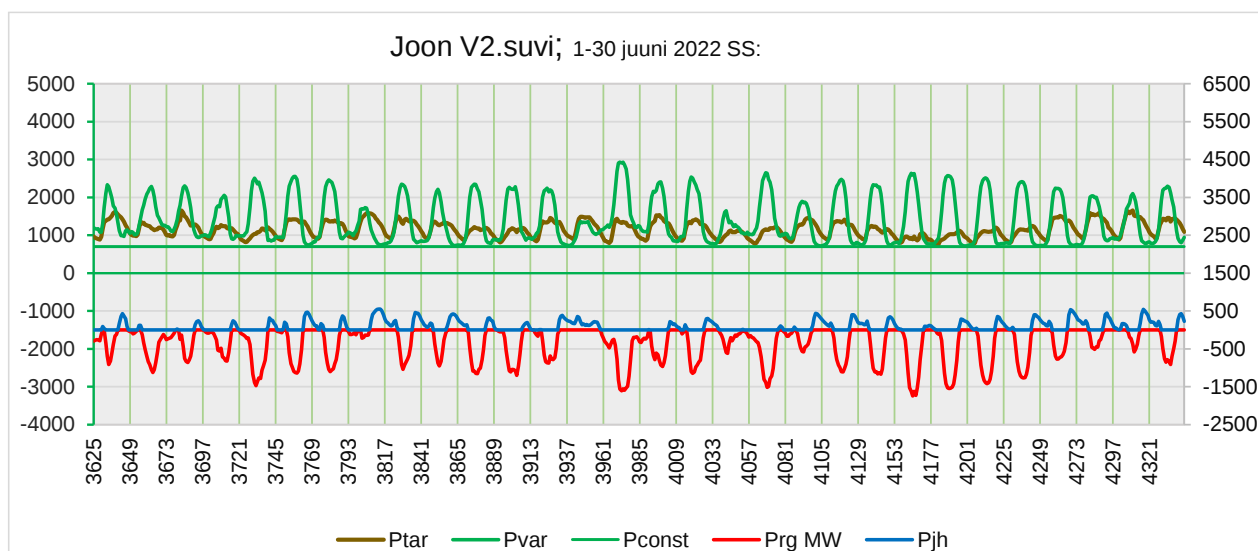
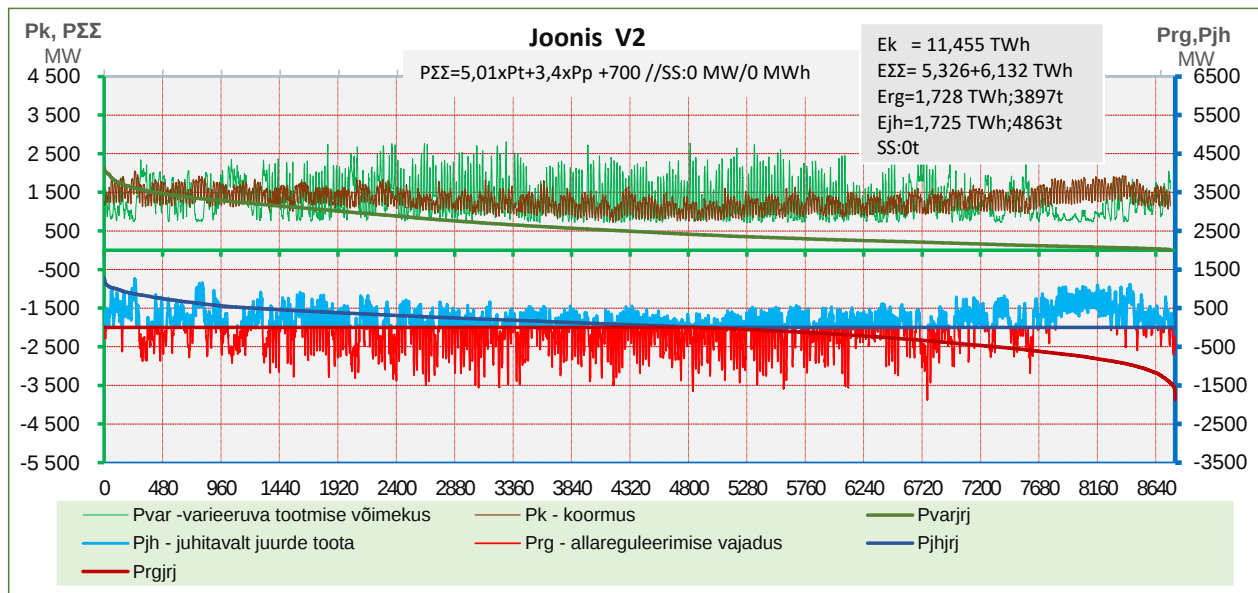
- releekaitse spetsiaalne ümberehitus ei ole vajalik.

- **kaks 300MW** ploki asendavad 4315 - 1600 = **2715MW** tuulikuid, kallid meretuulepargid ei ole vajalikud, suured var võimekuse piiramised ei ole vajalikud,

- vajalik juhitav energia väheneb $3.29 - 1.73 = 1.56 \text{ TWh}$ ja juhitava tootmise max võimsus $1860 - 1270 = 590 \text{ MW}$, st ~baasvõimsuse võrra,

- liinide läbilaskevõimed tunduvalt väiksemad (eriti genereerivate elementide ühendused) ja ajas ühtlasemalt koormatud

Saadakse klassikaliste omadustega süsteem, mis on lihtsam, stabiilsem, töökindlam kui keerukate juhtimisahelatega ja kergelt küberrünnatav variant, isegi suuremal määral CO2 vaba kui alternatiiv.



Variantide V1,V2 võrdlustabel	
Tähistused	
VarT -mittejuhitav tootmine=varieeruv tootmine, VarT võimekus-P(t)var, t=1-8760; Evar; tuul: Pt(t) t=1÷8760, Et; päike: Pp(t) t=1÷8760,Ep; P(t)var=Pt(t)+Pp(t); Eve - el.energiaks muundatud Evar , Eve=(Evar-Eag); JuhT -juhitav tootmine; P(t)jh, t=1-8760; Ejh; PüsiT -püsitootmine, Pc =const; Ec;	
Põhivariant (V1)	Võrdlusvariant (V2)
2030s VarT tootmisvõimekus (Evar) võrdne kogutarbimisega Etar ; Evar=Etar	Kogu tootmine max CO2 vaba + osasüsteemi min ümberehitusvajadus
Tarbimine: P(t)tar t=1÷8760, Etar;	
Etar=11.455TWh	Etar=11.455TWh
Tootmine	
VarT + JuhT	VarT+PüsiT+JuhT
Pc=0	Pc=100+2*300 MW,
Toodang	
Ec=0	Ec=0.876 +5.256=6.132 TWh
Varieeruv tootmine VarT	
Installeeritud võimsused	
tuul: Pinst= 4315MW; päike: Pinst=4.0* Pinst2022;	tuul: Pinst=1603MW (maismaa) päike: Pinst= 3.4* Pinst2022
Võimekused	
Et =9.220TWh; Pt =24 ÷4000MW Ep=2.236TWh; Pp=0÷1728 MW Evar=Et+Ep=11.455 TWh; Pvar=24÷4482MW	Et=3.426TWh; Pt =9 ÷1486MW Ep=1.90TWh, Pp=0÷1469MW Evar=5.323TWh, Pvar=9 ÷2161 MW
Vajalik alla reguleerida (piirata)	
Erg=3.286TWh, trg=3798t/a, max Prg=3495MW;	Erg= 1.724TWh, trg=3889t/a, Pmax=1872 MW
VarT võimekuse kasutustegur	Kvk= (Evar-Erg)/ Evar
(11.455-3.286)/11.455=0.71 :71% Evar-st	(5.323-1.728)/5.323=0.675 :68% Evar-st
Juhitav tootmine (juhitavalt juurde toota)	
Ejh=3.286TWh, tjh=4962t, max Pjh=1860 MW;	Ejh= 1.727TWh, tjh= 4871t, Pmax=1270MW;
Variantide võrdlus	
Elektrotehniliste materjalide kulu (ainult generaatorid)	
Pcg=0;Ptg=4315; Pjhg=1860; // ∑ 6170MW	Pcg=700;Ptg=1600; Pjhg=1300; // ∑ 3600MW
Energianäitajad	
Erg=3.286; Ejh=3.286; Eve=(Evar-Erg)=11.455-3.286=8.169TWh	Ec=6.132; Erg=1.727; Ejh=1.727 Eve=(Evar-Erg)=5.323-1.727=3.596TWh
CO2 vabalt toodetakse	
(11.455-3.286)/11.455=0.71 :71% Etar-st	(5.323-1.728)+5.256=8.854TWh : (77%)Etar
CO2 tootmisega	
3.286/11.455=0.29 : 29% Etar-st	0.876+1.725 =2.601 TWh : (23%)
SG inertsia ja lühisvooludega	
3.286/11.455=0.29 : 29% Etar-st	6.132 +1.725=7.857TWh : (69%),
Hetkosakaalude vahemik K(t)op, t=1÷8760	
0.027÷1.0	0.01-0.628

3.3 Variantide võrdlustulemused.

Võrdlustulemused on tabelist nähtavad ja ilmselgelt variant V2 kasuks.

Kokkuvõtlikult:

Variant V1 oma suure VarT osakaalu tõttu ei ole aastaks 2035+ funktsioneerimisvõimeline (GFR linkide areng ei võimalda), lisaks äärmiselt materjalikulukas (nii tuulegeneraatorid kui ühendused).

Funktsioneerimisvõimelisuse saavutamine

- a. sügava allareguleerimisega - madal VarT seadmete kasutusefektiivsus ja juhitava juurdetootmise suur maht.
- b. GFR linkide kasutamisega - ajaperspektiivilt määramatu, lisaks on selge et GFR linkide kasutamisel on süsteemi primaarprotsesside stabiilsuse saavutamise vahendiks keeruline elektrooniline-tarkvaraline juhtimissüsteem, mille häirekindlus ja küberrünnatavuse kindlus on madalad, ning mis tähendab ka süsteemi madalat töökindlust.

Variant V2 on tunduvalt materjaliefektiivsem 2050MW koormuse toitmiseks 3600MW (1600+700+1300) erinevat liiki genereerivaid võimsusi (ilma reservideta), + vastavate läbilaskevõimsustega ülekandesidemed.

Lisaks, kogu süsteemi **primaarprotsesside stabiilsus** põhineb klassikalisel, inertsil, piisavate lühisvooludega stabiilsusmehhanismil, mis on hästituntud, ning raskemini häiritav ja ka küberrünnatav. CO2 emiteerimine madalam kui variant V1-l

Kuna funktsionaalsete näitajate alusel on V2 vähemalt samaväärne või ületab varianti V1, siis oleks kohane **teostada nende majanduslike näitajate võrdlus**. Tuleb silmas pida et variant V2 ei nõua võrgu ümberehitust, variant V1 nõuab suuri ümberkorraldusi (seni millegipärast jäetud tähelepanuta) seetõttu nende maksumus **tuleb variandis V1 lisada**.

Senised **võrdlused** tuumajaama ja VarT vahel tehakse energiatootmise alusel, sisuliselt pr. energiatega tasemel, mis ei anna adekvaatset pilti, sest jäetakse kõrvale tootmiseseadmete koostöö omadused süsteemi ülejäänud osaga, ilma milleta ei ole võimalik ei tootmine, ülekande ega kasutamine.

Eraldi, miks on tuumaplokkide kasutamine otstarbekas baasis.

Selleks et oleks võimalus VarT linkides kasutada GFL konvertereid, peaks kogu elektrisüsteemi (meie juhul Balti osasüsteemi) inertsit ja lühisvoolude tase olema pidevalt kõrgem mingist nivoost (st $K(t)_{op} < 0.6 \div 0.7$), mida oleks võimalik hoida kui baastootmine toimiks SG-ga (püsitootmisena). On selge et püsitootmisena gaasijaamu kasutama ei hakata, seega elektrisüsteemi klassikalised omadused on võimalik säilitada ainult tuumaenergia kasutamisel.

Üldkokkuvõte.

1. Balti piirkonna riiklike (TSO-d) osasüsteemide (330kV) tuleks tugevate sisemiste sidemete, nõrga välissideme (v.v. side CE sünkroonala tuumikuga) ja ka sarnaste VarT omaduste tõttu vaadelda ühe tervikuna (või siis iteratiivselt koordineerida). Veelgi enam, kuna toodetud energia müük toimub börsi vahendusel siis igasuguse tootmise suhtes on Eesti osasüsteem piirkonnale avatud ja kõik Eesti taseme arutlused **on parimal juhul esimene samm** Balti piirkonna genereerimise defitsiidi lahendusteest.

2. Igasugustes arengukavades on vaatluse alt väljas terve VarT tootmise **konverterlinkide omadustest tulenev valdkond ja piirangud**.

VarT otstarbeka taseme (tuul/päike parkide võimsuse) **määrab** vastavate KL seadmete tehniline tase, mis peab kindlustama süsteemi stabiilse talitluse kõikides vajalikes olukordades, praegu on see tase $\sim K(t)_{op} = 0.6 \div 0.7$ piires (GFL konverterid). VarT -ga süsteemi aktiivvõimsuse balanseerimisvõimekuse kontroll ja selle saavutamine **ei tähenda vastava süsteemi funktsioneerimisvõimelisust, vajalik on ka** süsteemi konverterite koosfunktsioneerimise ja süsteemi talitlusnäitajate kontroll. Väide, et süsteemipoolseks probleemiks VarT suurendamisel on võrgu läbilaskevõime vähesus on lihtsustatud.

Oluline on VarT osakaalule vastavate **süsteemikulutuste suurenemise arvessevõtmine** variantide võrdluses (senistes võrdlustes pole seda näha).

3. Tarbimise 11,5TWh rahuldamiseks mittejuhitava tootmisega (tuul/päike), tasemel $E_{var} = E_{tar}$ **on tootmise- tarbimise balanseerimiseks vajalik** juhitavalt juurde toota: $E_{jh} \approx 1/3 E_{tar}$, jaotatud 50-60% -le aastastest kasutustundidest, $P_{tar\ max}$ lähedase P_{max} võimsusega (2022a realiseeringus: $E_{jh} = 3.286TWh$, $t_{jh} = 4962t$, $P_{jh} = 1860 MW$).

Eelnev on nn **ideaaljuhu** tulemus, st kui VarT ületootmise piirkonnas **töötaks süsteem $K(t)_{op} = 1$** ga, mis käesoleval ajal ei ole võimalik (vt pt 2). Väiksemad süsteemid (=sünkroonalad) piiravad oma $K(t)_{op} < K_p$ kus piirväärtus K_p oleneb süsteemist (näiteks $K_p < 0.7$) st VarT-d tuleb piirata tunduvalt rohkem ning seega energiat järgi tuleb juhitavalt toota tunduvalt rohkem, kuid aja järgi ($K(t)_{op} < 1$ -st tulenevalt) tuleb juhitavalt toota pidevalt – **aastaringelt**.

Oleks ratsionaalne kui süsteemis töötaks **pidevalt mingi baastootmine** (näit tuumaplokk) mis vähendaks piirangu $K(t)_{op} < K_p$ täitmiseks vajalikku juhitavat (kallimat) energiat

4. VarT ja koormuse **mittekokkulangevuse silumine** (täielik balanseerimine)

salvestusseadmetega, nõuab ebareaalselt suuri SS mahtuvusi ($E_{ss} \sim 1.7-1.8TWh$) ja on lähiajaloo jaoks **ainult teoreetiline võimalus**, eelnev hinnang ei puuduta aga SS seadmete suurt perspektiivi kitsamate ülesannete täitmiseks (näiteks süsteemiteenused).

Realse suurusega SS (Paldiski HAJ) efekt silumisel ei ole suur, ning ilmselt on ratsionaalne kasutusotstarve samuti kitsamate võimekuste realiseerimisel (tehnilis-majandus arvutused).

5. Näib, et ligema tuleviku **tootmise-tarbimise balanseerimise vahendiks on juhitav tootmine**, seega ka vastava tootmise suurendamine ja ajakohastamine (igas mõttes), eriti kui silmas pidada, et Balti piirkond peaks olema võimeline funktsioneerima ka saarestununa. Nii Eestile kui Balti piirkonna otstarbekas tootmissegu vastaks struktuurilt variandile V2, ning peaks olema kolme komponendiline: baastootmine, varieeruv taastuvenergia ja juhitav tootmine.

6. Baastootmiseks sobib **hästi 2x300 MW CO2 vaba plokki pidevalt max koormusega töös**. Kasutuskõlbliku energia mõttes **2x 300MW AEJ** plokki asendavad 4315 - 1600=2715MW tuuleparke, süsteemi funktsioneerimiseelimestest rääkimata. Taolise SG võimsuse olemasolu ToSe-s kindlustab piisava inertsia ja lühisvoolud, tulemusena puudub vajadus võrkku olulisel määral ümber ehitada, mis planeeritud konverterite osakaalu puhul on paratamatu.

Kui baastootmine toimiks tuumaenergiaga (Eesti süsteemi osas 2x300MW) siis saadakse kõige madalama CO2 emiteerimisega, kõige väiksema installeeritud VarT (tuul/päike) võimsusega ja kõige väiksema juhitava SG võimsusega tootmissegu Eesti tarbimise rahuldamiseks ning AEJ 2x300MW olemasolu oleks otsitava tähtsusega ratsionaalse ja töökindla elektrivarustussüsteemi kujundamiseks.

Balti allsüsteemide sarnasusi arvestades ei peaks võimaliku AEJ võimsus olema mitte 2x300 MW vaid vähemalt 6x300MW, tõenäoselt suurem. Baastootmine tuumajamaga (st konventsionaalsete SG-dega) välistaks süsteemi inertsia ja lühisvoolude probleemid, seega kõike sellest tulenevat (tekstis), hoiaks süsteemi funktsioneerimise ja tulevased tuulepargid lihtsamatena (odavamad ja töökindlamad).

Lisa 1

Konverterpõhistest linkidest (KL) laiemalt.

Kaasaegses elektrisüsteemis on **konverterpõhised lingid (KL)** kasutusel ka akupankade (AP) ja alalisvoolulinkide (HVDC) võrguühendustena, mille tulemusena nende osakaal on mõnedes võrkudes suur ja üldiselt suurem kui otseselt VarT seadmete osakaal (Kop järgi). Väiksemates suure VarT osakaaluga sünkroonpiirkondades (süsteemides) on tekkinud talitusprobleemid (dünaamika) [], mis on ajendiks nii erinevatele teoreetilistele uuringutele kui KL seadmete täiustamisele. Seetõttu on suure KL osakaaluga ($Kop > 0.6 \div 1.0$) võrkude talitlusest ja eriti stabiilsusprobleemidest kujunenud omaette uurimisvaldkond, ENTSOE tähistuses HPoPEIPS (High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources) [K22, K33]. Järgnevalt kasutame lühendit **VarT** kui on tegemist tuule/päikese energia muundamisega mis on nii varieeruv, mittejuhitav kui ka konverterpõhine (KL), lühendit **KL** kasutame juhul kui käsitletakse ainult konverterinterfeissidest tulenevat.

Seega VarT kasutamisel piirkonnas kus $Kop < 50-60\%$ võib toimida suhteliselt vabamalt, liikudes piirkonda kus mõnedel aja momentidel süsteemi $Kop > 60\%$ tuleb kindlsti kontrollida el.en ülekandeprotsessi kvaliteeti (realiseeritavust) vt täpsemalt ka [K34].

KL seadmete liigitusest

Tootmiseadme lingi **jõuelementide järgi** eristatakse:

- klassikaline türistoride baasil nn vooluallikas-tüüpi (CSC) konverter, kasutatakse pikkadel suure võimsusega HVDC linkidel (ka EstLink2 -650MW)
- uuem (1997) jõutransistoridel (IGBT) baseeruv pingeallikas- tüüpi (VSC) konverter, väga suurte võimalustega ja ka suurte ootustega, võimeline töötama erinevate juhtimisskeemidega, kasutusel VarT tootmisvahenditel. (ka EstLink1 -350MW, NordBalt -700MW).

VarT seadmetega süsteemi käsitlustes vaadeldakse linke (**nende juhtimisskeeme**), süsteemi funktsioneerimise vaatevinklist lähtudes ja eristatakse [K12] kahte liiki.

- võrku järgivad (GFL -grid following) konverterid
- võrku formeerivad (GFM -grid forming) konverterid

VarT seadmetes kasutatakse VSC konvertereid mis võivad omada nii GFL kui GFM juhtimisskeemi, kusjuures GFL link tähendab seda et VSC konverter töötab vooluallikas konverterina, GFM link tähendab seda et VSC konverter töötab pingeallikas konverterina,

GFM skeemi puhul on palju erinevate omadustega juhtimisskeemi allvariante, kusjuures sageli eristatakse KL -de põhivõimekusi ja lisatäiendusi mis on ettenähtud nende linkide poolt põhjustatud madala inertsiga ja - süsteemitugevuse kompenseerimiseks.

Juhtimisskeemide omadustest :

GFL -grid following - VSC konverterit juhitakse vooluallikas konverterina, selle juhtimissüsteem jälgib liitumispunkti (LP) pinget, seega ka võrgu sagedust, viimasega määratakse ka sisendvoolu (VarT-st näiteks) sagedus, sisendvoolu nurk LP pinge suhtes hoitakse vastavalt operaatori poolt etteantud aktiiv ja reaktiivvõimsusele. See on GFL põhitalitlusskeem mis on lihtne ja töötab hästi tugeva võrgu (LP) puhul.

Kui liitumispunkt on nõrga võrgu sõlm, võib suure häire (näit lühis) puhul pingekõver moonutada, tulemusena on konverteri juhtimine häiritud, tõenäoliselt see lülitatakse välja, kutsudes esile uue teiseliigilise häire, seega GFL konverterid kasutatakse ainult paralleeltöös nn tugeva võrguga (kus on piisav SG tootmine).

Kuni käesoleva ajani **VarT tootmisvahendid omavad GFL** juhtimisskeemiga VSC konvertereid [K15] ja seega süsteemis (sünkroonala), kus VarT tootmine omab ainult GFL juhtimisskeemi, ja Kop on pikalt üle $50 \div 60\%$, võib süsteemi stabiilne funktsioneerimine olla häiritud.

GFM – grid forming – st et põhiskeemilt töötab link pingeallikas-konverterina.

GFM on võimeline iseseisvalt formeerima väljundsignaali st reguleerima väljundpinget ja sagedust (nagu SG), seega töötama näiteks passiivkoormuse või saare tootmisel või kustunud süsteemi startimisel. GFM konverteritele on võimalik rakendada väga erinevaid ja keerukaid juhtimisskeeme, üheks levinumaks on nn virtuaalse SG emuleerimine millega loodetakse saada SG asendamist (ja isegi 100% asendamist). Põhimõtteline vabanemine SG -dest laob GFM-

dele aga väga palju täitmist vajavaid funktsioone [K15,K28, K35], käesoleval ajal ollakse ilmselt siiski mingis arengufaasis.

„Süsteemi formeeriv“ (gridforming) on tegelikult väga mitmetahuline **võimekus**, millist omavad klassikalised sünkroonmasinad ja ilma milleta ei ole võimalik ka suure KL osakaaluga süsteemi funktsioneerimine. „Süsteemi formeeriv“ koostisomadusteks oleks, jämedalt loetledes: väljundi juhitavus, sünkroniseeritavus, paralleeltöö, süsteemi käivitamine, talitus passiv või nõrgas võrgus, stabiilne talitus püsiolukorras ja siirde olukordades (eriti suurtel häiretel), käitumine võrgu ebasümmeetriate ja kõrgemate harmooniliste puhul jne. .

Reaalselt peab võrgus olema GFM konvertereid ainult mingi osa KL seadmetest, lisaks GFM konverterid võivad sõltuvalt selle asukohast ja funktsioonist süsteemis omada ainult osa võimekuse täiskomplektist.

[K33] andmetel komplitseeritud võimekustega GFM konvertereid toodetakse praegu ainult eritellimustel, mille tõttu pole selge ei nende suuremamahuline tootmisetulek, hind ega ka täpsemad võimekused. GFM konverterite arenduseks on koostatud arengukava [K35].

Sõlumatult konverterlingi KL tüübist kaasnevad nende osakaalu suurenemisele süsteemi oluliste omaduste muutused, nagu: süsteemi inertsit vähenedes, sumbuva muutused ja süsteemi tugevuse (lühisvõimsused) alanemine ning lisaks on KL seadmed olemuselt tunduvalt kiiremad kui senised elektromehaanilisi protsesse määravad seadmed - sünkroongeneraatorid. Eelnev toob kaasa süsteemi dünaamika ja selle stabiilsusomaduste muutused [K14,K17], juurde tuleb isegi kaks uut stabiilsuse alaliiki, mis tähendab et teatud KL osakaalude juures on süsteemi stabiilse funktsioneerimise saavutamiseks vajalik KL-de väga spetsiifiline juhtimine, mille väljatöötamine on ilmselt algusfaasis

Inertsit vähenedes tähendab, et suurte häirete korral sageduse muutumise kiirus (RoCoF) suureneb ja seega raskeneb sageduse hoidmine, tekivad sageduse stabiilsuse probleemid (ka sünkroonse stabiilsuse) ja palju muud, põhjalik ülevaade [K1, K17,]. Kuna inertsit vähenedes on üks esimesi KL- ga seotud raskusi, siis on käesolevaks ajaks välja töötatud juba suur hulk täiustusi RoCoF suurenemise tasakaalustamiseks [K32], nagu erinevad inertsit emuleerimise meetodid TG-de juhtimise baasil jne. Üldiselt, KL hetkeosakaalust lähtudes on sagedusstabiilsuse säilitamiseks kaks erinevat lähenemist: kas VarT allareguleerimine, nii et $Kop < \sim 70\%$ või KL seadmete varustamine spetsiaalse juhtimiskontuuriga mis toetab inertsit (virtuaalne inerts) või lisab kiire sagedustoetuse (FFR- fast frequency response). Need erinevad lähenemised omavad erinevaid süsteemseid mõjusid ja pole ekvivalentsed, analüüsides on näha et ilmselt tuleks eelistada selliseid sagedustoetuse meetmeid mis suurendavad inertsit (vähendavad RoCoF-i), teistel näit FFR kui RoCoF kasvab liiga suureks võib ilmned kaudne efekt nimelt mõned seadmed nagu PLL või sagedusautomaadi releed ei ole võimelised sagedust piisavalt täpselt mõõtma, tulemuseks võib olla näit sagedusautomaadi SA mitterakendumine ja väga raske avarii kuni süsteemi kustumiseni [K37].

Süsteemi tugevus (strength) on määratud lühisvoolude suurusega süsteemi sõlmedes (harudes), mis omakorda sõltuvad nii võrgu konfiguratsioonist kui genereerivate allikate lühisvoolu „toodangust“ võrgu lühiste puhul. Süsteemi tugevuse käsitlused KL seadmete kasutuselevõtul on keerukad ja lühisvoolud (lühisvõimsused) annavad ainult lihtsustatud pildi olukorrast, täpsemalt vt [K25, K19]]. Kuna konverterid lühisvoole ei tooda [K3] või täpsemalt on need väikesed, pärijärgnevus ($1 \div 1.1, 1.4$ p.u.), siis vähenevad võrgu lühisvoolud, ning vastavalt ka lühisvõimsused ja lühissuhe (SCR) koos KL osakaalu suurenemisega võrgus. Võrgu tugevuse kontroll toimub sõlmede kaupa, ning lihtsustatult, tugevaks loetakse sõlme kui $SCR > 3$ ja kui ei, siis on tegemist nõrga (low strength) võrgusõlmega, ning võrk selle ümbruses muutub nn nõrgaks võrguks. Nõrgas võrgus võib tekkida väga palju erinevaid probleeme [K19], alates GFL konverterite funktsioneerimiskustest, sünkroonse ja pingestabiilsuse häiretest, ja väga olulisena releekaitse (RK) funktsioneerimise häiretest.

Võrgutugevuse tõstmiseks on vahendeid vähe, põhiliseks on klassikalised sünkroonkompensaatorid, turbiinist lahtisidurdatud SG-d, lootused on ka SS-ga integreeritud GFM konverterikompleksile, mis on aga uurimisjärgus tegevus [K19].

Lühisvoolude vähenemisega tekivad probleemid ühes olulises energiasüsteemi valdkonnas milleks on **süsteemi releekaitstes (RK)** [K16], süsteemi funktsioneerimine ilma töökindla RK-ta ei ole aga võimalik.

Olemasolevad kaitsed muutuvad aeglasteks, vähetundlikeks, ja ebaselektiivseteks erinevates variantides, lahendus ei ole lihtsalt ümbersätestamises, vaid osa kaitseid tuleb ümber vahetada teiseliigiliste vastu. On ilmnenu et uues olukorras ei ole võimalik RK poolt täita nn kriitilist väljalülimiskiirust (kui see nõue pole täidetud siis mingi stabiilsusnõue pole rahuldatud) ning tuleb välja vahetada isagi võimsuslüliteid kiiremate vastu [K20].

On ka arvamusi et KL-seadmeid tuleks hakata ehitama suuremal määral ülekoormatavatena (kallimatena), kuid see kõik on majandusvõrdluste küsimus, kas odavam on ehitada kallimaid KL seadmeid või ehitada ümber elektrisüsteemide releekaitse jne.

Eelnevast on näha et suure KL osakaaluga süsteemi rahuldavaks funktsioneerimiseks on palju tööd ees [K22], eriti seoses KL seadmete edasiarendamisega ja just sobivate juhtimiseaduste väljatöötamisega. Silma jäävad järgmised nõuded (juhtimiseadustele):

- a. võrgu siirdetalitluse stabiilsuse näitajad peavad jõudma endisele tasemele kõikides talitlusolukordades, st elektrivarustuse töökindlus endine.
- b. uued KL seadmed peavad olema võimelised kindlustama käidus vajalike protseduuride (nagu sünkroniseerimine, saarestunud võrguosa toitmine, kustunud võrguosa startimine jne) teostamise
- c. KL seadmete ja SG -de vastastikune toime peab olema konfliktivaba kõikides talitlusolukordades.

Probleemide lahendamine toimub, kuid nagu väidetakse ülevaadetes mingitest lõplikest tulemustest ja lahendustest praegu rääkida ei saa, seega VarT kasutuselevõtul tuleks lähtuda konkreetsest olukorrast.

Kasutatud kirjandus.

Vastava valdkonna kirjanduse hulk on väga suur ja allikad käsitlevad üldjuhul laia temaatikat seetõttu viited ei ole väga konkreetseid.

-
- K1 Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems
Federico Milano, Florian Dörfler, Gabriela Hug, David J. Hill, Gregor Verbič
 - K2 Advanced Grid Requirements for the Integration of Wind Turbines
into the German Transmission System
I. Erlich, Member, IEEE, W. Winter, A. Dittrich
https://www.uni-due.de/imperia/md/content/ees/papers/paper_030706-02.pdf
 - K3 Short-Circuit Modeling and System Strength, White Paper, February 2018
 - K4 Baltic Load-Frequency Control block concept document
 - K5 Integration of Large-Scale Variable Renewable Energy Sources into the Future European
Power System: On the Curtailment Challenge
Chloi Syranidou, Jochen Linssen, Detlef Stolten and Martin Robinius
https://www.researchgate.net/publication/346333422_Integration_of_Large-Scale_Variable_Renewable_Energy_Sources_into_the_Future_European_Power_System_On_the_Curtailment_Challenge
 - K6 Impact of Current Limitation of Grid-forming Voltage Source Converters on Power System
Stability
Christian Schöll, Hendrik Lens
 - K7 WindEurope views on curtailment of wind power and its links to Priority-Dispatch
2016
 - K8 System Stability Roadmap
<https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/system-stability-roadmap.html>
 - K9 Netzregelung 2.0 – regelung und stabilität im strom-richter-dominierten verbundnetz
Öffentlicher Schlussbericht
<https://edocs.tib.eu/files/e01fb24/1902236149.pdf>
 - K11 Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system
networks – A review
Njabulo Mlilo¹, Jason Brown¹, Tony Ahfock¹
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40866-021-00123-w>
 - K12 Grid forming inverters. EPRI Tutorial (2023)
<https://www.epri.com/research/products/000000003002028090>
 - K13 AEMO Engineering Roadmap to 100% Renewables December 2022
 - K14 Stability Analysis of Systems With High VSC Penetration: Where Is the Limit?
Carlos Collados-Rodriguez, Marc Cheah-Mane, Member, IEEE, Eduardo Prieto-Araujo,
Member, IEEE, and Oriol Gomis-Bellmunt, Senior Member, IEEE
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8933043>
 - K15 Grid Forming Battery Storage
Julia Matevosyan, ESIG 2023
<https://pubs.naruc.org/pub/171BC89E-099E-F2D2-0F81-4ADE3FA81121>
 - K16 Assessment of the protection system in response to different grid-tied converters
Zhi Xu, Shakenbieke Alimasibieke, Baoyu Zhai, Qi Yang, Yuchen Wang
 - K17 Review of RoCoF Estimation Techniques for Low-Inertia Power Systems
Xiaoyu Deng, Ruo Mo, Pengliang Wang, Junru Chen, Dongliang Nan, Muyang Liu
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3708>
 - K18
 - K19 Integrating Inverter-Based Resources into Low Short Circuit Strength Systems
Reliability Guideline
 - K20 Impact of Renewables on Protection Schemes *IPCGRID March 27, 2019*
Michael Jensen

- K21 The future need for flexibility and the impact of fluctuating renewable power generation
Christoph Brunner , Gerda Deac , Sebastian Braun , Christoph Z€ophel
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811931626X>
- K22 High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (HPoPEIPS)
ENTSO-E Guidance document for national implementation for network codes on grid connection 2017
https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf
- K23 Flexibility in Power Systems of Integrating Variable Renewable Energy Sources
Hasan Huseyin Coban1, Wojciech Lewicki
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121000019>
- K24 G-PST/ESIG Webinar Series: Understanding Grid forming Inverter Specifications
<https://youtu.be/zkJbbLu5rSQ>
- K25 System Strength Classification, Evaluation Methods, and Emerging Challenges in IBR-dominated Grids 2022
Boricic, Aleksandar; Torres, Jose Luis Rueda ; Popov, Marjan
- K26 4-TSO Paper on Requirements for Grid-Forming Converters
[https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/zuordnung_unklar/grundlegende-anforderungen-an-netzbildende-umrichter/220504 - 4-tso paper on requirements for grid-forming converters.pdf](https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/zuordnung_unklar/grundlegende-anforderungen-an-netzbildende-umrichter/220504_-_4-tso_paper_on_requirements_for_grid-forming_converters.pdf)
- K27 What to Expect from Grid-forming Inverters and How to Facilitate System Stability at 100% Renewables September 8, 2023 by
Daniel Duckwitz - SMA Solar Technology AG
<https://www.esig.energy/what-to-expect-from-grid-forming-inverters-and-how-to-facilitate-system-stability-at-100-renewables/>
- K28 Challenges and potential solutions of grid-forming converters applied to wind power generation system—An overview (2023)
Liang Huang*, Chao Wu, Dao Zhou, Liang Chen, Daniela Pagnani, Frede Blaabjerg
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1040781>
- K29 Addressing Frequency Control Challenges in Future Low-Inertia Power Systems: A Great Britain Perspective
Qiteng Hong ↑, Md Asif Uddin Khan, Callum Henderson, Agustí Egea-Álvarez, Dimitrios Tzelepis, Campbell Booth
- K30 Getting to 100% renewables: operating experiences with very high penetrations of variable energy resources
Debra Lew, Drake Bartlett, Andrew Groom, Peter Jorgensen, Jon O'Sullivan, Ryan Quint, Bruce Rew, Brad Rockwell, Sandip Sharma
- K31 Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems
(Invited Paper)
Federico Milano David J. Hill and Gregor Verbič
- K32 High-Level Penetration Of Renewable Energy With Grid: Challenges And Opportunities
Shafiul Alam Fahad Saleh Al-Ismail Mohammed Abido Aboubakr Salem
- K33 High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources and the Potential Contribution of Grid Forming Converters Technical Report
<https://euagenda.eu/upload/publications/untitled-292051-ea.pdf>
- K34 Grid-Forming Inverters: Are They the Key for High Renewable Penetration?
- K35 Research Roadmap on Grid-Forming Inverters
Yashen Lin, Joseph H. Eto, Brian B. Johnson, Jack D. Flicker, Robert H. Lasseter, Hugo N. Villegas Pico, Gab-Su Seo, Brian J. Pierre, and Abraham Ellis
- K36 Impact of intermittent renewable energy generation penetration

- on the power system networks – A review
Njabulo Mlilo · Jason Brown · Tony Ahfock
- K37 Frequency control challenges and potential countermeasures in future low-inertia power systems: A review
Md. Nahid Haque Shazon, Nahid-Al-Masood *, Atik Jawad
- K38 Frequency Stability-Based Penetration Limit Evaluation of Variable Energy Resources in Power Systems for Online Application
Woo Yeong Choi, Member, IEEE, Kyung Soo Kook, Member, IEEE, and Jin-Oh Lee, Member, IEEE
- K39 Grid-Forming Control: Advancements towards 100% Inverter-Based Grids: A Review
Emmanuel Ebinyu, Omar Abdel-Rahim, Diao-Eldin A. Mansour , Masahito Shoyama and Sobhy M. Abdelkader
- K40 Overview of frequency control techniques in power systems with high inverter-based resources: Challenges and mitigation measures
Dlzar Al Kez Aoife M. Foley Faraedoon Ahmed D. John Morrow
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/stg2.12117>
- K41 Addressing Frequency Control Challenges in Future Low-Inertia Power Systems: A Great Britain Perspective. 2021
Qiteng Hong , Md Asif Uddin Khan, Callum Henderson, Agustí Egea-Àlvarez, Dimitrios Tzelepis, Campbell Booth.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809921002575>
- K42 System Non-Synchronous Penetration .Definition and Formulation Operational Policy • August 2018 EirGrid
- K43 Review of European Grid Codes for Wind Farms and Their Implications for Wind Power Curtailments
Elis Nycander and Lennart Söder
<http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1257541/FULLTEXT01.pdf>

=====

Koostas: Vello Zupsmann
elektriinsener
zup_ve@yahoo.co.uk
55671139
20.03.2024