

Please note! This is a self-archived version of the original article.

Huom! Tämä on rinnakkaistallenne.

To cite this Article / Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Huikkola, M., Jankko, T., Korpela, A. & Korpijärvi, J. (2025) Miten SYNTI hyödyntää matemaattista mallinnusta. Toolilainen, 2025:2, s. 18-19.

URL: https://www.tool.fi/wp-content/uploads/2025/05/TOOLilainen_2_2025_netti.pdf

MIIKA HUIKKOLA
TAMK



Kuva: Pekka Kaatiälä

TERO JANKKO
XAMK



Kuva: Jere Lauha

AKI KORPELA
TAMK



JUHA KORPIJÄRVI
XAMK



MITEN SYNTI HYÖDYNTÄÄ matemaattista mallinnusta?

Sähköenergiaturros etenee, ja samalla tarvitaan uusia teknisiä ratkaisuita sähköjärjestelmän hallintaan. Murroksen vaikutuksia käsiteltiin yleisellä tasolla Toolilaisen 3/24 artikkelissa ”Sähköenergiäjärjestelmä energiamurroksessa”, jossa mainittiin myös Synteettisen inertian ratkaisut hajautetuissa sähköverkoissa -hanke (lyhyemmin SYNTI), jota XAMK ja TAMK toteuttavat yhdessä. Lyhyesti synteettisen inertian TKI-tarve johtuu luontaisen inertian vähenemisestä esim. aurinko- ja tuulivoiman osuuden lisääntymisen myötä. SYNTI-hankkeessa valitsimme mallinnuksen ja simuloinnin lähtökohdaksi ymmärtää vaatimukset ja haasteet synteettisen inertian tuottamiselle. Tässä artikkelissa sukellaan SYNTI-hankkeen pinnan alle ja tarkastellaan hieman sähköverkkomallinnuksen periaatteita sekä erityisesti sähköntuotannossa käytettävän tahtigeneraattorin dynamiikkaa mallintavaa keinuyltälöä ja sen ratkaisemista. Synteettisen inertian kannalta tahtigeneraattorin dynamiikka on oleellista mm. siksi, että joka tapauksessa sähköverkoissa tulee olemaan tahtikoneita tai niiden kaltaisia laitteita ja että tunnettuna mallina sille inertialle, jota haluamme synteettisesti tuottaa, on juuri perinteinen mekaaninen inertia.

MALLINNUKSEN lähtökohdaksi valittiin yksinkertainen verkkorakenne, jossa kuitenkin toteutuvat todellisten sähköverkkojen tärkeät sähkötekniset ilmiöt. Muutaman kehitysaskeleen kautta muodostui kuvan 1 mukainen rakenne kuvaamaan tällaista sähköverkkoa.

KUTSUMME KUVAN 1 verkkorakennetta tästä eteenpäin nimellä ’Pii-verkko’. Erityistä

huomiota voi kiinnittää oikean alareunan tuntumassa oleviin resistiivisiin kuormiin R_k . Tässä artikkelissa myöhemmin kuvattava keinuyltälön käyttäytyminen on simuloitu siten, että lähtötapauksena on neljän rinnankytketyn kuorman stabiili tilanne.

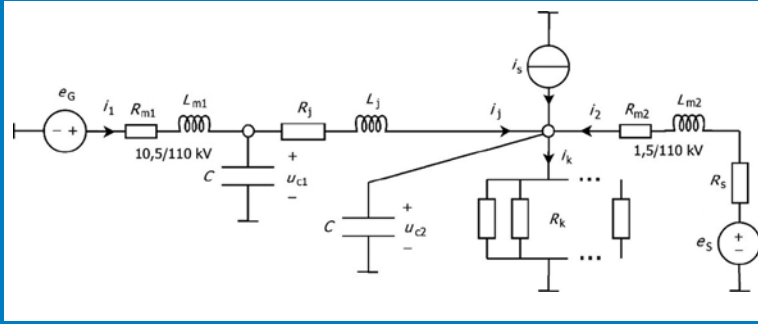
TUNNETTUJA SÄHKÖTEKNIIKAN lainalaisuuksia (kuten Kirchoffin lait) hyödyntäen, voidaan tämä Pii-verkko kuvata differentiaaliyltälöryhmänä. Tilasyistä johtuen emme pysty tätä ryhmää auki kirjoitettuna tässä esittämään, mutta yleisesti voimme esittää tämän differentiaaliyltälöryhmän (DY-ryhmä) vektorimuodossa $y' = f(t, y)$, jossa vektori y sisältää verkon ratkaistavat suureet (eri virrat, tietyt jännitteet) ja se koostetaan verkon rakenteen ja arvojen määräämistä differentiaaliyltälöistä. Lisäksi voimme ajatella tähän ryhmään kuuluvan vielä myös keinuyltälön, joka myös on differentiaaliyltälö ja joka mallintaa tahtigeneraattorin toimintaa sekä on keskeisessä roolissa sähköverkon dynamiikan mallintamisen osalta. Tällöin ratkaistava vektori y sisältää myös tahtigeneraattorin ajan funktiona muuttuvan kulmataajuuden $\omega(t)$.

TÄMÄ DY-RYHMÄ ratkaiseva mallinnustapa on luonteelta aikatasopohjainen ja käytännön simuloinneissa ratkaisemme sitä numeerisesti Runge-Kutta-pohjaisilla ratkaisutavoilla. Mallinnuksen mittakaavan hahmottamiseksi mainittakoon, että DY-ryhmää ratkaistaan mikrosekunti-luokan aika-askeleella. SYNTI-hankkeessa olemme toteuttaneet myös osoitinmallipohjaista mallinnusta, jota emme esittele tässä artikkelissa. Osoitinmallin etuna hetkellisarvomalliin verrattuna on laskentamallin yksinkertaisuus sekä muunnettavuus

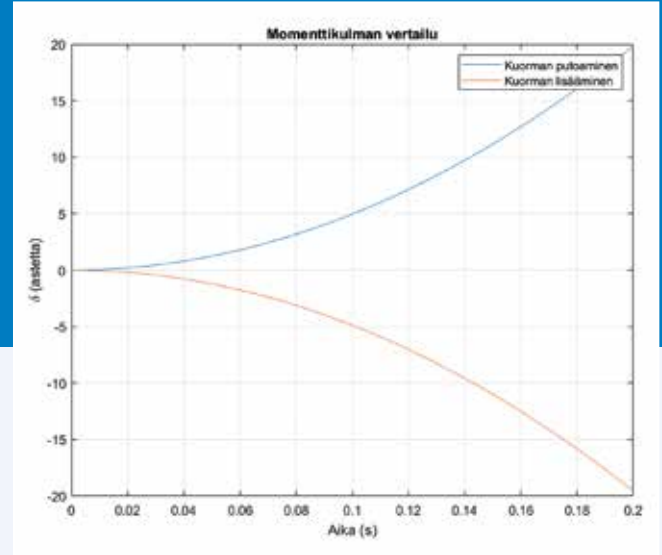
verkkomuodon ja rakenteen muuttuessa, vaikka toisaalta osoitinmallipohjaisesti ei ole mahdollista saada näkyviin verkon transientteja ja nopeita dynaamisia muutoksia, joita esimerkiksi erilaiset häiriötilanteet aiheuttavat. Kuitenkin riippumatta valitusta mallinnustavasta, on yhteisenä tekijänä molemmissa keinuyltälö. Seuraavaksi esitämme esimerkinomaisesti keinuyltälön ratkaisemiseen perustuvan simuloinnin siinä tapauksessa, kun edellä kuvattu Pii-verkko joutuu tehoepätasapainoon.

Keinuyltälö ja simuloinnit

KEINUYHTÄLÖ ON differentiaaliyltälö, joka kuvaa synkronisen koneen roottorin dynamiikkaa. Merkitsemme roottorikulmaa θ (radiaania) ja edelleen järjestelmän kulmanopeutta symbolilla $\omega = \dot{\theta}$ (radiaania sekunnissa). Käytämme tässä yhteydessä keinuyltälön muotoa $D\omega^2 + J\omega\omega = P_m - P_e$, missä J on järjestelmän inertiaa kuvaava termi (yksikkönä kgm^2), D on vaimennustermi (yksikkönä Nms), P_m on generaattorin tuottama mekaaninen teho (wattia) ja P_e on sähköverkon kuluttama sähköteho (wattia). Edelleen merkitsemme *momenttikulmaa* $\delta = \theta - \omega_s t$, joka on roottorikulman θ poikkeama referenssikulmasta (radiaaneina). Referenssikulman ajatusmallina tässä on verkon nimellistaajuutta vastaavalla ideaalikulmanopeudella ω_s pyörivä referenssikulma. Monesti keinuyltälö esitetään edellä olevan muodon sijaan juuri momenttikulman δ sisältävässä muodossa, jossa inertia kuvataan nimellistehoon S_{rated} suhteutetulla inertiatermillä $H = \frac{J\omega_s^2}{2S_{\text{rated}}}$ (yksikkönä MJ/MVA) sekä tehot suhteellisina tehoina. Käytämme tässä artikkelissa kuitenkin ensiksi mainittua keinuyltälön muotoa, sillä



Kuva 1. Dynamiikkamallinnuksen verkkomallin kolmas kehitysversio: 'Pii-verkko'.



Kuva 2. Tehoepätasapainon vaikutus momenttikulmaan simulaatioissa.

tätä olemme käyttäneet myös luomassamme aikatasomallissa. Nämä differentiaaliyhtälöt ovat kuitenkin oleellisesti sama asia esitettynä eri muodossa ja yhteys niiden välillä on suhteellisen helposti osoitettavissa. Luonnollisesti keinuyhtälö ratkaisemalla saadaan $\delta(t)$ eli momenttikulman arvot ajan funktiona. Aikatasosimuloinneissamme olemme käyttäneet Runge-Kutta-pohjaisia numeerisia menetelmiä.

SIMULOINTIA VARTEN valitaan soveltuvat alkuarvot sähköverkon perusteella. Oletetaan alussa vallitsevan tasapainotilan ja oletetaan verkon ideaalitaajuudeksi 50 Hz, jolloin alussa kulmataajuus $\omega = 2\pi f = 100\pi \frac{rad}{s}$. Asetetaan simulointiin hitausmomentti $J = 1000 \text{ kgm}^2$, jota vastaava suhteellinen inertiatermi H olisi simulointitapauksessamme kovin alhainen, eli $H \approx 1 \text{ MJ/MVA}$ mutta siksikin soveltuu hyvin simuloimaan alhaisen inertian tilannetta. Lisäksi asetamme vaimennustermin arvoksi $D = 3,5 \text{ Nms}$. Lisäksi simuloinneissa on käytetty yksivaiheista mallia kuvassa 1 esitetyssä verkossa, jossa pääjännite on 110 kV.

SEURAAVAKSI tarkasteltavassa simulointiesimerkissä generaattorin tuottama mekaaninen teho on $P_m = 26,7 \text{ MW}$, joka vastaa neljän kuorman stabiilia tilannetta kuvan 1 esittämässä verkossa. Sähköverkon kuluttama sähköteho P_e taas vastaa simuloinneissa kolmen ja viiden kuorman stabiileja tilanteita. Ensimmäinen voidaan ajatella tapauksena, kun edellä kuvatusta tasapainotilassa olevasta Pii-verkosta putoaa äkillisesti yksi kuorma pois. Toisena mainittu taas sitä, että verkkoon tuodaan äkillisesti yksi kuorma lisää. Varsinkin jälkimmäisessä tapauksessa on helppo intuitiivisestikin

ajatella synteettisen inertian (tuodaan lisää tehoa verkkoon) tuoman hyödyn verkon tasapainottamiseksi. Reaalimaailman esimerkkejä, joissa synteettisestä inertiaasta on hyötyä, ovat esim. tuotannon tai kulutuksen nopeat ennakoimattomat muutokset, siirtolinjan katkeaminen ja oikosulkutilanteet.

SEURAAVASSA ON EDELLÄ kuvattujen tapausten numeerisesta ratkaisusta saatujen funktioiden momenttikulmien käyttäytymisen kuvaaja. Mikäli tuotettavan ja kulutettavan tehon välillä on epätasapainoa, ajautuu tilanne simulaation perusteella varsin nopeasti kohti epätasapainoista tilannetta, mikäli tilannetta ei aktiivisesti korjata. Kuvassa 2 esitetään kuvaajana momenttikulma ajan funktiona 0,2 sekunnin ajalta, kun simuloinnissa käytetään edellä esiteltyjä arvoja.

HAVAITAAN KUVAAJASTA, että Pii-verkon yhden kuorman äkillisen lisäyksen (ja vastaavasti kuorman äkillisen pois putoamisen) vaikutukset ovat todella nopeat, jolleivät säätöalgoritmit välittömästi reagoi mitenkään. Tässä simulaatioissa säätöalgoritmeja ei ole, kuten kuvaajastakin voidaan päätellä. Alle 0,2 sekunnin kuluttua kuorman lisäämisestä (putoamisesta) on synkronisen koneen roottorin pyörimiskulma jäänyt (ajautunut) jo lähes 20 astetta referenssikulmaa jälkeen (edelle). Tilanne ajautuu nopeasti kestävämmäksi, mikäli esimerkiksi tuotettua mekaanista tehoa ei vähennetä tai sähköverkon kuluttamaa sähkötehoa lisätä. Tai vaihtoehtoisesti pyritä hallitsemaan tilannetta mm. synteettisen inertian keinoin. Huomautettakoon, että oikeissa sähköverkoissa toki on muitakin stabiilisuuden hallintamekanismeja mutta näin

voidaan kuitenkin päästä kiinni mallinnetun verkon simulointien kautta kiinni synteettisen inertian perusymmärryksen.

Lopuksi

EDELLÄ KUVATUN PERUSTEELLA voidaan saada ymmärrystä myös nopeiden säätötoimien tarpeellisuudesta verkon stabiloimiseksi. Voidaan ajatella, että säädön keinoin voidaan vähentää tuotettavaa mekaanista tehoa pienemmäksi kuin kulutettava teho. Jos näin säädettäessä momenttikulma saadaan palautumaan takaisin toivottuun tasapainotilaan, voidaan taas tuottaa mekaanista tehoa yhtä paljon kuin verkko kuluttaa sähkötehoa. Synteettiseen inertiaan tämä liittyy erityisesti taas toisinpäin, eli momenttikulmaa saadaan palautettua kohti toivottua tasapainotilaa myös siten, että sähköverkkoon tuodaan sähkötehoa. Tähän taas liittyy kuvan 1 Pii-verkon suuntaaja sekä sen säätäminen. Tämä säätötarve on yksi konkreettinen esimerkki synteettisen inertian keskeisistä vaatimuksista. Jotta sähköverkko saadaan pysymään stabiilina (tämä on välttämätön vaatimus; synteettiseen inertiaan liittyy muitakin vaatimuksia) synteettisen inertian keinoin, on synteettisen inertian lähde pystyttävä säätämään nopeasti, tarkoituksenmukaisesti ja oikein. Tämän säätöproblematiikan kehittämiseen simulaatioympäristössä liittyy mm. pätö- ja loistehon hetkelliseen tehoon pohjautuva jatkuva laskenta aikatasossa sekä vaihe-eron jatkuva-aikainen laskenta. Ja mm. näihin asioihin tulemme SYNTI-hankkeessa jatkossa vielä syventymään. <<