



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud

Uurimistöo 1.1-4/2015/227/ Lep 15066 II etapi lõpparuanne

Tallinn 2016

Uurimistöö täitjad:



Ülo Treufeldt	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Mati Meldorf	professor, TTÜ elektroenergeetika instituut
Madis Leinakse	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Uku Salumäe	insener, TTÜ elektroenergeetika instituut



Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud“ R&D projekti juht, Elering AS
Kaur Krusell	energiasüsteemi juhtimiskeskuse töökindluse spetsialist, Elering AS
Andrus Reinson	releekaitse ja automaatika talituse juhataja, Elering AS
Ilja Matjas	energiasüsteemi planeerimise talituse elektrisüsteemi analüütik, Elering AS

SISUKORD

Sissejuhatus	6
1. PSCAD tarkvara koormusmodelite analüüsi jätkamine.....	8
1.1 Ülevaade esimese etapi tööst	8
1.2 PSCAD koormusmodeli võnkumine	10
1.2.1 Võnkumise omadused	10
1.2.2 Võnkumise põhjused	12
1.3 Võimalikud lahendused PSCAD koormusmodeli võnkumiste summutamiseks.....	14
1.3.1 Võnkumise summutamine aktiivtakistusega (<i>Resistor</i>)	15
1.3.2 Näide aktiivtakisti suuruse valikust.....	18
1.3.3 Võnkumise summutamine liini mudeliga (<i>Coupled Pi Section Transmission Line</i>).....	20
1.4 Kokkuvõte	24
1.5 Kirjandus	25
2. Koormuskoosseisude ajalise muutlikkuse uurimine	26
2.1 Koormusklasside osakaalude muutused	27
2.2 Koormussõlmede grupeerimine lähtudes koormusklasside osakaaludest	29
2.3 Koormusklasside koosseisu kuuluvate koormuskomponentide osakaalud	34
2.3.1 Teenindus ja avalik koormus.....	35
2.3.2 Kodutarbijad	40
2.4 Koormuskoosseisu muutuste mõju koormuskarakteristikutele.....	41
2.5 Kokkuvõte	43
2.6 Kirjandus	44
3. Tarbimiseadmete koormuskarakteristikute uurimine PSCAD mudelite abil	46
3.1 Tarbimiseadmete koormuskarakteristikud	46
3.1.1 Tarbimiseadmete iseeneslik väljalülitumine.....	46
3.1.2 Kodutarbijate tarbimiseadmed	48
3.1.3 Otseühendatud asünkroonmootorid.....	49
3.2 Kodutarbijate tarbimiseadmete mudelite agregeerimine	59
3.3 Kokkuvõte	59
3.4 Kirjandus	60
4. Koormuse matemaatilise mudeli täiustamine ja rakendusvõimaluste uurimine	62
4.1 Koormustüüpide ilmastikutundlikkus.....	62
4.1.1 Koormuse temperatuuritundlikkus.....	62

4.1.2	Koormusandmed	63
4.1.3	Temperatuuritundlikkuse tegurid	65
4.1.4	Järeldused	66
4.2	Koormuse pingetundlikkus ja sagedustundlikkus	67
4.2.1	Koormuse hälve.....	67
4.2.2	Pingetundlikkuse estimateerimine	69
4.2.3	Statistiline pingetundlikkus	70
4.2.4	Aktiivne katse.....	71
5.	Agregeeritud koormuste sõltuvus sagedusest	72
5.1	Sageduse mõju aktiiv- ja reaktiivkoormusele.....	72
5.2	Agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuste leidmise meetodika ...	76
5.3	Koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuse tegurid	79
5.4	Esinduskoormused ja koormusklasside osakaalud	81
5.5	Agregeeritud koormuste sagedustundlikkus.....	85
5.6	Kokkuvõte	91
5.7	Kirjandus	92
6.	Hajatootjate mõju uurimine agregeeritud koormuste staatilistele ja dünaamilistele karakteristikutele	93
6.1	Hajatootjate liigitus.....	93
6.1.1	Hajatootjate võrguga ühendamise konfiguratsioonid.....	93
6.1.2	Hajatootjate võimsused	95
6.1.3	Liitumispinged	95
6.1.4	Genereerivad allikad	96
6.1.5	Tootmiseseadmete primaarajamid	97
6.2	Hajatootjate kirjeldus.....	98
6.2.1	Tuulegeneraatorite liigitus.....	98
6.2.2	Päikeseelektrijaamad	103
6.3	Hajatootjate lühisvoolud.....	105
6.3.1	Hajatootjate liigitus koormuskarakteristikute leidmisel.....	105
6.3.2	Võrguga vahetult ühendatud sünkroongeneraatorid	105
6.3.3	Võrguga vahetult ühendatud lühisrootoriga asünkroongeneraatorid	108
6.3.4	Kaksistoitega asünkroongeneraatorid	110
6.3.5	Konverterid ja inverterid	113
6.4	Hajatootjate automaatika- ja kaitseseadmed.....	117

6.4.1	Mikrotootmiseseadmed	117
6.4.2	Madalpingevõrku ühendatud pisi- ja väiketootmiseseadmed	118
6.4.3	Keskpingevõrku ühendatud väiketootmiseseadmed	120
6.5	Eesti elektrisüsteemi hajatootjate analüüs	123
6.6	Kokkuvõte	133
6.7	Kirjandus	133
7.	Koormuskarakteristikute mõõtmistepõhine määramine.....	135
7.1	Mõõtmiste kasutamine koormuskarakteristikute määramiseks	135
7.2	Mõõdetavad pingesündmused	137
7.2.1	Pingekarakteristikute määramiseks sobivad pingehäiringud	137
7.2.2	Sobilike pingehäiringute tekitamise võimalused.....	138
7.3	Mõõtmisteks kasutatavad mõõteseadmed	142
7.3.1	Mõõdetavad suurused.....	142
7.3.2	Diskreetimissamm ja mõõteperiood.....	142
7.3.3	Mõõtmiseks sobilikud seadmed	144
7.3.4	Eesti elektrivõrgus kasutatavad koormuskarakteristikute mõõtmiseks sobilikud mõõteseadmed.....	145
7.4	Mõõdetavate koormussõlmede valik	153
7.5	Pidevmõõtmistega kogutavate andmete kasutamisevõimalused.....	157
7.6	Koormuskarakteristikute katseline määramine	159
7.6.1	Katsete ajastus	159
7.6.2	Pinge muutmise protseduur	160
7.6.3	Mõõteseadmed	161
7.6.4	Mõõtepunktide valik	162
7.7	Koormuskarakteristikute parameetrite väärtuste määramine	162
7.7.1	Koormusmudeli struktuuri valik	162
7.7.2	Koormusmudeli parameetrite väärtuste määramine.....	163
7.7.3	Määratud koormusmudeli parameetrite väärtuste sobivuse hindamine	164
7.7.4	Mõõteandmete töötlemise näide.....	164
7.8	Kokkuvõte	170
7.9	Kirjandus	171
	Kokkuvõte	173
	Lisa 1 Alajaamagruppide keskmed	175
	Lisa 2 Alajaamade grupid lähtudes K-keskmiste põhisest klasterdamisest.....	177

Sissejuhatus

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks on Eesti 110 kV põhivõrgu sõlmede agregeeritud koormuste pinge- ja võimalusel sagedussõltuvuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramine.

Projekti eelmise etapi aruandes anti ülevaade tänapäeval kasutatavatest koormuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute mudelitest ning iseloomustati erinevaid karakteristikute määramise meetodeid. Samuti kirjeldati TTÜ elektroenergeetika instituudis väljatöötatud koormuse matemaatiline mudelit, näidati selle mudeli omadusi ja selgitati kasutusvõimalusi mitmesuguste koormuse omaduste ja näitajate esiletoomisel. Lisaks anti eelmises aruandes põhjalik ülevaade tarkvarade PSS/E ja PSCAD koormusmudelitest ning Elektrilevi AS kasutatavast tarbijate grupeerimise meetodikast.

Aruande esimeses peatükis jätkatakse tööd PSCAD-i eksponentsiaalse koormusmudeliga (*Fixed Load*). Projekti esimeses etapis leiti, et nimetatud koormusmudel võib teatavates olukordades käituda eksitavalt, mis võib mõningates olukordades tekitada probleeme PSCAD simulatsiooni tulemuste tõlgendamisel. Probleemiks on eelkõige koormusmudelist tulenev võnkumine lühise korral. Käesoleva aruande esimeses peatükis on kirjeldatud probleeme lähemalt uuritud ning pakutud välja võimalikke lahendusi olukorra parandamiseks.

Aruande teises peatükis analüüsitakse Elektrilevi AS tarbijate klassifikatsioonist lähtudes koormuskoosseisude ajalist muutlikkust ning kirjeldatakse koormussõlmede grupeerimise meetodikat, mis kasutab koormusklasside koosseisu grupeerimise alusena. Käsitletakse kodutarbijate, avaliku ning teenindus koormusklassi koosseisu kuuluvate koormuskomponentide osakaale. Lisaks kirjeldatakse koormuskoosseisu ajalise muutlikkuse eeldatavat mõju määratavatele koormuskarakteristikutele.

Kolmandas peatükis käsitletakse kodutarbijate tüüpkoormusseadmete pingekarakteristikuid ning otseühendatud asünkroonmootoreid lähtudes tarkvara PSCAD võimalustest ja kirjanduses esitatud karakteristikutest. Samuti kirjeldatakse kodutarbijate tüüpkoormusseadmete karakteristikute agregeerimise võimalusi lähtudes komponentidel põhineva modelleerimise põhimõtetest.

Neljandas peatükis uuritakse koormuse matemaatilise mudeli kasutamise võimalusi ilmastiku, pinge ja sageduse mõjude uurimisel. Selgitatakse koormustüüpide temperatuurisõltuvuste leidmise meetodikat Jüri ja Abja sõlme koormuste ning temperatuuride mitmeaastaste statistiliste tunniandmete alusel.

Viiendas peatükis vaadeldakse aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvusi. Kirjeldatakse agregeeritud koormuste sagedussõltuvuste leidmise meetodikat koormusklasside sageduskarakteristikute abil. Koormusklasside sageduskarakteristikud määratakse kindlaks kirjandusallikate põhjal. Lähtudes valitud esindussõlmedesse agregeeritud koormusklasside osakaaludest ja sageduskarakteristikutest, leitakse esindussõlmedesse agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sageduskarakteristikud suvel ja talvel.

Kuuendas peatükis käsitletakse hajatootjaid. Vaadeldakse hajatootjate erinevaid liike ja nende talitlusomadusi. Uuritakse erinevate hajatootjate reaktsioone lühistele, pingelohkudele ning iseloomustatakse hajatootjate kaitseseadmeid. Tehakse kindlaks hajatootjate osakaalud 110 kV võrgu sõlmedesse agregeeritud koormustes ja vaadeldakse nende mõju arvestamise võimalusi.

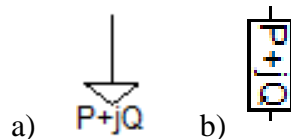
Seitsmendas peatükis kirjeldatakse mõõtmistepõhise koormuskarakteristikute määramise meetodika praktilisi aspekte. Lisaks analüüsitakse meetodika rakendamise võimalusi Eesti ülekandevõrgu koormussõlmede koormuskarakteristikute määramise seisukohalt.

1. PSCAD tarkvara koormusmodelite analüüsi jätkamine

Käesolevas peatükis jätkatakse tööd PSCAD-i eksponentsiaalse koormusmodeliga. Projekti eelnevas etapis leiti, et nimetatud koormusmodel võib käituda teatavates olukordades eksitavalt, tekitades probleeme PSCAD simulatsiooni tulemuste tõlgendamisel. Probleemiks oli eelkõige koormusmodelist tulenev võnkumine lühisel, samuti täheldati koormuse võnkumist sagedushüppel. Võnkumised esinesid induktiivse iseloomuga koormusel, mistõttu võib põhjus peituda koormuse induktiivtakistuse omadustes. Kirjeldatud käitumine võib tekitada probleeme simulatsiooni tulemuste tõlgendamisel, näiteks kui analüüsida juhtimissüsteemide talitlust või elektrituulikute pingelohu läbimisvõimet. Käesolevas projekti osas on antud probleeme lähemalt uuritud ning pakutud välja võimalike lahendusi olukorra parandamiseks.

1.1 Ülevaade esimese etapi tööst

PSCAD tarkvaras on võimalik koormust modelleerida põhiliselt kahel moel: eksponentsiaalse koormusmodeliga (*Fixed Load*) ja kolmefaasilise passiivlemendiga (*Three-Phase Capacitive/Inductive/Resistive Load*). Neist esimene, eksponentsiaalne koormusmodel, võimaldab kasutust nii faasikoormusena (*Fixed Load L-G*) kui ka liinikoormusena (*Fixed Load L-L*). Projekti esimeses osas uuriti peamiselt eksponentsiaalset koormusmodelit sealhulgas nii tema faasi- kui ka liinikoormuse versiooni. Eksponentsiaalse koormusmodeli tingmärgid on joonisel 1.1, kus a) on faasikoormuse ja b) liinikoormuse tingmärk.



Joonis 1.1. PSCAD eksponentsiaalse koormusmodeli tingmärgid.

Esimeses etapis vaadeldi eksponentsiaalse koormusmodeli käitumist pinge- ja sagedushüppel, erinevate pinge- ja sagedustundlikkusteguri väärtustel ning mudeli lühiskäitumist erinevate pingetundlikkustegurite korral. Uuriti nii induktiivse kui ka mahtvusliku iseloomuga koormust. PSCAD-i skeem simulatsioonide läbiviimiseks on joonisel 1.2.

Joonis 1.2. PSCAD-i simulatsiooni skeem eksponentsiaalse koormusmudeli uurimiseks.

Joonisel 1.2 esitatud mudel kujutab tüüpilist 110 kV alajaama trafo ja fiidri lihtsustatud lahendust. Koostatud mudelis on kolm ühefaasilist 110 kV elektrivõrgu aseseemi (koosneb ideaalsest pingesallikast ning 110 kV elektrivõrgu ekvivalentsest takistusest jõutrafo 110 kV klemmidel), 110/6 kV jõutrafo ja koormusmudel. Eksponentmudeli lühiskäitumise uurimiseks on 110 kV poolel elektrivõrgu aseseemi ja jõutrafo vahel lühiseplokk. Lisaks on skeemis vajalikud mõõteplokid ja juhtimisahelad. Detailsemalt on skeemi kirjeldatud projekti esimese etapi aruandes.

Esimeses etapis läbiviidud simulatsioonidest selgus, et lühise järgselt tekib induktiivse iseloomuga koormusmudelil aperiodiliselt sumbuv võnkumine. Lisaks sagedustundlik mudel võnkus ± 1 Hz sagedushüppel, samas pingehüppel ± 10 % nimipingest koormusmudeli võnkumisi ei täheldatud. Mahtuvusliku iseloomuga koormusel võnkumist ei esinenud. Joonisel 1.3 on kujutatud PSCAD-i eksponentsiaalse koormusmudeli aktiivkoormust kolmefaasilisel lühisel kestvusega 0,24 s. Kasutatud on koormusmudeleid aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkus teguritega 0, 1 ja 2 (vastavalt sinine, roheline ja punane joon).

Ekspponentsiaalse koormusmudeli võnkumist on detailsemalt kirjeldatud projekti esimeses etapis. Võnkumiste võimalikke põhjuseid ja võimalusi summutamiseks esimeses etapis ei uuritud, mistõttu käesolevas aruandes on ebasoovitavate võnkumiste võimalike põhjuseid otsitud ning pakutud lahendusi nende likvideerimiseks. Vaadeldud on ainult võnkumisi lühisel.

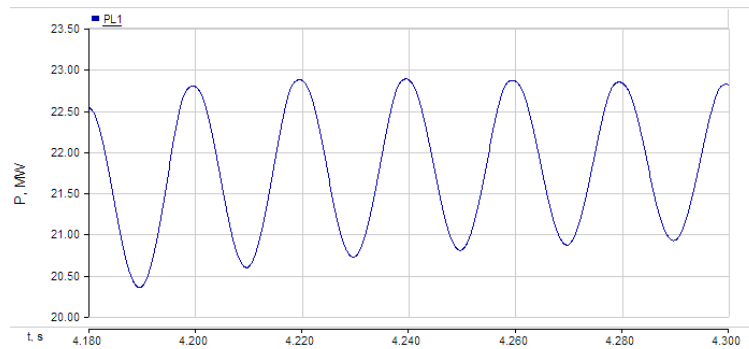
1.2 PSCAD koormusmudeli võnkumine

Käesolevas peatükis käsitletakse PSCAD-i ekspponentsiaalse koormusmudeli võnkeprotsessi lühise korral. Esmalt on vaadeldud võnkeprotsessi omadusi ja tekkimise tingimusi ning seejärel on tuginedes protsessi omadustele vaadeldakse võimalikke tekkimise põhjuseid.

1.2.1 Võnkumise omadused

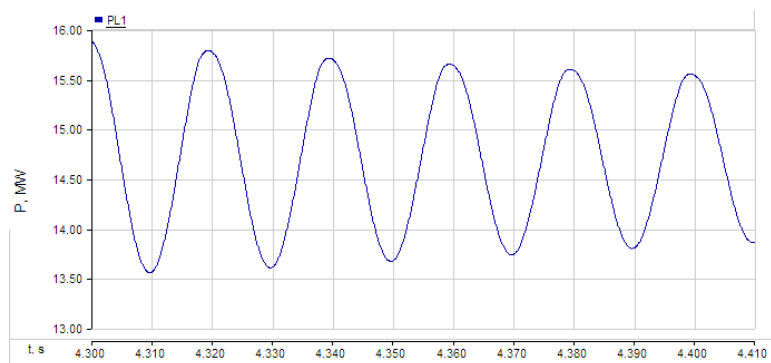
Joonis 1.4. Lühisest taastumisel tekkiv transient.

Transiendi sageduse edasisel uurimisel selgus, et ta ei sõltu lühise pikkusest, koormuse induktiivsusest ega ka pingetundlikkustegurist. Selle kinnituseks on toodud joonised 1.5 kuni 1.7. Joonisel 1.5 on aktiivkoormuse võnkumine lühendatud lühise kestvusega, milleks on 0,12 s. Aktiiv- ja reaktiivkoormus on vastavalt 8,34 MW ja 6,26 Mvar-i faasi kohta ning mõlemad pingetundlikkustegurid on väärtusega 2.



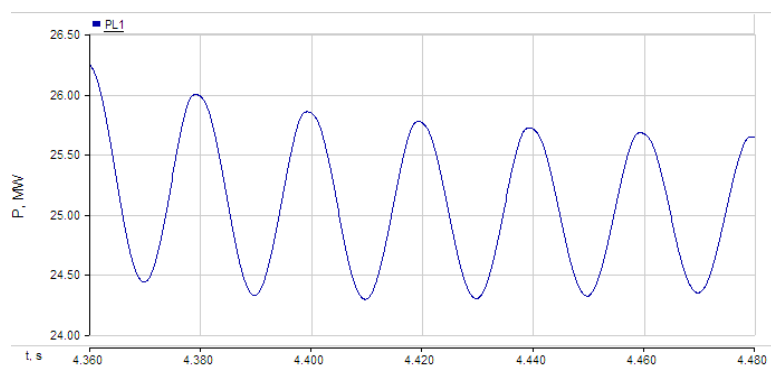
Joonis 1.5. Lühisest taastumisest tekkinud transient lühise kestusega 0,12 s.

Joonisel 1.6 on aktiivkoormuse võnkumine muudetud aktiiv- ja reaktiivvõimsusega. Aktiiv- ja reaktiivkoormus on vastavalt 6 MW ja 10 Mvar faasi kohta. Lühise kestvus on 0,24 s ja mõlemad pingetundlikkustegurid on väärtusega 2.



Joonis 1.6. Lühisest taastumisest tekkinud transient aktiivkoormusel 6 MW ja reaktiivkoormusel 10 Mvar faasi kohta.

Joonisel 1.7 on aktiivkoormuse võnkumine lühise taastudes, kui pingetundlikkustegurite K_{pu} ja K_{qu} väärtused võrduvad 0. Aktiiv- ja reaktiivkoormus on vastavalt 8,34 MW ja 6,26 Mvar-i faasi kohta ning lühise kestvus on 0,24 s.



Joonis 1.7. Lühisest taastumisest tekkinud transient aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegurite väärtustega 0.

Jooniselt 1.4 kuni 1.7 on näha, et võnkumise periood on kõigil juhtudel 0,02 s, ehk ta ei sõltu lühise kestvusest, koormuse induktiivsusest ja pingetundlikkustegurist. Periood 0,02 s vastab teatavasti 50 Hz sagedusele, ehk põhiharmoonikule. PSCAD simulatsiooni tulemuste analüüs näitas, et kõrgemaid harmoonilisi komponente pinges ega voolus ei esinenud.

Projekti esimese etapis järeldati, et võnkumine tekib ainult induktiivse iseloomuga koormusel. Nimetatud asjaolu viitab, et siirdeprotsessi põhjused võivad peituda lühisvoolus, kuna elektriahelate teooriast on teada, et induktiivsusel ei saa vool hüppeliselt muutuda. Esimese etapi tulemustest järeldus, et lühise tekkides ja taastudes tekkis võimsuse vastujärgnevuskomponent, mis sumbus kiirelt peale lühist. Nulljärgnevuskomponenti tekkimist lühiskatse puhul ei täheldatud.

1.2.2 Võnkumise põhjused

Joonis 1.8. Eksponentsiaalse koormusmudeli alalisvoolukomponent lühisel.

Jooniselt 1.8 on näha, et lühise ajal ja peale lühist tekib koormusvoolu vähesumbuv aperioidiline vool, ehk alalisvoolukomponent. Lisaks on näha, et lühise taastumisel tekib aperioidilise voolu järsk hüpe, mis ei mõjuta aperioidilise voolu sumbumist.

Aperioidiline voolu komponent esineb antud olukorras induktiivse iseloomuga koormusel ka reaalses elektrivõrgus. Reaalses elektrivõrgus on tegemist suhteliselt kiirelt sumbuva protsessiga elektrivõrgu aktiivtakistuse tõttu. Elektriahelate teooriast on teada, et aperioidilise

Ilma aktiivkoormuseta arvatud ajakonstandi järgi oleks 0,24 s peale lühise teket aperioidilise voolu suhe oma algsesse väärtusse 71%. Saadud aperioidilise voolu väärtus on lähedal PSCAD simulatsioonis saadud väärtusele ning kui arvestada ka lihtsustuse korras välja jäetud trafo rauaskadudega, siis võib ilmselt järeldada, et PSCAD tarkvaras arvutatakse aperioidilist voolu ilma koormusmudelis oleva aktiivtakistusega. Kirjeldatud erisus esineb peale eksponentsiaalse koormusmudeli ka passiivelementidest koostatud koormusel.

Lühise likvideerimisel koormusmudeli aktiivtakistus taastub, sellele viitab aktiivvõimsuse taastumine lühise eelsele tasemele. See peaks aga tähendama ahela ajakonstandi väärtuse vähenemist tasemeni, millel aperioidiline vool ei jõuaks märgatavalt mõjutada simulatsiooni tulemusi. Ometi esineb ka peale lühise likvideerimist koormusvoolus aeglaselt sumbuv aperioidiline komponent ning ilmselt ka seetõttu võimsuse võnkumine (joonis 1.8). Kirjeldatud omadus viitab, et aperioidilise komponendi arvutusel ei arvesta PSCAD peale lühise likvideerimist koormuse aktiivtakistusega. Jooniselt 1.8 on ka näha, et aperioidiline komponent sumbuv mõnevõrra kiiremini peale lühist, kui lühise ajal. Kui lühise ajal on trafo aktiivtakistus ainuke aktiivtakistus, millel aperioidiline vool sumbuv, siis peale lühist ilmselt lisandub sellele ka 110 kV võrgu ekvivalent.

Eelnevast mõttekäigust on üks järeldus, et kui lühis simuleeritaks trafo taga, siis peaks lühise ajal aperioidiline vool olema sumbumatu, kuna puudub aktiivtakistus lühisest tagapool. Eelduseks on eelnevale väitele, et lühisekoha takistus on null. Toodud väite illustatsiooniks on joonis 1.9, millelt on näha, et lühise ajal aperioidilise voolu väärtus ei vähene.

1.3 Võimalikud lahendused PSCAD koormusmodeli võnkumiste summutamiseks

Tekkivat võnkumist on võimalik summutada, kui selleks tekib vajadus näiteks juhtimissüsteemide seadistamisel, elektrituulikute pingelohu läbimisvõime ning mudeli probleemide uurimisel, et välistada eksitavad faktorid koormusmudelist. Võnkumise summutamiseks on vajalik lisada skeemis (joonis 1.2) trafo ja koormusmodeli vahele jadamisi täiendav aktiivtakistus, mis suurendab ahela ajakonstanti ning sellest tulenevalt vähendab tekkivat aperioidilist voolu. Seejuures mida suurem on aktiivtakistus, seda rohkem aperioidiline vool sumbub. Arvestada tuleb aga ka, et kui koormusmodeli ette lisada kunstlikult suur takisti, siis väheneb simulatsiooni täpsus. Nende põhjuste tõttu on vajalik leida optimaalne aktiivtakistuse väärtus, mis summutaks piisavalt palju aperioidilist voolu ja samas ei mõjutaks märgataval määral simulatsiooni tulemusi.

Aktiivtakistust võib lisada trafo ja koormuse vahele nii otseselt, kasutades selleks vastavat PSCAD mudelit, kui ka lisades trafo ja koormuse vahele liini. Käesolevas töös on vaadeldud liini lisamist, kasutades mudelit *Coupled Pi Section Transmission Line*, ning takisti lisamist, kasutades vastavat passiivelementi (*Resistor*).

1.3.1 Võnkumise summutamine aktiivtakistusega (*Resistor*)

Üks võimalus võnkumise summutamiseks on lisada koormusmudeli ette aktiivtakisti. Aktiivtakistuse lisamisega näeks skeem välja järgmine (joonis 1.10). Lisaks joonisel 1.10 näidatud eksponentsiaalsele koormusmudelile võib aktiivtakisti lisada ka passiivelementidest koostatud koormusmudeli ette.

Joonis 1.10. PSCAD skeem eksponentsiaalse koormusmudeli võnkumise summutamiseks aktiivtakistusega.

Alljärgnevalt kirjeldatakse käesoleva töö raames koostatud meetodit, kuidas lisatava aktiivtakistuse suurust valida.

Meetodi järgselt arvutatud aktiivtakistus on optimaalne vähendamaks lühise tõttu tekkiva aperioidilise voolu komponenti ilma, et lisandunud takistus mõjutaks oluliselt simulatsiooni tulemusi.

Teatavasti aperioidiline vool sumbub eksponentsiaalselt [1]:

$$I_{ap} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.3)$$

Võrrandis 1.3 tähistab I_{ap} aperioidilise voolu suurust ajahetkel t , t tähistab aega alates aperioidilise voolu tekkimisest, τ on eespool kirjeldatud ahela ajakonstant L/R ja I_0 on aperioidilise voolu algväärtus ($t = 0$). Aperioidilise voolu algväärtus I_0 avaldub koormuse aktiivtakistust arvestamata järgmiselt.

$$I_0 = \frac{U_f}{X_T + X_k} \quad (1.4)$$

Võrrandis 1.4 on U_f trafo sekundaarpoole faasi ja maa vaheline nimipinge, X_T trafo reaktiivtakistus ja X_k koormusmodeli reaktiivtakistus. Ajakonstandi τ saab arvutada järgmiselt.

$$\tau = \frac{X}{\omega^* R} = \frac{X_T + X_k}{\omega(R_T + R')} \quad (1.5)$$

Võrrandis 1.5 on ω põhiharmoniku nurkkiirus, R_T trafo aktiivtakistus ja R' otsitav lisatava aktiivtakistuse suurus. Asendades võrrandisse 1.3 võrrandid 1.4 ja 1.5, saame järgmise tulemuse.

$$\tau = \frac{X_T + X_k}{\omega(R_T + R')} \quad (1.6)$$

Kui avaldada võrrandist 1.6 otsitava aktiivtakisti suurus R' , saame tulemuseks võrrandi 1.7.

$$(1.7)$$

Võrrandis 1.7 tähistab I_{ap} voolu aperioidilist komponenti ajahetkel t , kui ahelasse on juba lisatud takistus R' . Aperioidilise komponendi suuruse määramiseks on kasutatud tema suhet püsitalitlusvoolu efektiivväärtusesse, vastavalt nagu võrrandis 1.8 on kirjeldatud.

$$(1.8)$$

Võrrandis 1.8 tähistab k soovivat aperioidilise voolu suurust tema suhtena püsitalitlusvoolu. Näiteks kui soovitakse, et aperioidiline vool oleks 1% püsitalitlusvoolust, siis oleks k väärtus 0,01. I_f tähistab püsitalitlusvoolu, ehk koormusvoolu, S tähistab koormuse kogunäivvõimsust ning U_f koormuse nimifaasipinget. Asendades voolu aperioidilise komponendi võrrandis 1.7 ning korrutades tulemuse läbi 0,5-ga, saame lõpuks järgmise tulemuse.

$$(1.9)$$

Tulemust on korrutatud konstandiga 0,5, mis on leitud empiiriliselt simulatsioonide analüüsimisest, et vähendada aktiivtakistuse mõju simulatsiooni täpsusele.

Võrrand 1.9 annab väiksemate reaktiivkoormuste juures suuremaid R' väärtusi. Asjaolu tuleneb eelkõige koormuse reaktiivtakistuse X_k suuremast mõjust tulemusele võrrelduna koormuse näivvõimsuse S -iga. Nimelt reaktiivkoormust vähendades suureneb koormuse

reaktiivtakistus, mis omakorda tingib R' suurenemise. Näivvõimsus S avaldab samuti tulemusele mõju, tema suurenedes suureneb R' ning vastupidi. Siiski ei avalda näivvõimsus tulemusele nii suurt mõju, kui koormuse reaktiivtakistus, mistõttu mõlema muutudes domineerib reaktiivtakistuse mõju. Lühise kestvuse t mõju tulemusele on samuti pöördvõrdeline.

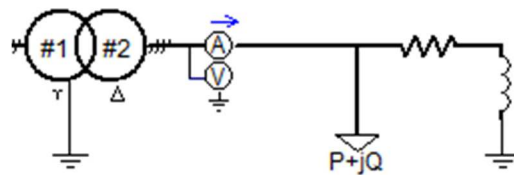
Muutuja k abil saab mõjutada aperioidilise voolu soovitud suurust lühise taastumisel ja selle kaudu järelikult ka võimsuse võnkumist. Suurendades k väärtust annab seos 1.9 väiksema R' väärtuse ning vähendades k väärtust annab seos suurema R' väärtuse. K väärtusel 0,05 oli võimsuse võnkumine vahemikus 1 – 5% (võimsuse võnkumise amplituudi suhe võimsuse püsiväärtusse) ning lisataval aktiivtakistil R' avaldus kuni 5 % kogu koormuse aktiivvõimsusest. Testiti koormusi, mille P/Q suhe oli vahemikus 10 kuni 1. K väärtusel 0,1 esines koormusmudelil üpriski suur võnkumine, mistõttu ei ole nimetatud väärtuse kasutamine soovitatav. K väärtusel 0,01 hakkas R' märgatavalt mõjutama koormuse püsitalitluse väärtust. Eelnevat arvesse võttes on muutujaks k soovitatav valida 0,05 või selle lähedal olevad väärtused.

Võrrandi tuletamisel on tehtud mõningaid lihtsustusi. Esiteks ei ole arvestatud lühise likvideerimisel tekkiva aperioidilise voolu hüppega ning trafo rauaskadude mõjuga aperioidilisele voolule.

Kirjeldatud meetodi puuduseks on, et domineeriva aktiiv- või induktiivkoormuse korral ei anna meetod soovitud tulemusi. Domineerival induktiivkoormusel hakkab lisatav aktiivtakistus R' märkimisväärselt mõjutama koormuse püsiväärtust, samas kui R' vähendada, ei saada soovitud koormuse võnkumise vähenemist. Äärmiselt domineeriva aktiivkoormuse korral annab valem jällegi väiksemaid takisti väärtusi, kui oleks vaja reaktiivvõimsuse võnkumise summutamiseks, R' suurendades hakkab aga ta mõjutama märgatavalt aktiivkoormust. Lisaks annab äärmiselt domineeriva aktiivkoormuse korral valem 1.9 lisatava aktiivtakistuse R' väärtuseks negatiivseid väärtusi, mistõttu teda sellistel juhtudel ei saa kasutada.

Domineeriva aktiivkoormuse korral võib kirjeldatud ebatäpsuseid kompenseerida, kui induktiivkoormust modelleerida eraldi passiivelemendina paralleelselt koormusmudelile (joonis 1.11) ning märkida koormusmudelil endas reaktiivkoormus 0-ks. Aktiivtakisti R' lisada sellisel juhul vahetult induktiivsuse ette. Aktiivtakistuse R' arvutamisel valemiga 1.9 kasutada näivvõimsuse S asemel reaktiivvõimsust Q . Tuleb tähele panna, et passiivelemendi

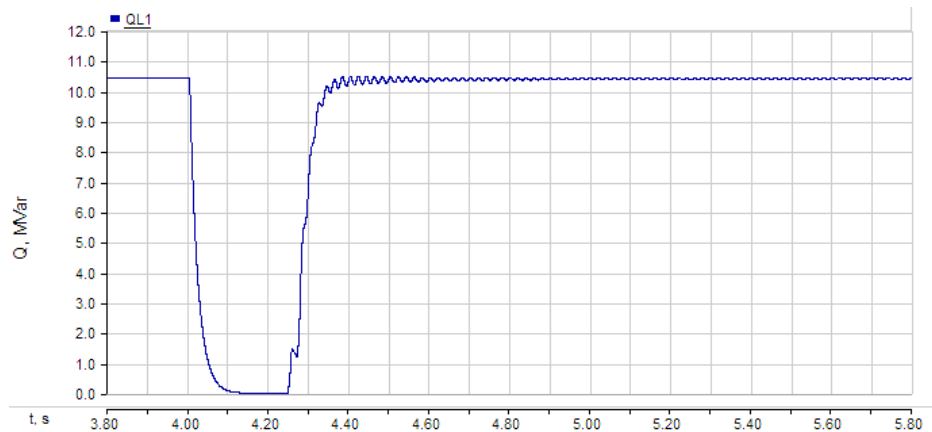
kasutamine tähendab modelleeritava reaktiivkoormuse ping- ja sagedustundlikkusteguri väärtuseks 2, mis võib reaktiivkoormuse modelleerimise muuta ebatäpseks.



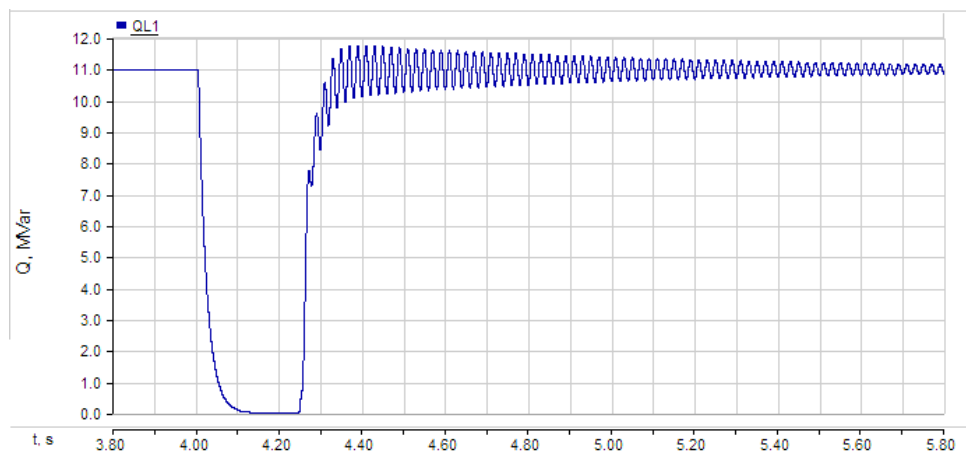
Joonis 1.11. Induktiivkoormuse väljatoomine eksponentsiaalsest koormusmudelist äärmiselt domineeriva aktiivkoormuse korral.

Kirjeldatud viisil koormusmudeli ette lisatava aktiivtakisti määramine annab ainult hinnangu takisti suurusele, olenevalt soovist võib kasutaja takisti valikul saadud tulemust korrigeerida väiksemaks või suuremaks. Valemi kasutamisel domineeriva aktiiv- või reaktiivkoormusel ei anna valem tõenäoliselt kasutaja poolt soovitud tulemust, mistõttu oleks sellistel juhtudel vajalik muu meetodi valik. Töö hinnangul annab võrrand 1.9 orientiiri, millest lähtuda lisatava aktiivtakisti suuruse täpsemal valikul.

Reaktiivkoormuse võnkumine koos lisatud aktiivtakistiga on joonisel 1.14, reaktiivvõimsuse võnkumine ilma lisatud aktiivtakistita on joonisel 1.15.



Joonis 1.14. Reaktiivkoormus koormusmudeli ette lisatud aktiivtakistusega ($R' = 0,04 \Omega$).



Joonis 1.15. Reaktiivkoormus ilma koormusmudeli ette lisatud aktiivtakistusega.

Joonistelt 1.14 ja 1.15 on näha, et lisatud aktiivtakisti vähendas märgatavalt reaktiivkoormuse võnkumist. Reaktiivkoormuse võnkumiste suurima ja väikseima väärtuste vahe vähenes aktiivtakisti lisamisega 1,76 Mvar-ilt 0,30 Mvar-ini ehk 83 %. Lisatud takisti mõju reaktiivkoormuse püsitalitluse väärtusele oli 0,58 Mvar, ilma lisatud takistita oli reaktiivkoormus 10,99 Mvar, koos aga 10,41 Mvar.

1.3.3 Võnkumise summutamine liini mudeliga (Coupled Pi Section Transmission Line)

Lisaks aktiivtakisti (*Resistor*) kasutamisele on võnkumiste summutamiseks võimalik kasutada ka liinimudeleid. Antud alapeatükis on vaadeldud PSCAD mudeli *Coupled Pi Section Transmission Line* kasutamist sobiva liinimudelina. Sarnaselt aktiivtakistile on liinimudel

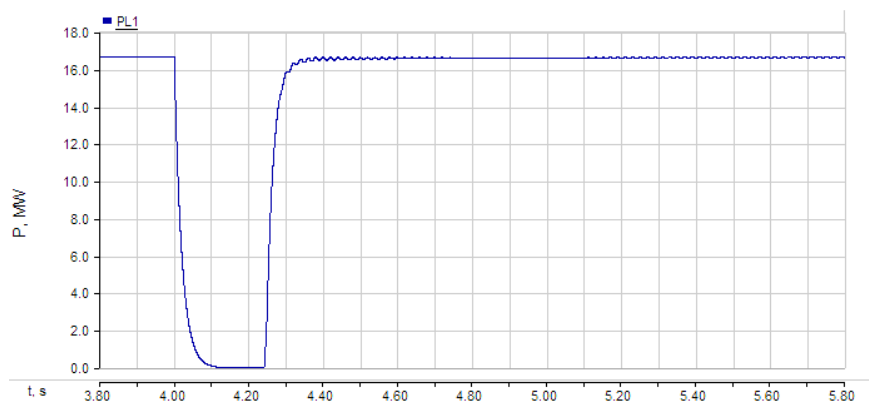
lisatud vahetult koormusmudeli ette. PSCAD skeemil näeks liinimudeli lisamisel välja järgmine (joonis 1.16).

Joonis 1.17. PSCAD mudeli Coupled Pi Section Transmission Line aseskeem [2].

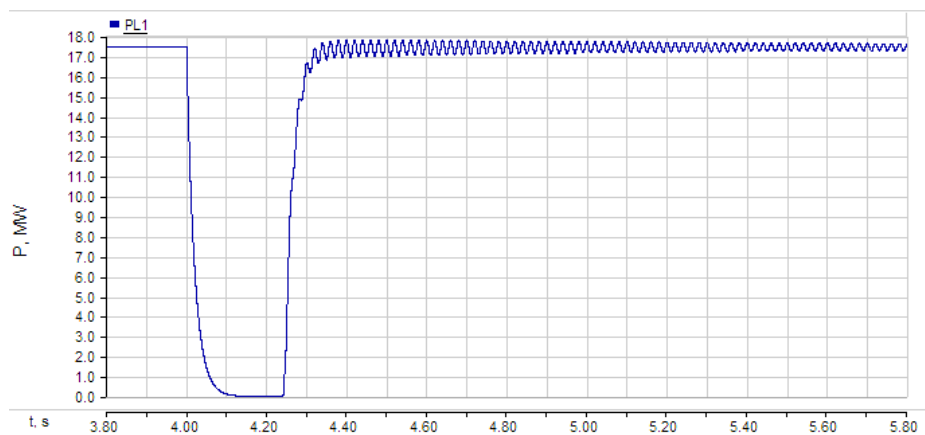
Liinimudeliga võnkumiste summutamisel on idee sama, mis eespool vaadeldud aktiivtakisti kasutamisel, ehk liini aktiivtakistus (joonisel 1.17 tähis R) peaks summutama koormuse induktiivsusest tekkivat alalisvoolukomponenti.

Sarnaselt tavalisele aktiivtakistile saab ka siin liini aktiivtakistuse suurendamisega võnkumisi vähendada, samas tuleb arvestada simulatsioonitulemuste täpsust. Liini takistust saab suurendada kahel viisil: suurendades juhtme takistust pikkusühiku kohta või pikendades liini. Kui aluseks on võetud reaalsed liini parameetreid, siis tõenäoliselt ei saa muuta parameetreid pikkusühiku kohta, vaid tuleb suurendada liini pikkust.

Koormuse aktiivvõimsus nii liinimudeliga kui ka ilma on vastavalt joonistel 1.18 ja 1.19.



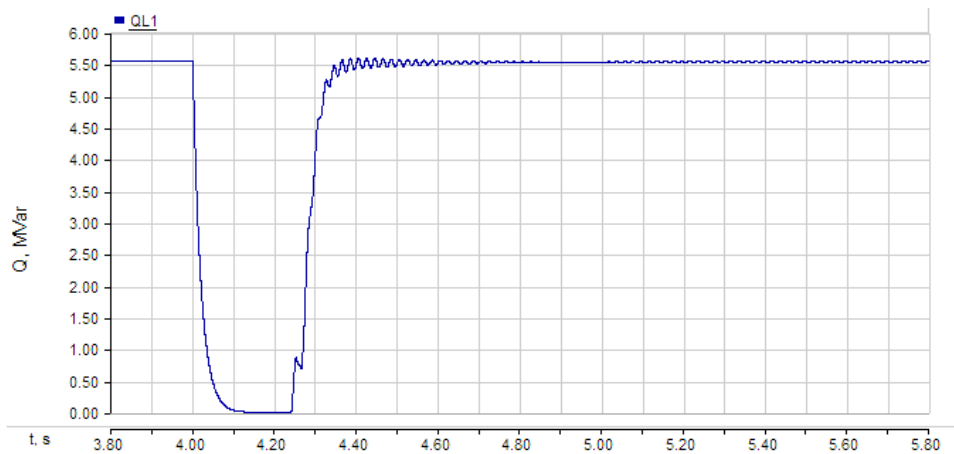
Joonis 1.18. Aktiivkoormuse võnkumine kaabli pikkusega 1800 m.



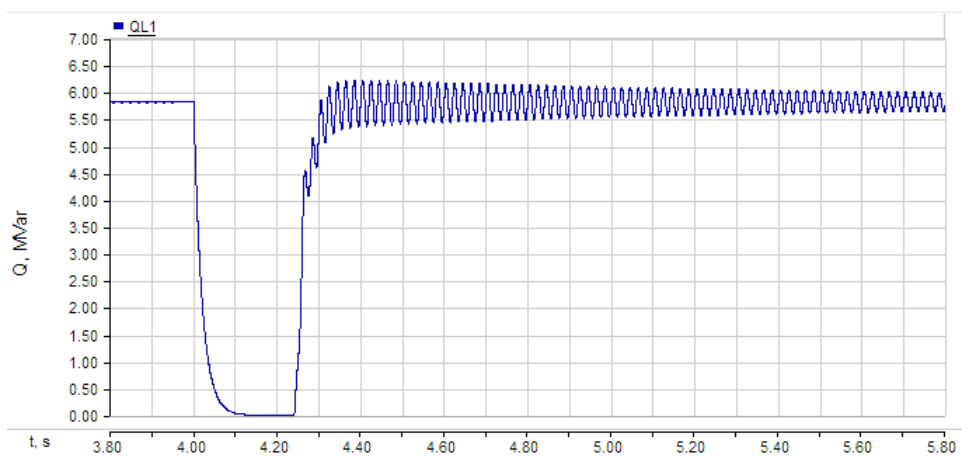
Joonis 1.19. Aktiivkoormuse võnkumine ilma kaablita.

Joonistelt 1.18 ja 1.19 on näha, et aktiivkoormuse võnkumiste suurima ja väikseima väärtuste vahe vähenes aktiivtakisti lisamisega 0,93 MW-ilt 0,22 MW-ini ehk 76 %. Lisatud takisti mõju aktiivkoormuse püsitalitluse väärtusele oli 0,83 MW, ilma lisatud takistita oli aktiivkoormus 17,46 MW, koos aga 16,63 MW.

Koormuse reaktiivvõimsus nii liinimudeliga kui ka ilma on vastavalt joonistel 1.20 ja 1.21.



Joonis 1.20. Reaktiivkoormuse võnkumine kaabli pikkusega 1800 m.



Joonis 1.21. Reaktiivkoormuse võnkumine ilma kaablita.

Joonistelt 1.20 ja 1.21 on näha, et reaktiivkoormuse võnkumiste suurima ja väikseima väärtuste vahe vähenes aktiivtakisti lisamisega 0,96 Mvar-ilt 0,19 Mvar-ini ehk 80 %. Lisatud takisti mõju reaktiivkoormuse püsitalitluse väärtusele oli 0,27 Mvar, ilma lisatud takistita oli reaktiivkoormus 5,81 Mvar, koos aga 5,54 Mvar.

1.4 Kokkuvõte

Käesoleva aruande teises osas jätkati PSCAD koormusmodelite uurimist. Projekti esimeses etapis leiti, et lühistalitusel tekib koormusmodelitesse võnkumine, mida realses elektrivõrgus ei pruugi esineda. Projekti teises osas on uuritud võnkumise põhjuseid ning pakutud välja võimalike lahendusi võnkumise kõrvaldamiseks.

Teise etapi töö tulemusena leiti, et koormusmodeli häbelist käitumist lühise korral põhjustab induktiivse iseloomuga koormusmodelis olev aktiivtakistus. Nimelt ei arvestata lühisel PSCAD simulatsioonis kirjeldatud aktiivtakistust, mistõttu muutub lühisekohast tagapool olev

ahel (joonis 1.2) induktiivseks. Induktiivse ahela iseloomu tõttu tekib ahelasse aperiodiline vool, mis vähese aktiivtakistuse tõttu on vähe sumbuv (joonis 1.8). Tekkiv aperiodiline vool põhjustab lühise järgse võimsuse võnkumise.

Kirjeldatud võnkumise esinemisel võib olukorrast olenevalt tekkida vajadus tema summutamiseks. Üheks näiteks on koormusmudeli võnkumisest tekitatud probleemid juhtimissüsteemide seadistamisel, mistõttu võib olla tarvilik välistada eksitavad faktorid koormusmudelist.

Võnkumise summutamiseks tuleb ahelasse lisada aktiivtakistust. Aktiivtakistust saab lisada nii kasutades elementi *Resistor* (joonis 1.10) kui ka liinimudeliga (joonis 1.16). Aktiivtakistuse suurust võib valida käesolevas töös toodud võrrandi 1.9 abil, mille tuletuskäiku on töös ka kirjeldatud. Aktiivtakistuse lõpliku suuruse määramisel on siiski vajalik kasutaja enda hinnang vastavalt simulatsiooni täpsuse nõuetele.

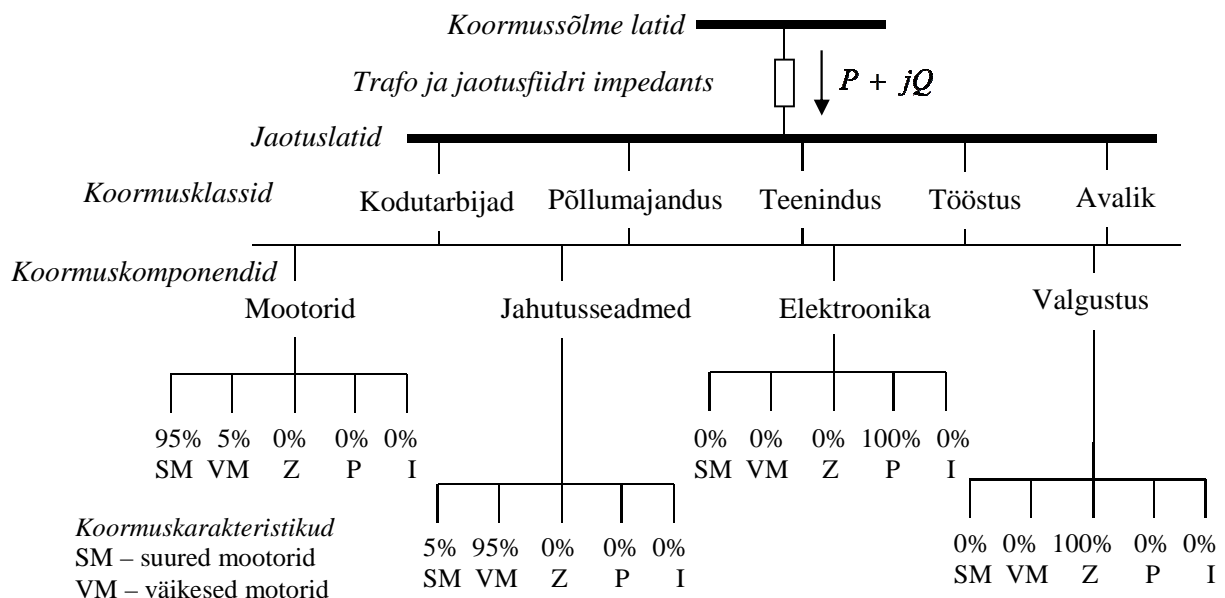
1.5 Kirjandus

- [1] Treufeldt, Ü. Lühised elektrisüsteemides. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2002, 158 lk.
- [2] PSCAD X3 Online Help v4.5.2 Manitoba HVDC Research Centre, 2013.

2. Koormuskoosseisude ajalise muutlikkuse uurimine

Üheks koormussõlmede pinge- ja sageduskarakteristikute koostamise meetodiks on komponentidel põhinev modelleerimine, mis tugineb üksikute tarbimisseadmete pinge- ja sageduskarakteristikute agregeerimisele lähtudes seadmete osakaaludest. Joonisel 2.1 kujutatud näites kasutatakse tarbijate klassifitseerimiseks 5 koormusklassi ning iga koormusklassi elektriseadmed jagatakse 4 koormuskomponendiks (seadmegrupiks). Iga koormuskomponendi koormuskarakteristikuid esitatakse komposiitmodeliga, mis koosneb suure mootori mudelist, väikese mootori mudelist ning polünoommudelist (ehk ZIP-mudeli). Teades koormuskomponentide osakaale on võimalik koormuskomponentide mudelite agregeerimise tulemusena koostada koormusklasside koormusmudelid. Järgnevalt on võimalik koormusklasside mudelid agregeerida ning agregeerimise tulemusena tuvastada koormussõlmede mudelid.

Aruande käesolev peatükk käsitleb esmalt koormusklasside osakaalude ajalist muutlikkust lähtudes teadaolevast infost ning pakub välja meetodika sarnase koormusklasside koosseisuga alajaamade grupeerimiseks. Järgnevalt kirjeldatakse koormuskomponentide osakaale teenindus, avaliku ning kodutarbijate koormusklassi tarbimises.



Joonis 2.1. Näide komponentidepõhisest koormuskarakteristikute modelleerimisest [1][2].

Sarnaselt kogu Elektrilevi AS jaotusvõrgu tarbimisele muutub energia tarbimine ka koormusklasside siseselt. Joonisel 2.4. on kujutatud Elektrilevi AS jaotusvõrgu tarbimine koormusklasside (tüüpgruppide) lõikes, väärtused on normaliseeritud lähtudes iga tüüpgrupi suurima tarbimisega kuust. Põllumajanduse puhul on suurim energiatarve augustis, teiste koormusklasside puhul jaanuaris.

Joonis 2.4. Elektrilevi AS jaotusvõrkude energiatarve koormusklasside lõikes (koormusklasside tarbimine normaliseeritud koormusklassi suurima energiatarbega kuu suhtes).

Joonise 2.4 põhjal langevad suveperioodil enim kodutarbijate ja avalike hoonete tarbimine. Lähtuvalt tööstus ja teeninduskoormuse väiksemast langusest võiks eeldada, et nende koormusklasside osakaalud suurenevad suveperioodil.

Arvutades koormusklasside osakaalud kuude kaupa (joonis 2.5) on võimalik tuvastada, et teeninduskoormuse osakaal suureneb suveperioodil (juuni kuni august) talvega (detsember kuni veebruar) võrreldes umbes 5 protsendipunkti võrra ning kodutarbijate osakaal langeb umbes sama palju. Põllumajanduskoormuse ja tööstuskoormuse osakaal summaarse koormuse hulgas tõuseb suveperioodil 1 protsendipunkti võrra. Avalike hoonete tarbimine langeb suveperioodil umbes 2 protsendipunkti võrra võrreldes talvise osakaaluga.

2.2 Koormussõlmede grupeerimine lähtudes koormusklasside osakaaludest

Koormusklasside osakaale kirjeldavate andmete põhjal on võimalik koormussõlmi grupeerida. Üks koormussõlmede jaotus esitati projekti eelmise etapi aruandes [2]. Järgnevalt kirjeldatakse täpsemat alajaamade grupeerimise metoodikat, mis tugineb K-keskmiste klasterdamise algoritmile.

Klasterdamisel kasutatavaks valimiks võeti koormusklasside koosseise kirjeldavatest andmetest 92 suurema energiatarbega tarbimissõlme, mis moodustavad umbes 96% Elektrilevi tarbimisest. Ülejäänud sõlmede grupeerimiseks on järgnevalt võimalik kasutada näiteks hierarhilist klasteranalüüsi, mille käigus saaks määrata sõlmed lähima koormusgrupi keskmega klastrisse ehk gruppi.

K-keskmiste algoritmi nimetatakse ka Lloyd'i algoritmiks [5] ja selle kasutusala on vaatlusobjektide jaotamine K gruppi lähtudes objektide omadustest. Koormusklasside osakaalude põhisel koormussõlmede grupperimisel on koormussõlmede omadusteks koormusklasside osakaalud aasta erinevatel kuudel. Kasutades keskmistatud aastat, mille puhul erinevate aastate mõõteväärtused on keskmistatud, iseloomustab iga koormussõlme 60 väärtust, mis kõik kirjeldavad kindla koormusklassi osakaalu ühel ekvivalentaasta kuul.

K-keskmiste algoritmi puhul on võimalik kasutada vaadeldavate objektide grupeerimiseks objektide ja klatri kesete vahelise Eukleidilise kauguse ruudu minimeerimist. Eukleidiline

kauguse ruut $d(x,z)$ vaadeldava objekti $x=(x_1, x_2 \dots x_n)$ ja klasteri keskme $z_1=(z_{1,1}, z_{1,2} \dots z_{1,n})$ vahel väljendub valemiga 3.1.

kus z_i on klasteri C_i kese ning $d(x, z_i)$ on vaadeldava objekti x ja klasteri keskme z_i vahelise Eukleidilise kauguse ruut.

Minimeerimisülesande lahenduseks on K klasteri (grupi) keskme koordinaadid ning vaadeldavate objektide jaotus gruppidesse. Gruppide arv K on optimeerimisel algoritmi sisendiks ehk see on tarvis algoritmile ette anda.

Koormussõlme gruppide arv K

Optimaalse gruppide arvu K valikuks on kasutusel mitmeid meetodeid. Kui arvestada, et optimeerimisprobleemi eesmärgiks on objektide ja grupikeskmete Eukleidiliste kauguse ruutude summa minimeerimine, siis on üheks klasterite arvu K valiku võimaluseks lahendite Eukleidiliste kauguste ruutude summa klasterite arvust sõltuvuse analüüsimine.

Sobiva K väärtuse valikuks teostati valimi grupeerimine K väärtustega 2...40. Iga K väärtuse jaoks teostati 100 grupeerimist ning valiti nende hulgast parim lahend. Kasutatava valimi korral klasterite arvu K suurendamisel Eukleidiliste kauguste ruutude summa väheb, kirjeldatud sõltuvust on kujutatud joonisel 2.6.

Joonisel 2.6 on võimalik märgata kahte käänupunkti, klastrite arvu 5 ja 15 lähistel. Käänupunktid iseloomustavad klastrite arvu suurendamise marginaaltulu muutust ning üheks võimaluseks on klastrite arvuna K kasutada käänupunkti väärtust.

Teine võimalus gruppide arvu K analüüsiks on silueti keskmise laiuse SC (*Silhouette Coefficient*) kasutamine [6][7]. Klatri silueti laius S_j väljendub valemiga 2.3, milles s_i on objekti i silueti väärtus, b_i on minimaalne keskmine kaugus objektist i teiste klastrite objektideni ja a_i on objekti i kaugus sama klatri teistest objektidest. Kaugusena on käesoleval juhtumil kasutusel Eukleidilise kauguse ruut, valem 2.1.

Klatri silueti laius S_j on:

Joonis 2.7. Silueti keskmise laiuse sõltuvus klastrite arvust.

Klastrite arvu vahemiku 5...15 analüüsil selgub, et rahuldava struktuuriga (silueti keskmine laius 0.51 või suurem) grupeerimist saaks teostada 5, 6 ja 10...14 klastrite korral. Lähtudes tulemustest valiti sobilikuks gruppide arvuks 10, mis võrreldes 5 klastriga pakub poole väiksemat Eukleidiliste kauguste ruutude summat. Samas on eeldatav struktuur sama tugev kui 14 klastrite korral.

Joonis 2.8. Silueti keskmise laiuse sõltuvus klastrite arvust ($K=5...15$).

Kui grupeerida valimisse kuuluvad koormussõlmed kümnesse gruppi, siis on võimalik saada valimisse kuulunud koormussõlmedele joonisel 3.11 kujutatud siluettide väärtused (valem 2.4). Objekti silueti väärtus on alati vahemikus -1...1. Silueti kõrge väärtus näitab objekti tugevat sidet määratud grupiga ning nõrka sidet teiste gruppidega.

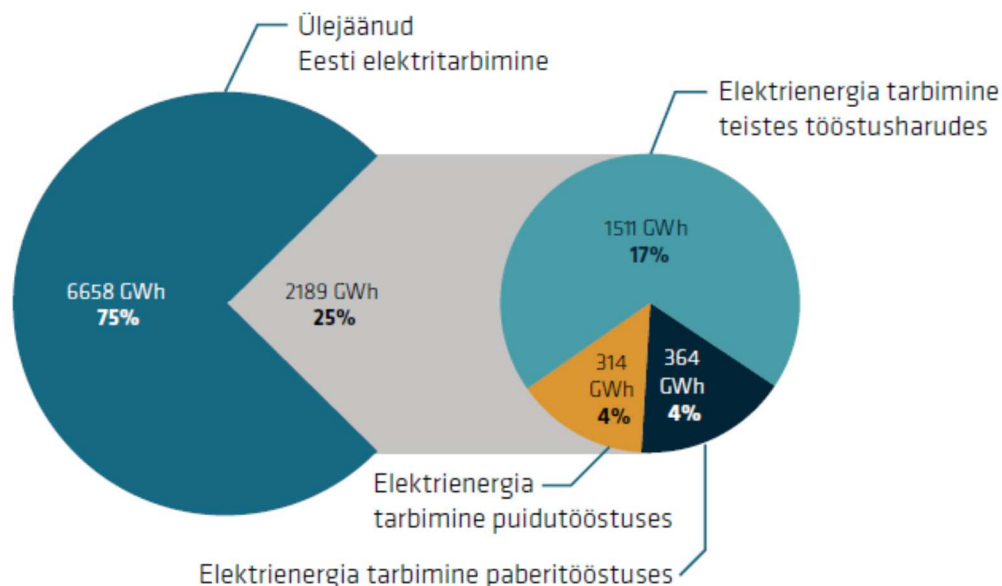
Saadud tulemusi võib pidada rahuldavaks, kõigi siluettide väärtused on positiivsed ning mitmetel koormussõlmedel on suhteliselt kõrged väärtused.

2.3 Koormusklasside koosseisu kuuluvate koormuskomponentide osakaalud

Elektrilevi AS edastatud 110 kV ülekandevõrgu koormussõlmede tarbimisandmetes (kirjeldatud põhjalikumalt aruandes [2]) jaotati tarbijad viide koormusklassi:

Järgnevalt käsitletakse tüüpiliste tarbimisseadmete (koormuskomponentide) osakaale kodutarbijate, teenindus ning avalike tarbijate energiatarbimises.

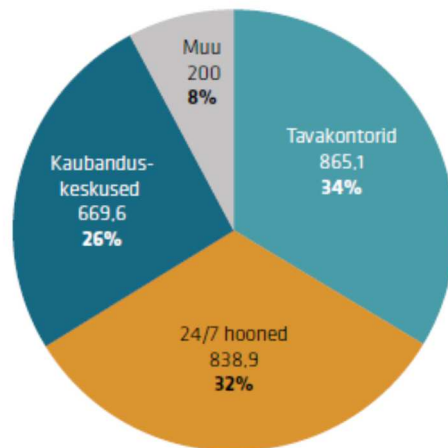
Koormusklasside osakaalud Elektrilevi AS jaotusvõrgu koormussõlmedes lähtuvalt Elektrilevi edastatud andmetest vastavad joonisel 2.3 kujutatule. Kui võrrelda joonist 2.3 trükises [9] esitatud joonisega 2.10, siis ilmneb, et allikas [9] on tööstuskoormuse osakaal suurem. Elektrilevi AS andmetes oli tööstuskoormuse osakaal 9%, alliks [9] 25%. Erinevuse üheks põhjuseks võib-olla, et Elektrilevi AS koormus esindab ainult ühte osa võrgu koormusest ning teiste klientide hulgas on tööstuskoormuse osakaal kõrgem.



Joonis 2.10. Tööstuse energiatarbe jagunemine [9].

2.3.1 Teenindus ja avalik koormus

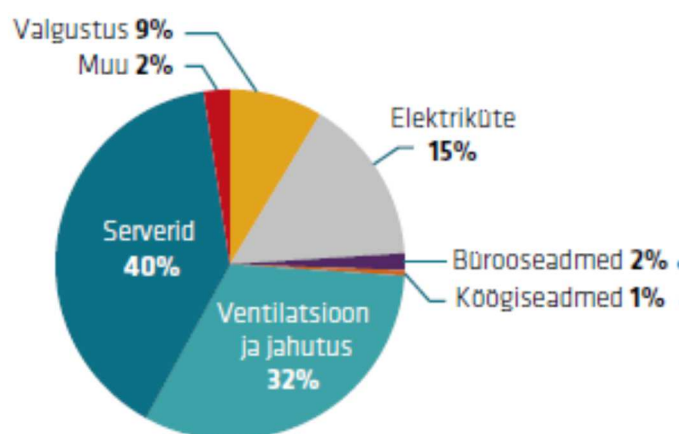
Teenindus- ja avalik koormus koosneb aruande [9] põhjal peamiselt (92% ulatuses) kaubanduskeskuste, 24/7 hoonete ja tavakontorite energiatarbest. Järgnevalt käsitletakse nende kolme alamgrupi koormuskoosseise.



Joonis 2.11. Tarbimise jagunemine äri- ja avaliku teeninduse sektorite osade vahel aastal 2012 [9].

Kontorihooned

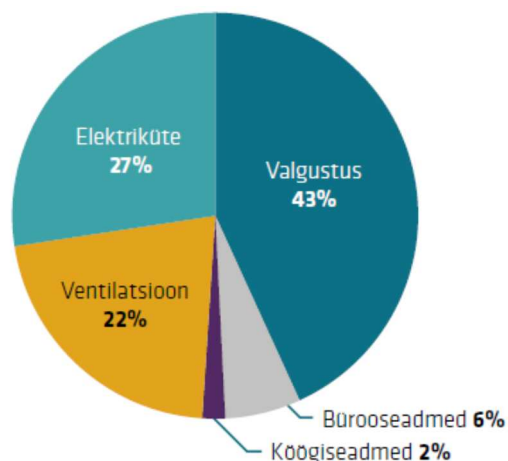
Kontorihoonete koormusjaotus vastas aruandes [9] analüüsitud juhtumitel joonisel 2.12 kujutatud jaotusele.



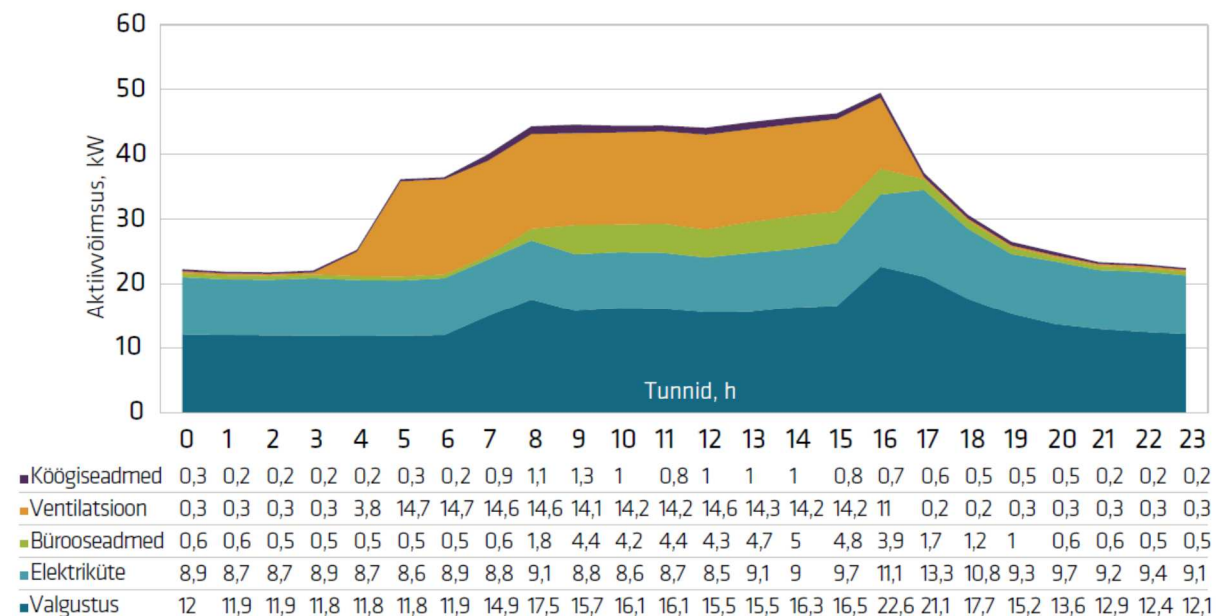
Joonis 2.12. Analüüsitud kontorihoonete koormusjaotus koormusliigiti [9].

Kontorihooned (tavakontorid)

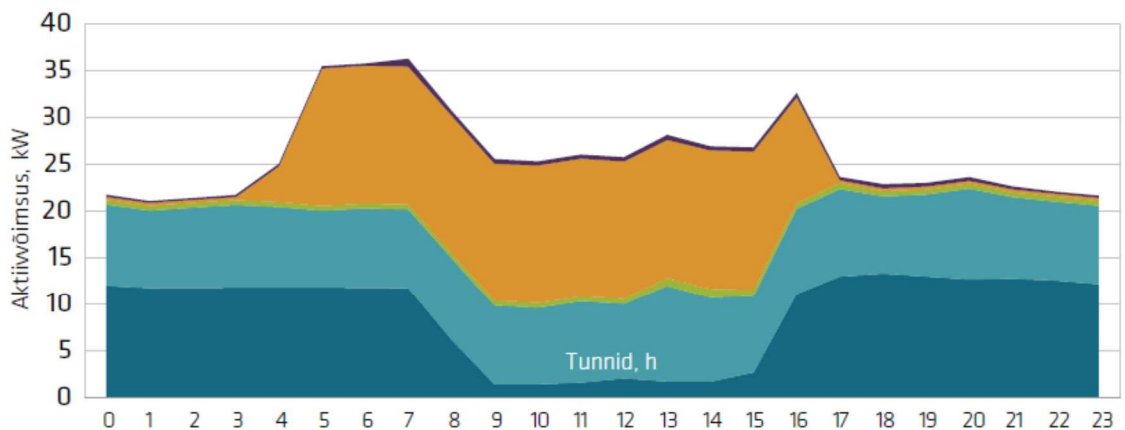
Tavakontori energiatarve vastas aruandes [9] joonisel 2.13 esitatud jaotusele ning lähtuvalt joonistest 2.14 ja 2.15 seisneb päevase ja öise tarbimise põhierinevus ventilatsiooniseadmete energiatarbes. Samuti on võimalik märgata vähest valgustuskoormust nädalavahetustel päevasel ajal.



Joonis 2.13. 8/5 tüüpi kontorihoone koormusjaotus liigiti [9].



Joonis 2.14. 8/5 tüüpi kontorihoone tööpäeva koormusjaotus liikide kaupa ööpäeva jooksul [9].

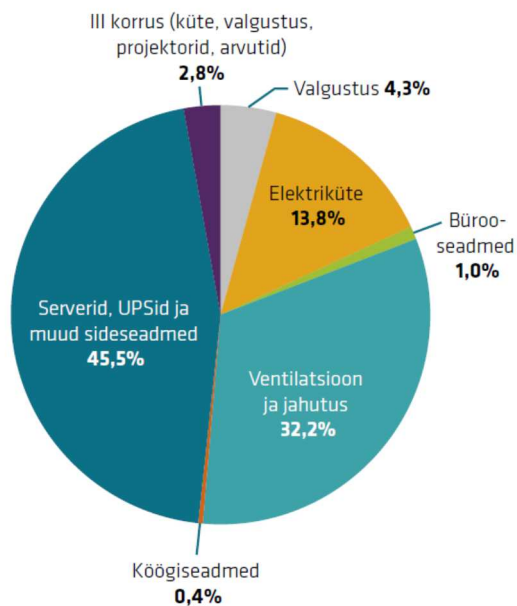


■ Kõõgiseadmed	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
■ Ventilatsioon	0,3	0,3	0,3	0,3	3,8	14,6	14,7	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,6	14,7	14,8	14,8	11,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
■ Bürooseadmed	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,9	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
■ Elektriküte	8,6	8,2	8,5	8,8	8,6	8,2	8,5	8,4	8,7	8,4	8,1	8,6	7,9	10,2	9,0	8,1	9,1	9,3	8,2	8,7	9,6	8,6	8,4	8,3	
■ Valgustus	12,0	11,7	11,7	11,8	11,8	11,8	11,7	11,7	6,2	1,4	1,4	1,6	2,0	1,7	1,7	2,7	11,1	13,0	13,3	13,0	12,6	12,7	12,5	12,1	

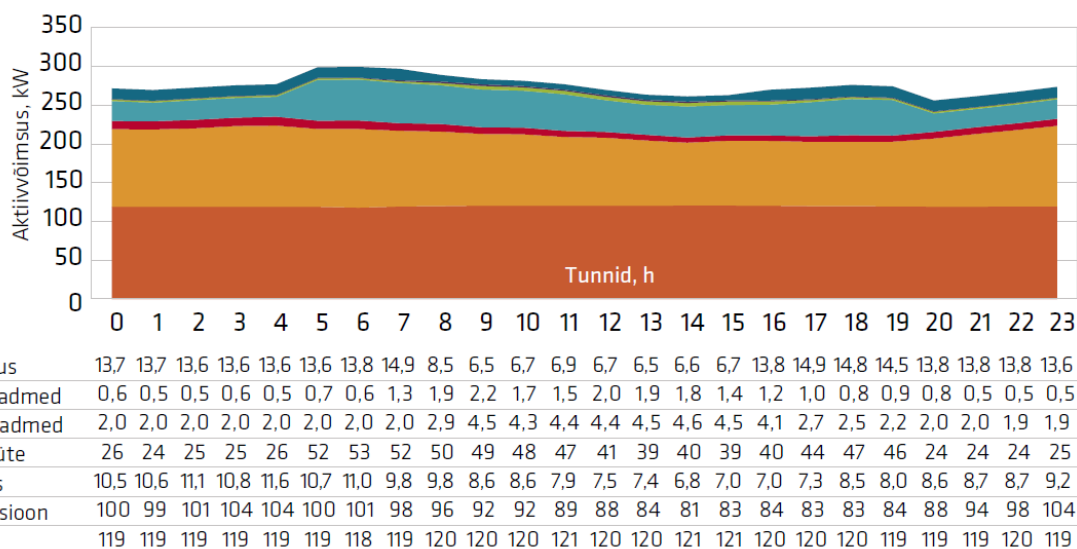
Joonis 2.15. 8/5 tüüpi kontorihoone puhkepäeva koormusjaotus liikide kaupa ööpäevas [9].

Kontorihooned (24/7 tüüpi kontorihoone)

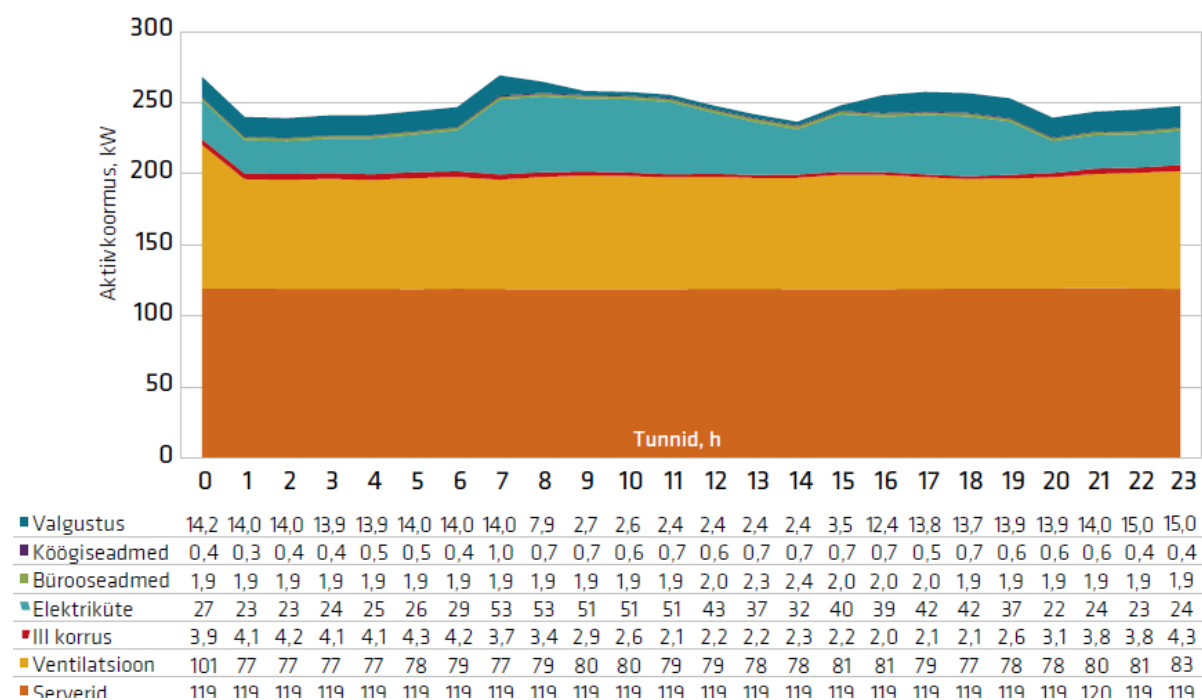
Joonistelt 2.17 ja 2.18 ilmneb, et 24/7 kontorihoonete puhul on ööpäevane koormuskoosseis suhteliselt püsiv, samuti ei erine tööpäeva ja puhkepäeva energiatarbimine olulisel määral.



Joonis 2.16. 24/7 tüüpi kontorihoone koormusjaotus liigiti [9].



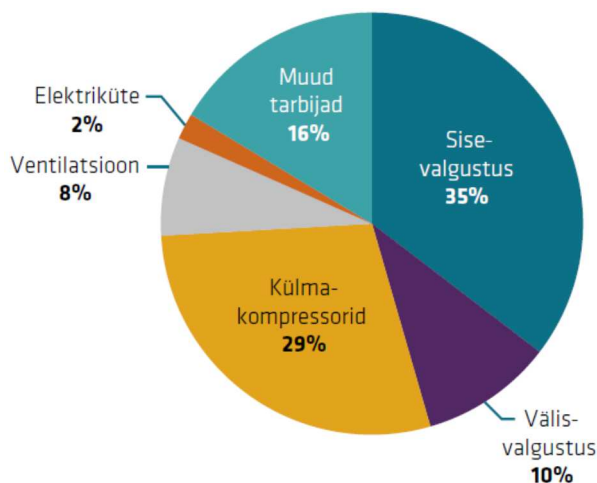
Joonis 2.17. 24/7 tüüpi kontorihoone tööpäeva koormusjaotus liikide kaupa ööpäevas [9].



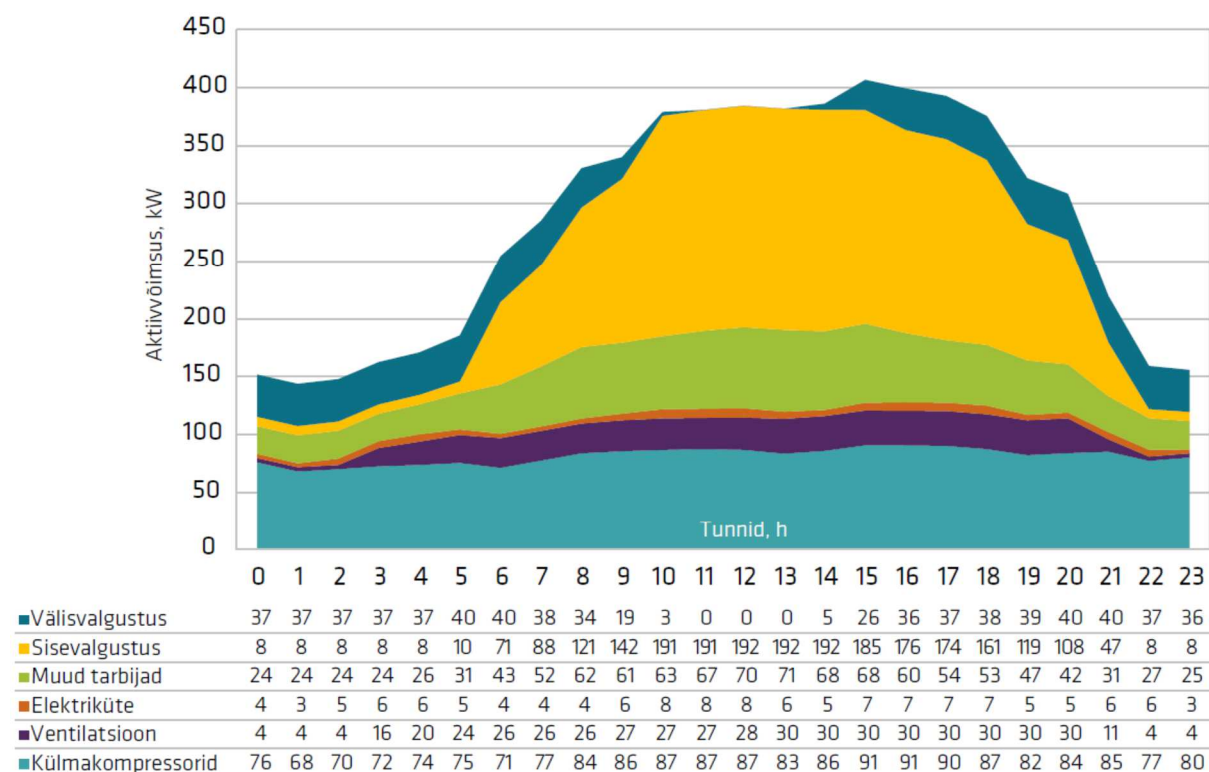
Joonis 2.18. 24/7 tüüpi kontorihoone puhkepäeva koormusjaotus liikide kaupa ööpäevas [9].

Kaubanduskeskused

Kaubanduskeskuste päevaste ja öiste koormuskoosseisude oluliseks erinevuseks on külmakompressorite, bürooseadmete ja välisvalgustuse koormuse ajasõltuvus.



Joonis 2.19. Kaubanduskeskuse koormusjaotus liigiti [9].



Joonis 2.20. Kaubanduskeskuse koormusjaotus liigiti ööpäevas [9].

2.3.2 Kodutarbijad

Kodutarbijate tarbimisseadmete grupeerimisel on üheks võimaluseks seadmete viieks jagamine lähtudes allikas [1] esitatud jaotusest.

"Märg koormus" – seadmeid iseloomustab konstantse mehaanilise koormusega mootori olemasolu. Seda tüüpi seadmeteks on näiteks nõudepesumasin, pesumasin ja kuivati.

"Külm koormus"- seadmeid iseloomustab mootori olemasolu ning mootori koormuse ruutsõltuvus kiiruse suhtes. Seda tüüpi seadmeteks on näiteks külmkapp, õhukonditsioneer, soojuspump, tolmuimeja ja õhupuhasti.

Info- ja kommunikatsioonitehnoloogia (ICT) ja elektroonika- seadmeid iseloomustab väike inerts ning mootori puudumine. Sellesse gruppi kuuluvad näiteks igat tüüpi arvutid, modemid, printerid, laadijad, televiisor, CD/DVD mängijad. Elektroonika üldjuhul modelleeritakse konstantse koormusena.

Lineaarne koormus käitub aktiivtakistusena. Sellese seadmegrupi kuuluvad näiteks pliidid, elektriahjud, keedukannud, kohvimasinad ning kütteseadmed (elektriküte, elektriboiler, põrandaküte, elektrikeris).

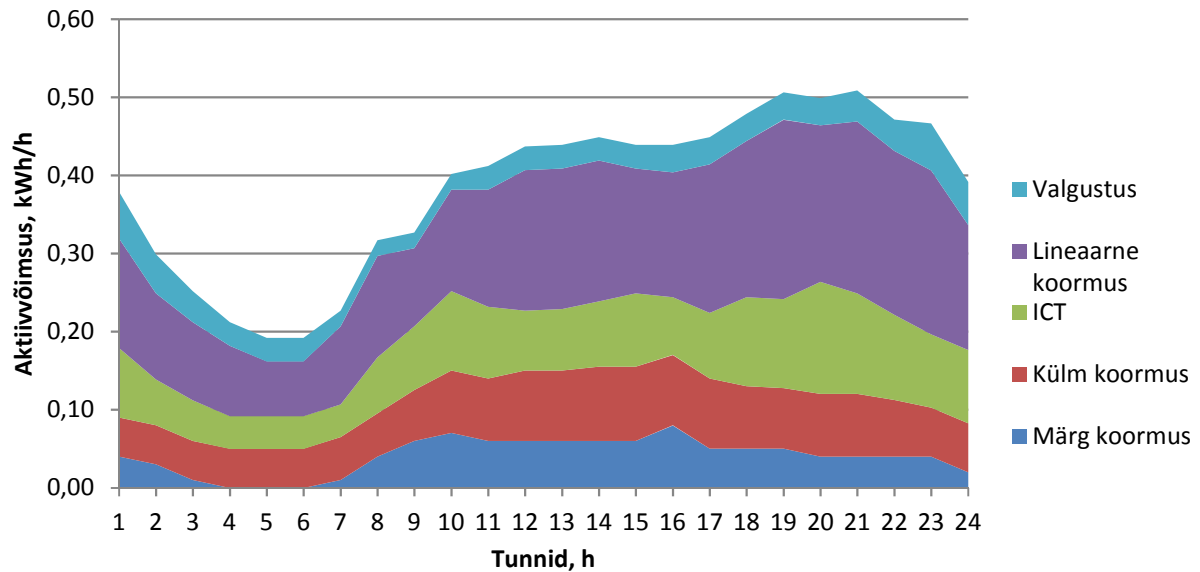
Valgustus. Komapktluminofoorvalgustid ja ja GIL tüüpi valgustus

Magistritöös [10] käsitletakse ühe teemana kodutarbimisseadmete osakaalude ajalist muutlikkust ning pakuti seadmegruppide osakaaludena välja tabelis 2.1 esitatud väärtused.

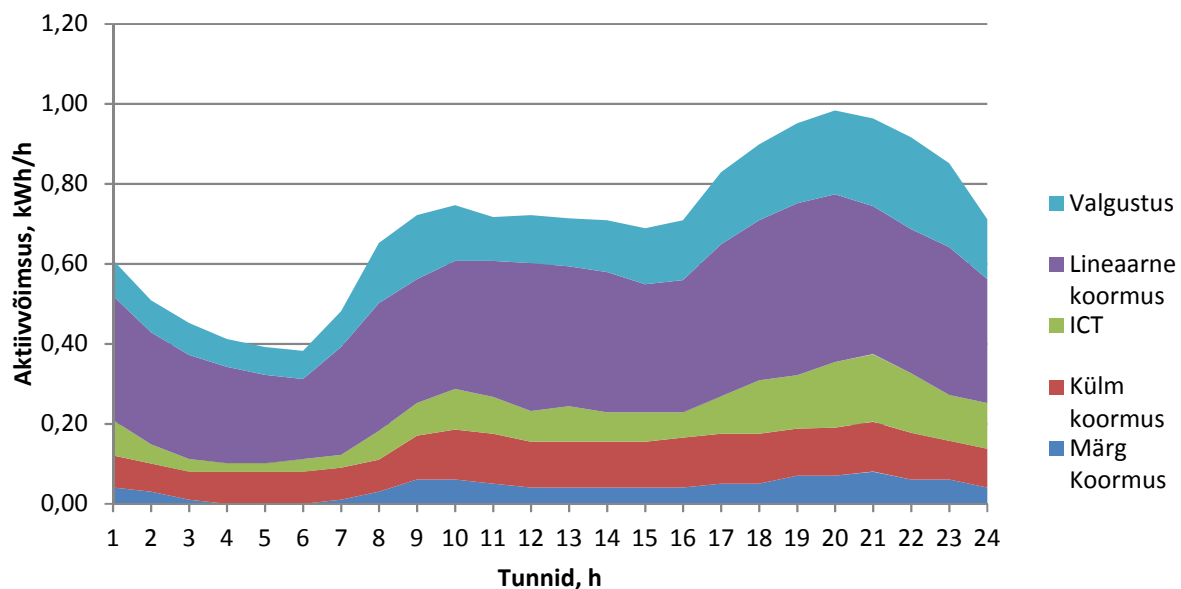
Tabel 2.1. Koormusseadmete gruppide osakaalud kodutarbija tarbimises [10].

Koormus- komponent	Talv, %			Suvi, %		
	Hommik	Õhtu	Päeva keskmine	Hommik	Õhtu	Päeva keskmine
Märg koormus	6,10	6,85	5,80	14,06	8,43	10,57
Külm koormus	15,77	12,75	14,89	20,12	15,51	18,52
ICT	11,45	15,56	12,39	21,28	23,98	21,80
Lineaarne koormus	47,95	42,38	46,83	37,9	43,05	39,97
Valgustus	18,72	22,46	20,09	6,64	9,03	9,15

Magistritöös pakutakse analüüsi tulemusena välja suvise ja talvise tüüppäeva seadmegruppide osakaalude ajalised muutused, mis on kujutatud joonistel 2.21 ja 2.22.



Joonis 2.21. Kodutarbija koormuskomponentide osakaalud talvepäeval [10].



Joonis 2.22. Kodutarbija koormuskomponentide osakaalud suvisel suvepäeval [10].

2.4 Koormuskooseisu muutuste mõju koormuskarakteristikutele

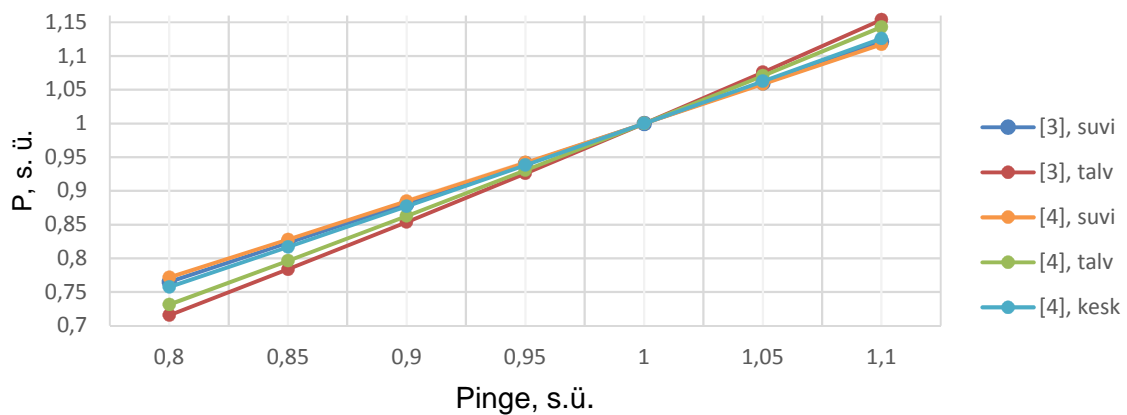
Sesoonsete muutuste mõju kodutarbijate koormuskarakteristikutele

Kodutarbijate suvise ja talvise karakteristiku erinevust on käsitletud allikates [3] ja [4], milles esitatud eksponentsiaalsed koormuskarakteristikud on kujutatud joonistel 2.23 ja 2.24 ning kasutatud pingetundlikkused on esitatud tabelis 2.2. Kahes allikas esitatud väärtuste võrdlemisel ilmneb, et suvel võiks kodutarbijate aktiivkoormuse pingetundlikkus olla väiksem kui talvel ning reaktiivvõimsuse pingetundlikkus on suurem kui aktiivkoormusel. Kahe

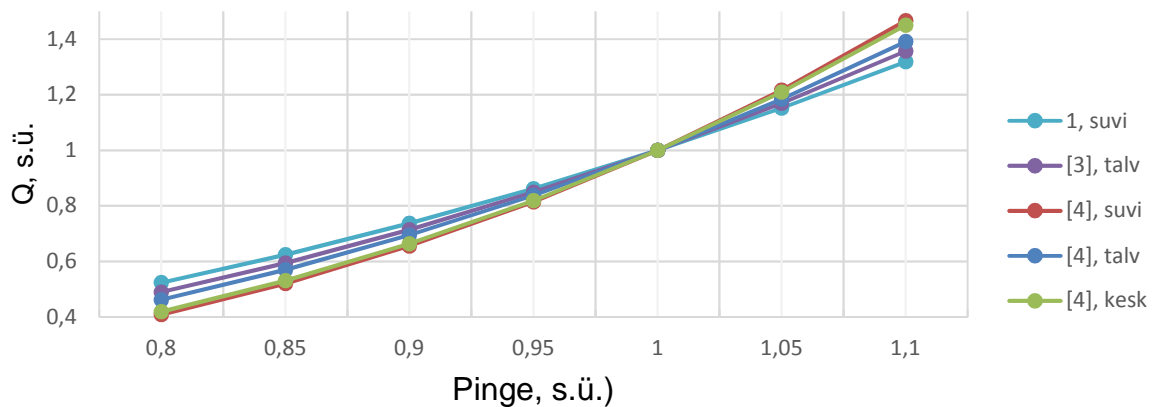
kirjandusallika reaktiivvõimsuse karakteristikute osas on märgatav erinevus: artikkel [4] hinnangul on talvine reaktiivvõimsuse pingetundlikkus väiksem kui suvel ja raamatus [3] on suvel väiksem reaktiivvõimsuse tundlikkus kui talvel.

Tabel 2.2. Kodutarbija eksponentmudeli pingetundlikkused

Joonistelt 2.23 ja 2.24 on võimalik märgata, et artiklis [4] mõõdetud keskmistatud koormuskarakteristikud ühtivad enim suviste karakteristikutega.



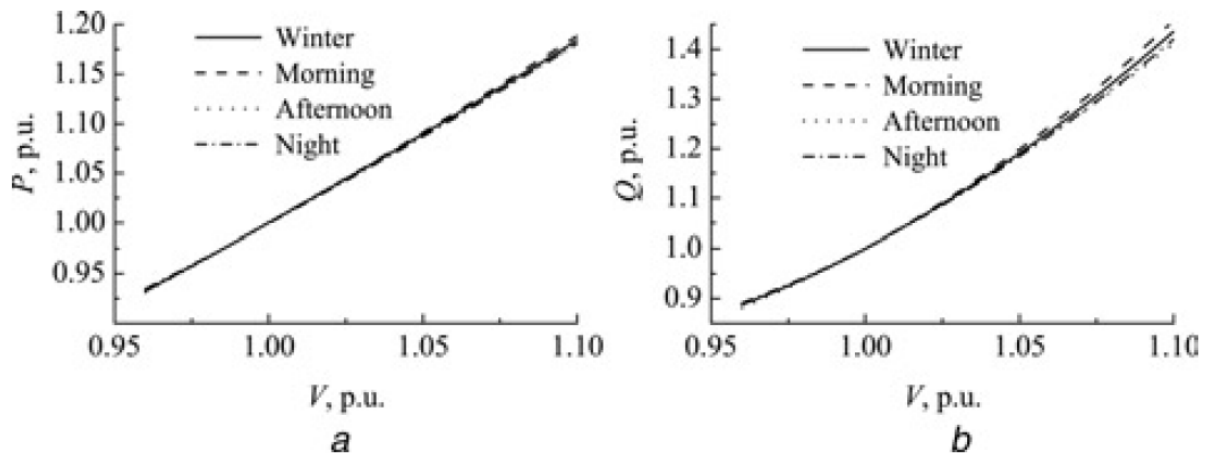
Joonis 2.23. Kodutarbija aktiivvõimsuse pingetundlikkus[3][4].



Joonis 2.24. Kodutarbija reaktiivvõimsuse pingetundlikkus [3][4].

Päevasiseste muutuste mõju koormuskarakteristikutele

Artiklis [4] võrreldi talve keskmistatud koormuskarakteristikut hommiku, pärastlõuna ja öö mõõtmiste põhjal keskmistatud koormuskarakteristikutega. Tulemus on esitatud joonisel 2.25. Joonise 2.25 põhjal ei ole päevasisesel mõõtetehetel olulist mõju aktiivvõimuse pingetundlikkuse mõõtmisele, reaktiivvõimsuse pingetundlikkuse hindamisel võib mõju tulemusele suurem olla.



Joonis 2.25. Aktiivvõimuse pingekarakteristiku (a) ja reaktiivvõimsuse pingekarakteristiku (b) sõltuvus päevasisesest mõõtetehetkest; talvel, hommikul, pärastlõunal ja öösel teostatud mõõtmiste põhjal tuletatud karakteristikud [4].

2.5 Kokkuvõte

Lähtuvalt koormusklasside koosseise kirjeldavatest mõõteandmetest on võimalik tuvastada, et süsteemi tasemel erineb suvine ja talvine koormusklasside koosseis kuni 5 protsendipunkti võrra (koormussõlme kaupa analüüsides oleks erinevused eeldatavasti suuremad).

Koormusklassi osakaalude põhjal alajaamade grupeerimisel tuvastati, et koormussõlmede jagamine 10 gruppi pakub huvitavat lahendit, mille seost koormuskarakteristikutega on kavas uurida projekti järgmises etapis.

Eelnevas peatükis esitatud teenindus ja avaliku koormuse koormuskomponentide koosseisu osas tugineti aruandele [9], kus nende koormusklasside koormuskomponentide koosseise on põhjalikult kirjeldatud. Kodutarbijate osas lähtuti 2017. aastal kaitstavast magistritööst, milles tuvastatud koormuskomponentide osakaalude osas on oluline arvestada, et koosseisud koostati lähtudes ebamäärasest informatsioonist ning seetõttu võib esitatud koosseisudes esineda olulisi ebatäpsusi. Peatükis ei käsitletud tööstus- ja põllumajanduskoormuse koosseisu, nende kahe koormusklassi osas jätkatakse tööd projekti järgmises etapis.

Koormuskarakteristikute ajalise mõju uurimisel tuvastati, et talvine ja suvine koormuskarakteristik võivad olulisel määral erineda, seetõttu võib osutuda otstarbekas nii suvise kui ka talvise koormuskarakteristiku määramine. Artiklis [4] esitatud tulemuste põhjal ei oma päevasisene mõõtehetk sedavõrd suurt mõju kui sesoonne tegur, seetõttu võib osutada võimalikuks päevasiseste muutuste mitteamestamine.

2.6 Kirjandus

- [1] Cigre Working Group C4.605. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, CIGRE, 2014, 190 pp.
- [2] Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud, Projekti I etapi aruanne, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.
- [3] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York : McGraw-Hill, Inc., 1176 pp.
- [4] Korunovic, L., Stojanovic, D., Milanovic, J. Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 2, No 2, March 2008, pp 227 - 234.
- [5] Lloyd, S. P. Least Squares Quantization in PCM. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 28, 1982, pp. 129–137.
- [6] Grigoraş, G., Scarlatache, F., Cârţină, G. Load estimation for distribution systems using clustering techniques. 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2012. Brasov, 2012, pp. 301-306.
- [7] Rousseeuw, P. J. Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation Cluster Analysis. Journal of Computational Applied Mathematics, vol. 20, pp. 53 – 65, 1987.
- [8] Kaufman L., Rouseeuw, P. J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [9] Rosin, A., Drovtar, I., Link, S., Hõimoja, H., Mölder, H., Möller, T. Tarbimise juhtimine: suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks. Eleringi toimetised nr 3/2014 (8). Elering, 2014, 57 lk.

[10] Karin, E. Kodutarbijate t uikoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD. Magistrit o. TTÜ elektroenergeetika instituut, Ilmumas.

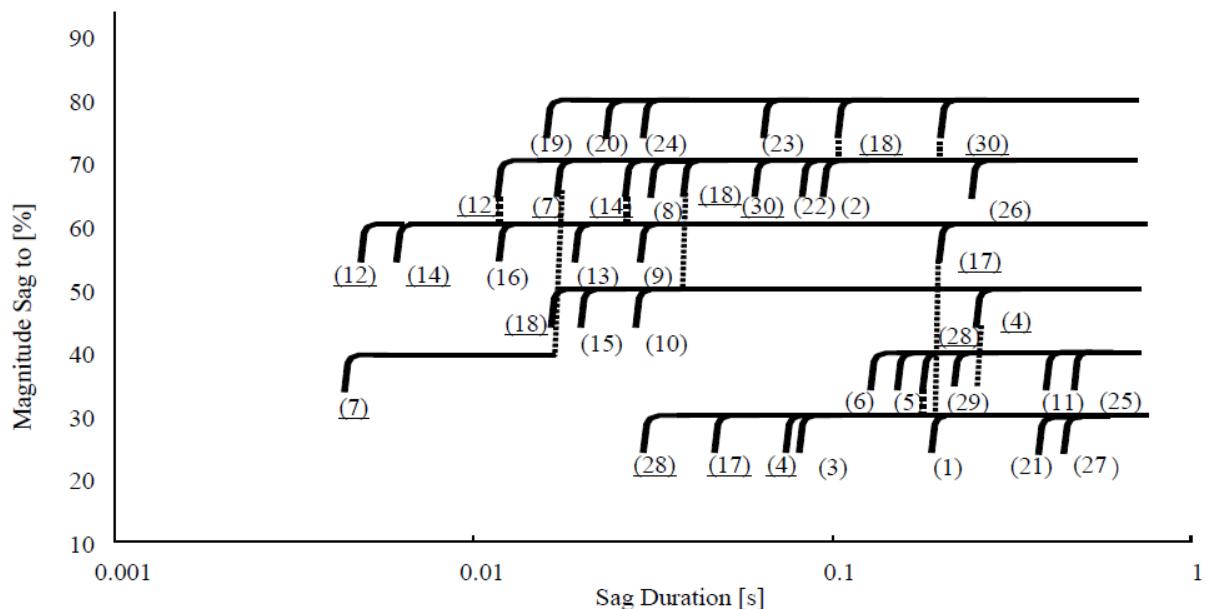
3. Tarbimisseadmete koormuskarakteristikute uurimine PSCAD mudelite abil

Käesolev alapeatükk käsitleb tarbimisseadmete (koormuskomponentide) modellemist tarkvaras PSCAD, peamiselt on vaatluse all pingekarakteristikute modelleerimine. Esmalt käsitletakse tarbimisseadmete pingekarakteristikute modelleerimise seisukohalt olulist iseeneslikku väljalülitumist, seejärel kirjeldatakse kodutarbijate tüüpseadmete omadusi ning antakse ülevaade PSCAD tarkvara asünkroonmootori mudelist.

3.1 Tarbimisseadmete koormuskarakteristikud

3.1.1 Tarbimisseadmete iseeneslik väljalülitumine

Tüüpkoormusseadmete karakteristikute koostamisel on oluline arvestada tarbimisseadmete iseeneslikku väljalülitumist liiga madalate ja liiga kõrgete pingete korral. Väljalülitamised põhjustavad järske astmelisi muutusi koormusstruktuuris. Sellised muutused põhjustavad eeldatavasti ebapidevusi pingekarakteristikus. Ühtlasi mõjutavad välja lülitumised ka võrgus tehtavate mõõtmiste tulemusi, mistõttu mõõtetulemuste analüüsimisel on oluline arvestada tarbimisseadmete iseenesliku väljalülitumisega. Üks artiklis [2] kirjeldatud seadmete väljalülitumise katsetuste tulemus on esitatud joonisel 3.1 ja seadmete loetelu tabelis 3.1.



Joonis 3.1. Erinevate seadmete väljalülitumise sõltuvus pingelohu kestvusest ja jääkpingest [2].

Joonis 3.1 põhjal lülituvad esimesed seadmed välja, kui pinge langeb alla 80% nimipingest ja allpool 30% nimipinget lülituvad välja kõik seadmed, mis on võimelised ennast võrgust lahutama. Oluline on siinkohal silmas pidada, et osad seadmed jätkavad talitlust ka peale võrgupinge alanemist alla 30%. [3]

Tabel 3.1. Katsetatud koormusseadmete loetelu [2].

Koormuse tüüp	Seade ja kirjeldus
(1) Personaalarvuti	DELL: OPTIPLEX GX60 115/230 2/1A
(2) Personaalarvuti	HITACHI: HF-W6500
(3) Ethernet jagur	BUFFALO: LSW2-GT-16NSRR 100V 16.5W
(4) LCD televiisor	TOSHIBA: 37Z7000 100V 239W valmistatud 2009
(5) LCD televiisor	SHARP: LC-20D30 100V 72W valmistatud 2008
(6) DVD mängija	SONY: RDR-VH95 100V 38W valmistatud 2006
(7) Tööstuskontroller	OMRON: SYSMAC CJ1M CPU11 (SCU21-V1, OC211, PA202) 100-240V
(8) Elektromagnetiline lüliti	PANASONIC: BMF6-100 AC100V, 3-faasiline
(9) Elektromagnetiline lüliti	Teadmata: 220-240VAC, 3-faasiline 220V-150A
(10) Elektromagnetiline lüliti	Teadmata: 100-240VAC, 3-faasiline 220V-32A
(11) Digitaalrelee	TOSHIBA: Earth-fault Overvoltage Relay NVG21S-01A51 valmistatud 2009
(12) Minirelee / signaalrelee	OMRON: MY4ZN-CR AC100/110V
(13) Minirelee / signaalrelee	OMRON: MY2N-Y AC200/220V
(14) Minirelee / signaalrelee	OMRON: MM2XP AC110V
(15) Minirelee / signaalrelee	OMRON: MY4 AC100/110V
(16) Taimer	OMRON: H3CR-A8 AC100-240V
(17) Luminofoorlamp	TOSHIBA: FSH91353R 100V 110W
(18) Kõrgrõhu-elavhõbelamp	IWASAKI Electric: HF100X 100V 100W
(19) Kõrgrõhu-lahenduslamp	IWASAKI Electric: HRF200X 100V 360W
(20) Kõrgrõhu-lahenduslamp	IWASAKI Electric: MT1500B-D/BH 242V 1500W
(21) Kõrgrõhu-lahenduslamp	TOSHIBA: 200V MF400EB-J2/BU-P 400W
(22) Õhukonditsioneer (muunduriga)	TOSHIBA: RAS-402PADR 200V 900W (jahutus), 950W (küte),
(23) Õhukonditsioneer (muundurita)	HITACHI: RAC-22HSFW 100V 870W (jahutus), 860W (küte), valmistatud 1997
(24) Tööstuslik õhukonditsioneer	DAIKIN: RYP140AA, 3-faasiline, 200V 5kW, valmistatud 2009
(25) Külmkapp (muundurita)	SHARP: SJ-17J-H 165L 100V 140W, valmistatud
(26) Külmkapp (muunduriga)	SHARP: SJ-W42DE-H 415L 100V 119W,
(27) Külmkapp (muundurita)	HITACHI: R-37V7 370L 100V 150W, valmistatud
(28) Induktiivpliit	TOSHIBA: BHP-M46DR, ühefaasiline 200V 5000W
(29) Induktiivpliit	TAKES GROUP: PLM-29700, 100V, 1300W, valmistatud 2006
(30) Elektriboiler	Teadmata: ühefaasiline 200V, 0.915kW, valmistatud

Eraldi on artiklis [2] toodud välja, et inverteriga õhukonditsioneerid ja külmkapid lülituvad välja suhteliselt kõrgetel pingetel. Riskid, mis kaasnevad suure hulga mootorite pidurdumisega, on suured voolud keskpinge ja kõrgepinge võrkudes, mis võivad aktiveerida võrgus distantsreleed ja voolureleed elektrijaamades, mis võivad viia osalise või täieliku võrgu pimenemiseni. Võimalike vastumeetmetena nähakse ette kiirete mahtuvuslike reservide lisamist võrku või koormuse välja lülitamist. Nagu eelnevalt välja toodud, siis õhukonditsioneeride kompressorite mootorid võivad küllaltki kiirelt seiskuda, seega kirjeldatud probleem on aktuaalne [3]. Eriti arvestades suurenevat läbi inverteri ühendatud mootorite osakaalu.

3.1.2 Kodutarbijate tarbimisseadmed

Kodutarbijate tüüpkoormusseadmete gruppide pingekarakteristikute kirjeldamiseks pakutakse magistritöös [3] välja järgnevad parameetrite väärtused. Põhjalikum ülevaade esitatud karakteristikutest antakse projekti järgmises etapis. Nimetatud seadmegruppe kirjeldati pt 2.3.2.

Tabel 3.2. Kodutarbijate tarbimisseadmete klasside mudelid [3]

EkspONENTmudeli rakendamiseks tarkvaras PSCAD on võimalik kasutada eksponentsiaalset koormusmudelit (*Fixed Load*). Selle mudeli kasutamisel on oluline silmas pidada, et koormusmudeli arvutusliku pinge erinemisel koormusmudeli nimipingest üle 20% asendatakse koormuse eksponentmudel konstantse takistusega mudeliga [4]. Polünoommudeli koostamiseks on võimalik ühendada kolm eksponentsiaalset koormusmudelit paralleeli ning määrata nende pingetundlikkuseks 0, 1 ja 2 ehk kasutada esimest püsivõimsusega koormusena, teist püsivooluga ja kolmandat püsitakistusega koormusena.

Kodutarbijate tarbimisseadmete mudelite agregeerimiseks on võimalik kasutada pt 3.2 kirjeldatud komposiitmudelit, mida käsitletakse magistritöös [3].

3.1.3 Otseühendatud asünkroonmootorid

Asünkroonmootori puhul on staator ühendatud allika (süsteemi) külge. Staatori mähise vool tekitab pöörleva magnetvälja, mis jaguneb staatori puistereaktantsi X_s , magneetimisreaktantsi X_μ ja rootori puistereaktantsi X_r vahel. Lühisrootori korral on vardad lühistatud, mis põhjustab suure voolu rootori varrastes. See omakorda tekitab rootoris magnetvälja, mis avaldab vastastikmõju staatori pöörlevale magnetväljale tekitades elektrilise pöördinerti. Asünkroonmootori peamiseks erinevuseks võrreldes sünkroonmootoriga on asünkronism staatori pöördvälja ja indutseeritud ankruvälja vahel. Välja kiiruste erinevuse kirjeldamiseks kasutatakse libistuse mõistet. Libistus on nominaalkiiruse (sõltuvalt pooluspaaride arvust tekitatav staatori pöörlev magnetväli) ja ankruvälja kiiruse erinevuse suhe [6]. [5]

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.1)$$

Asünkroonmootori aseskeem ja staatiline võimsuskarakteristik (joonis 3.2) kirjeldavad asünkroonmootori talitlust süsteemiparameetrite muutumisel. Aseskeemi alusel on võimalik välja kirjutada asünkroonmootori staatilised põhivõrrandid, mille abil on võimalik kirjeldada asünkroonmootori talitlust ja parameetreid talitluse ajal [7]. [5]

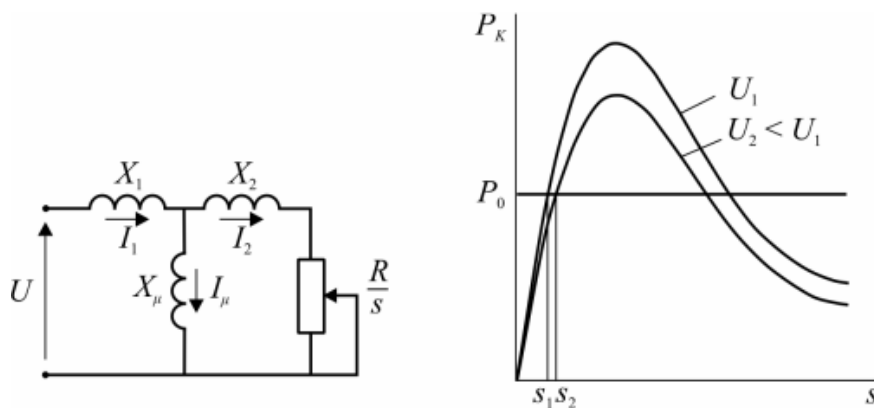
$$U = I_1 * R_1 + j\omega_1(I_1 * L_1 + I_\mu * L_\mu) \quad (3.2)$$

$$0 = I_r * \frac{R}{s} + j\omega_1(I_2 * L_2 + I_\mu * L_\mu) \quad (3.3)$$

$$I_\mu = I_1 + I_2 \quad (3.4)$$

Pingekarakteristikul on näha, et pinge alanedes langeb võimsuskõvera amplituud ja vastavalt sellele kasvab libistus s (punktist 1 nihkub punkti 2) ja suurenenud libistus põhjustab suurema aheldusvoo ja suurema voolu I_2 mis mõjutab mootori võimsuskarakteristikuid (joonis 3.2) [8]. [5]

Mootori reaktiivvõimsuse komponendid jagatakse kaheks: magneetimisahela induktiivsuse poolt põhjustatud Q_μ ja staatori ja rootori induktiivsuste põhjustatud Q_s . Reaktiivvõimsuse komponentide liitmisel saadakse summaarne pingesõltuvus, mis on minimaalne pinge $0,7U_n$ korral. Pinge edasisel langemisel suureneb oluliselt mootori reaktiivenergia tarbimine. Aktiivvõimsuse pingetundlikus on asünkroonmootori puhul väike ($\approx dPk/dU = 0$) [8]. [5]



Joonis 3.2. Asünkroonmootori aseskeem ja aktiivvõimsuse-libistuse pingekarakteristik [8].

Maksimaalvõimsuse P_m suhteline väärtus nimivõimsuse suhtes sõltub masina tüübist, kuid on enamik masinate korral ligikaudu 2. Maksimaalvõimsuse ja kriitilise libistuse valemitest (all olevad) on näha, et kui pinge langeb allapoole kriitilise väärtuse $0,7U_n$ on võimalik asünkroonmootori stabiilsuse kadumine [8]. [5]

$$s_{kr} = \frac{R}{X} \quad (3.5)$$

$$P_m = \frac{U^2}{2(X+X_v)} \quad (3.6)$$

Asünkroonkoormuse dünaamiliste karakteristikute kirjeldamiseks kasutatakse rootori liikumisvõrrandit, mille tuletamisel lähtutakse sünkroonmasina võrrandist, mis on saadud Newtoni seadusest. Rootori kiirendus tuleb avaldada sisestada koos libistusega, kuna nurk δ ei ole asünkroonmasinate korral konstantne ja sõltub libistusest s [8]. [5]

$$p\omega = p\omega_0 s \quad (3.7)$$

Sisestades seose generaatori liikumise diferentsiaalvõrrandisse, saame asünkroonmootori rootori liikumise diferentsiaalvõrrandi [8].

$$T_j p s = M - M_M \quad (3.8)$$

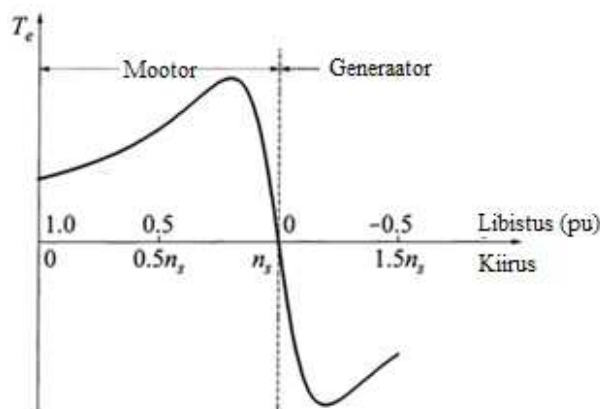
Kus

M_M – mootori mehaaniline moment

M – elektriline moment, mis avaldub valemiga $M = \frac{U^2 R s}{R^2 + (Xs)^2}$

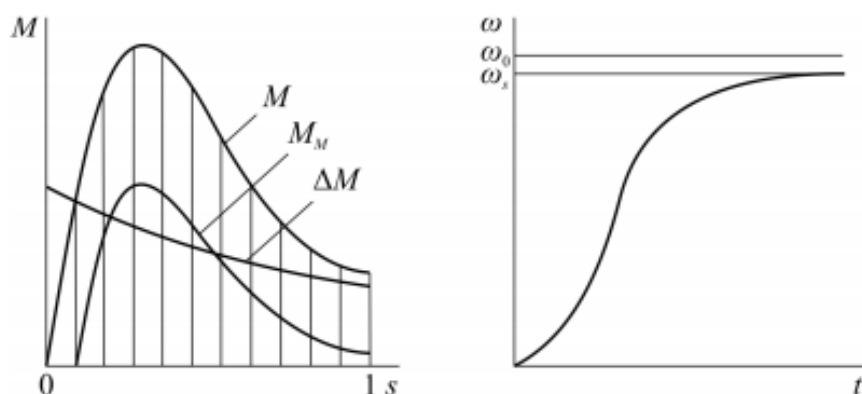
Võrrand 2.8 on 1. järku diferentsiaalvõrrand, mis tähendab, et puuduvad perioodilised lahendid, mis kinnitab, et asünkroonmootori rootor ei võngu häiringute korral. Intervalliliste lahendite abil on võimalik uurida asünkroonmootori talitlust isekäivitumise protsessi ajal, mis

on peamiseks stabiilsuse probleemiks asünkroonmootorite korral. Jaotades libistuse intervallideks $s_1 = 1 - \Delta s$, siis igale perioodile vastavad ajaintervallid Δt ja nurkkiirused tuletatuna intervallidest. Intervallide abil on võimalik leida elektrilised ja mehaanilised inertsid kogu käivitusprotsessi ajal ning nende erinevus $T_j ps$, mis põhjustab mootori kiirenduse. Olukorras, kus mehaaniline koormus jääb väiksemaks kui elektriline pöördemoment, toimub asünkroonmootori kiirenemine kuni sünkroonkiiruseni, kus mootori elektriline moment langeb 0 väärtuseni, kuna aheldusvoog, mis läbib rootori vardaid on 180 kraadise nurga all. Inertsil toimel võib mootor kiirendada ka üle sünkroonkiiruse ja sellisel juhul läheb mootor generaatoritallitlusele ja hakkab süsteemi andma võimsust (joonis 3.3) [9]. [5]



Joonis 3.3. Asünkroonmootori libistus-pöördemomendi sõltuvus [9].

Kui elektriline pöördemoment jääb väiksemaks kui mehaaniline pöördemoment, siis toimub mootori pidurdus ning pinge taastumisel hakkab mootor uuesti käivituma. Joonisel 3.4 on kirjeldatud taaskäivituse protsess kuni nimilibistuse saavutamiseni [8]. [5]



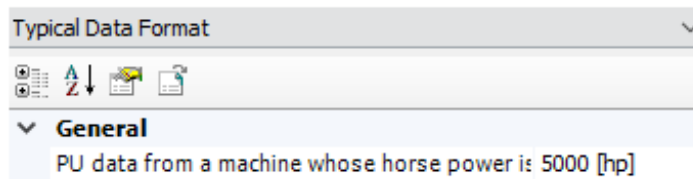
Joonis 3.4. Mootori isekäivitusprotsessi kirjeldav pöördemomendi ja nurkkiiruse sõltuvused [8].

Häiringu ajal pinge langedes mootorid aeglustuvad ja pinge taastudes suurenenud elektriline moment põhjustab mootorite isekäivituse (kiirenemise juhul, kui mootorid ei ole veel seiskunud). Kriitilisel pingel, kui mootor on peatunud, hakkab kehtima lühisekarakteristik, millega kaasneb edasine pinge langemine ja sellega kaasneb mõju süsteemi stabiilsusele [8]. [9]

Asünkroonmootori andmete sisestamine PSCAD mudelisse *Induction Machine*

PSCAD modelleerimisel on võimalik kasutada kolme erinevat andmete sisestamise viisi [5][9]:

- a. *Typical* - Mootorite parameetritest sisestatakse ainult nimivõimsus. PSCAD tarkvara sisestab teised parameetrid tüüpiliste asünkroonmootori parameetrite alusel. *Typical* parameetrite sisestamisel kasutatakse suuri lihtsustusi, ning tulemused iseloomustavad tüüpilise mootori käitumist häiringu ajal. Joonisel 3.5 on näha andmete sisestamise võimalus *typical* andmeformaadi korral. *Typical* parameetrite sisestamine sobib suuremate süsteemide analüüsimisel, kus ei ole oluline üksikute parameetrite analüüsimine vaid asünkroonmootori ligikaudne mõju kogu süsteemi talitlusele.



Joonis 3.5. *Typical*-parameetrite sisestamine PSCAD tarkvaras [5].

Typical parameetrite kasutamise korral on mootori talitus taandatud tüüpilisele mootorile, mis lihtsustab modelleerimist, kuid samas teeb mootori analüüsi keerulisemaks kuna üksikute parameetrite mõju ei ole võimalik hinnata [10].


- b. *Explicit* - Sisestatakse asünkroonmootori elektrilised ja mehaanilised parameetrid, mis saadakse mootori kataloogi parameetrite arvutuste ja mootori parameetrite katsetuste (tühijooksu, koormuskatsete) alusel. Elektriliste parameetrite abil on võimalik kirjeldada mootori käitumist ja väljund aktiiv-ja reaktiivvõimust häiringu ajal. Arvutatud parameetrid on kasutatavad mootori aseskeemil (joonis 3.2). Asünkroonmootori parameetrite sisestamisel kasutatakse pinnaefekti arvestamiseks kahe tasandilist rootorit (kõrgema sagedusega harmoonikute korral jaotub rootoris tekkiv vool pinnaefekti mõju tõttu ebahühtlaselt). Parameetrite sisestamise näide on toodud joonisel 3.6 [10].

Explicit Data Format	
▼ General	
Mutual Saturation	Disabled
Leakage Saturation	Disabled
Stator Resistance	0.066 [pu]
First Cage Resistance	0.298 [pu]
Second Cage Resistance	0.018 [pu]
Stator Unsaturated Leakage Reactance	0.046 [pu]
Unsaturated Magnetizing Reactance	3.86 [pu]
Rotor Unsaturated Mutual Reactance	0.122 [pu]
Second Cage Unsaturated Reactance	0.105 [pu]
Polar Moment of Inertia (J=2H)	0.5 [s]
Mechanical Damping	0.008 [pu]

Joonis 3.6. *Explicit* parameetrite sisestamine PSCAD tarkvaras [5].

Kasutatava mudeli korral kasutatakse lihtsustust ning kasutatakse ühe astmelist rootorit ja vastavaid takistusi kuna mootori summaarne väljund aktiiv- ja reaktiivvõimus, mis on generaatori talitluse peamiseks mõjuteguriks, ei muutu oluliselt lihtsustuse tagajärjel. *Explicit* parameetrite abil on võimalik hinnata elektriliste parameetrite mõju mootori talitlusele ja väljund aktiiv- ja reaktiivvõimusele, mis on generaatori talitluse analüüsi peamiseks mõjuteguriks. Samas on parameetrite leidmisel vajalik teha lihtsustusi ning kuna parameetrite leidmiseks vajalikke sisendandmeid ei ole kõiki võimalik leida kataloogidest, on tarvis teha teisendusi ja arvutusi, mis muudab parameetrite leidmise keerulisemaks [10].

- c. *EMTP (type 40)* - *EMTP (Electromagnetic Transient Program)* abil kirjeldatakse mootori talitlust pöördemomendi tüüpgraafiku alusel. Mootori parameetrite sisestamisel kasutatakse mootori voolu-kiiruse ja pöördemomendi-kiiruse graafikuid. Mudelisse sisestatakse käivitus ja maksimaalne pöördemoment suhtarvudena, mis kirjeldavad tüüpgraafiku abil pöördemomendi erinevate mootori kiiruste korral. *EMTP* sobib mootori koormatuse hindamiseks, kuna kirjeldab tüüpgraafiku alusel mootori kiirendus ja käivitusprotsessi. Sobib hästi mootori koormatuse hindamiseks. Peamiseks eeliseks *Explicit* andmete sisestamise ees on parameetrite olemasolu enamikes kataloogides, kuid samas eeldab sellel viisil parameetrite sisestamine palju lihtsustusi ning nimiandmete sisestamisel on väljundtulemus oluliselt moonutatud kataloogi andmetest (põhjuseks on, et valitud mootorid ei ole oma talitluselt vastavuses klassikalistele pöördemomendi-libistuse sõltuvustele). *EMTP* andmete sisestamine PSCAD tarkvarasse on toodud joonisel 3.7 [10].

EMTP Type 40 format	
	
General	
Design Ratio	1.0 [pu]
Power factor at rated load	0.85 [pu]
Efficiency at rated load	0.985 [pu]
Slip at full load	0.015 [pu]
Starting current at full volts	5.0 [pu]
Starting Torque at full volt / Full load torque	1.5 [pu]
Maximum Torque / Full load torque	3.0 [pu]
Number of poles	4
Polar moment of Inertia (J)	10.0
Units of the inertia	kg*m ²
Mechanical Damping	0.008 [pu]

Joonis 3.7. EMTP Type 40 andmete sisestamine PSCAD tarkvaras [5].

Lisaks on probleemiks tüüpgraafiku andmete puudumine nimilibistusest suurema libistuse korral (ei sisalda mootori generaator talitlust, mis on suurte tööstus mootorite korral oluline tegur lühise esimestel ajahetkedel).

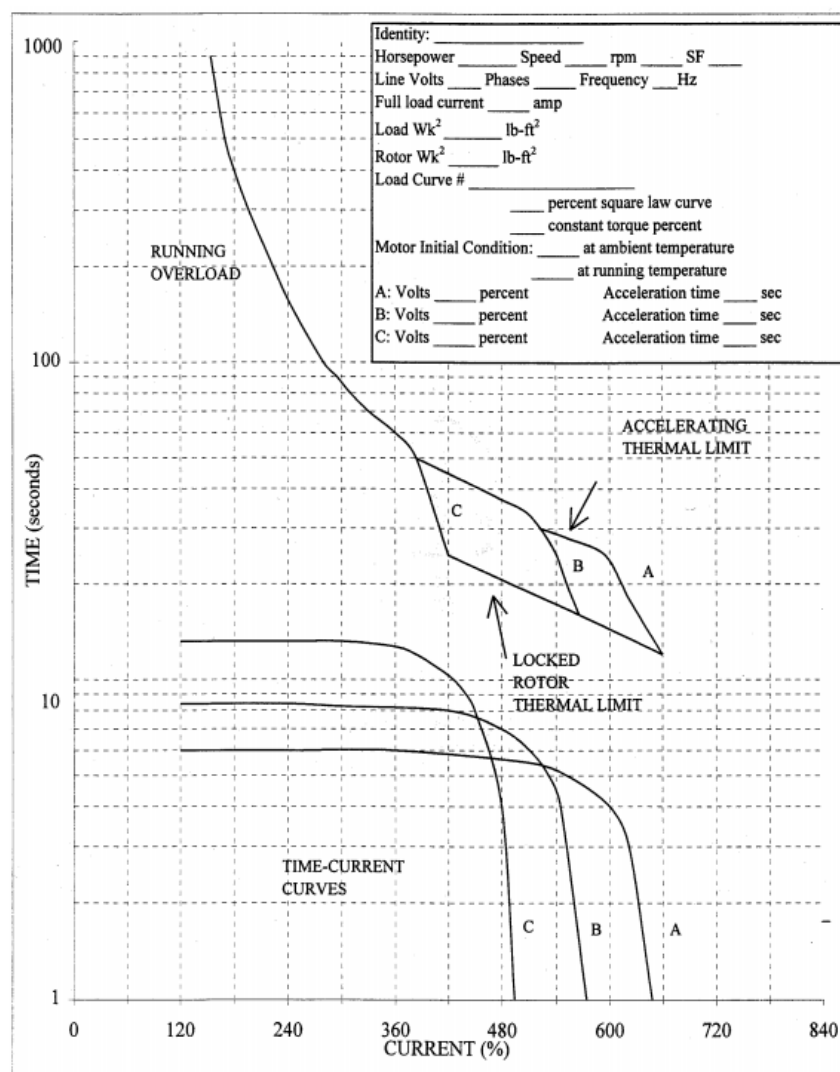
Kõikide parameetrite sisestamise viise arvestades on mootori pingelangu analüüsi modelleerimise korral kõige õigem kasutada *Explicit* parameetrite sisestamist, kuna antud meetodika kirjeldab kõige paremini võimusteguri ja väljundvõimuse muutumist siirdetalitluste korral. Parameetrite sisestamisel jaotuvad parameetrid kaheks [5]:

- a. Mootori mehaanilised parameetrid - Maksimaalne käivitusae, koormuse pöörde-moment, mootori summaarne inerts;
- b. Mootori elektrilised parameetrid - Rootori ja staatori takistused, mootori summaarne reaktants.

Mootori mehaanilised parameetrid

Mootori käitumise hindamise olulisemaks teguriks väikeste ja suurte häiringute korral on rootori ja koormuse inerts. Inerts kirjeldab pöörleva massi omadust säilitada oma liikumise kiirus. Mootori andmelehel on kirjeldatud rootori inertsikonstant ühikutes kgm². Koormuse inerts leidmiseks tuleb esmalt analüüsida modelleeritava mootori käivituspöördemomendi. Käivitusmomendi iseloomulikud suurused on lukustatud rootori pöördemoment, nimipöördemoment, *Pull-Up* ja *Pull-Down* pöördemomendid. Nende kataloogi suuruste abil on võimalik välja joonistada käivituskõver ja valida maksimaalne koormuse pöördemoment. Mootori pöördemomendi ja koormuse pöördemomendi summeerimisel saadakse summaarne pöördemoment, mille alusel on võimalik leida inertsikonstant koormatud mootori jaoks.

Mootori summaarse inertsikonstandi leidmiseks tuleb mootori (peamiselt rootori inerts J_m) inertsile lisada koormuse inerts (J_k). Ülekande mehhanismi korral tuleb mootori koormus viia samale baaskiirusele ja siis on võimalik inertsid algebraliselt kokku liita. Leitakse inertsikonstandid maksimaalse inertsiga (mootor maksimaalselt koormatud) ja minimaalse (tühijooksus rootori inerts) inertsiga korral. Maksimaalse võimaliku inertsiga tuvastamiseks on võimalik esmalt leida maksimaalne võimalik käivitusaja arvestades masina kuumenemist käivitusaja jooksul. Mähise kuumenemise hindamiseks saab kasutada IEEE 620-1996 [11] standardi kuumenemise graafikut (joonis 3.8), valides mootori tehniliste andmetel vastava isolatsiooni soojenemise klassi. [5]



Joonis 3.8. Lühisrootoriga asiinkroonmootori termilise käivitusaja standardgraafik [11].

Mootori ülevoolu kaitseks on võimalik kasutada PSCAD *sequence* funktsiooni (joonisel 3.9 on toodud funktsiooni plokk skeem). *Set-point* parameetrina vaadeldakse staatori voolu. Kui

staatori vool ületab 2,0 s.ü. (nimivoolu suhtes) pikemalt kui 10 sekundit, siis eraldatakse omatarbe mootor süsteemist. [5]

Joonis 3.9. Alapinge kaitse PSCAD tarkvaras [5].

Mootori käivituse inertsileidmiseks võetakse arvesse ka koormuse iseloomu. Omatarbe peamisteks koormuse tüüpideks on ventilaatorid, mis puhuvad purustatud kütust katlasse ja konveierid, mis toovad kütust ette ja samal ajal purustades. Koormuse iseloomulikud pöördemomendi tegurid on toodud tabelis 2.2 [13]. [5]

Tabel 3.3. Koormuse koefitsendi sõltuvus koormuse tüübist [13]

Koormuse pöördemomendi valimisel tuleb arvestada ligi 15 % varuteguriga mootori nimipöördemomendist, et vältida mootori talitlemist üle nimi parameetrite, mis vähendaks oluliselt mootori eluiga. Resulteeriva käivituspöördemomendi leitakse all olevast valemist [7][13]:

Modelleerimise käigus kasutatakse inertsikonstante tühijooksu ja maksimaalkoormuse vahemikus, et väljendada mootori tööd erinevate talitluste korral [14][15][8].

Mootori mehaaniline pöördemoment (mehaaniline koormus) on mootorile sisestatud ruutsõltuvusena kiirusest, sest pöörlevale koormusele on iseloomulik, et pöördemoment on ruutsõltuvuses kiirusest ja kuupsõltuvuses võimsusest (joonisel 3.10 on mehaanilise koormuse

model). Ruutsõltuvus pöördemomendi ja mootori kiiruse vahel iseloomustab kõige paremini suure inertsiga pöörlevaid koormuseid nagu ventilaatorid. [5]

Joonis 3.10. Mehaanilise pöördemomendi sõltuvus mootori kiirusest [5].

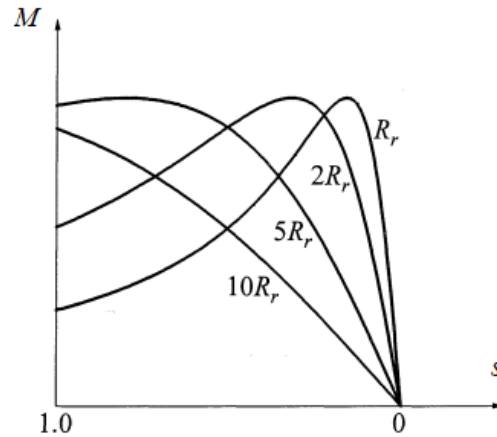
Suure inertsiga mootorite käivitamise lihtsustamiseks on võimalik kasutada mootori käivitamist tühijooksul. Lõputöös [5] lisati mootorile mehaaniline pöördemoment 10. sekundil. Pöördemoment oli maksimaalselt 0,85 s.ü. elektrilisest pöördemomendist, kuna suure inertsiga mootorite korral on oluline kasutada mehaanilise ja elektrilise pöördemomendi varu (15 %) [7]. See lihtsustas mootori käivitamist ja võimaldas transient analüüsis kasutada maksimaalse mehaanilise inertsiga mootoreid. Joonisel 3.11 on näha mootori käivitusaeg ning käivituse ja koormuse lisamisel tekkivad elektrilise pöördemomendi võnkumised.

Joonis 3.11. Mootori käivituse kiirus ja koormuse lisamine [5].

Mootori elektrilised parameetrid

Lisaks inertsikonstandile ja mehaanilisele koormusele on modelleerimise seisukohalt olulised elektrilised parameetrid. Elektrilistest parameetritest peamised on rootor- ja staatormähise

takistused ning mootori põhireaktants. Rootori takistus mõjutab otseselt käivituspööremomendi elemente. Suurem rootori takistus tähendab suuremat lukustatud rootori pöördemomenti kuid väiksemat nimipöördemomenti. Samuti sõltub mootori efektiivsus väga olulisel määral staatori ja rootori takistustest. Joonisel 3.12 on kirjeldatud rootori takistuse mõju mootori käivitusinerti kujule. [5]



Joonis 3.12. Mootori pöördemomendi sõltuvus rootori takistusest [9].

Nimiparameetrite teisendamiseks PSCAD tarkvara jaoks sobilikule ühiksuurustele saab kasutada järgnevaid valemeid. Rootoriahela aktiivtakistuse saab määrata mootori nimivõimsuse kaudu [7]. [5]

$$R_r = \frac{P_n * s_n}{3(1-s_n)I_n^2} \quad (3.11)$$

Staatori aktiivtakistuse määramiseks saab kasutada valemit [7].

$$R_s = \frac{P_n(1-\eta)}{3\eta I_n^2} - R_r \quad (3.12)$$

Mootori põhiinduktiivsuse leidmiseks kasutati lõputöös [5] mootori tühijooksu voolu I_0 . Tühijooksu vool on saadud mootori tühijooksu katse abil.

$$X_m = \frac{U_0}{I_0 * 2\pi f} \quad (3.13)$$

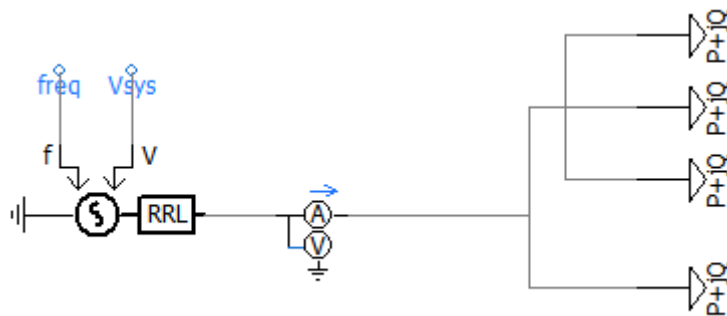
PSCAD tarkvarasse takistuste sisestamiseks teisendati kõik suurused baassuurustesse, kusjuures baasiks on nimipinge ja mootori nimivõimsus. Asünkroonmootori takistuse baassuuruseks on vastava mootori baasvõimsuse ja baaspinge abil leitud

$$R_b = \frac{U_r^2}{P} \quad (3.14)$$

3.2 Kodutarbijate tarbimisseadmete mudelite agregeerimine

Lihtsaimaks agregeerimise võimaluseks on erinevate tüüpseadmete mudelite kombineerimine ning komposiitmudeli koostamine, milles igale tüüpseadmele vastaks üks komponent või üks komponentide grupp. Samuti on võimalik sarnase karakteristikuga tüüpseadmete karakteristikute osade summeerimine, näiteks ZIP mudeli puhul Z, I ja P komponentide kaupa summeerimine.

Pt. 3.1.2 esitatud kodutarbijate tüüptarbimisseadmete koormuskarakteristikute agregeerimiseks on kõige lihtsam kasutada komposiitmudelit, mida on kujutatud joonisel 3.13 paremal. Ülemised kolm PSCAD eksponentsiaalset koormusmudelit (*Fixed Load*) esindavad polünoommudelit, iga üksik element on erineva pingetundlikkusega, vastavalt 0, 1 ja 2. Need väärtused vastavad ZIP mudeli komponentidele, püsivõimssega, püsivooluga ja püsitakistusega koormusele. Neljas element vastab eksponentmudelile, mille puhul on summeeritud üksikud eksponentmudelid numbriliselt ning eksponentjoonega lähendades on tuvastatud summaarne karakteristik.



Joonis 3.13. Lihtsustatud komposiitmudel [3].

3.3 Kokkuvõte

Eelnenud peatükis käsitleti otsetoitega asünkroonmootori modelleerimist PSCAD tarkvaras ning kodutarbijate koormuskomponentide koormuskarakteristikuid. Samuti kirjeldati seadmete pingest sõltuvat iseeneslikku väljalülitumist, mis mõjutab nii koormuskarakteristikute määramist kui ka määratavate karakteristikute kasutatavust. Järgnevalt on tarvis uurida avaliku, teenindus, põllumajandus ning tööstussektori tüüpiliste tarbimisseadmete karakteristikuid. Kirjaldatud otsetoitele lisaks on asünkroonmootoreid võimalik võrguga ühendada kasutades sagedusmuundurit. Sagedusmuunduriga asünkroonootori modelleerimist ning erinevust otsetoitega mootorist käsitletakse järgneva etapi aruandes.

3.4 Kirjandus

- [1] Cigre Working Group C4.605. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, CIGRE, 2014, 190 pp.
- [2] Yamashita, K., Kobayashi, H., Kitauchi, Y. Identification of Individual Load Self-disconnection Following a Voltage Sag. Proc. Asia Oceania Regional Council of CIGRE Technical Meeting, Oct. 2011, OP-8.
- [3] Karin, E. Kodutarbijate tüükoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD. Magistritöö. TTÜ elektroenergeetika instituut, Ilmumas.
- [4] Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud, Projekti I etapi aruanne, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.
- [5] Aunapuu, V. Koormuse mõju sünkroongeneraatori talitlusele. Magistritöö: Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2016, 109 lk.
- [6] Wildi, T. Electric machines, drives, and power systems. New Jersey: Pearson Education International, 2006, 934 pp.
- [7] Lehtla, T. Elektriagamid. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007, 201 lk.
- [8] Kilter, J., Meldorf, M. Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.
- [9] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc., 1176 pp.
- [10] Manitoba Research Centre. Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. Manitoba Research Centre, 2005.
- [11] IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines, IEEE Std 620-1996.
- [12] ABB. (2016). High voltage induction motors Technical catalog for IEC motors. https://library.e.abb.com/public/0cc54967fa9045078b6a9dd9b7fc7510/HV_Induction_9AKK103508%20EN%2006-2015.pdf (04.03.2016)
- [13] Electrical Engineering Portal. Calculation of motor starting time as first approximation. <http://electrical-engineering-portal.com/calculation-of-motor-starting-time-as-first-approximation> (22.03.2016)

- [14] Physicsforums. Moment of inertia calculation for induction motors. <https://www.physicsforums.com/threads/moment-of-inertia-vs-inertia-constant.758338/> (02.03.2016)
- [15] WEG. (2015). WEG Specification of Electric Motors. <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-specification-of-electric-motors-50039409-manual-english.pdf> (04.03.2016)

4. Koormuse matemaatilise mudeli täiustamine ja rakendusvõimaluste uurimine

4.1 Koormustüüpide ilmastikutundlikkus

Koormus sõltub ennekõike välisõhu temperatuurist, päikese radiatsioonist, tuule kiirusest ja õhu niiskusest. On arusaadav, et erinevate koormustüüpide ilmastikusõltuvus on erinev. Arvata võib, et näiteks kodutarbijate koormuse temperatuurisõltuvus on märgatav, tööstustarbijatel seevastu mitte. Kui teada on sõlmekoormuste koosseis koormustüüpide kaupa, võib ilmastikusõltuvust ka täpsemalt uurida.

4.1.1 Koormuse temperatuuritundlikkus

Vaatleme esmalt koormuse temperatuuritundlikkust. Koormuse temperatuurisõltuvuse võib esitada kujul

$$\Gamma(t) = P_0 R(t) \gamma(t) \quad (4.1)$$

Siin P_0 on keskmine koormus, $R(t)$ – koormuse temperatuuritundlikkus ning $\gamma(t)$ – normeeritud temperatuurisõltuvuskomponent. Erinevate koormuste võrdlemise võimaldamiseks, on temperatuuritundlikkus siin suhtelistes ühikutes – keskmise koormuse P_0 suhtes. Kui vaadelda erinevate koormuste temperatuuritundlikkust mingi ajavahemiku (nt teatud kuu) keskmisena, võib temperatuuritundlikkuse esitada vektorina $\mathbf{R} = \|R_i\|$, kus $i = 1 \dots n$ on koormuse indeks.

Koormustüüpide osakaalud koormustele moodustavad maatriksi $\mathbf{H} = \|H_{ij}\|$, kus $i = 1 \dots n$ on koormuse ja $j = 1 \dots m$ on koormustüübi indeks. Tähistades $\mathbf{r} = \|r_j\|$ kui koormustüüpidele vastavat temperatuuritundlikkuse tegurite vektorit, võib kirjutada

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}\mathbf{r} \quad (4.2)$$

Ülesandeks on temperatuuritundlikkuse tegurite, vektori \mathbf{r} , estimateerimine. Rakendades vähemruutude meetodit, tuleb minimeerida sihifunktsiooni

$$\mathbf{J}(\hat{\mathbf{r}}) = [\mathbf{R} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{r}}]^T [\mathbf{R} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{r}}] = \min \quad (4.3)$$

kus $\hat{\mathbf{r}}$ on vektori \mathbf{r} estimaat. Siit

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \hat{\mathbf{r}}} = 2\mathbf{H}^T [\mathbf{R} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{r}}] = 0 \quad (4.4)$$

mis annab estimaadi $\hat{\mathbf{r}}$ leidmiseks lineaarse võrrandsüsteemi

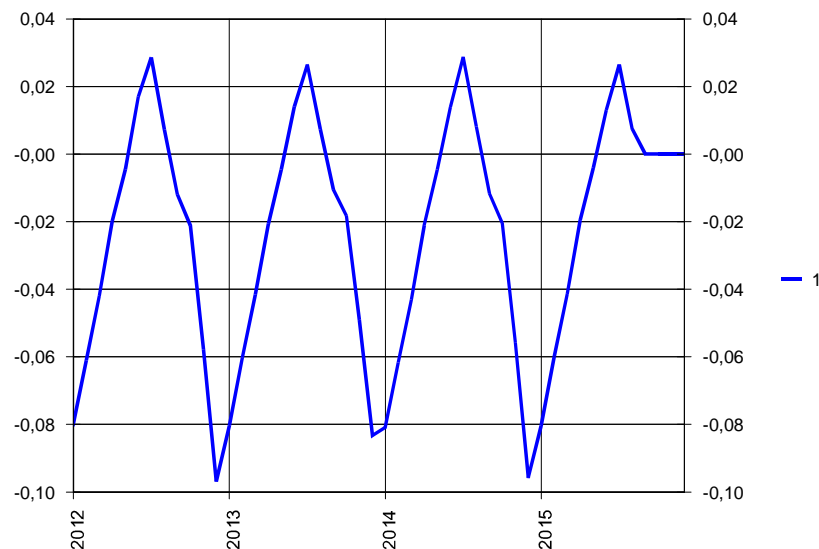
$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{r}} = \mathbf{H}^T \mathbf{R} \quad (4.5)$$

Temperatuuritundlikkuse tegurid kehtivad kõigi arvutustes osalenud koormuste kohta vaadeldavas ajavahemikus. Muidugi võib koormusi rühmitada näiteks elektrivõrgu regioonide kaupa (põhi-lõuna, ida-lääs vms) ning tulemusi võrrelda.

Ilmastiku lisafaktorite (päikese radiatsioon, tuule kiirus ja õhu niiskus) mõju uurimisel, kus temperatuuritundlikkusele vastav suurus matemaatilises mudelis puudub, võib aluseks võtta maksimumilähedase väärtuse taandatuna keskmisele koormusele või pigem transformeeritud väärtuse ($^{\circ}\text{C}$). Muus osas on arutluste käik analoogiline.

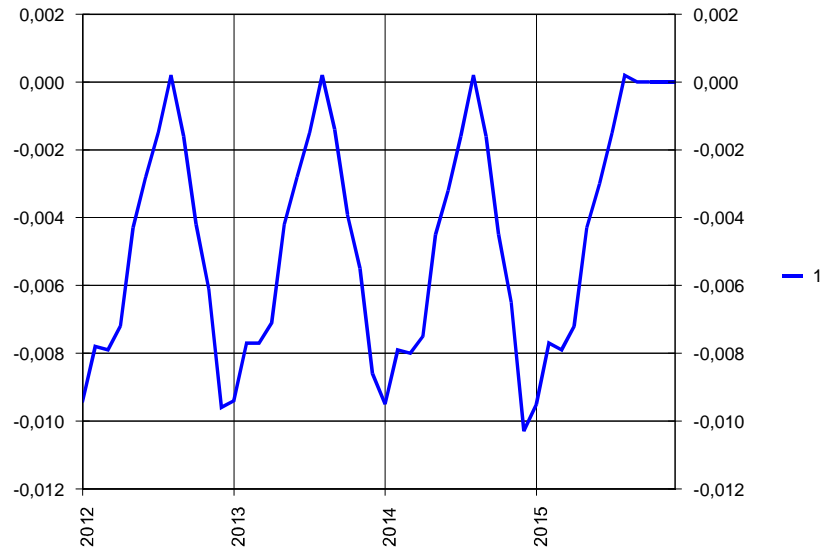
4.1.2 Koormusandmed

Momendil on kasutada kahe sõlmekoormuse, Jüri ja Abja, tunniandmed ning tarbitud energia väärtused koormustüüpide kaupa ajavahemikus 2012...2015. Koormuste matemaatilise mudeli estimeerimisel saadud temperatuuritundlikkus on joonistel 4.1 ja 4.2 ning suhtelised (%) tarbitud energia väärtused joonistel 4.3 ja 4.4.

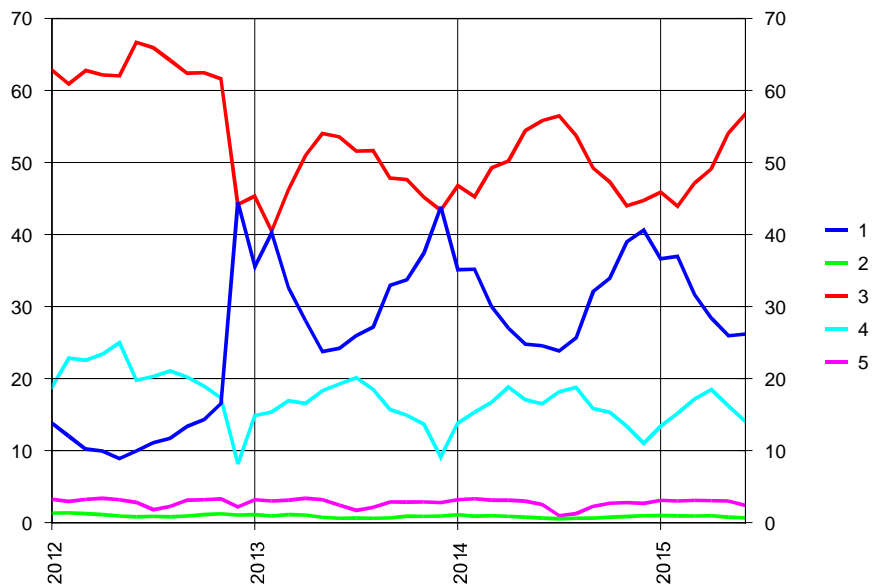


Joonis 4.1. Jüri koormuse temperatuuritundlikkus MW/ $^{\circ}\text{C}$.

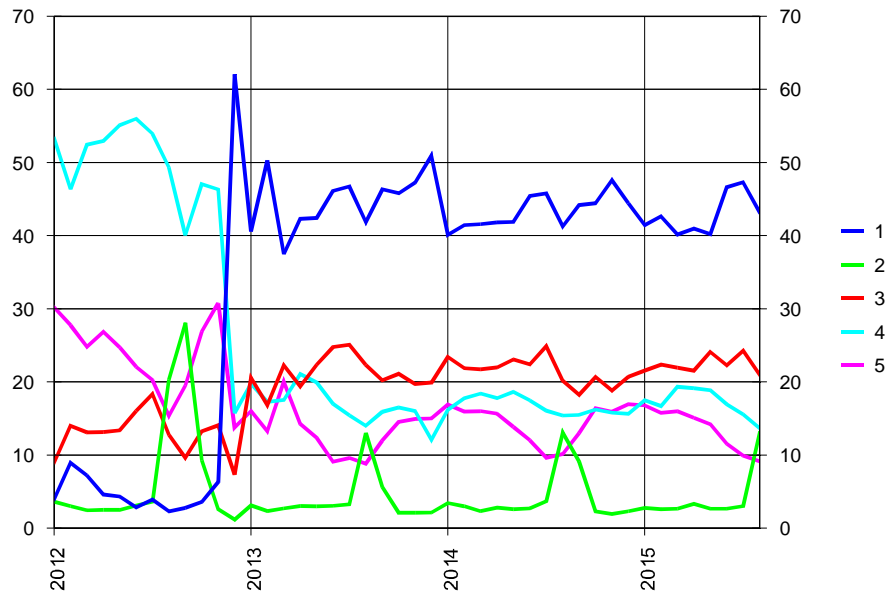
Võib tähele panna, et aasta 2015 teise poole andmed puuduvad. Koormustüüpide osas erinevad aasta 2012 andmed olulised muudest andmetest, mistõttu on need edasisesest käsitlusest välja jäetud.



Joonis 4.2. Abja koormuse temperatuuritundlikkus MW/°C.



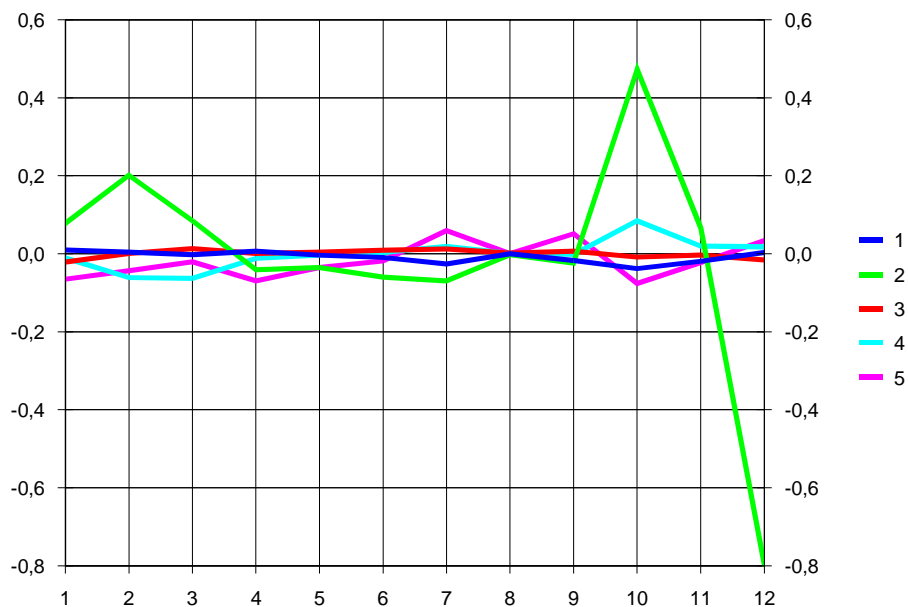
Joonis 4.3. Jüri koormustüübid %: 1 – kodutarbija, 2 – põllumajandus 3 – teenindus, 4 – tööstus, 5 – avalik.



Joonis 4.4. Abja koormustüübid %: 1 – kodutarbija, 2 – põllumajandus, 3 – teenindus, 4 – tööstus, 5 – avalik.

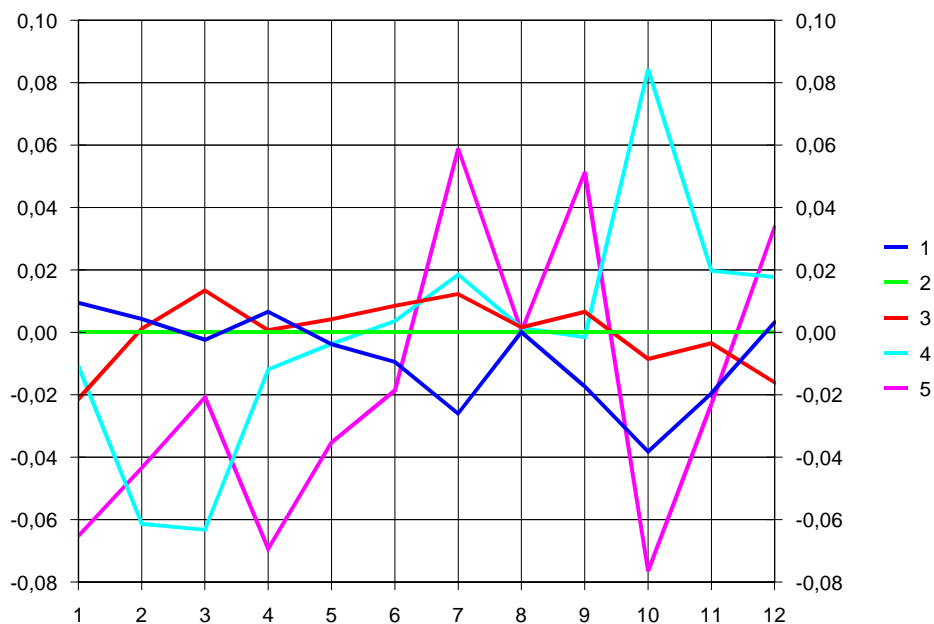
4.1.3 Temperatuuritundlikkuse tegurid

Kui ülaltoodud algoritmi järgi leida temperatuuritundlikkuse tegurid (vektor \mathbf{r}), on tulemus joonise 4.5 kohane.



Joonis 4.5. Temperatuuritundlikkuse tegurid: 1 – kodutarbija, 2 – põllumajandus, 3 – teenindus, 4 – tööstus, 5 – avalik.

Kuna siin põllumajandusele vastavad tegurite vahelduvus on suur, mis raskendab muude koormustüüpide jälgimist, on joonisel 4.6 põllumajandusele vastavad tegurid nullitud.



Joonis 4.6. Temperatuuritundlikkuse tegurid: 1 – kodutarbija, 2 – põllumajandus (nullitud), 3 – teenindus, 4 – tööstus, 5 – avalik.

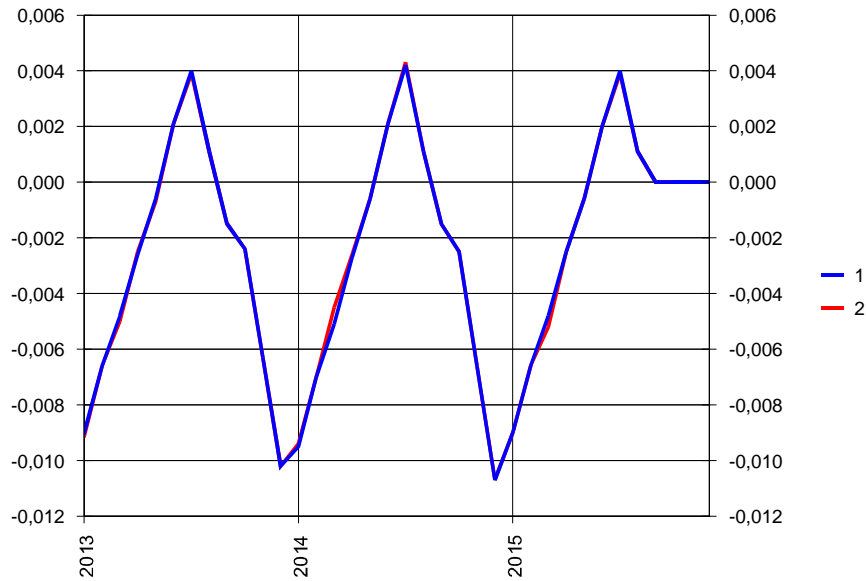
4.1.4 Järeldused

Eeltoodust äratavad kahtlust põllumajandusele vastavate temperatuuritundlikkuse tegurite suured väärtused. Tegemist võib olla vigadega algandmetes (koormustüübikohastes väärtustes). Algoritmi kontrolliks võib koormuse temperatuuritundlikkuse leida tegurite alusel. so

$$\mathbf{R} = \mathbf{Hr} \quad (4.6)$$

Tulemused on joonisel 4.7, kus lähteandmetes antud ning arvutatud temperatuuritundlikkuse väärtused Jüri koormusele langevad praktiliselt kokku. Samalaadsed on tulemused ka Abja koormusele.

Küsimusi on teisigi. Kuidas näiteks seletada temperatuuritundlikkuse tegurite suuri muutusi oktoobrikuus? Sellele ja teistele küsimustele saab leida vastused, kui usaldusväärseid koormusandmeid on rohkem.



Joonis 4.7. Jüri koormuse temperatuuritundlikkus MW/°C: 1 – lähteandmed, 2 – arvutatud.

4.2 Koormuse pingetundlikkus ja sagedustundlikkus

Koormuse pingetundlikkuse estimeerimisel on probleemiks see, et koormus sõltub küll pingest, aga kadude tõttu võrgus sõltub pinge omakorda koormusest. Seetõttu ei saa elementaarse statistika alusel koormuse pingetundlikkust tõepäraselt hinnata. Kuna sagedus ei sõltu üksikute sõlmede koormusest, siis sagedustundlikkuse leidmisel kirjeldatud probleemi pole. Raskuseks võib kujuneda aga see, et meie elektrisüsteemi sagedus on viimastel aastatel võrdlemisi püsiv. Seetõttu ei saa statistiliste andmete alusel usaldusväärset hinnata, milline võiks olla olukord suuremate sagedushälvete korral. Võiks muidugi teha aktiivseid katseid, muutes koormuse toitepinget näiteks reguleeritavate trafode abil, kuid ka siis jääks alles koormuse mõju pingele.

4.2.1 Koormuse hälve

Vaatame esmalt, kuidas avaldub pinge- ja sagedustundlikkus koormuse matemaatilises mudelis. Matemaatiline mudel kirjeldab koormust arvestades selle muutumist ajas (ööpäevane, nädalane ja sesoonne perioodilisus, trend, erandpäevad) sõltuvust ilmastikust (välisõhu temperatuur, päikese radiatsioon, tuule kiirus, õhu niiskus) ja talitusparameetritest (pinge, sagedus). Koormuse mudelit võib vaadelda koosnevana kolmest komponendist

$$P(t) = E(t) + \Gamma(t) + \Theta(t) \quad (4.7)$$

kus $E(t)$ – matemaatiline ootus

$\Gamma(t)$ – ilmastikusõltuvuskomponent

$\Theta(t)$ – stohhastiline komponent.

Koormuse pinge- ja sagedustundlikkust võib avaldada ruutsõltuvustena

$$U(u) = 1 + \mu_1 u + \mu_2 u^2, \text{ kus } u = U_V / U_N - 1 \quad (4.8)$$

$$F(f) = 1 + \nu_1 f + \nu_2 f^2, \text{ kus } f = F_V / F_N - 1 \quad (4.9)$$

Siin on $\mu_1, \mu_2, \nu_1, \nu_2$ tegurid ning U_V ja U_N ning F_V ja F_N vastavalt pingele ja sagedusele vaadeldavad ja nimiväärtused. Pinge- ja sagedustundlikkust vaadeldakse mudelis vaid seonduvalt matemaatilise ootusega

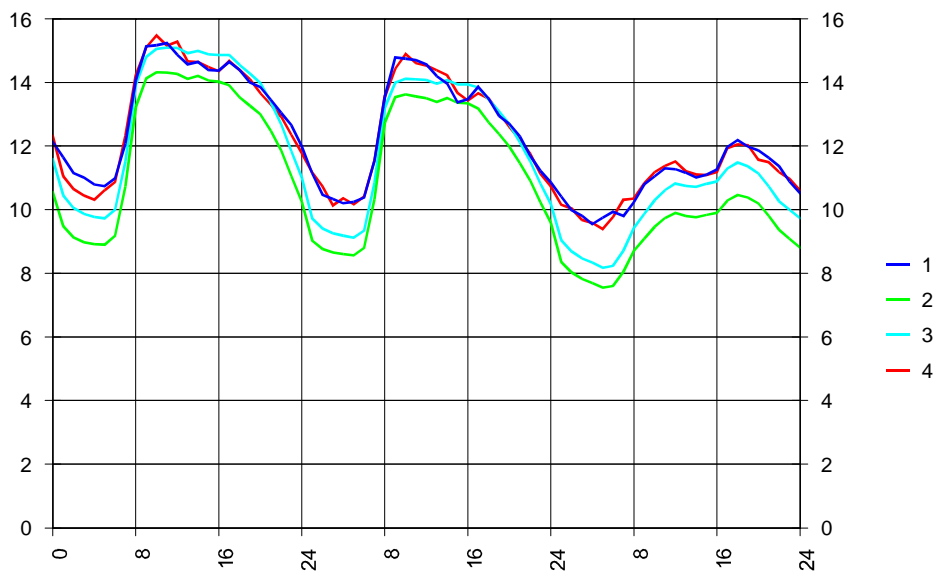
$$E(t) = U(u)F(f)E_0(t) \quad (4.10)$$

Kui koormusest elimineerida matemaatiline ootus ja ilmastikusõltuvuskomponent, jääb järgi stohhastiline komponent, mis omakorda koosneb reast teguritest

$$\Theta(t) = S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)] \quad (4.11)$$

Siin $S(t)$, $\zeta(t)$, $\xi(t)$ ja $\pi(t)$ on vastavalt koormuse ruuthälve, deviatsioon, jääkhälve ja piikhälve. Nendest $\zeta(t)$ väljendab viimaste päevade (kuni umbes 1 nädal) koormushälvete jooksvat mõju. See suurus on matemaatilise mudeli põhjal arvutatav ning pingesõltuvuse estimateerimisel huvi ei paku. Seega võib ka komponendi $S(t)\zeta(t)$ koormusest elimineerida. Piikhälve vastab koormuste suurtele kõrvalekalletele, mis sõlmekoormustes on suhteliselt sagedased. Koormuse sellised väärtused edasiseks analüüsiks ei sobi ning tuleb jätta kõrvale. Järgi jääb jääkhälve, nimiühikutes $S(t)\xi(t)$, mis väljendab koormuse "normaalset" juhuslikkust. Kui matemaatilise ootusest eemaldada eelnevalt pingele mõju, asendades tegurid μ_1 ja μ_2 nulliga, sisaldab jääkhälve ka pingele muutustest tingitud hälbeid ning võib olla aluseks koormuse pingetundlikkuse estimateerimisel.

Näitena on joonisel 4.8 Jüri alajaama koormuse näitajad kolmel talvepäeval. Ooteväärtuseks nimetatakse siin suurust $E(t) + \Gamma(t)$ ehk koormuse oodatavat väärtust arvestades temperatuuri mõju.



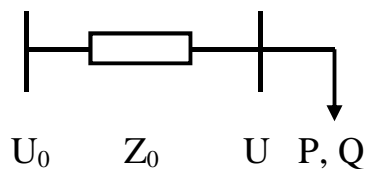
Joonis 4.8. Jüri alajaama koormusnäitajad kolmel talvapäeval: 1 – tegelik koormus, 2 – matemaatiline ootus, 3 – ooteväärtsus, 4 – lühiajaline prognoos.

4.2.2 Pingetundlikkuse estimeerimine

Pingetundlikkuse estimeerimiseks sobiv pingehälve peaks niisiis olema koormusest sõltumatu. Väljapääsuks on modelleerida koormust toitev võrk ekvivalentse toitepingega U_0 ja takistusega Z_0 . Siin $U_0 = U + \Delta U$ ning

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} \approx \frac{QZ_0}{U} \quad (4.12)$$

kui vaadelda põhivõrku, kus aktiivtakistused on väikesed.



Estimeerimisprotsess, kus vaadeldakse teatavat pikemat ajavahemikku (aasta või enam) vaadeldakse $S(t)\xi(t)$ ning U_0 vahelist sõltuvust, mis väljendatakse tegurite μ_1 ja μ_2 kaudu. Probleemiks on see, et koormuse iseloom ja seega ka pingetundlikkus muutub nii ööpäevases, nädalases kui aastases perioodis. Olukord on sarnane koormuse temperatuurisõltuvusega, mis vaheldub samas viisil. Temperatuurisõltuvust estimeeritakse iseloomulike ööpäevaste,

nädalaste ja aastaste ajavahemike kaupa (tööpäevade esimene vahetus, ööperioodid, erinevad nädalapäevad, aastaajad). Sama tuleb ilmselt teha ka pingetundlikkuse estimeerimisel.

Probleemiks on siin takistuse Z_0 leidmine. Seda võiks teha süsteemitakistuse hindamise eeskujul lühisvoolude arvutamisel. Vastav süsteemitakistus iseenesest ei sobi, sest see põhineb ülimööduval voolul. Kui aga ülimööduva lühisvoolu asemel vaadelda püsilühisvoolu, siis ehk küll. Niisiis

$$Z_0 = U_N / I_Q \quad (4.13)$$

kus I_Q on püsilühisvool.

4.2.3 Statistiline pingetundlikkus

Üritame pingetundlikkust leida otseselt statistiliste andmete alusel lähteandmetena koormuse ja pingehälve, vastavalt

$$\Delta P(t) = P(t) - E(t) - \Gamma(t) - S(t)\zeta(t) \quad \text{ja} \quad (4.14)$$

$$\Delta U(t) = U(t) - E[U(t)]$$

Siin $E[U(t)]$ on pinge keskväärts, mis praktiliselt on konstantne. Joonisel 4.9 on näide vaadeldavate suuruste kohta samades tingimustes kui koormusnäitajad joonisel 4.8.

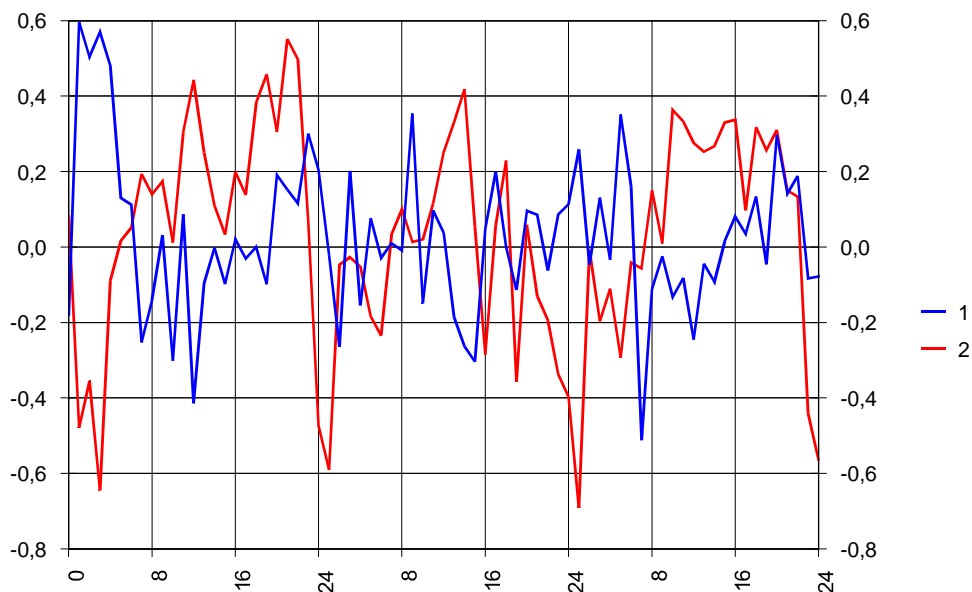
Põhimõtteliselt võiks koormuse pingetundlikkuse leida kujul

$$P_i = cU_i \quad (4.15)$$

kus tegurit c saab hinnata vähemruutude meetodil

$$c = \sum_i P_i U_i / \sum_i U_i^2 \quad (4.16)$$

Praktiliselt sel viisil usaldusväärset tulemust siiski ei saa. Näiteks Jüri alajaama nelja aasta andmetel on tulemuseks $c = -0,02$ MW/kV. Põhjuseks on pinge vähene muutlikkus. Nii on joonise 4.9 kohaselt pingehälve enamasti väiksem, kui $\pm 0,4$ kV, mis 120 kV tööpinge juures teeb vaid 0,3%.



Joonis 4.9. Jüri alajaama koormus ja pinge: 1 – koormuse hälve, 2 – pinge hälve.

4.2.4 Aktiivne katse

Kujutame koormussõlme, mis saab toite põhivõrgust ning vahel on reguleeritav trafo. Muudame trafo tegurit ning saame ΔU , ΔP ja ΔQ . Kui katseid korrata, saame koormuse sõltuvuse pingest ehk staatilised karakteristikud kogu ulatuses. See, et ka põhivõrgu pinge muutub, meid ei huvita.

Jätame nüüd trafoteguri samaks ja kujutame, et põhivõrgu pinge muutub. Saame jällegi ΔU , ΔP ja ΔQ (automaatreguleerimist esialgu ei vaata) ning võime leida koormuse sõltuvuse pingest. Seega ei ole vahet, kas muutus oli koormuse seisukohalt aktiivne või passiivne?

Järeldus on, et koormuse pingetundlikkust polegi statistiliste mõõteandmete põhjal võimalik leida. Vajalik on koormusmudeli või muude teoreetiliste skeemide rakendamine või aktiivsete katsete korraldamine.

5. Agregeeritud koormuste sõltuvus sagedusest

5.1 Sageduse mõju aktiiv- ja reaktiivkoormusele

Elektrivõrgu sõlmedesse agregeeritud koormus moodustub paljude erinevate seadmete poolt tarbitavast võimsusest, millele lisanduvad kaod sõlme ühendatud jaotusvõrgu elementides. Erinevatel seadmetel on erinev sagedustundlikkus. Ka aktiiv- ja reaktiivkoormustel on sagedustundlikkus erinev.

Puhtalt aktiivtakistusi sisaldavate koormuste, nagu näiteks hõõglambid ja mitmesugused küttekehad, võimsus on sagedusest praktiliselt sõltumatu. Vaid väga suured sageduse kõrvalekalded võivad mõningal määral muuta selliste koormuste võimsust, näiteks kõrgetel sagedustel esineva pinnaefekti tõttu. Reaalses sageduse muutumiskiirkonnas on ainult aktiivtakistusi sisaldavad koormused sagedusest sõltumatu.

Reaktiivtakistusi sisaldavad koormused on sagedusest sõltuvad.

Reaktiivtakistusi esineb enamusele elektriseadmetel. Reaktiivtakistused võivad olla induktiivsed ja mahtuvuslikud. Nende reaktiivvõimsus võib olla induktiivne või mahtuvuslik.

Induktiivne takistus võib olla lineaarne või mittelineaarne.

Lineaarsete induktiivtakistustega seadmete induktiivsus L ei sõltu sagedusest ja reaktiivkoormus Q_L avaldub valemiga

Aktiivvõimsuse sõltuvust sagedusest põhjustab sagedusest sõltuv reaktiivvõimsus, mis omakorda tekitab aktiivtakistustel sagedusest sõltuvaid aktiivvõimsuskadusid.

Võrgukadude sõltuvus sageduse muutumisest võib olla erinev: kaod võivad nii suurenda kui ka väheneda.

Sagedusest sõltuvuse leidmine muutub komplitseerituks, kui arvestada mittelineaarsete induktiivsustega. Tüüpilised mittelineaarset induktiivsust sisaldavad seadmed on

- trafod
- mittelineaarne elektroonika
- asünkroonmasinad (mootorid ja generaatorid)
- sünkroonmasinad (mootorid ja generaatorid)

Selliste seadmete sagedustundlikkus on oluliselt mittelineaarne ja sõltub konkreetse seadme omadustest.

Nii näiteks muutub elektroonikaseadmete tarbitav aktiivvõimsus ligikaudu 0,5...0,8 % sageduse muutumisel 1 % võrra.

Agregeeritud koormuse koosseisus on tavaliselt suur osakaal asünkroonmootoritel.

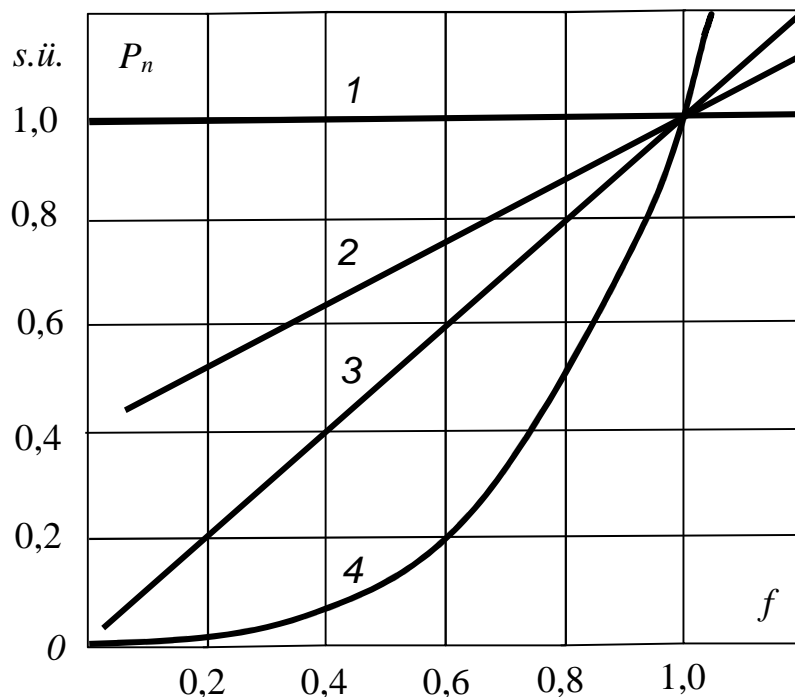
Asünkroonmootorid ongi peamised agregeeritud aktiivkoormuse sagedusest sõltuvuse põhjustajad. Mootorite sagedussõltuvuse suurus sõltub mootori momendi-kiiruskarakteristiku järskusest, mis omakorda on seotud mootori poolt käitatavate seadmetega. Joonisel 5.1 on kujutatud erinevate seadmete sageduskarakteristikud:

1 – hõõglambid

2 – luminofoorlambid

3 – kolbpumbad, kompressorid, kuulveskid, metallitööpingid, tõste- ja transpordiseadmed

4 – tsentrifugaalpumbad ja ventilaatorid

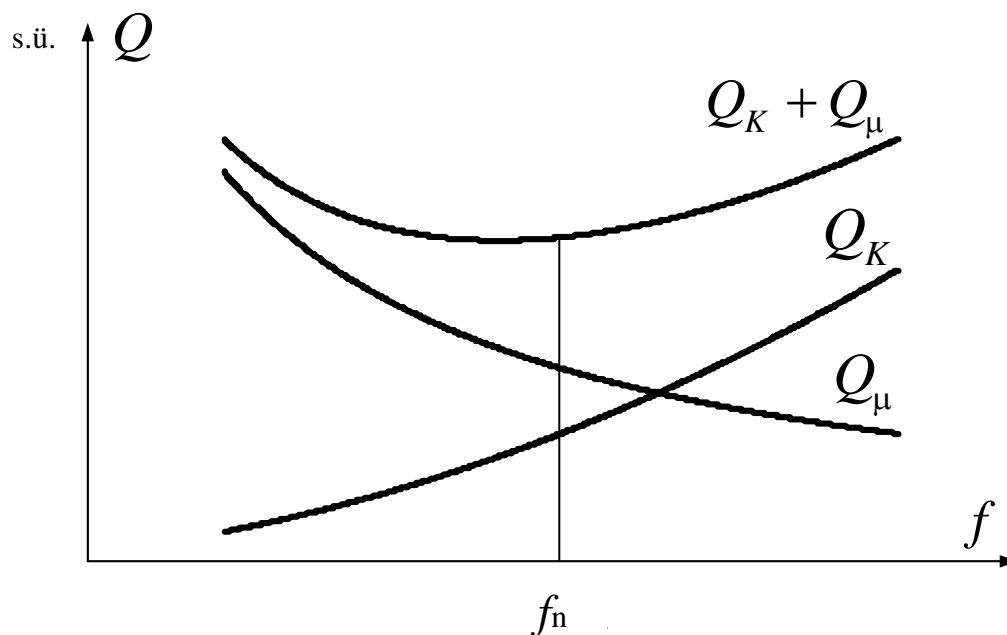


Joonis 5.1. Erinevate tarbijate aktiivkoormuse sõltuvus sagedusest.

Reaktiivkoormuse sõltuvus sagedusest on samuti oluliselt määratud mootoriga.

Asünkroonmasina reaktiivkoormuse sagedusarakteristik koosneb kahest komponendist: koormusvoolust sõltuvast reaktiivvõimsusest Q_k ja magnetimis-reaktiivvõimsusest Q_μ :

Asünkroonmootori reaktiivkoormuse tüüpiline sageduskarakteristik on joonisel 5.2.



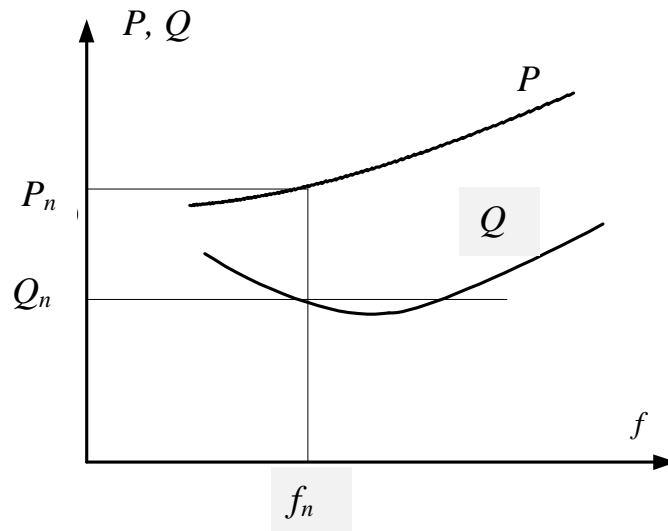
Joonis 5.2. Asünkroonmootori reaktiivkoormuse sõltuvus sagedusest.

Koormussõlme agregeeritud reaktiivkoormuse sagedussõltuvuse juures olulised ka muud tegurid:

- mootorite ja trafode tühijooksukarakteristikute mittelineaarsus
- sünkroonmasinate ergutuse muutumine sageduse muutumisel
- reaktiivvõimuse kompenseerimisseadmete olemasolu ja liik
- liinide mahtuvuste oluline sõltuvus sagedusest

Seega sõltuvad sagedusest nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormused. Tüüpilised agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuse kõverad on joonisel 5.3.

Vaatamata karakteristikute üldiselt tuntud kujule on konkreetsesse sõlme agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuse leidmine oluliselt komplitseeritud ülesanne, kuna eri sõlmede koormuskoosseisud võivad üksteisest oluliselt erineda. Veelgi enam, koormuste reaktsioon sageduse muutustele ei ole ajas muutumatu, kuna nii koormuste koosseis kui ka seadmete koormatus ajas muutub, olles erinev suvel ja talvel, päeval ja öösel, tööpäevadel ja puhkepäevadel. Samuti tuleb tähele panna, et ka sõlme poolt toidetava võrgu kaod sõltuvad sagedusest. Reaktiivvõimsuste osas teevad sageduskarakteristikute leidmise keerukamaks võimalikud reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed



Joonis 5.3. Agregeeritud koormuse tüüpilised sageduskarakteristikud.

5.2 Agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuste leidmise meetoodika

Agregeeritud sõlmekoormuste sagedussõltuvuste leidmisel või kasutada kahte põhimõtteliselt erinevat lähenemisviisi:

- mõõtmistel põhinev lähenemine;
- komponentidel põhinev lähenemine.

Mõõtmistel põhineval lähenemisviisil on kaks võimalust:

- koormuse ja sageduse statistilistel aegridadel põhinev modelleerimine;
- aktiivsel katsel saadud mõõtmistulemustel põhinev modelleerimine.

Koormuse matemaatiline modelleerimine statistiliste aegridade alusel positiivseid tulemusi ei andnud (vt pt 4). Põhjuseks on võrgusageduse suur stabiilsus ja väga väikesed hälbed nimisagedusest. Sellistele tingimustel ei õnnestunud tuvastada usaldatavaid korrelatiivseid seoseid aktiiv- ja reaktiivkoormuse ning sageduse vahel. Seega osutus koormuse matemaatilise mudeli kasutamine sagedussõltuvuste uurimiseks võimatuks.

Aktiivsel katsel saadavate mõõtetulemuste põhjal võiks põhimõtteliselt sagedussõltuvusi hinnata. Probleem tekib seoses reaalses võrgus aktiivse sageduskatse korraldamisega. Sellise katse korraldamine võiks kõne alla tulla vaid saartalitluse tekitamisega mingis piiratud süsteemi osas. Praktiliselt ei ole reaalsel võimalust sellist eksperimenti korraldada, eriti silmas pidades vajadust tekitada saartalitlusi ja sageduskatseid paljudes uurimiseks vajalikes sõlmedes. Veelgi enam,

arvestades koormuskoosseisude ajaliste muutustega tuleks selliseid aktiivseid katseid korraldada suvel ja talvel, päeval ja öisel ajal, aga ka eraldi töö- ja puhkepäevadel. Seega ei ole võimalik aktiivseid sageduskatseid käesoleva uurimistöo raames kasutada.

Üle jääb võimalus kasutada käesolevas uuringus komponentidepõhist meetodit. Komponentidel põhinevat lähenemist võib nimetada tinglikult ka teadmistele põhinevaks lähenemiseks, mille kohaselt agregeeritud koormuse sageduskarakteristikute mudeleid saaks tuletada:

- teades alajaama agregeeritud koormuses sisalduvaid koormusklasse;
- teades koormusklasside osakaalu ja nende ajalist muutumist vaadeldavas sõlmes
- teades koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste tüüpilisi sageduskarakteristikuid.

Iga koormusklass sisaldab mingeid tüüpilisi komponente e tarbimisseadmeid. Koormusklassi sageduskarakteristikud kujunevad vastavalt koormusklassides sisalduvatele koormuskomponentidele ja nende osakaalule. Probleemiks on tavaliselt nende komponentide osakaalu leidmine ning nende osakaalude muutumine nii ajas kui ruumis. Selle probleemi ületamiseks on iga koormusklassi jaoks arvestatud ligikaudselt mingi keskmise, tüüpilise komponentide koosseisuga.

Käesolevas töös on sagedustundlikkuse määramise aluseks võetud koormussõlmedesse agregeeritud koormusklassid, nende osakaal agregeeritud koormuses ja osakaalude sesoonsed muutused.

Koormusklasside määramisel on kasutatud Elektrilevi OÜ andmeid. Elektrilevi jagab kliendid viide tüüpgruppi:

- Grupp 1 – kodutarbijad: eramud, korterelamud ja suvilad
- Grupp 2 – põllumajandus: karjakasvatus, taimekasvatus ja kalandus
- Grupp 3 – äri ja muu: kontorid, kaubandus, teenindus, tervishoid, muu segakoormus
- Grupp 4 – tööstus: tööstus, transport, transpordibaasid
- Grupp 5 – avalik: ühiskondlikud hooned

Alguses määratakse igale tüüpgrupile omad koormuskarakteristikud, mille kirjeldamiseks on aluseks võetud PSCAD programmides kasutatavad aktiiv- ja reaktiivkoormuse mudelid kujul

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_{pu}} (1 + K_{pf} \Delta f), \quad (5.6)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_{qu}} (1 + K_{qf} \Delta f), \quad (5.7)$$

kus: P_n ja Q_n – vastavalt koormuse nimiaktiiv- ja nimireaktiivvõimsus;

U/U_n – pingesuhe, kus U on tegelik pinge ja U_n on nimipinge;

$\Delta f = \frac{f - f_n}{f_n}$ – sageduse suhteline erinevus nimisagedusest;

K_{pu} ja K_{qu} – vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse tegurid;

K_{pf} ja K_{qf} – vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkuse tegurid.

Sagedussõltuvuste leidmiseks on oluline teha kaks lihtsustust:

- jätta arvestamata pinge muutustega ning lugeda pinge konstantseks ja võrdseks nimipingega: $U = U_n$;
- lugeda aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvused lineaarseteks.

Esimese lihtsustuse tulemusel saavad mudelid lineaarse kuju:

$$P = P_n (1 + K_{pf} \Delta f), \quad (5.8)$$

$$Q = Q_n (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (5.9)$$

Teine lihtsustus on põhjendatud sageduse suhtelise stabiilsusega ja sageduse kõrvalekallete väikese ulatusega. Selle tõttu võib sageduskarakteristiku (vt joon. 5.3) nimisageduse ümbruses lineariseerida. Saadud lineaarsed karakteristikud on staatilised karakteristikud, kuid esimeses lähenduses võib neid kasutada ka dünaamiliste karakteristikutena dünaamiliste protsesside modelleerimisel.

Kui sõlme agregeeritud koormusklasside osakaalud on teada, saab koormusklasside mudelite alusel leida kogu agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuste mudelid. Andmete puudumise tõttu on koormusklasside reaktiivkoormuste osakaalud võrdsustatud aktiivkoormuste osakaaludega.

Kui tähistada koormusklasside osakaalud vastavalt tüüpgruppide numbritele c_1, c_2, \dots, c_5 , siis avaldub agregeeritud aktiivkoormus valemiga

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma n}(1 + K_{pf}\Delta f) = \sum_{i=1}^5 c_i P_{\Sigma n}(1 + K_{pfi}\Delta f) = P_{\Sigma n} \left(1 + \Delta f \sum_{i=1}^5 c_i K_{pfi} \right) \quad (5.10)$$

ja agregeeritud reaktiivkoormus analoogselt valemiga

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma n}(1 + K_{qf}\Delta f) = \sum_{i=1}^5 c_i Q_{\Sigma n}(1 + K_{qfi}\Delta f) = P_{\Sigma n} \left(1 + \Delta f \sum_{i=1}^5 c_i K_{qfi} \right) \quad (5.11)$$

Seega avalduvad summaarse agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkuse tegurid valemitega

$$K_{pf} = \sum_{i=1}^5 c_i K_{pfi} \quad \text{ja} \quad K_{qf} = \sum_{i=1}^5 c_i K_{qfi} \quad (5.12)$$

Kui koormusklasside osakaalud on antud protsentides, siis võtavad valemid kuju

$$K_{pf} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^5 c_i K_{pfi} \quad \text{ja} \quad K_{qf} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^5 c_i K_{qfi} \quad (5.13)$$

5.3 Koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuse tegurid

Koormusklasside sagedustundlikkuse tegurid on leitud kirjandusallikate põhjal. Tuleb mainida, et kirjandusallikates on põhitähelepanu pööratud koormuste pingesõltuvustele, kuid sagedussõltuvuste kohta leidub suhteliselt vähe andmeid [1], [2], [3], [4].

Põhjalikumalt on koormusklasside sagedustundlikkuse tegureid käsitletud kirjandusallikates [1], [2] ja [3]. Andmeid leidub kodutarbijate, äri ja segatarbijate ning tööstustarbijate ehk koormusklasside 1, 3 ja 4 kohta eraldi nii suve- kui ka talveperioodiks. Põllumajanduse ja avaliku sektori ehk koormusklasside 2 ja 5 sagedustundlikkuse kohta andmeid kirjanduses ei leidunud. Siiski saab nende koormusklasside sagedustundlikkuse tegureid tuletada sarnaste koormusklasside tarbijakoosseisude [5] alusel.

Tarbimisseadmete koosseisude võrdlemine [5] näitab, et avaliku sektori 5 koormuskoosseis on ligikaudu sarnane ärisektoriga 3. Seepärast on ülesande lahendamiseks võetud avaliku sektori 5 sagedustundlikkuse tegurid võrdseks ärisektori 3 teguritega.

Arvestades tootmiseseadmete suurt osakaalu nii põllumajanduses kui ka tööstuses, võib põllumajandussektori 2 sagedustundlikkuse tegurid võtta esimeses lähenduses võrdseks

tööstussektori 4 teguritega. Nendest lihtsustustest tekkiv viga on süsteemi seisukohalt suhteliselt tühine, kuna avaliku sektori ja põllumajandussektori osakaalud süsteemi summaarses koormuses on kõige väiksemad, vastavalt 7 % ja 2 % (vt joon.5.4).

Täpsemalt saaks tegureid hinnata tarbimisseadmete sagedustundlikkuste alusel, kuid see eeldab koormusklasside koosseisu kuuluvate seadmete osakaalude ja nende ajalise muutlikkuse tundmist. Praegu sellised andmed puuduvad.

5.4 Esinduskoormused ja koormusklasside osakaalud

Karakteristikute modelleerimiseks on kõik 110 kV elektrivõrgu koormussõlmed jagatud sarnaste tarbijakoosseisude alusel kümnesse iseloomulikku rühma. Igale rühmale on leitud kõige tüüpilisem e nn esindussõlm. Esindussõlmeks sobib piisavalt stabiilse tarbimisega sõlm. Selleks peaks esinduskoormus olema piisavalt suure võimsusega e piisavalt suure osakaaluga kogutarbimises. Igale esindussõlmele leitakse aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuste karakteristikud. Seejärel kasutatakse neid karakteristikuid kõikide muude antud rühma kuuluvate koormuste sagedustundlikkuse modelleerimiseks.

Valitud esindussõlmed on tabelis 5.2.

Tabel 5.2 Esindussõlmede loetelu ja osakaal kogutarbimises.

Sesoonset muutlikkust võetakse arvesse karakteristikute leidmisega eraldi suvise ja talvise koormuskoosseisu jaoks. Esinduskoormuste koormusklasside osakaalud ja sesoonsed muutused on kujutatud joonisel 5.5 ning koormusklasside osakaalud suvel ja talvel on esitatud tabelis 5.3, kus suvised ja talvised koormusklasside osakaalud on arvatud kolme talvekuu (detsember, jaanuar, veebruar) ja kolme suvekuu (juuni, juuli, august) keskväärtustena.

5.5 Agregeeritud koormuste sagedustundlikkus

Lähtudes tabelis 5.4 toodud esindussõlmede koormusklasside osakaaludest suvel ja talvel ning tabelis 5.1 toodud koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuse teguritest, saab arvutada esindussõlmedesse agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste resulteerivad sagedustundlikkuse tegurid suvisel ja talvisel perioodil valemitega

Toodud graafikute alusel saab teha rida järeldu:

- aktiivkoormuste sagedussõltuvused on suvel ja talvel mõnevõrra erinevad
- reaktiivkoormuste suvised ja talvised sagedussõltuvused erinevad üksteisest vähe
- domineeriva tööstuskoormuse puhul on koormuste suvised ja talvised sagedussõltuvused praktiliselt võrdsed
- domineeriva tööstuskoormuse puhul on reaktiivkoormuse sagedustundlikkus väike

Jooniste 5.6...5.15 alusel saab järeldada, et alajaamade nr 8, 22, 29, 38, 42, 45, 77 ja 84 koormuste sagedussõltuvused on võrdlemisi sarnased. Selline sarnasus on enamus juhtudel põhjendatav kahe asjaoluga:

- nendesse alajaamadesse agregeeritud koormused on lõpptarbijate summaarset koosseisu arvestades suhteliselt sarnased segakoormused
- mõne koormusklassi sagedustundlikkused on sarnased

Sellest tulenevalt võiks nende koormuste jaoks esimeses lähenduses ja soovi korral kasutada ühiseid keskendatud sagedussõltuvuse karakteristikuid.

Neist erinevad, kuid omavahel sarnased on alajaamade nr 83 ja 111 e Põltsamaa ja Tööstuse sageduskarakteristikud. Siin on põhjuseks tööstuskoormuste suur osakaal ja tööstuskoormuste sageduskarakteristikute märgatav erinevus ülejäänud koormusklasside vastavatest karakteristikutest.

5.6 Kokkuvõte

Käesolevas peatükis on koormusklasside osakaalude ja kirjanduse alusel leitud koormusklasside sagedussõltuvuste tegurite alusel leitud kümnele nn esindussõlmele agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuse staatilised karakteristikud, mida võib teatud piirides kasutada ka dünaamiliste protsesside korral. Esindussõlmede koormuste sageduskarakteristikute järgi saab modelleerida sagedussõltuvusi kõikidele teistele asjakohastele sõlmedele.

Tulevikus võiks sageduskarakteristikute täpsemaks leidmiseks lähtuda tarbimisseadmete modelleerimisest ning nende sagedussõltuvuste uurimisest PSCAD mudelite abil. Seejärel tuleks uurida koormusklassidesse kuuluvate tarbimisseadmete koosseise ja osakaale ning nende muutumist ajas. Saadud tulemuste alusel tuleks määrata koormusklassidele adekvaatsemad sagedustundlikkuse mudelid, mis omakorda aitaksid suurendada ka agregeeritud sõlmekoormustele leitavate sageduskarakteristikute täpsust.

5.7 Kirjandus

- [1] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc., 1176 pp.
- [2] Cigre Working Group C4.605. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, CIGRE, 2014, 190 pp.
- [3] Louie, K-W. Aggregation of Voltage and Frequency Dependent Electrical Loads. The University of British Columbia, 1999, 207 pp.
- [4] Sun, K. Power System Operation and Planning. Part 3. Load Modelling. The University of Tennessee, 2015, 24 pp.
- [5] Rosin, A., Drovtar, I., Link, S., Hõimoja, H., Mölder, H, Möller, T. Tarbimise juhtimine: suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks. Eleringi toimetised nr 3/2014 (8). Elering, 2014, 57 lk.

6. Hajatootjate mõju uurimine agregeeritud koormuste staatilistele ja dünaamilistele karakteristikutele

6.1 Hajatootjate liigitus

Hajatootjaid võib liigitada mitmesuguste tunnuste alusel:

- võrguga ühenduse konfiguratsioon
- võimsus
- liitumispinge
- genereerivad allikad
- primaarenergia allikad
- talitlusomadused.

6.1.1 Hajatootjate võrguga ühendamise konfiguratsioonid

Hajatootjate võrguga ühendamise võimalikud konfiguratsioonid on joonisel 6.1.

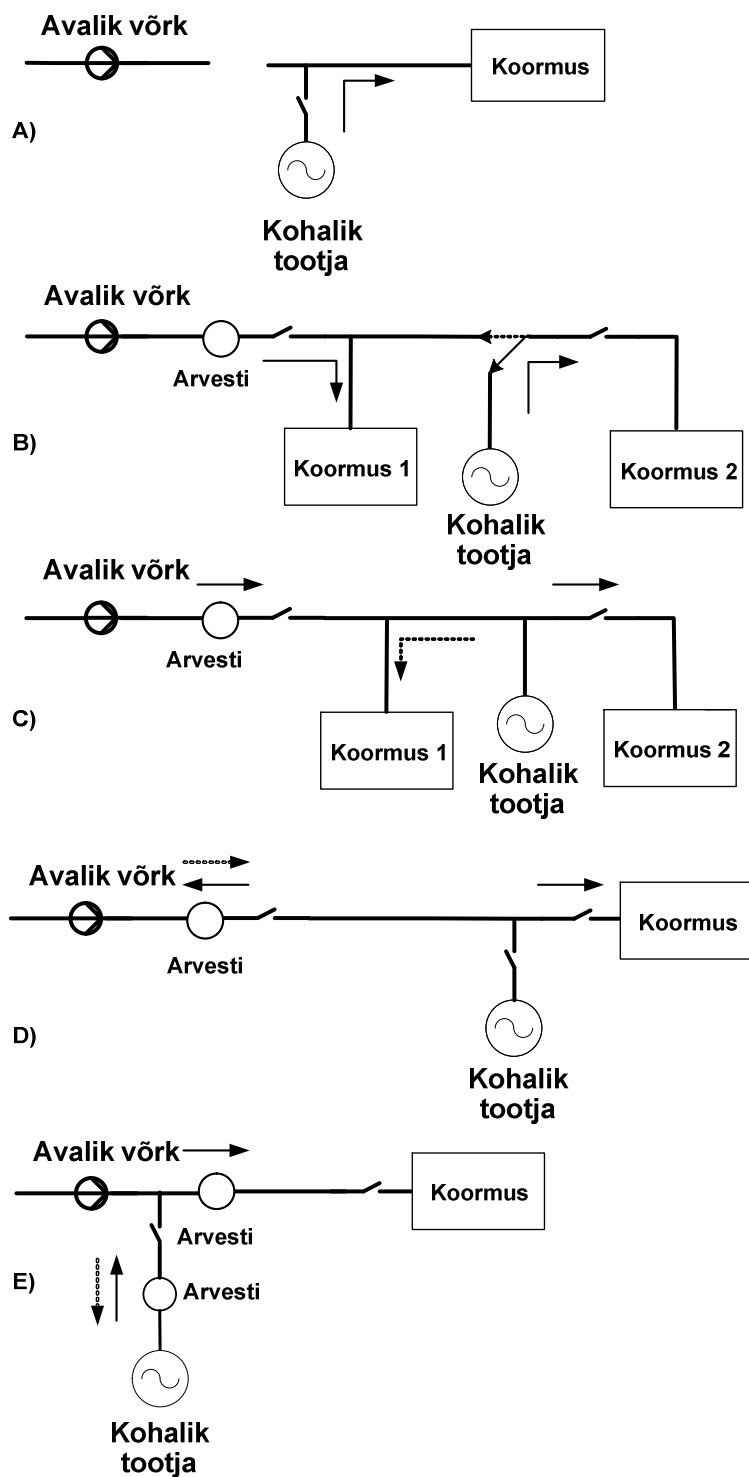
Hajatootja võrguga ühendamise konfiguratsioonist sõltub kas hajatootja mõjutab 110 kV sõlme agregeeritud koormuse karakteristikuid või mitte.

Ühendusviiside A ja B korral ei ole hajatootja ega selle poolt kaetav koormus võrguga ühendatud, seega ei osale kumbki agregeeritud koormuse koosseisus.

Ühendusviisi E korral on tegu suhteliselt suure võimsusega hajatootjaga, mille talitlust vaadeldakse eraldi e lahus sõlme agregeeritud summaarsest koormusest.

Seega avaldub hajatootjate mõju sõlme agregeeritud koormuse karakteristikutele ühendusskeemide C ja D korral.

Mõju iseloom ja suurus sõltuvad oluliselt hajatootja genereeriva seadme tüübist ja võimsusest.



A) Talitus võrgust eraldatult.

Kohalik tootja toidab avalikust võrgust täielikult eraldatud koormust. Avalikust võrgust ei saada ei reserv- ega lisavõimsust

B) Võrguga ühendatud, kuid mitte paralleeltalitus.

Hajatootja tagab koormuse 2 toite. Avalik võrk toidab koormust 1 ja vahel (kohaliku tootja rikke korral) koormust 2.

C) Võrguga paralleeltalitluses, kuid võrku võimsust ei anna.

Kohalik tootja katab kõigi või osa koormuste tipu- või baasvõimsuse vajaduse ning võrgu rikke korral tagab reservvõimsuse. Võrk kindlustab lisa- või reservvõimsuse.

D) Võrguga paralleeltalitlusele ühendatud, annab võimsust võrku.

Kohalik tootja katab baas- ja tipukoormuse ning annab võimsuse ülejäägi võrku. Võrk kindlustab lisa- või reservvõimsuse.

E) Ühendatud otse võrku.

Kohalik tootja annab kogu võimsuse võrku, sealt kaetakse koormuse vajadus.

Joonis 6.1. Hajatootjate võrguga ühendamise erinevad konfiguratsioonid.

6.1.2 Hajatootjate võimsused

Võimsuste järgi liigitatakse hajatootjad järgmiselt:

- mikrotootjad, tootjad võimsusega kuni 11 kW
- pisitootjad, tootjad võimsusega 11 kW kuni 200 kW
- väiketootjad:
 - väiketootjad võimsusega 200 kW kuni 1 MW
 - väiketootjad võimsusega 1 MW kuni 5 MW
- suurtootjad, tootjad võimsusega üle 5 MW.

110 kV võrgu sõlmedesse agregeeruvad koos koormusega tavaliselt pisitootjad ja väiketootjad.

Mikrotootjate mõju sõlmekoormuste karakteristikutele on (senini) tühine ja neid sõlmekoormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramisel ei ole vaja arvestada.

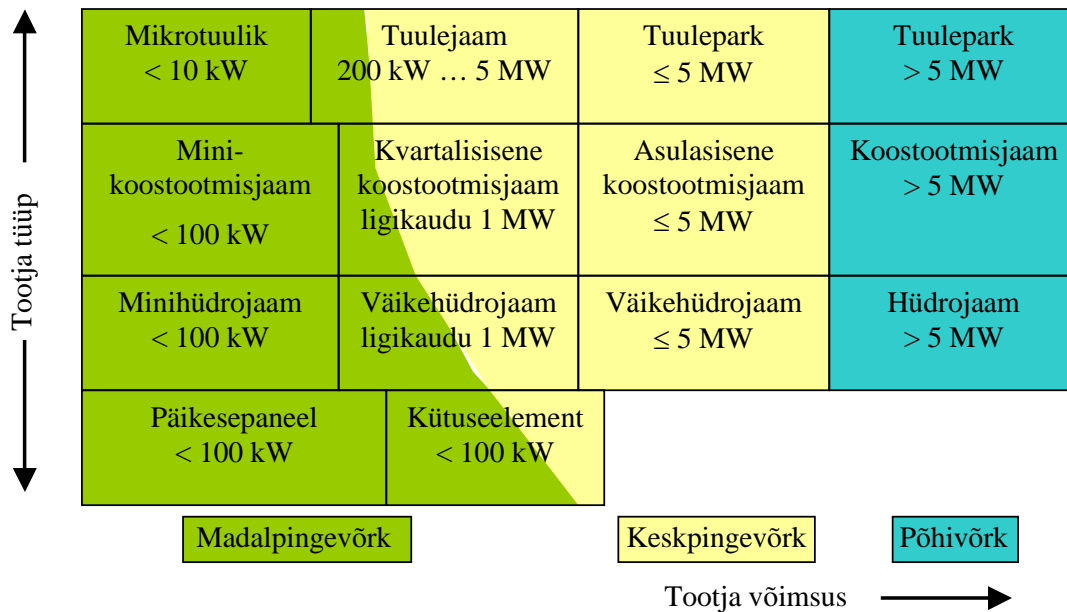
Suurtootjad kujutavad endast iseseisvaid elektrijaamu. Nende mõju elektrisüsteemi talitlusele käsitletakse lahus agregeeritud sõlmekoormustest ja seega langeb ära vajadus neid agregeeritud sõlmekoormuste karakteristikute määramisel arvestada.

6.1.3 Liitumispinged

Hajatootja ühenduskoha pinge sõltub oluliselt hajatootja liitumisvõimsusest.

Suurema võimsusega hajatootjad on ühendatud võrku kõrgemal pingel, sest kõrgemal pingel on sama võimsuse juures voolud ja kaod väiksemad.

- tootmiseadmed võimsusega kuni 200 kW on tavaliselt ühendatud madalpingevõrguga kas eraldi või ühiselt koos koormusega. Alajaama madalpingelattidele ühendatud tootmiseadmete võimsus võib olla ka suurem.
- seadmed võimsusega üle 200 kW kuni 5 MW on reeglina ühendatud:
 - üldotstarbelise jaotustrafo kaudu kuni 500 kW seadmed;
 - otse keskpingevõrku oma trafo abil üle 500 kW võimsusega seadmed
- üle 5 MW võimsusega jaamad on ühendatud kõrgepingevõrguga ja reeglina ei kuulu agregeeritud sõlmekoormuse koosseisu.



Joonis 6.2. Tootmiseadme ühendamise elektrivõrku võimsuse ja tüübi järgi.

6.1.4 Genereerivad allikad

Genereerivateks allikateks võivad olla nii vahelduvvoolu- kui ka alalisvoolu allikad.

Vahelduvvooluallikateks on tüüpiliselt järgnevad genereerimisseadmed:

- sünkroongeneraatorid
 - ergutusmähisega
 - püsimagnetiga
- asünkroongeneraatorid
 - lühisrootoriga
 - kaksistoitega
- konverter koos temaga ühendatud genereeriva(te) seadme(te)ga

Sünkroongeneraatorite võrguga ühendamise viis sõltub primaarajamist. Eristatakse püsi- ja muutuvkiirusega primaarajameid.

Sünkroongeneraatoreid saab ühendada otse (vahetult) võrku ainult püsikiirusega primaarajamite korral.

Muutuvkiirusega ajamite korral tuleb sünkroongeneraator ühendada võrku läbi konverteri. Konverterid koosnevad alaldist ja vaheldist, alaldades esmalt ajami muutuvast kiirusest tingitud muutuva (ebasobiva) sagedusega voolu ja pinget alalisvooluks ja -pingeks ning seejärel vaheldades need võrgusageduslikuks vooluks ja pingeks. Konvertereid kasutatakse ka ülikiirete mikroturbiinide puhul sagedusmuunduritena.

Lühisrootoriga asünkroongeneraatorid leiavad kasutamist nii püsikiirusega kui ka muutuvkiirusega primaarajamite korral. Vastavalt oma karakteristikule suudavad lühisrootoriga asünkroongeneraatorid hoida muutuvkiirusega ajamite kiirust teatavates piirides stabiilsena, takistades ajami kiiruse suurenemist genereeritava võimsuse suurendamisega ja kiiruse vähenemist võimsuse vähendamisega. Lühisrootoriga asünkroongeneraatorid on vahetult võrku ühendatud väiksema võimsusega tuule- ja hüdroturbiinide korral. Siiski on sellisel asünkroongeneraatorite vahetul võrku ühendamisel eriti tuulikute korral probleemiks oluliselt fluktuieriv võimsus ja ühes sellega märgatav pinge värelus. Selle vältimiseks on paljud väikese võimsusega ja reeglina kõik suurema võimsusega lühisrootoriga asünkroongeneraatorid ühendatud võrguga läbi konverterite.

Kaksistoitega asünkroongeneraatorid suudavad ise hoida võrguga sünkroonset sagedust sõltumata primaarajami kiiruse muutlikkusest. Seepärast on kaksistoitega asünkroongeneraatorid ühendatud võrku vahetult, ilma konverterite abita.

Alalisvooluallikad on tänapäeval tüüpiliselt päikesepaneelid, mis leiavad paljudel juhtudel kasutust ainult kliendi oma tarbeks (ühendusviisid A ja B).

Kütuseelemendid ei ole praegusel hetkel veel kõrge hinna tõttu konkurentsivõimelised, kuid leiavad kasutamist erirakendustes.

Alalisvooluallikate võrguga ühendamiseks kasutatakse vaheldeid e invertereid, mis muudavad alalisvoolu ja -pinge võrgusageduslikeks vahelduvvooluks ja -pingeks.

6.1.5 Tootmisseadmete primaarajamid

Primaarenergia allikate alusel liigituvad hajatootmisseadmed järgmiselt:

- soojusenergia: väikesed koostootmisjaamad
 - diiselaagregaadid
 - mikro- ja miniturbiinid
- hüdroenergia: hüdroelektrijaamad
- tuuleenergia: tuuleelektrijaamad
- päikese kiirgusenergia: päikeseelektrijaamad

Primaarajamite alusel liigituvad generaatorid järgmiselt:

- muutuvkiirusega generaatorid:
 - tuulegeneraatorid
 - väiksemad hüdrogeneraatorid

- püsikiirusega generaatorid:
 - turbogeneraatorid
 - diisलगeneraatorid
 - suuremad hüdrogeneraatorid
 - püsikiirusreduktoriga tuulegeneraatorid

Muutuvkiirusega primaarajamite korral kasutatakse:

- asünkroongeneraatoreid
 - lühisrootoriga asünkroongeneraatoreid (väiksemate võimsuste korral)
 - kaksistoitega asünkroongeneraatoreid
- asünkroon- või sünkroongeneraatoreid koos konverteritega.

Püsikiirusega primaarajamite korral kasutatakse:

- asünkroongeneraatoreid
- sünkroongeneraatoreid.

Päikeseelektrijaamad toodavad alalisvoolu ja on võrguga ühendatud läbi inverteerite.

6.2 Hajatootjate kirjeldus

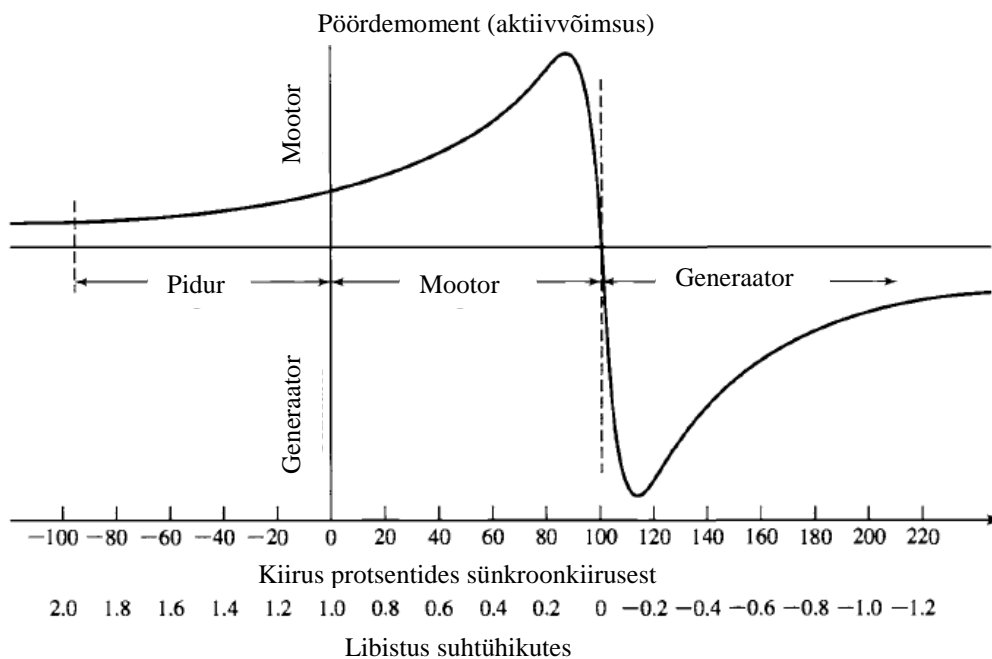
6.2.1 Tuulegeneraatorite liigitus

Tänapäeval on üheks enimlevinud hajatootjate tootmiseseadmeteks tuulegeneraatorid.

Tuulegeneraatorid võivad olla erineva ehituse ja komponentidega. Konstruktsiooni ja lühisele reageerimise alusel jagunevad tuulegeneraatorid viide liiki [1]:

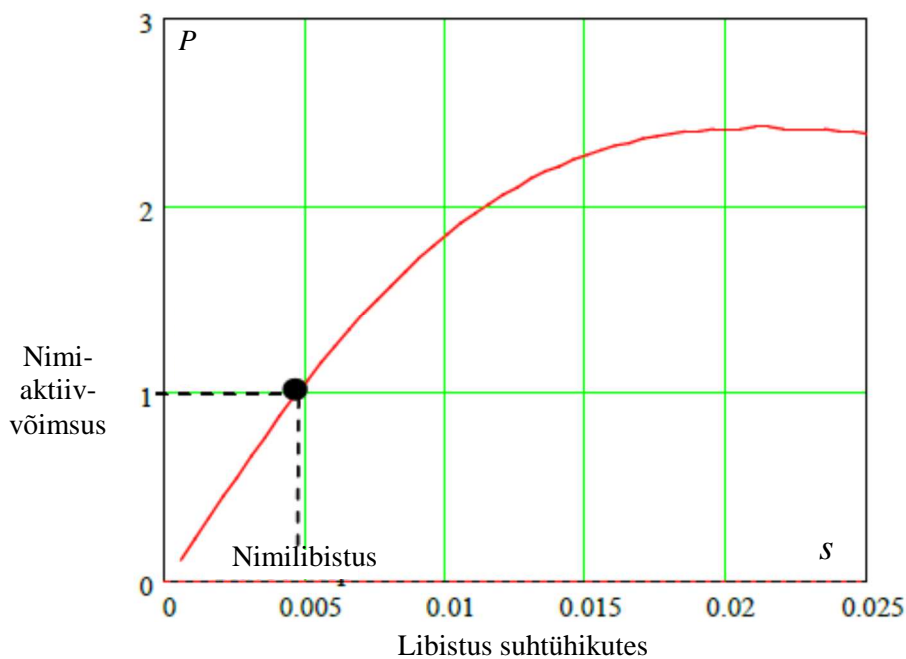
- tüüp I: lühisrootoriga asünkroongeneraatorid
- tüüp II: reguleeritava resistoriga mähisrootoriga asünkroongeneraatorid
- tüüp III: kaksistoitega asünkroongeneraatorid
- tüüp IV: konverteriga asünkroon- või sünkroongeneraatorid
- tüüp V: püsikiirusega sünkroongeneraatorid

I ja II tüüpi generaatorid on varustatud reaktiivvõimsust ja ühes sellega ka võimsustegurit ja pinget reguleerivate kondensaatoritega. Kondensaatoritel võivad olla astmelülitid erinevate turbiini pöörlemiskiiruste jaoks. Siiski peab I ja II tüüpi tuuleturbiinide pöörlemiskiirus olema suhteliselt stabiilne, kuna vastavalt asünkroonmasina karakteristikule on stabiilse töö vahemik võrdlemise kitsas – 100..105 sünkroonkiirusest, mis vastab asünkroongeneraatori libistusele 0...–5%.



Joonis 6.3. Induksioonmasina pöördemomendi (aktiivvõimsuse) sõltuvus rootori kiirusest

Võrku antav aktiivvõimsus on võrdeline sünkroonkiirust ületava kiiruse suurusega. Nimivõimsus saavutatakse juba väikeste libistuste $s = -0,5\%$ korral. Suurim stabiilsuse varuga arvestav võimsus aga libistuste ca $s = -(2...3)\%$ juures (joonis 6.4).



Joonis 6.4. Asünkroongeneraatori suhtelise aktiivvõimsuse P sõltuvus suhtelisest libistusest s [1].

Üle -5% libistuse korral võib generaator kaotada stabiilsuse. Seega näiteks kahe pooluspaariga staatori korral on stabiilse genereerimise vahemik vaid 1500...1545 pööret

minutis. Kui primaarajam ei suuda tagada täisvõimsuseks vajalikku rootori pöörlemiskiirust, peab kasutama reduktorit. Asünkroongeneraatoril on vastavalt pöördemomendi karakteristikule rootori pöörlemiskiirust stabiliseeriv omadus: pöörlemiskiiruse väikesed muutused põhjustavad suuri võimsuse muutusi, mis töötavad vastu kiiruse muutumisele. Teisalt aga põhjustab see oluliselt fluktureerivat väljundvõimsust ja pinge värelust. I ja II tüüpi tuulegeneraatorid on kõige lihtsamad ja odavamad ning leiavad kasutamist vanemat tüüpi väikestes tuulejaamades.

Joonis 6.6. II tüüpi tuulegeneraatori põhimõtteskeem.

II tüüpi tuulegeneraatori rootoril paikneb mähis, mis on lühistatud läbi alaldi ühendatud reguleeritava takistusega aktiivtakistiga. Takisti ülesandeks on vähendada generaatori lühisvoolusid ja reguleerida (vähendada) genereeritavat võimsust. Aktiivtakistuse suurus sõltub libistusest. Suurematel libistustel kasutatakse suuremaid takistuse väärtusi. Suurimad lühisvoolud tekivad takistuse nullväärtuse korral.

III tüüpi tuulegeneraatorid on kaksistoitega asünkroongeneraatorid.

Erinevalt lühisrootoriga asünkroongeneraatorist on kaksistoitega asünkroongeneraatoril kolmefaasilised mähised nii staatoril kui ka rootoril. Seega toidetakse kaksistoitelistes asünkroongeneraatorites kaht kolmefaasilist mähistekomplekti – staatori ja rootori mähist, tekitades kaks aktiivset pöördmagnetvälja. Kaksistoiteliste hulka võib tinglikult lugeda ka mähisrootoriga sünkroongeneraatorid.

Joonis 6.7. III tüüpi tuulegeneraatori põhimõtteskeem.

Erinevalt lühisrootoriga asünkroongeneraatorist ei ole rootori magnetväli rootori suhtes staatiline, vaid pöörleb rootorimähisesse juhitava voolu sagedusega võrdelise kiirusega. Seega staatorit läbiv rootori pöörlev magnetväli ei pöörle mitte ainult tänu rootori pöörlemisele, vaid ka rootoris juhitud vahelduvvoolu mõjul. Sellega saab staatori klemmidel hoida pidevalt võrguga sünkroonset pinget ja voolu.

Rootori kolmefaasilise mähise toitevoolu juhitakse elektrooniliselt generaatori konverteri abil, mis saab toite generaatori klemmidelt vahelduvvoolu võrgust, muutes võrgusagedusliku kolmefaasilise voolu alalisvooluks ja seejärel alalisvoolu sobiva sageduse ja suurusega rootori kolmefaasiliseks vooluks. Kui rootoris antava voolu sagedus on null, siis ergutatakse rootorit alalisvooluga ja kaksistoitega asünkroongeneraator töötab sel juhul tavalise sünkroongeneraatorina, mille ergutust juhitakse rootoris antava alalisvoolu suurusega.

Generaatoritalituses genereerib staator võimsust kuid alasünkroonsel kiirusel tuleb osa sellest tagasi rootoris. Ülesünkroonsel kiirusel annavad nii staator kui ka rootor võrku võimsust.

Kaksistoitega generaatorid edestavad ülesünkroonsel kiirusel võimsusnäitajatelt kõiki teisi generaatoreid, kuna ka rootoril on aktiivne osa energiatootmises.

Sobivateks kasutusvaldkondadeks on muutuvkiirusega tuule- ja hüdrogeneraatorid. Siiski peaksid talitluskiirused jääma vahemikku $\pm 30\%$ sünkroonkiirusest.

Mootorkäivitamisel kasutatakse induktsioontalitlust, mis saavutatakse eriliste rootorit lühistavate takistitega. Kui rootori kiirus jõuab normaalsesse töövahemikku, siis lülitatakse käivitustakistid välja ja konverter ühendatakse rootoriga. Generaatorid reeglina mootorkäivitust ei vaja. Lühise olukorras lühistatakse lühisvoolude piiramiseks rootori mähised ja rootori toide lülitatakse välja. Seega töötab kaksistoitega asünkroongeneraator lühise olukorras tavalise lühisrootoriga asünkroongeneraatorina.

Generaatori pinget sõltub rootorile rakendatava pingest U_{rootor} ja sagedusest f_{rootor} suhtest.

Generaatori pinget hoidmiseks nõutaval tasemel peab leidma seda pinget tagava suhte $U_{\text{rootor}}/f_{\text{rootor}}$ ning hoidma see konstantsena.

Suhe $U_{\text{rootor}}/f_{\text{rootor}}$ määrab ära ka aheldusvoo ja ühes sellega saab valida ka genereeritava reaktiivvõimsuse taseme, näiteks $Q = 0$.

III tüüpi tuulegeneraatorid sobivad muutuvkiirusega ajamitele, kuid nende laiemat kasutamist takistab generaatori keerukusest tingitud suhteliselt kõrge hind. Lisaks on selliste masinate nõrgaks kohaks rootori kollektorrõngad ja harjad. Harjadeta ühendus on praegu alles otsingute ja uuringute järgus.

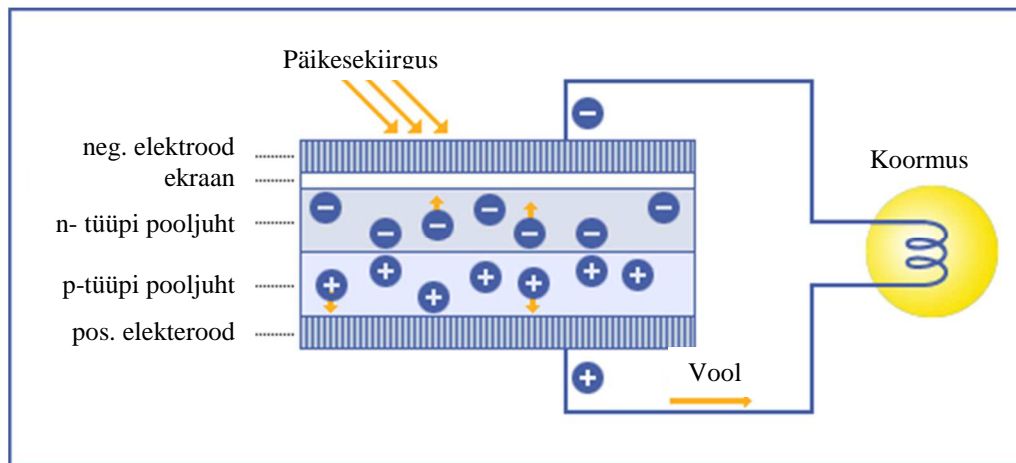
IV tüüpi tuulegeneraatorid on kaasajal ühed laiemalt levinud generaatorid. Kuna võrguühendus toimub konverteri abil, siis saab generaatoreid võrguga ühendada sõltumata primaarajami kiiruse muutlikkusest. Nii saab tuuleelektrijaamades laialdaselt kasutada nii ergutusmähisega kui ka püsimagnetitega sünkroongeneraatoreid, aga vajadusel ka tavalisi lühisrootoriga asünkroongeneraatoreid. Teisalt võimaldab konverter hoida tiivikute pöörlemiskiirust optimaalsel aerodünaamilisel tasemel. Samuti on võimalik juhtida reaktiivvõimsust sõltumata genereeritava aktiivvõimsuse suuruselt, mis on oluline dünaamilistel siirdeprotsessidel. Konverteri pinget ja sageduse talitlusvahemikud on väga laiad, mis on eriti sobiv nõrkade elektrivõrkude korral.

6.2.2 Päikeseelektrijaamad

Enamus kasutatavatest päikesepaneelidest on ehitatud õhukese kristalliseeritud ränipaneelidest. Ränipaneelid on väga haprad ja rabedad, seetõttu asetatakse nad paneelis kahe plaadi vahele, et kaitsta neid mehaaniliste vigastuste eest. Tavaliselt kasutatakse pealmise plaadina peegeldust vähendava pinnatöötusega klaasekraani ning allpool tavalist plastikplaati. Kaitstva plaadi ning kristalliseeritud silikooniga paneeli vahel paiknevad

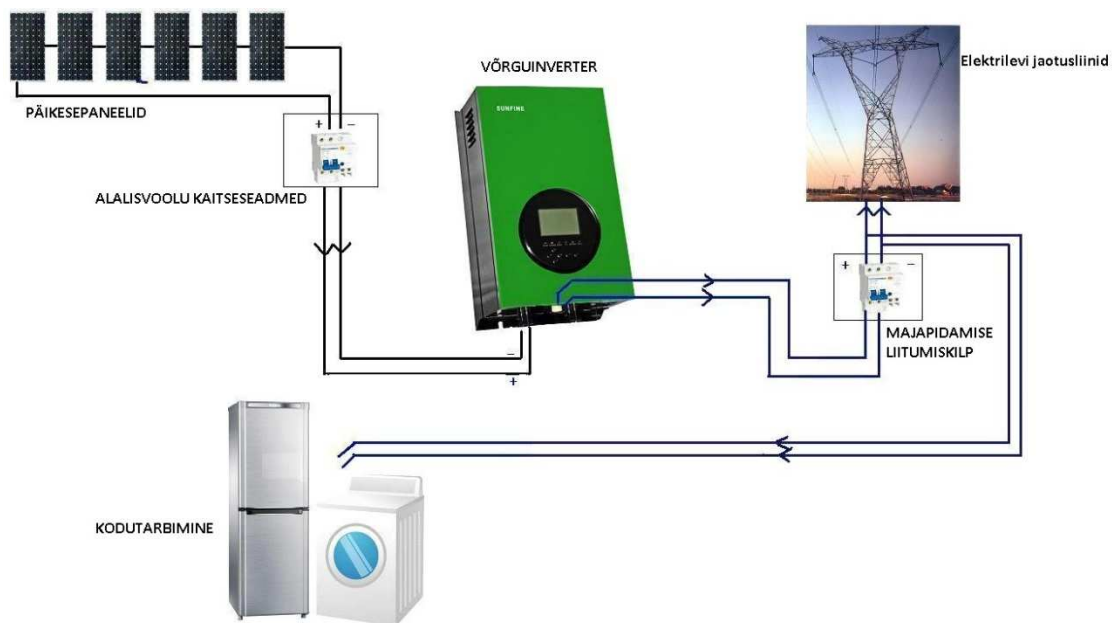
tavaliselt õhukesed polümeeri kihid, mille eesmärk on kaitsta paneele niiskuse eest, mis võivad tekitada seal korrodeerumist elektrilistes ühendustes.

Päikesepaneeli töö põhineb pooljuhtidel (joonis 6.10). Paneeli valgustneelav ekraan on suunatud päiksekiirguse poole. Kiirguse toimel pooljuhi elektronid ergastuvad. N-tüüpi pooljuhti kogunevad negatiivsed elektronid, p-tüüpi pooljuhti aga jäävad nn augud, mis käituvad positiivsete laengutena. Ühendades paneelid juhtmete abil koormusega, tekib alalisvool.



Joonis 6.10. Päikesepaneeli tööpõhimõte [2].

Päikesepaneelide ühendamiseks elektrivõrku vaheldatakse alalisvool sobivaks vahelduvvooluks inverteri(te) abil (joonis 6.11).



Joonis 6.11. Päikesepaneelide ühendamine läbi inverteri [3].

6.3 Hajatootjate lühisvoolud

6.3.1 Hajatootjate liigitus koormuskarakteristikute leidmisel

Normaaltalitusel on eri liiki tootmiseseadmete talitluse erinevused suhteliselt väikesed. Olulised erinevused ilmnevad aga erinevate tootmiseseadmete reageerimisel lühistele ja teistele pingele, voolu ja võimalik, et ka sageduse muutusi põhjustavatele häiringutele. Vastavalt sellele saab kõiki hajatootmiseseadmeid vaadelda viies iseloomulikus rühmas:

- võrguga vahetult ühendatud sünkroongeneraatorid
- võrguga vahetult ühendatud lühisrootoriga asünkroongeneraatorid
- võrguga vahetult ühendatud kaksistoitega asünkroongeneraatorid
- võrguga läbi konverterite ühendatud sünkroon- ja asünkroongeneraatorid
- võrguga läbi inverteerite ühendatud päikesepaneelid

Kui hajatootmiseseadmed esinevad agregeeritud koormuse koosseisus, siis ka selliste sõlmekoormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute leidmisel tuleb erinevatesse rühmadesse kuuluvate hajatootjate mõju selgitamiseks neid uurida ja käsitleda eraldi.

6.3.2 Võrguga vahetult ühendatud sünkroongeneraatorid

Võrguga vahetult ühendatud sünkroongeneraatorid eeldavad püsikiirusega primaarajameid, milleks hajatootmisel on tüüpiliselt auruturbiinid ja diiselagregaadid ning ka mõned hüdroturbiinid ja V tüüpi tuuleagregaadid. Tüüpilisteks kasutuskohtadeks on väikesed tööstus- ja koostootmisjaamad. Hajatoomisel kasutatakse nii ergutusmähisega kui ka püsimagnetiga sünkroongeneraatorid. Tavaliselt leiavad püsimagnetiga sünkroongeneraatorid kasutamist väiksemate nimivõimsuste korral.

Ergutusmähisega sünkroongeneraatori voolu ja pinget kujundavad generaatori takistuse muutumine siirdeprotsessi käigus ja ergutuse reguleerimine.

Generaatori töötab lühise alghetkel ülিমööduva takistusega, mis on peaaegu suurusjärgu väiksem normaalsest takistusest. Lühise käigus generaatori takistus suureneb kuni normaalse väärtuseni. Vastavalt sellele on generaatori lühisvool algul suurenenud ja seejärel kahaneb (joonis 6.12).

Lisaks suurendab lühivoolu tippväärtusi ka lühise alghetkel tekkida võiv lühisvoolu aperioidiline komponent, mis sumbub eksponentsiaalselt vastavalt kogu lühiseahela ajakonstandile.

Voolu suurus ja kahanemiskiirus sõltub generaatori suurusest (nimivõimsusest) ja lühisekoha kaugusest generaatorist. Hajatootmises kasutatavate kuni 5 MVA võimsusega sünkroongeneraatorite voolu kahanemine kestab alla 0,2...0,5 s.

Pinge hoidmiseks ja stabiilsuse suurendamiseks lühisest või muudest häiringutest põhjustatud pingelohkude korral suurendab automaatse ergutusregulaatoriga generaator järsult ergutusvoolu. Sellist ergutusvoolu järku suurendamist nimetatakse ergutuse forsseerimiseks.

Forsseerimiskiirus sõltub oluliselt erguti ja ergutusmähise ajakonstantidest:

- masinerguti e harjadeta ergutussüsteemi ajakonstant on ca 0,2...0,6 s.
- staatiliste e türistorergutite ajakonstant on ca 0,02 s

Arvestades ka ergutusmähise induktiivsusest sõltuva ajakonstandiga hakkab ergutuse forsseerimine mõjuma ca 0,2...0,5 s pärast. Selle tulemusel suureneb generaatori elektromotoorjõud ning ühes sellega ka lühisvool.

Kolmefaasilise lühise korral generaatori klemmidel või generaatori vahetus läheduses on lühisvool lühise alghetkel tavaliselt võrdne 5,5...7,3 kordse nimivooluga. Kui lühist välja ei lülitata võib lühisvool pärast ergutuse forsseerimist olla isegi suurem algväärtusest.

Kuna lühisvool on olulisest reaktiivvool, siis aktiivkoormuse järsu vähenemise tõttu lühise ajal generaatori pöörlemiskiirus kasvab. Ka generaatori pinge ja võrgupinge vaheline pingenuk kasvab. Kõik see kokku võib ohustada generaatori stabiilsust ja põhjustada generaatori voolu tõusu kuni 10 kordse nimivooluni.

Joonis 6.12. 50 kVA nimivõimsusega sünkroongeneraatori lühisvoolu perioodiline komponent kolmefaasilisel lühisel (PSCAD mudel).

Lühise olukorras peab generaator läbima pingelohu e säilitama stabiilse talitsuse pinge järsu alanemise tingimustes. Pingelohu läbimise kõver peab vastama järgmistele nõuetele:

- pinge järsk alanemine liitumispunktis 0 %-i nimipingest kuni 0,25 sekundiks;
- pinge alanemisele järgnev lineaarne pinge tõus 25 %-st 90 %-i nimipingest 0,5 sekundi jooksul;
- liitumispunkti pinge püsiv hoidmine tasemel, mis on vähemalt 90 % liitumispunkti elektrivõrgu nimipingest. Sel juhul võib võimsus väheneda 10 %-i nimivõimsusest [4].

Lühistalitluse tingimustes peab sünkroongeneraator säilitama stabiilse sünkroontalitluse. Kasutatava mudeli korral tehakse lühis trafo ülempinge poole lattidel, kus on liitumispunkt. Pinge muutumiskõvera näide lühistalitluse ajal ja lühise järgselt on toodud joonisel 6.13, kus on näha ka võrgueeskirja nõuete piirväärtused.

Joonis 6.13. Pinge taastumine lühiskatse järel [5].

Graafikult on näha, et generaatori klemmipinget taastub 0,25 sekundilise lühise korral võrgueeskirja kehtestatud piirides, mis tähendab, et generaator ei tohi sellise kestvusega lühise korral välja lülituda. 0,25 sekundilise lühise järel taastub pinge hüppeliselt tasemele 0,7 pu. Ajahetkel 23,5 rakendub turbiini kiirusregulaator ja põhjustab pinge taastumises lohu, kuid pingelang on samuti võrgueeskirja kehtestatud piirides. Lühise järgselt jääb generaator stabiilseks ja võrgust välja lülitamiseks vajadust ei ole [4][5].

Püsimagnetiga sünkroongeneraatoril ergutuse forsseerimist ei toimu. Seega lühisvool kahaneb esimese hetke ülimööduvast voolust kuni püsilühisvooluni monotoonselt.

6.3.3 Võrguga vahetult ühendatud lühisrootoriga asünkroongeneraatorid

Lühisrootoriga otse võrku ühendatud asünkroongeneraatorid leiavad tavaliselt kasutamist väikehüdroelektrijaamades ja mõnedes väikese võimsusega vanemates tuulegeneraatorites. Lühisrootoriga asünkroongeneraatorite reaktsioon lühisele sõltub oluliselt lühise liigist ja jääkpingest.

Kolmefaasilise lühise korral suudavad lühisrootoriga asünkroongeneraatorid genereerida lühisvoolusid vaid lühiajaliselt, kuna lühise põhjustatud pingelohk ei võimalda generaatoril saada magnetamiseks vajalikku reaktiivvõimsust.

Kolmefaasilise lühise korral on asünkroonmootori ülimööduva voolu suurusjärg võrdne 3...8 kordse nimivooluga.

Mööduv vool võrdub umbes 2...6 kordse nimivooluga.

Induktsioongeneraatori lühisvool sumbub väga kiiresti, ca 0,1...0,3 s jooksul kuni nullini.

Tuleb tähele panna, et lühisekaitse rakendumiseks kulub teatud aeg – rakendusviide ja kiiresti sumbuva lühisvoolu tõttu võib kaitse lühisele mitte reageerida. Seepärast ei saa induktsioongeneraatori korral kasutada kolmefaasilise lühise vastu ainult liigvoolupõhist kaitset vaid kaitse peab toimima ka muudele tunnussuurustele peale lühisvoolu. Kaitse võib reageerida näiteks liitumispunkti pinge või sageduse muutumisele.

Kui kaitse lahutab lühisekoha võrgust ja võrgupinge taastub järsult normaalseks, tekib generaatoril suur, käivitusvoolu meenutav voolutõuge. Sel juhul võib võrku antava voolu tippväärtus ulatuda kuni 10 kordse nimivooluni, kuid kahaneb kiiresti normaaltasemele.

Kui kolmefaasilise lühise korral jääkpinge generaatori klemmidel ei muutu nulliks, siis käitub generaator vastavalt joonisel 6.15 kujutatud kõveratele. Lühis algab ajahetkel 0 s ja lõppeb hetkel 0,2 s.

Joonis 6.16. Resistoriga lühistatud rootorimähisega asünkroongeneraatori lühisvoolud: a – libistus 1 % (resistor puudub); b – libistus 2 % (resistori suhteline takistus 0,00989); c – libistus 3 % (resistori suhteline takistus 0,019596) [7].

Rootoriahelas olev resistor toimib võnkesummutina ja ühtlasi vähendab ka lühisvoolu tippväärtusi.

6.3.4 Kaksistoitega asünkroongeneraatorid

Kaksistoitega asünkroongeneraatorid on sobivad kasutamiseks muutuvkiirusega tuulikutes, kuid ei ole leidnud eriti laialdast kasutamist konstruktsiooni keerukusest tuleneva suhteliselt kõrge hinna tõttu.

Kaksistoitega asünkroongeneraatori lühisevool sõltub oluliselt rootori voolu juhtimisest.

Lühise korral lülitatakse rootor lühistavate takistite abil lühisesse ja generaator käitub takisti kaudu lühistatud rootorimähisega asünkroongeneraatorina (tüüp II).

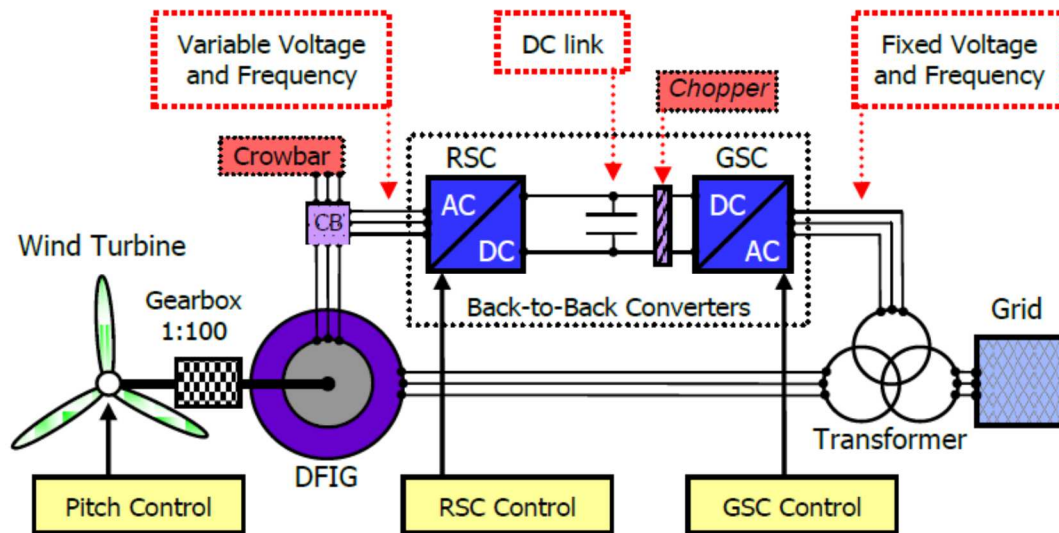
Lühisti toimib generaatori kaitsena lühise olukorras.

Lühisti lülitatakse sisse ka mootorkäivitusrežiimis.

Samaaegselt rootorimähise lühistamisele lahutatakse konverter võrgust, et säästa konverterit lühise ajal rootori poolt põhjustatud suurtest vooludest.

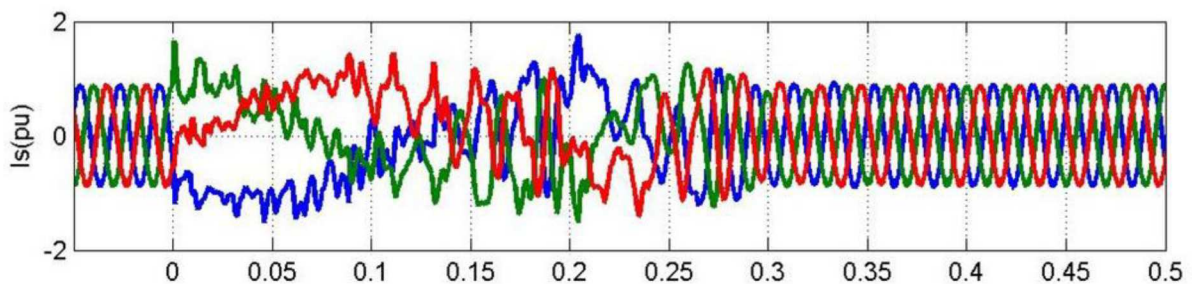
Rootori lühisti koosneb türistoride komplektist. Tänu rootori lühistamisele vähenevad rootori pinged ja vool. Lühisti takistuse muutmine muudab ka voolu ja pinged käitumist. Tänu rootori

lühistile on võimalik hoida kaksistoitega asünkroongeneraatorit lühise ajal võrgus ning lühise möödudes jätkata sujuvalt normaaltalitlusega.



Joonis 6.17. Kaksistoitega asünkroongeneraatoriga tuuliku põhimõtteskeem [8].

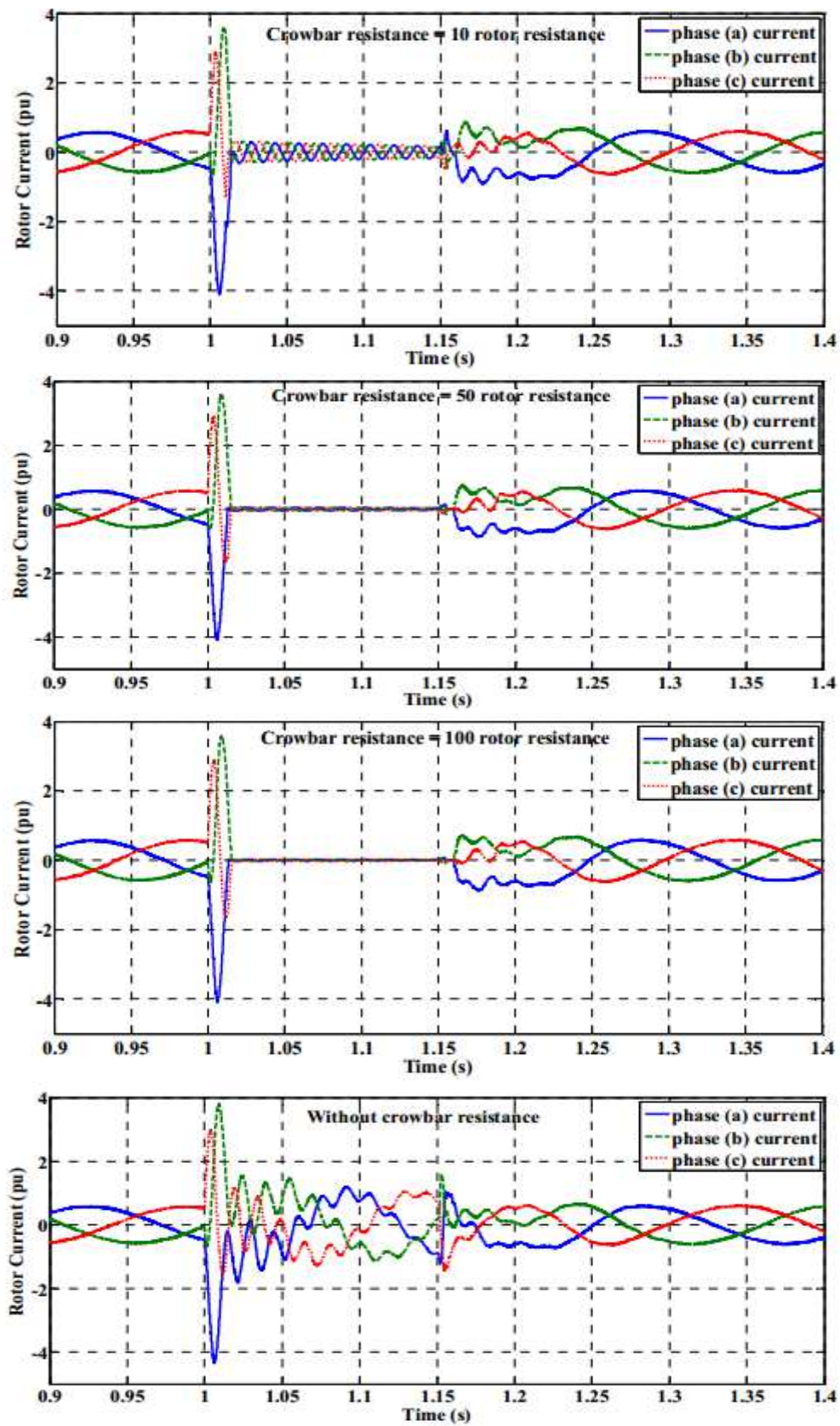
Kaksistoitega asünkroongeneraatori lühisvoolu kolmefaasilise lühise korral iseloomustab joonis 6.18.



Joonis 6.18. Kaksistoitega asünkroongeneraatori lühisvool kolmefaasilise lühise korral [9].

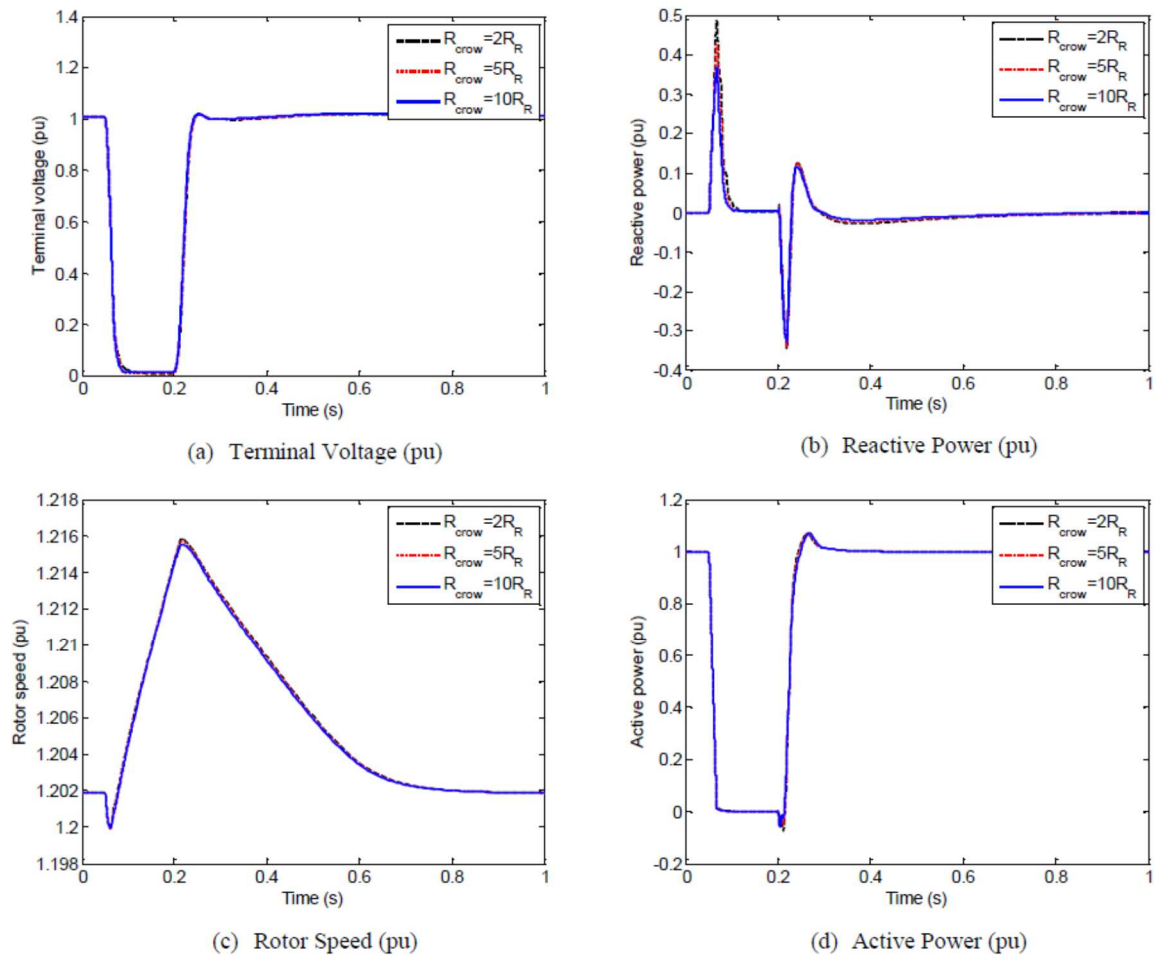
Näitena on vaadeldud kuue 1,5 MW kaksistoitega asünkroongeneraatoriga tuuleparki, mis on ühendatud läbi 20 kV liini võrku, millel on pingeks 110 kV. Lühis tekib esimese sekundil ja selle kestus on 150 ms. Lühise tekkimisel lühistatakse generaatori rootor ning rootorit toitev konverter lülitatakse võrgust välja. Lühise lõppedes jäetakse rootor lühistatuks veel 10 ms-ks ning peale seda ühendatakse rootori lühisti rootorist lahti ning konverter taasühendatakse võrguga [8].

Joonisel 6.19 on kujutatud generaatori rootori lühisvoolud lühisti erinevate takistuste korral.



Joonis 6.19. Kaksistoitega asünkroongeneraatori rootori voolud lühise korral [8].

Joonisel 6.20 on kujutatud kaksistoitega asünkroongeneraatori pinget, rootori kiiruse, aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse muutumiskõõverad lühise korral jaama trafo kõrgepingelattidel.



Joonis 6.20. Kaksistoitega tuulegeneraatori parameetrite muutumiskõõverad 150 ms kestva lühise korral jaama trafo kõrgepingelattidel [10].

6.3.5 Konverterid ja inverterid

Konvertereid kasutatakse muutuvkiirusega ajamitega generaatorite ühendamiseks elektrivõrguga. Konverter koosneb muutuvkiirusega generaatori poolsest alaldist ja võrgusagedusega voolu ja pinget genereerivast vaheldist e inverterist. Seega võrgu seisukohalt on oluline inverteri reaktsioon lühisele. Invertereid kasutatakse ka päikesejaamade ühendamiseks elektrivõrguga.

Rikke olukorras suudab inverter hoida voolu ja pinget ohutul tasemel ning genereerida vajalikul määral reaktiivvõimsust. Lühise olukorras suudab inverter hoida lühisvoolu tasemel, mis ei ületa nimivoolu enam kui 1,1...1,5 kordselt. Seega võib konverteriga tuulegeneraator

jääda võrguga ühendatuks ka mitmesuguste võrgu rikketalitluste korral ja toetada võrgu parameetreid sobivas suunas ka mitmesugustel võrgu rikketalitlustel. Konkreetset lühisvoolu väärtused sõltuvad nii võrgu jääkpingest, tuule tingimustest ning aktiiv- ja reaktiivvoolu sätetest normaaltalitusel enne lühist.

Siiski võtab konverteril lühise tuvastamine aega umbes 1..2 võrgusagedusliku pinge perioodi e seega ca 0,02...0,04 sekundit. Selle aja jooksul on lühisvool suhteliselt suur, kuid ei muutu ohtlikuks väga lühikese kestuse tõttu.

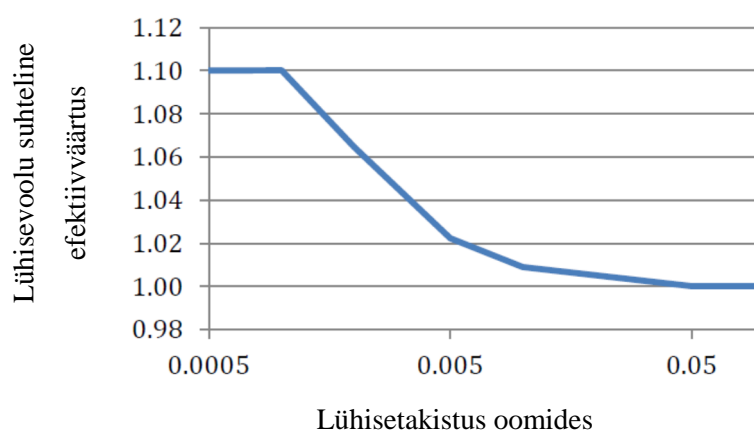
Seega koosneb konverteriga generaatori reaktsioon lühisele kahest perioodist:

- rikke tuvastamise periood
- periood pärast rikke tuvastamist

Rikke tuvastamise perioodil sõltub voolu genereerimine võrgu jääkpingest ja rikke eelsetest talitlustingimustest (aktiiv- ja reaktiivvõimsusest ning tuule kiirusest). Võimalikud on kõik voolu väärtused alates nullist kuni inverteri suurima koguvooluni.

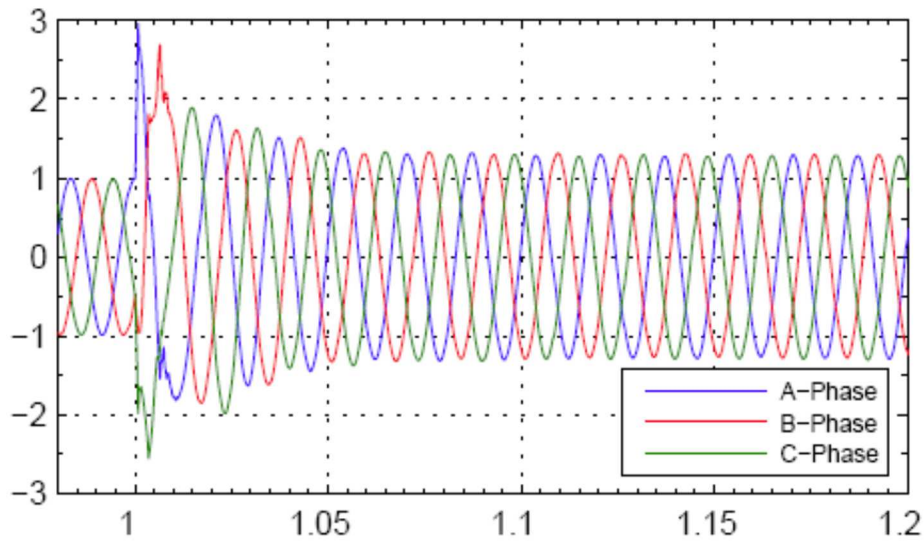
Teisel perioodil sõltub voolu genereerimine tuulegeneraatori pingelohu läbimise karakteristikust, jääkpingest ja tuule kiirusest. Ka sel juhul on võimalikud kõik voolu väärtused alates nullist kuni inverteri suurima koguvooluni. Seega võib võrku antav vool olla suurem esimesel perioodil ja väiksem teisel perioodil, aga ka vastupidi.

Lühisvoolu suurus sõltub ka lühisetakistusest. Lühisvoolu efektiivväärtuse suhtelist suurust on kujutatud joonisel 6.21 [1].

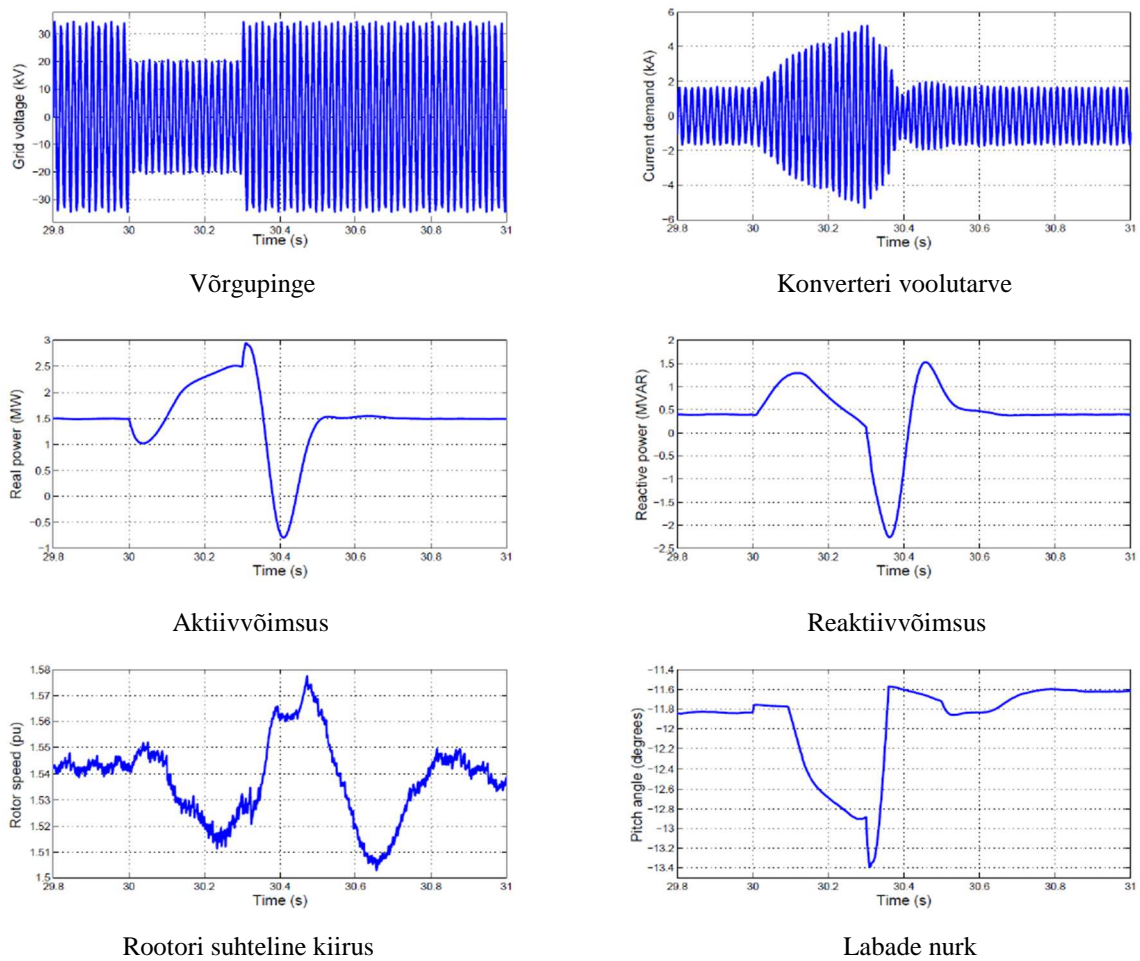


Joonis 6.21. Konverteriga tuulegeneraatori lühisevoolu efektiivväärtuse sõltuvus lühisetakistusest [1].

Joonisel 6.22 on näide konverteriga tuulegeneraatori lühisvoolust 3-faasilise lühise korral jaama trafo keskpingelattidel, mille puhul generaatori klemmidel on 20 % jääkpinge.



Joonis 6.22. Konverteriga tuulegeneraatori suhteline lühisvool 20 % jääkpinge korral [11].



Joonis 6.23. Konverteriga tuulegeneraatori parameetrid 60 % jääkpingega pingelohu läbimisel [12].

Konverteri sisemine juhtimisplakk reageerib ebanormaalsetele pingetele, vooludele ja sagedustele ning piiride ületamisel lahutab seadme kiiresti võrgust. Konverter kontrollib ka käivitamist ja sünkroonsust võrguga ühendamisel. Tänu elektroonikale on konverteri lahutusvõime kiirem kui mehaanilistel seadmetel.

Konverteri talitus sõltub oluliselt selle ehitusest ja sätestamisest.

Konverteri löökvoolu suurus on sünkroongeneraatori löökvooluga võrreldes 10...20 %, ulatudes kuni kolmekordse nimivooluni

Tabel 6.1. Erinevates teabeallikates antud lühisvoolu ja nimivoolu suhtetegurid konverteriga varustatud seadme poolt genereeritava lühisvoolu määramiseks.

Tavaliselt arvestatakse konverteriga generaatoritel lühisvoolu väärtuseks $1,2 \times I_{nimi}$

Lühise korral ei ole jõuelektroonikat sisaldav liitumisseadmeistik tavaliselt võimeline toitma võrku pikaajalise lühisvooluga.

Selle tõttu tuleb kaitseseadmed luua samadel põhimõtetel kui asünkroongeneraatori korral.

Tulevikus võib siiski olla võimalik, et kõikidelt jõuelektroonikaga varustatud väiketootjatelt nõutakse kaitse toimimiseks vajalikku lühisvoolu kestust.

Tulenevalt eelnevast võetakse jõuelektroonika vahendusel võrku ühendatud väiketootjat lühise olukorras arvesse vaid ülimööduva vooluga. Voolu suurus leitakse sel juhul jaama nimivõimsusele vastava voolu ja tabelis 6.1 toodud teguri korrutisena.

Tegelik jaama poolt võrku antav lühisvool sõltub alati konkreetsest jõuelektroonika seadmeist ja selle reguleerimissüsteemist, kuid praktiliselt asuvad oodatavad väärtused siiski tabelis 6.1 toodud piirides.

6.4 Hajatootjate automaatika- ja kaitseseadmed

6.4.1 Mikrotootmiseseadmed

Mikrotootmiseseadme kaitse ja nende tüüpilised sätted on esitatud tabelis 6.2.

Tabel 6.2. Mikrotootmiseseadme kaitsete tüüpilised sätted.

Kaitse liik	Suurim eraldusaeg	Rakendusväärtus
Ülepingekaitse	0,2 s	230V + 15 %
Alapingekaitse	1,5 s	230V – 15 %
Ülesageduskaitse	0,5 s	51,0 Hz
Alasageduskaitse	0,5 s	47,0 Hz
Võrgukaotuskaitse	0,15* s	

*Elektrilevi poolt nõutav suurim väärtus on 5 s.

Mikrotootmiseseade tuleb lahutada avalikust jaotusvõrgust seal esineva toitekatkestuse korral. Mikrotootmiseseade ei tohi sel juhul jääda tööle saarestunud avaliku jaotusvõrgu osa ainutoitjana.

Võrgukaotuskaitse peab katkestama mikrogeneraatori poolse toite avalikku jaotusvõrku jaotusvõrgu poolse toite kadumisel kuni normaalse toite taastumiseni.

Võrgukaotuskaitse peab lahutama võrgust tootmiseseadme(d) piisavalt kiiresti. Rakendusaeg peab võrduma normeeritud rakendusajaga olukorras kus $U \leq 0,5U_n$, seega olema 0,15 s.

Mikrogeneraatori sünkroniseerimine võrguga ja lühisejärgne tagasilülitamine peab olema täisautomaatne. Elektrilevi tehniliste tingimuste kohaselt võib mikrotootmiseseadme kaitse rakendumise järel tagasi lülitada jahul, kui võrgu sagedus ja pinge on püsinud alltoodud piirides vähemalt 60 sekundi jooksul:

sagedusvahemik: 47,5...50,05 Hz

pingevahemik: 0,85...1,1 U_n

Kui sama liitumispunkti taga on mitu generaatorit, peaks pärast lühist võrku tagasi lülitamine toimuma astmeliselt.

Astmeline sisselülitamine võib, näiteks, inverteritega tootmiseseadmete korral toimuda nii, et pärast normaaltalitluse taastumist sünkroniseeritakse seadmed võrku juhusliku lisaviitega 0...15 sekundit. Sellega on sünkroniseerimise koguaeg 60...75 sekundit.

6.4.2 Madalpingevõrku ühendatud pisi- ja väiketootmisseadmed

Võrgu toetamine

Tootmisseade peab toetama madalpingevõrgu pinget hoidmist lubatavates piirides ja reageerima pinget aeglasele muutustele. Võrgu dünaamilist toetamist (pingelohud, toitekatkestused) madalpingevõrgus ei eeldata.

Aktiivvõimsuse edastamine võrku

Tootmisseade lülitatakse välja ja aktiivvõimsuse edastamine võrku katkeb järgmistel juhtumitel:

- kui ilmneb potentsiaalne oht võrgu turvalisele talitlusele;
- kui võrgus tekib "pudelikaal" või võrguelementide ülekoormus;
- kui tekib saartalitluse oht;
- kui tekib oht võrgu staatilisele või dünaamilisele stabiilsusele;
- kui tekib süsteemi ohustav sageduse tõus;
- remondivajaduse ja/või võrgu konstruktsiooni muutmise korral.

Reaktiivvõimsus

Üle 11 kVA tootmisseade peab normaaltalitlustingimustel pingevahemikus $U_n \pm 10\%$ alates 20% väljund-nimiaktiivvõimsusest olema võimeline töötama võimsusteguriga $\cos\varphi = 0,90$ induktiivne kuni 0,90 mahtuvuslik.

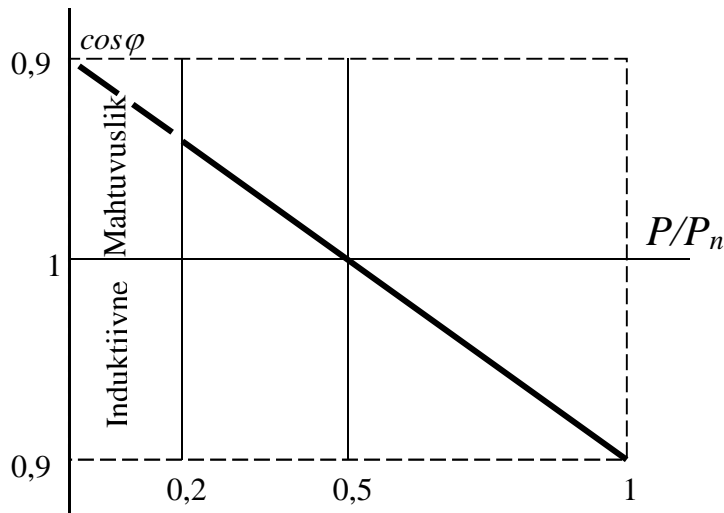
Toodud piirides konkreetse $\cos\varphi$ väärtuse annab ette jaotusvõrguettevõtte vastavalt konkreetsetele tingimustele.

Tootmisseadmed võivad töötada kas

- etteantud kindla väärtusega võimsusteguriga $\cos\varphi$
- aktiivvõimsusest sõltuva võimsusteguriga vastavalt $\cos\varphi(P)$ karakteristikule

Kui jaotusvõrguettevõtte on $\cos\varphi(P)$ karakteristikute ette andnud, peab automaatregulaator olema suuteline reguleerima vajalikku $\cos\varphi$ väärtust 10 sekundi jooksul.

Standardne $\cos\varphi(P)$ karakteristik on joonisel 6.24.



Joonis 6.24. Standardne $\cos \varphi (P)$ karakteristik.

Kaitseadmed

Kaitsena kasutatakse üldjuhul liitumispunktis toimivat tsentraalset võrgu- ja tootmiseadmekaitset, milles on olemas kõik vajalikud kaitsefunktsioonid. Tsentraalne kaitse on tootmiseadme(te)st eraldiseisev kaitse süsteemide kogum.

Sõltuvalt tootja võimsusest S_{EJ} :

- kui $S_{EJ} > 30$ kVA; tuleb kasutada tsentraalset võrgu ja tootmiseadme kaitset liitumispunktis.
- kui $S_{EJ} \leq 30$ kVA, võib kasutada nii tsentraalset võrgu ja tootmiseadme kaitset liitumispunktis kui ka tootmiseadmega integreeritud kaitset.

Tüüpilised kaitselahutusfunktsioonid on:

- ülekoormuskaitse;
- liigvoolukaitse;
- alapingekaitse $U <$
- alapingekaitse $U \ll$
- ülepingekaitse $U >$
- ülepingekaitse $U \gg$
- alasageduskaitse $f <$
- ülesageduskaitse $f >$
- võrgukaotuskaitse
- pingeasümmeetriakaitse
- elektrituulikule paigaldatakse lisaks liigtuulekaitse.

6.4.3 Keskpingevõrku ühendatud väiketootmisseedmed

Tootmisseedmetele on nõutavad järgmised kaitseseadmed:

- ülepingekaitse $U_{>>}$
- alapingekaitse $U_{<}$ ja $U_{<<}$
- ülesageduskaitse $f_{>}$
- alasageduskaitse $f_{<}$

Need kaitselahutusseedmed peavad olema ühendatud kas trafo alam- või ülempingepoolele. Keskpingevõrku ühendatud tootmisseedmete kaitse tüüpilised sätteväärtused on koondatud tabelitesse 6.4 ja 6.5.

Tabel 6.4. Piirkonnaalajaama keskpingelattidele ühendatud tootmisseedmete kaitse tüüpilised sätted.

* nende väärtuste korral tuleb võrgu dünaamilise toetamise nõuded lugeda täidetuks.

** rakendusviite määrab võrguettevõte. Tavaliselt üks neljandik keskpinge võrku ühendatud tootmiseseadmetest tuleb lahutada võrgust pärast 1,5 s ja ülejäänud neljandikud vastavalt 1,8 s, 2,1 s ja 2,4 s pärast.

Arvestades tootmiseseadme trafode ühendusseadmete impedantse, on tootmiseseadmete alapingekaitse $U_{<<}$ sätted võetud lihtsustatult 45 % alampingepoolele taandatud lepingulisest pingest.

Vastavalt võrgueeskirjale peavad häiringute olukorras primaarreguleerimises osalema kõik üle 1 MW tootmiseseadmed.

Võrgu dünaamiline toetamine

Võrgu dünaamiline toetamine tähendab põhiliselt pinget juhtimist võimalike pingelohkude korral, et vältida tootmiseseadmete ettekavatsematut võrgust lahutamist ja ühes sellega võrgu lagunemist.

Võrgu dünaamiliseks toetamiseks peavad tootmiseseadmed olema tehniliselt võimelised alljärgnevalt:

- mitte võrgust lahutama võrgus esinevate lühiajaliste häiringute korral;
- toetama häiringute ajal võrgus võrgu pinget, edastades võrku reaktiivvõimsust;
- pärast häiringu kõrvaldamist mitte võtma võrgust rohkem induktiivset reaktiivvõimsust kui enne häiringu tekkimist.

Need nõudmised kehtivad kõigi lühiste (ühefaasiliste, kahefaasiliste ja kolmefaasiliste) korral.

Reaktiivvõimsuse genereerimine

Tootmiseseadme talitlemiseks vajalik reaktiivvõimsus toodetakse kohapeal. Võrku antav või võrgust võetav reaktiivvõimsus peab olema minimaalne. Lubatud kõikumine on $\pm 10\%$ tootmiseseadme nimiaktiivvõimsusest

Suvalise talitluse ja aktiivvõimsuse korral peab saama reguleerida tootmiseseadme reaktiivvõimsust nii, et võimsustegur oleks liitumispunktis piires $\cos\varphi = 0,95$ induktiivset kuni $\cos\varphi = 0,95$ mahtvuslikku. Ülaltoodud vahemikust väljuvaid väärtusi tuleb reguleerida lepinguga.

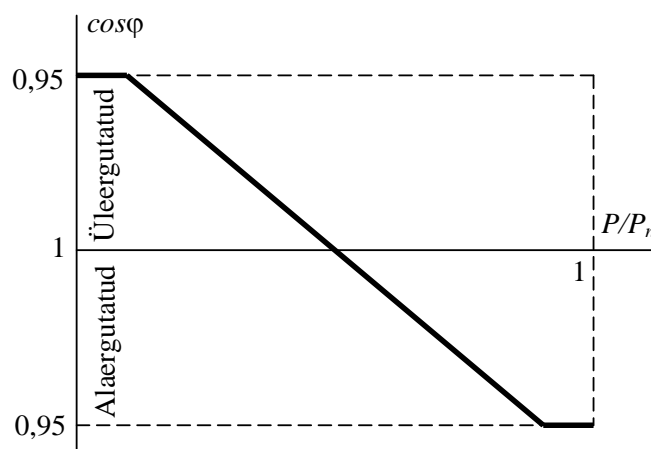
Sätteväärtuseks on tootmiseseadmetele nimivõimsusega alla 1 MW fikseeritud võimsustegur $\cos\varphi$ või reaktiivvõimsus $Mvar$.

Tootmiseadmetele nimivõimsusega 1 MW või enam võib sätteks olla ka aktiivvõimsusest sõltuv võimsustegur $\cos\varphi(P)$ või) reaktiivvõimsuse karakteristik $Q(U)$.

Kui vastav karakteristik on võrguettevõtte poolt kindlaks määratud, peab sellele vastav suvaline reaktiivvõimsuse väärtus esinema automaatselt:

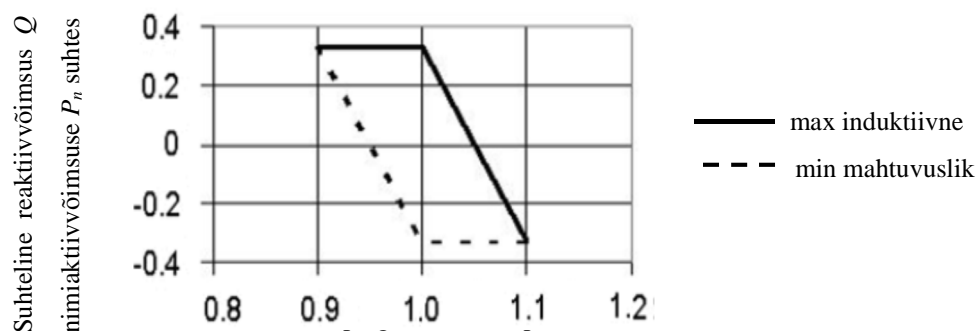
- 10 sekundi jooksul $\cos\varphi(P)$ karakteristikute korral ja
- 10 sekundi kuni 1 minuti jooksul $Q(U)$ karakteristikute korral (aja määrab võrguettevõtte).

Vastavad karakteristikud on joonistel 6.25 ja 6.26.



Joonis 6.25. Näide $\cos\varphi(P)$ karakteristikust.

Suhtelise reaktiivvõimsuse karakteristik sõltuvalt pingest kui $\cos\varphi = 0,95$ induktiivsest kuni mahtuvuslikuni on joonisel 6.26



Joonis 6.26. Näide $Q(U)$ karakteristikust.

Igale konkreetsele tootmiseadmele valib võrguettevõtte nii sätestamise meetoodika kui ka soovitud väärtused individuaalselt.

Kehtiv võrgueeskiri kohaldab elektrituuliku ja tuulepargi reaktiivvõimsuse reguleerimise suhtes järgmised lisanõuded [4]:

- võrguhäire korral peab elektrivõrgu dispetšeril olema võimalik reguleerida üle 1MW nimiaktiivvõimsusega elektrituuliku või tuulepargi väljastatavat reaktiivvõimsust kogu tehniliselt võimaliku reaktiivvõimsuse reservi ulatuses. Reaktiivvõimsuse automaatne reguleerimine võib olla vajalik, kui liitunud tuulepargi, elektrituuliku või tuuleparki võrguga ühendavate liinide sisse- või väljalülitamine põhjustab tarbijatele lubamatult suuri pinge kõikumisi;
- reaktiivvõimsuse reguleerimine toimub pinge järgi, mida mõõdetakse elektrituuliku kas ülempinge või alampinge poolel;
- väljastatavat reaktiivvõimsust reguleeritakse ühe kesksignaali abil;
- reguleerimise sätteid ja algoritme muudetakse kaugjuhtimise teel.

Elektrisüsteemi talitluste analüüsil tuleb vajaduse korral nende suurte hajatootmiseseadmetega arvestada eraldi.

Kesk- ja madalpingevõrku ühendatud hajatootjate mõju arvestamiseks agregeeritud koormuste pinge ja sageduskarakteristikutele on kaks võimalust:

- luua adekvaatsed aktiivse mikrovõrgu PSCAD mudelid erinevat tüüpi hajatootmiseseadmete ja koormuste koosmõju uurimiseks;
- korraldada hajatootmiseseadmeid sisaldavas jaotusvõrgu osas aktiivseid katseid.

Mõlemad võimalused vajavad edasit uurimist.

6.6 Kokkuvõte

Käesolevas peatükis on käsitletud hajatootjate võrguga ühendamise viise ja erinevate hajatootmisseadmete omadusi. Vaadeldud on eri tüüpi hajatootmisseadmete rektsioone võrgus esinevatele lühistele ja pingelohkude läbimise võimet. Esitatud on hajatootmisseadmete releekaitse ja automaatika põhisätteid. Uuringu tulemused on kasutatavad hajatootmisseadmete PSCAD mudelites adekvaatsemate tulemuste saamiseks. Analüüsitud on Eesti elektrisüsteemi ühendatud hajatootjaid ja leitud, et 110 kV sõlmedesse agregeeritud koormustele mõjuvad kesk- ja madalpingevõrku ühendatud hajatootmisseadmed. Sealjuures võib mikrotootmisseadmetega mitte arvestada. Edasisel hajatootjate mõju uurimisel tuleks luua ja kasutada adekvaatseid aktiivse mikrovõrgu PSCAD mudeleid ja/või korraldada hajatootjaid sisaldavates jaotusvõrgu osades aktiivseid katseid.

6.7 Kirjandus

- [1] Muljadi, E., Gevorgian, V., Samaan, N., Li, J., Pasupulati, S. Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Types. IEEE Power and Energy Society 2010 General Meeting, 10 pp.
- [2] Electrical Technology. How to omake a solar cell photovotlaic cell. <http://www.electricaltechnology.org/2015/06/how-to-make-a-solar-cell-photovoltaic-cell.html>
- [3] Maandus. Millist päikeseelektrisüsteemi valida? <http://maandus.com/pvsysteemid.html>.
- [4] Eesti Vabariigi Valitsus määrus – Võrgueeskiri. (Vastu võetud 26.06.2003, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 19.02.2016). Elektrooniline Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412> (01.07.2016)
- [5] Aunapuu, V. Koormuse mõju sünkroongeneraatori talitlusele. Magistritöö: Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2016, 109 lk.
- [6] UVIG. Wind Plants Performance Characterization. http://www.uwig.org:8080/index.php?title=Wind_Plants_Performance_Characterization
- [7] IEEE Power and Energy Society Joint Working Group. Fault Current Contributions from Wind Plants. A report to the Transmission & Distribution Committee, Electric Machinery Committee, Power System Relaying Committee of the IEEE Power and

Energy. Society. <http://www.pes-psrc.org/Reports/Fault%20Current%20Contributions%20from%20Wind%20Plants.pdf>

- [8] Noureldeen, O. Behavior of DFIG Wind Turbines with Crowbar. *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS* Vol: 12 No: 03, 2012, pgs. 32-37.
- [9] Oliveira, F., Amorim, A., Encarnação, L., Fardin, J., Orlando, M., Silva, S., Simonetti, D. Enhancing LVRT of DFIG by Using a Superconducting Current Limiter on Rotor Circuit. *Energies* 2016, 9(1), 16.
- [10] Salles, M., Hameyer, K., Cardoso, J., Grilo, A., Rahmann, C. Crowbar System in Doubly Fed Induction Wind Generators. *Energies* 2010, 3, pgs. 738-753.
- [11] English, B., Gursoy, E., Walling, R. Current Contributions from Type 3 and Type 4 Wind Turbine. 19 slides on GE Energy presentation.
- [12] UVIG. Modeling of Type 4 Wind Turbine Generators. http://www.uwig.org:8080/index.php?title=Modeling_of_Type_4_Wind_Turbine_Generators

7. Koormuskarakteristikute mõõtmispõhine määramine

Käesolevas peatükis käsitletakse koormuskarakteristikute määramiseks kasutatavatele mõõteandmetele esitatavaid nõudmisi, Eesti elektrivõrgus kasutatavate mõõteseadmete tehnilist võimekust, olemasolevaid mõõteandmete andmebaase ja karakteristikute mõõtmispõhiseks määramiseks kasutatavaid meetodeid ehk mõõteandmetepõhise koormuskarakteristikute määramise võimalusi Eesti kontekstis.

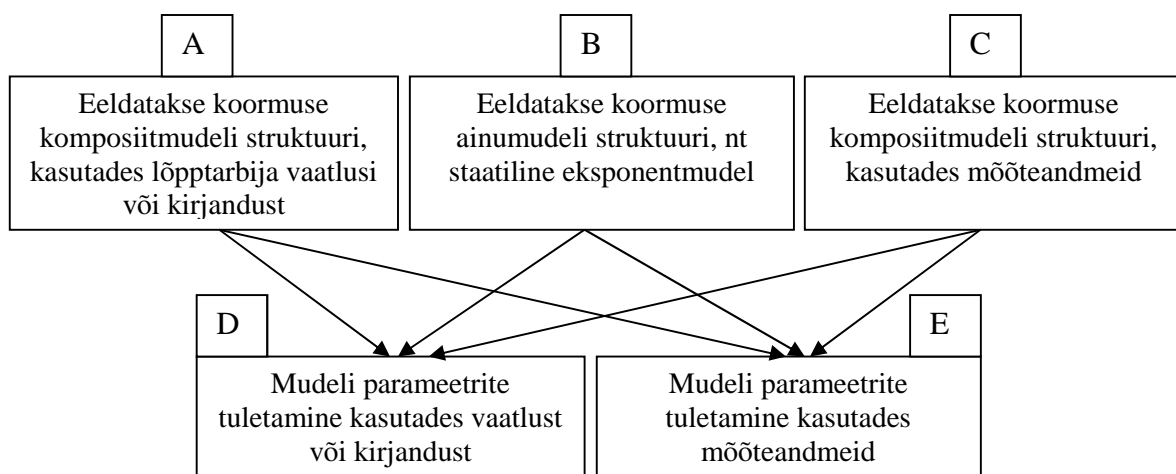
Selleks, et uurida koormuste pingetundlikkust on tarvilik mõõta olukordades kui pinge muutub ning koormusel on piisavalt aega pingehäiringule reageerimiseks. Pikemalt käsitletakse mõõtmiseks sobivaid pingehäiringuid, tarvilikke tingimusi ning häiringute tekitamise võimalusi alapeatükis 7.2.

Mõõtmiste teostamisel on üheks küsimuseks mõõteseadmetele esitatavad tehnilised nõuded, mis määravad kogutavate mõõteandmete omadused. Koormuskarakteristikute parameetrite mõõtmiseks sobivaid mõõteandmeid ning mõõteseadmetele esitatavaid nõudmisi kirjeldatakse alapeatükkides 7.3. Ühte mõõtepunktide valiku metoodikat on käsitletud alapeatükis 7.4 ning pidevmõõtmiste andmete kasutatavust peatükis 7.5.

Koormuskarakteristikute esmaseks määramiseks välja töötatud katsekava on kirjeldatud alapeatükis 7.6 ning ühte mõõteandmete töötlemise näidet alapeatükis 7.7

7.1 Mõõtmiste kasutamine koormuskarakteristikute määramiseks

Projekti esimeses etapis [1] tuvastati, et koormuskarakteristikute määramisel on kaks põhietappi, mida on kujutatud joonisel 7.1: mudeli struktuuri valik (A, B ja C) ja parameetrite väärtuste tuletamine (D ja E).



Joonis 7.1. Koormuskarakteristikute mudelite koostamise üldskeem [1][2].

Mudeli struktuuri valikuks on võimalik kasutada lõpptarbivate vaatlusi (A), kirjandust (A), eeldamist (B) ja mõõteandmeid (C) ning võimalik on valida ainumudeli ja komposiitmudeli struktuuri vahel. Esmase lõpptarbivate vaatlus- ja mõõteandmete kogumise käigus selgus, et Elektrilevi AS jagatava teabe põhjal on võimalik tuvastada koormusklasside osakaalud koormussõlmedes, 1 kuu pikkuse mõõteintervalliga. Teisi kasutatavaid mõõteandmeid esmaste päringutega ei saadud. Koormusklasside koosseisu kuuluvate koormuskomponentide osakaalude ning koormusmudeli võimaliku struktuuri määramiseks kasutati peatükis 2 kirjandusepõhist lähenemist. Kirjandusallikate läbitöötamisel tuvastati, et allikate lõikes esineb märgatavaid erinevusi kasutatud mudeli struktuuri ja parameetrite väärtuste osas. Samuti on peatükis 2 kasutatud meetodika puuduseks laialdane kirjandusallikate kasutamine ning vähene mõõtmiste ja vaatluste osakaal. Välja pakutud koormusmudeli struktuuride hulgast sobivaima valimiseks on võimalik koguda täiendavaid mõõteandmeid, millele tuginedes oleks võimalik määrata võrreldavatele koormusmodelitele vastavad parameetrite komplektid, piiratud hulgale sõlmedele, ning nende võrdleva modelleerimisega sobivaim mudeli struktuur valida.

Koormusmudeli parameetrite väärtuste määramine on võimalik lähtudes kirjandusest ja/või mõõteandmetest. Kirjandusele tuginemisel kerkib taaskord esile väärtuste usaldatavuse küsimus. Nimelt kirjeldavad kirjandusallikad teistes riikides kasutatud koormusmudeleid, mis ei pruugi esindada Eesti elektrivõrgu koormuste omadusi. Üheks mudeli parameetrite sobivuse hindamise võimaluseks on võrdluskarakteristikute mõõtmine ning seejärel võrdlemine kirjandusest pärinevate väärtustega. Alternatiivselt on sobivate mõõteandmete olemasolul võimalik määrata koormuskarakteristikud tuginedes mõõteandmetele ning kasutada kirjanduses esitatud karakteristikuid mõõteandmete valideerimiseks. Mõõteandmetest lähtumine karakteristikute parameetrite väärtuste määramisel eeldab sobivate andmete olemasolu või koormuskarakteristikute määratlemiseks piisavat mõõtevõimekust. Käesoleva projekti puhul on eeldatavasti sobivaim lahendus kirjanduses esitatud väärtuste võrdlemine koormussõlmedes mõõdetud parameetrite väärtustega ning lähtuvalt tulemustest kirjanduses esitatud väärtuste abil mõõtmata koormussõlmede koormuskarakteristikute parameetrite väärtuste tuletamine.

Mõõteandmete kogumiseks on üldjoontes kaks meetodikat: passiivne ja aktiivne. Passiivse meetodika kasutamine põhineb pidevseirel: mõõteseadmed paigaldatakse mõõtepunktidesse, seadistatakse mõõtmise aktiveerumise lävi ning salvestatakse sobivaid pingehäiringuid pikema aja vältel. Aktiivse meetodika puhul tekitatakse koormussõlmes sobivad pinge-

häiringud ning mõõdetakse koormusvastust või mõõdetakse tüüptarbimisseadmeid laboris, kus on võimalik tekitada suuremaid pingehäiringuid. [2]

7.2 Mõõdetavad pingesündmused

Pinge mõju koormusele ilmneb olukordades kui pinge muutub ehk toimub pingehäiring ning koormusel on piisavalt aega pingehäiringule reageerida ehk häiringu pikkus on piisav koormuse mõjutamiseks. Seejuures peab pingehäiringu ainsaks mõjuks koormusele olema pinge muutus koormusel, teiste mõjudega sündmused on tarvilik enne koormusmodeli parameetrite estimateerimist mõõteandmete valimist eemaldada või need mõjud korrektselt arvesse võtta.

7.2.1 Pingekarakteristikute määramiseks sobivad pingehäiringud

Võrgu pidevmõõtmiste kasutamist koormuskarakteristikute määramiseks on varem põhjalikult uurinud EPRI (*Electric Power Research Institute*), kelle põhjaliku töö tulemus [3] valiti ka CIGRE töögrupi poolt [2] mõõtmistepõhise koormuskarakteristiku määramise näiteks. EPRI teostatud uurimistöö käigus tuvastati, et koormuskarakteristiku määramiseks sobiliku pingehäiringu/pingesündmuse iseloomustavateks omadusteks on:

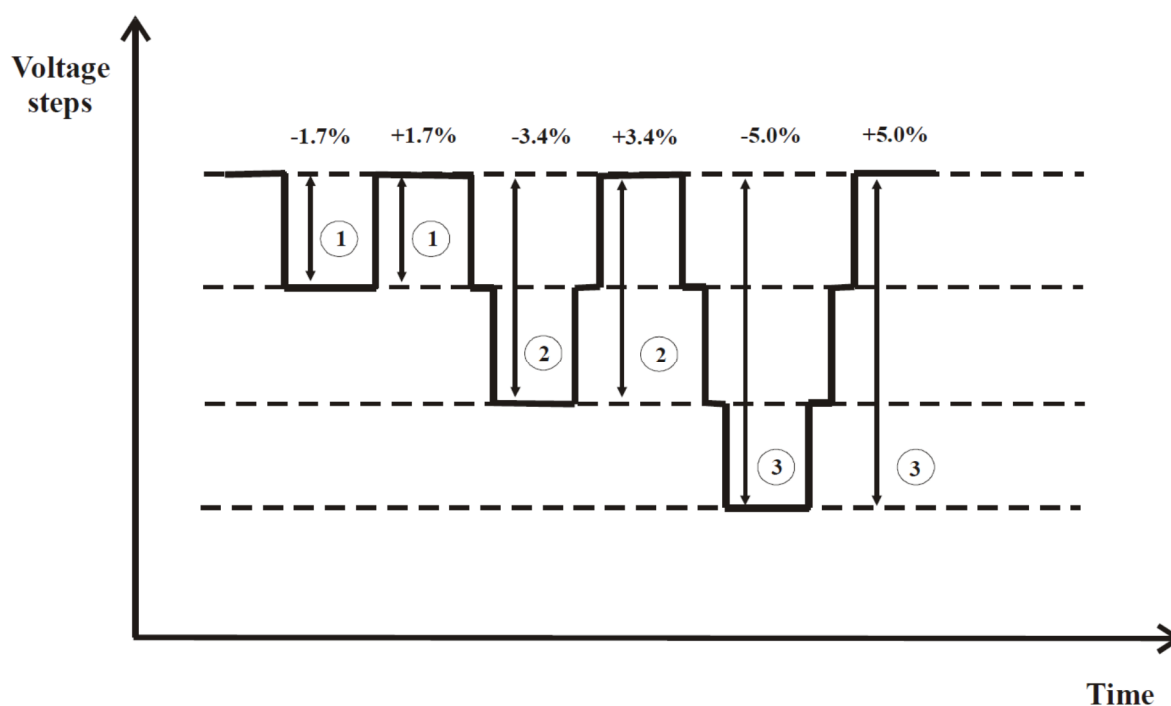
- Sobilikumad on kolmefaasilised häiringud, mille faasipingete/faasivoolude asümmeetria kuni 10% on aktsepteeritav. Asümmeetriliste lühiste andmete kasutamisel on oluline arvestada koormuse olemust, näiteks koormuse eeldatavat jaotust faaside vahel.
- Sündmuse toimumise koht peaks asuma uuritavast koormusest kõrgemal pingestmel või naaberfiidris. Mõõdetavas fiidris toimuvate sündmuste korral võib toimuda osade tarbimisseadmete või fiidriosade lahutamine, mis põhjustaks probleeme pingekarakteristiku parameetrite estimateerimisel.
- Pingesündmus ei tohiks olla katkestus ehk mõõdetavas sõlmes peaks säilima pinge üle 0 V.
- Peaks esinema piisavalt suur pingelang (10% või enam), et dünaamiline koormusvastus ilmneks ja oleks mõõdetav. Sündmuse järel võiks pinge taastuda sündmuseeelse pingeni, et oleks võimalik tuvastada häiringu põhjustatud koormuse lahutamist.
- Sündmuse kestvus peaks olema vähemalt 4 tsüklit ehk 80 ms, et oleks võimalik salvestada piisavalt andmeid.

- Tuleks salvestada vähemalt mõned tsüklid sündmuseelselt, kui mõõteseade võimaldab, siis mitmed sekundid.

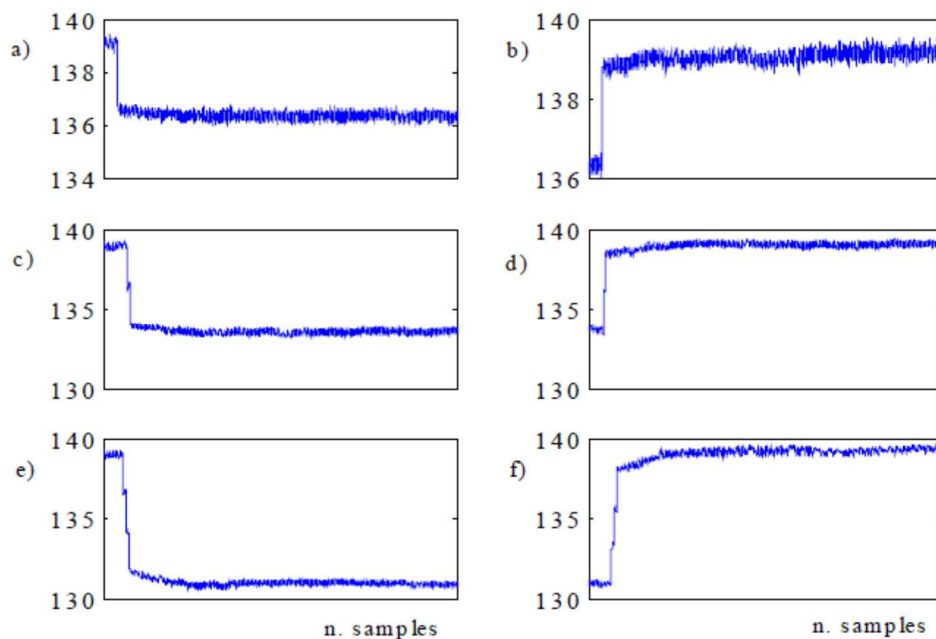
7.2.2 Sobilike pingehäiringute tekitamise võimalused

Pingehäiringute tekitamise võimalustena on aruandes [2] nimetatud trafo astmelüliti asendi muutmist, põikreaktorireaktorite ja põikkondensaatorite lülitusi ning rööptaliltuses trafo(de) lahutamist. Piiravaks teguriks on pingehäiringu mõju minimeerimine jaotusvõrkude talitlusele, mis tähendab praktikas väikeste pingehäiringutega piirdumist ja seeläbi võimaldab koormuste pingekarakteristikuid ainult piiratud pingevahemikus uurida. Suuremate häiringute mõju tarbimisseadmetele ning koormustele on võimalik uurida laboratoorsete katsete käigus või pidevmõõtmistega ehk võrgus loomulikult esinevate pingehäiringute mõõtmisega.

Trafo astmelülite asendi muutmise abil on võimalik tekitada pingelangust ja pingetõusu, mille muutumise kiirus vastab astmelüliti lülituskiirusele. Seda võimalust kasutati pingemuutuste tekitamiseks lõputöodes [12] ja [13], kus lülitusi teostati kolme astmelüliti asendi ulatuses lähtudes joonisel 7.2 esitatud graafikust, trafo astmelülite lülitamisega saavutatud pingemuutuste näited on esitatud joonisel 7.3.

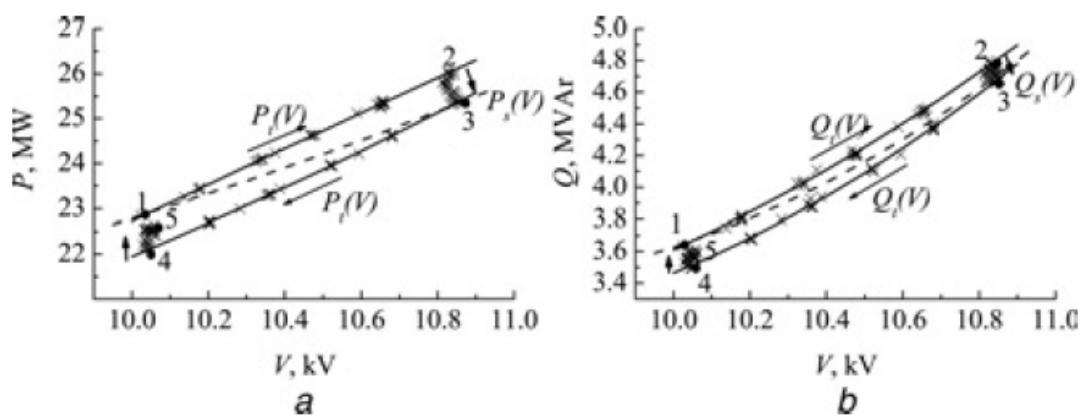


Joonis 7.2. Pingehäiringute tekitamine kasutades trafo astmelülite lülitusi [12].



Joonis 7.3. Trafo astmelülite lülitamisega esile kutsutud pingemuutused a) $-1,7\%$, b) $+1,7\%$, c) $-3,4\%$, d) $+3,4\%$, e) -5% ja f) $+5\%$. X-teljel aeg; Y-teljel pinge, kV [12].

Trafo astmelülite lülitusi kasutati samuti artiklis [6], kus tuvastati, et tüüpiline koormuse siirdeprotsess kulgeb joonisel 7.4 kujutatud moel. Mõõtepunktid on joonisel märgistatud X-märkidega. Punkt 1 vastab normaalalatlusele enne pinge tõstmist. Sirged $P_t(V)$ ja $Q_t(V)$ kirjeldavad koormuse muutust siirdeprotsessi vältel.

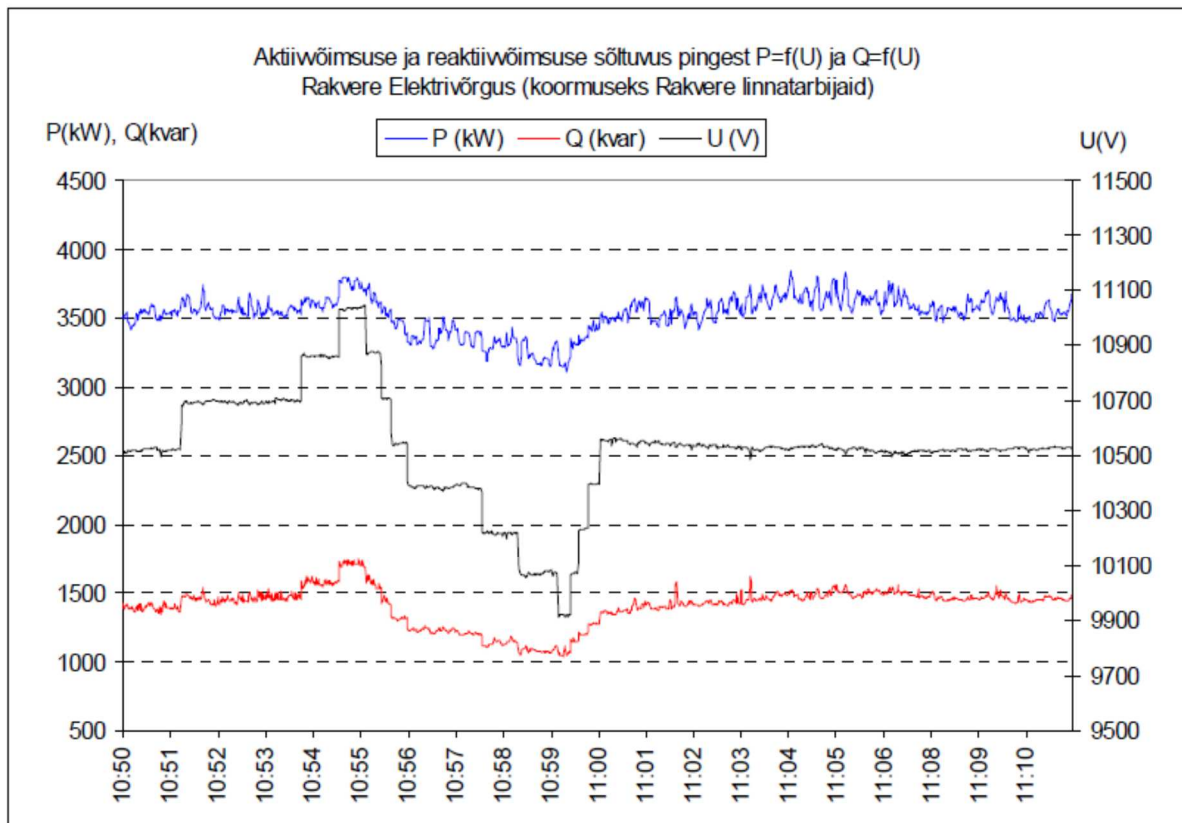


Joonis 7.4. Aktiiv ja reaktiivvõimsuse muutused keskpingevõrgus. a) aktiivvõimsus b) reaktiivvõimsus [6].

Punkt 2 on ülemineku punkt pinge tõstmiselt pinge langetamisele. Punkt 2 on küllaltki ebastabiilne punkt ja vastab võimsuserinevustele tootmise ja tarbimise vahel, mis siirdeprotsessi käigus on tekkinud. Seetõttu, enne pinge langetamist saavutab koormus uue

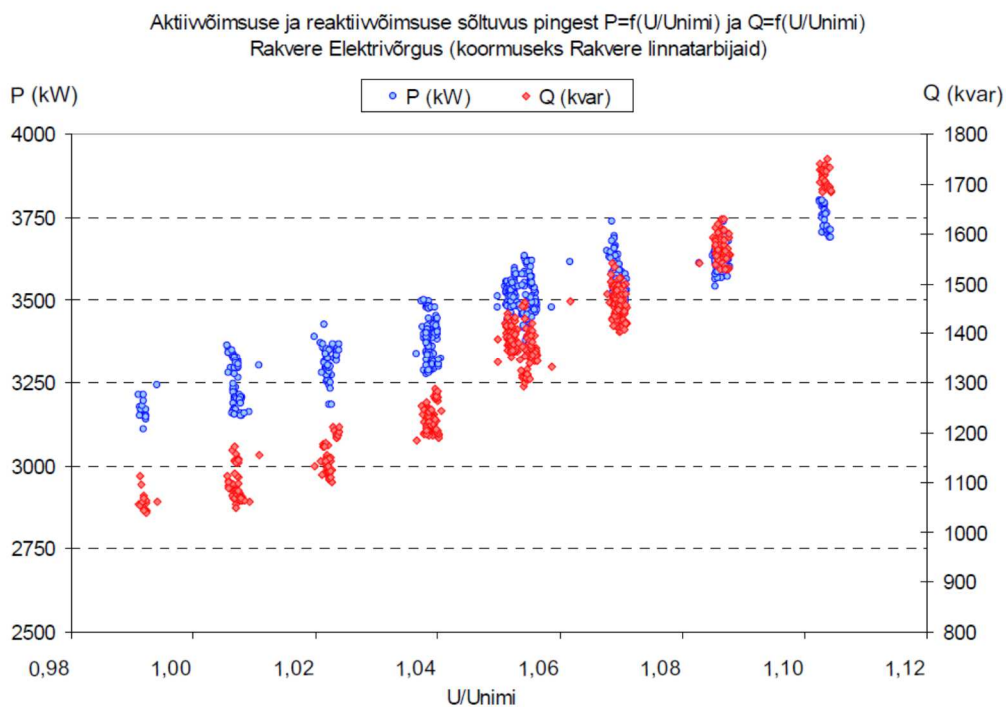
stabiilse tööpunkti punktis 3. Sama seaduspära kordub pinget langetamisel, kus punkti 4 läbimisel jõutakse stabiilsesse tööpunkti, punkti 5. [6]

Eesti oludes on trafo astmelülitit kasutatud staatiliste pingekarakteristikute uurimiseks doktoritöös [14], kus mõõtmisi teostati Rakveres. Katsete teostamiseks kasutati 110/10 kV trafo astmelüliteid, langetades pinget alla algpinge ja üle algpinge. Mõõdetud pinged, aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse muutused on kujutatud joonisel 7.5. Mõõtmiste teostamisel mõõdeti pinget, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse 1 sekundi keskvaartusi.

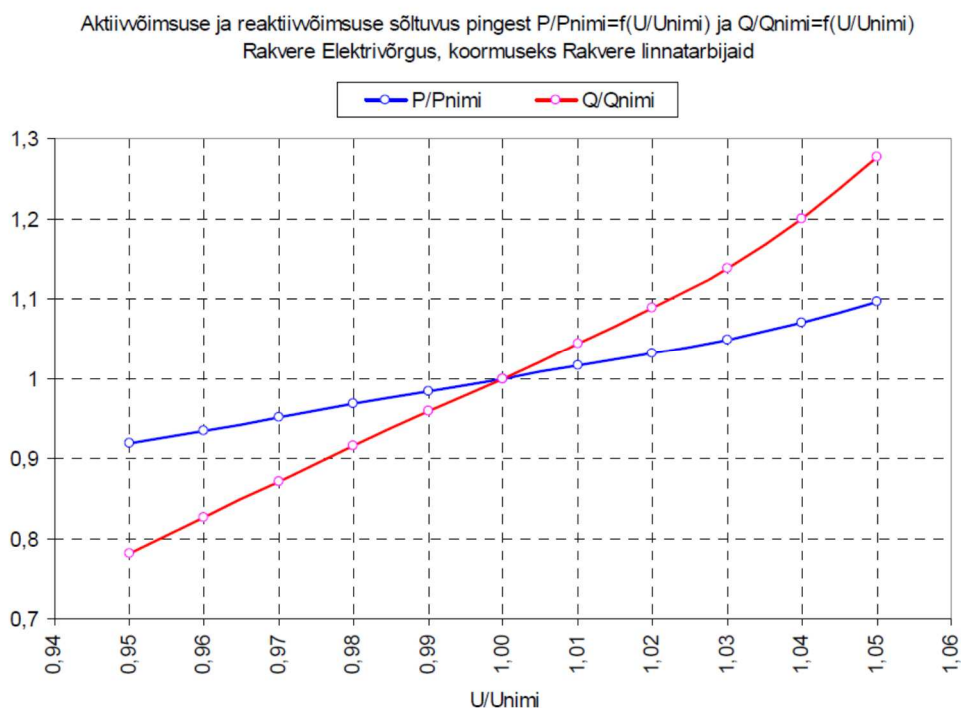


Joonis 7.5. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurite määramise katse mõõtetulemused, 1 sekundi keskvaartused [14].

Mõõdetud tulemuste kujutamisel pinget-võimsuse teljestikus saadi tulemuseks joonis 7.6 ning võimsuse normeerimise ning andmetöötluse järel tuvastati joonisel 7.7 kujutatud karakteristikud.



Joonis 7.6. Segakoormuse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse määramisel [14].



Joonis 7.7. Segakoormuse suhtelise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvus suhtelise pingeteljel [14].

Alternatiivselt trafo astmelüliti kasutamisele on võimalik kasutada paralleeltöös trafo väljalülitamist, mille tekitatav pingehäiring on lähedasem ühikhüppele. [2]

Samuti on võimalik kasutada staatilisi reaktiivvõimsuse kompensatoreid väikeste pingehäiringute (± 0.01 suhtühikut sagedusega 20 Hz) genereerimiseks ning tulemusi faasimõõteseadmetega mõõta [5].

7.3 Mõõtmisteks kasutatavad mõõteseadmed

7.3.1 Mõõdetavad suurused

Selleks, et mõõta pingekarakteristikuid ja sageduskarakteristikuid, nii staatilisi kui ka dünaamilisi, soovib EPRI [3] mõõta

- pinge ja voolu efektiivväärtust
- aktiiv- ja reaktiivvõimsust
- põhisagedust

CIGRE aruanne [2] soovib mõõta ajatempliga faasipingeid ja faasivoole ehk faasipingete ja -voolude hetkväärtusi.

Faasipingete ja -voolude hetkväärtuste või faasipinge ja faasivoolu efektiivväärtuste ning faasinurga abil on võimalik aktiiv- ja reaktiivvõimsuse väärtus arvutada. Näiteks kolme faasi pingete ja kahe väljundfiidri voolude efektiivväärtuste ja faasinurkade alusel saab aktiiv- ja reaktiivvõimsuse arvutamiseks kasutada CIGRE aruandes [2] esitatud valemeid, mis on esitatud järgnevalt.

7.3.2 Diskreetimissamm ja mõõteperiood

Diskreetimissamm

EPRI aruande [3] hinnangul võiks pidevmõõtmiste jaoks optimaalne mõõtesagedus olla vahemikus 10...50 Hz ja sündmuste mõõtmiseks 16 kuni 512 lugemit tsükliks (*samples/cycle*).

CIGRE aruandes [2] on esitatud kokkuvõttev tabel, Tabel 7.1, mis iseloomustab diskreetimissammu ja kasutatava koormusmudeli parameetrite usaldatavause vahelist seost.

Võrreldes tabelis 7.1 esitatud väärtusi EPRI soovitustega, ilmneb, et EPRI soovitatatud sündmuste mõõtmiseks kasutatav diskreetimissamm jääb kuni 1 ms piiresse (elektrivõrgu sagedusel vastab 16 lugemit tsüklis mõõtmine umbes 1 ms suurust diskreetimissammu). Sellise diskreetimissammuga on CIGRE esitatud tabeli põhjal võimalik määrata dünaamilised koormuskarakteristikud (ZIP + as. mootor) kõrge usaldatavusega. EPRI poolt pidevmõõtmisteks soovitatud mõõtesageduse 10 kuni 50 Hz korral on diskreetimissammuks 20 kuni 100 ms, mis vastab kuni 100 ms diskreetimissammule tabelis 7.1. Sellise diskreetimissammuga on võimalik kõrge usaldatavusega määrata sagedus- ja pingestabiilsuse modelleerimiseks sobiliku ZIP mudeli parameetrid, kuid dünaamilise stabiilsuse uuringuteks koostatava ZIP mudeli usaldatavus jääb madalaks.

Mõõteperiood

Elektrisüsteemi pikaajalise dünaamika simulatsioonide (pikaajaline pingestabiilsus) jaoks sobiva mudeli koostamiseks on tarvilik kasutada pikemaid mõõteperioode, mitu minutit, et saada teavet madalamatel pingetasemetel paiknevate trafo astmelülitite ja pingeregulaatorite mõjust [2].

Pidevmõõtmiste eesmärgiks on pingetaseme muutuste (aeglaste pingemuutuste) mõju määramine koormustele. Sündmuste mõõtmisel kasutatakse aktiveerimiseks pinget, voolu või

sageduse muutust. Andmete salvestamist jätkatakse 10...20 sekundit pärast pinge taastumist sündmuseäärsele tasemele [3].

Doktoritöös [13] on soovitatud staatiliste karakteristikute määramiseks 2.5...3 koormuse ajakonstandi pikkust ooteaega. Võttes arvesse allikas [13] määratud ajakonstantide suurusjärku 50...300 sekundit, võiks sobiv ooteaeg olla 125...900 sekundit. Allikas [6] mõõdetud võrgu puhul tuvastati sobiliku mõõteajana 500...550 sekundit ning välistati 900 sekundit lähtudes koormuskooseisu muutlikkusest.

7.3.3 Mõõtmiseks sobilikud seadmed

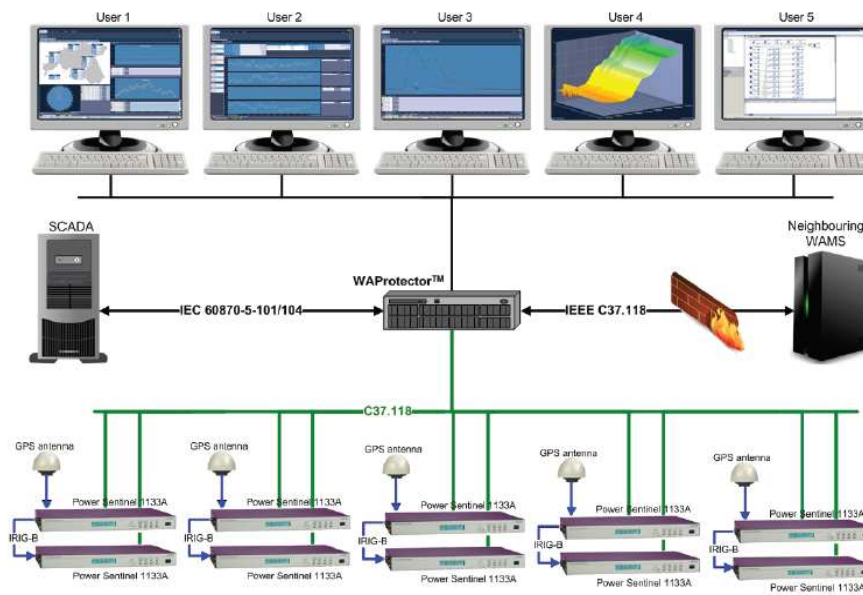
Dünaamiliste koormuskarakteristikute mõõtmiseks sobilik mõõteseade peaks vastama CIGRE aruande [2] alusel järgmistele nõuetele:

- Omama vähemalt 6 analoogsisendit, et mõõta faasivoole ja pingeid, ideaalis võiks pingesisend olla 4-juhtmeline ühendusega (koos neutraaljuhiga).
- Digitaalsisendid võivad olla kasulikud osade katsetoodikate rakendamisel, näiteks võimsuslülitite asendite salvestamiseks.
- Diskreetimissagedus 1 kHz või kõrgem.
- Sündmuseelselt peaks mõõteseade salvestama vähemalt 2 kuni 5 tsüklit, parem kui salvestaks mitme sekundi jagu.
- Sündmusejärgselt peaks mõõteseade dünaamiliste mudelite koostamiseks mõõtma mitme sekundi jagu andmeid. Pikaajalise pingestabiilsuse uurimiseks sobilike mudelite koostamiseks peaks mõõteseade mõõtma mitme minuti jagu andmeid.
- Mõõteseadme andmesalvestust aktiveerivaid trigereid peaks olema võimalik seadistada lähtudes ala- ja ülepingest ning ala- ja ülesagedusest.

EPRI uurimistöös aruandes [3] nimetatakse sobiva seadmetüübina kvaliteedijälgimisseadmeid (*PQ monitor*), mille tüüpiliseks diskreetimissageduseks on 128 kuni 512 lugemit tsüklis (*samples/cycle*). Dünaamiliste koormuskarakteristikute uurimiseks võiks sündmuste mõõteperioodiks olla vähemalt 10 - 20 sekundit. Karakteristikute parameetrite määramiseks võib piisata ka salvestatud andmetest, mille andmetihedus on 24/48/96 lugemit tsükli kohta. CIGRE aruanne [2] nimetab lisaks digitaalsed häiresalvestid (*digital fault recorder (DFR)*) ja digitaalsed releed (*digital relay*). Samuti esitatakse nimetatud aruandes seadmeklasse võrdlev tabel, tabel 7.2.

Tabel 7.2. mõõteseadmete tüübid ja sobivus koormusmudeli koostamiseks [2].

Andmete arhiveerimine sisaldab reaajas ringpuhvriina toimivat andmebaasi, sündmuste andmebaasi ja häiringute salvestiste andmebaasi. Ringpuhvriiga andmebaas võimaldab mõõteandmeid (vool, pinge, võimsus jne) salvestada maksimaalselt üks kord tsükli kohta (50 valimit sekundis). Salvestatud andmed püsivad andmebaasis 14 päeva, peale mida toimub andmete ülesalvestamine. Sündmuste andmebaasi kasutatakse alarmide ja huvipakkuvate sündmuste arhiveerimiseks. Häiringute salvestuste andmebaas sisaldab endast eraldi mõõteandmeid, mida salvestatakse ainult häiringute toimumise ajal. Neid andmeid kasutatakse hilisemalt häiringute taassimuleerimisel ja analüüsimisel [11].



7.4 Mõõdetavate koormussõlmede valik

Projekti I etapis uuriti koormussõlmede koormuskoosseise lähtudes Elektrilevi AS koormusklassidest:

Elektrilevi tarbijate koormusklasside eeldatav mõju modelleerimistulemustele

Tuginedes Elektrilevi koormusandmetele, mõõteperiood 2013 jaanur kuni 2015 september, kujutatud joonisel 6.14, moodustas grupp 3 (teenindus ja muu) tarbimine 51.5% kogutarbimisest, grupp 1 (kodutarbijad) moodustas 31.1%. Lähtuvalt nende kahe grupi suurest osakaalust, on nende koormusgruppide mudelite täpsusel eeldatavasti suurim mõju koormuste modelleerimistäpsusele. Samuti on võimalik märgata, et grupp 2 (põllumajandus) osakaal on väike, 1.9%, ning seetõttu on selle grupi mõju modelleerimistulemustele väike.

Joonis 7.12. Koormusgruppide osakaal kogutarbimises (2013 jaanuar kuni 2013 september).

Suurim põllumajandusliku koormuse osakaal (üle 40%) on Kantküla ja Põdra alajaamas, mis on väikse tarbimisega alajaamad, vastavalt 0.0762% ja 0.0151% vaadeldud koormussõlmede kogutarbimisest. Üle 30% on grupp 2 osakaal Aravete, Koigi, Lõpe ja Ruusa alajaamas. Nendest suurim on Aravete, mille osakaal on 0.20% Elektrilevi koormussõlmede kogutarbimisest.

Kokkuvõttes tasub mõõtmisi kasutada peamiselt gruppide 3 ja 1 koormuskarakteristikute uurimiseks ning vähemalt esialgu on õigustatud grupp 2 (põllumajandus) analüüsist välja jätmine.

Koormussõlme energiatarbe mõju modelleerimistulemustele

Eeldades, et suurema tarbimisega alajaamad mõjutavad modelleerimistulemusi enam kui väikse tarbimisega alajaamad ja suurte alajaamade koormuskoosseis võib püsida stabiilsemana - üksikutel lõpptarbijatel on väiksem mõju koormussõlme kogukoormusele, on mõistlik eelistada mõõtepunktidena suuremaid alajaamu. Suurima energiatarbega alajaamad on esitatud tabelis 7.6. Esitatud osakaal väljendab antud alajaama osakaalu kõigi vaadeldud alajaamade summaarsest koormusest

Tabel 7.6. Suurima tarbimisega alajaamad.

Sobilike mõõtepunktide valik lähtudes suurimatest koormustest

Üheks võimaluseks on eeldada, et koormusgrupi siseselt on koormuskarakteristik sarnane ning seetõttu on võimalik ühes mõõdetavas alajaamad tuvastatud karakteristikut teistele sarnase koormusklasside koosseisuga alajaamale laiendada. Sellisel juhul on võtmeküsimuseks koormusklasside tüüpiliste karakteristikute koostamine ning esitatud hüpoteesi valideerimine.

Kahe suurima mõjuga koormusgrupi uurimine

Tarbimisandmete esitamisel koormusklasside kaupa selgus, et gruppide 1 ja 3 karakteristikutel võib olla suurim mõju modelleerimistäpsusele ning grupp 2 mõju on eeldatavasti väike. Seetõttu peaks piiratud mõõtmiste korral eelistama mõõtepunkte, mis annaksid infot grupp 1 ja grupp 3 karakteristiku kohta. Samuti on eeldatavasti otstarbekas suure tarbimisega alajaamade eelistamine, sest nende mõju modelleerimistulemusel võib olla suurem.

Suurima tarbimisega alajaamade koormuskoosseise uurides selgub, et mitmetes on lisaks 1. ja 3. koormusgrupile esineb teisi gruppe. Mõõtmisel soovime teisi gruppe vältida, sest need toimivad koormusklasside karakteristikute tuvastamisel mõõtemürana. Tabel 7.7 näitab gruppide 1 ja 3 osakaalu suuremate alajaamade tarbimises. Otsides alajaamu, kus grupi 1 ja grupi 3 kombineeritud osakaal on suurem kui 95%, jäävad sõelale Viimsi, Alutaguse ja Kunda. Nende alajaamade puhul on grupi 1 (kodutarbijad) osakaal väike ning seetõttu oleks tarvis lisada alajaamu, milles grupp 1 osakaal on märgatav. Näiteks Kallavere ja Ida võiksid olla sobivateks alajaamadeks.

Tabel 7.7. Suurima tarbimisega alajaamad ning tüüpgruppide 1 (kodutarbijad) ja 3 (teenindus) osakaal

7.5 Pidevmõõtmistega kogutavate andmete kasutamisevõimalused

Mitmetes koormussõlmedes mõõdetakse pidevalt pingeid ja voole koormuskarakteristikute määramiseks sobiva diskreetimissammuga. Pidevalt mõõdavad elektrivõrgu pingeid ja voole Eesti elektrivõrkudes kohtpaigaldatud kvaliteedianalüsaatorid ning häiresalvestid.

Ülekandevõrgus paigaldatud kvaliteedianalüsaatoritest on töös ainult vähesed, vaata pt 7.3, ning nende osas ei ole paigutus koormuskarakteristikute tuvastamiseks soodne: lisaks koormusele on sõlme ühendatud tootmisüksused või alalisvooluühendused. Jaotusvõrgus paiknevate seadmete paigutus on soodsam, kuid ka nende puhul on mõõtmiste eesmärgiks üldjuhul liinide jälgimine. Koormuskarakteristikuid võiks olla võimalik tuvastada Aruküla, Elva, Haapsalu, Järveküla, Kullamaa ja Soo mõõtepunkti andmetest. Keerukuseks on andmebaasist sobilike andmete välja filtreerimine. Kui sobiliku pingesündmuse toimumise aeg on eelnevalt teada, siis on andmerea leidmine teostatav väikse ajakuluga.

7.6 Koormuskarakteristikute katseline määramine

Teostatakse kolm katseseeriat. Iga katseseeria käigus teostatakse katsed mitmes alajaamas.

7.6.1 Katsete ajastus

Esimene katseseeria võiks toimuda sügisel, teine talvel kõrge tarbimisega ja kolmas suvel madala tarbimisega.

Katsete esimese seeria eesmärgiks on koormuskarakteristikute nädala- ja päevasisese muutlikkuse uurimine. Katsed tuleks teostada tööpäeval ja puhkepäeval; hommikul, (päeva keskel,) õhtul ja öösel (päeva madalaim tarbimine). Iga mõõteööpäeva jooksul on tarvis teostada vähemalt 3 alamkatset (nt hommikul, õhtul, öösel), et ilmneks päevasisene koormuskarakteristikute variatsioon.

Teise katseseeria eesmärgiks on talvise maksimaalse koormuse karakteristiku uurimine. Parim aeg võib olla veebruaris, tööpäeva õhtul 18 kuni 20 vahel. Probleemiks on koormuse suur muutlikkus sellel kellaajal.

Kolmanda katseseeria eesmärgiks on suviste koormuskarakteristikute uurimine. Ideaalis tuleks katsed teostada vahemikus juuni kuni august, madalaima koormusega ajal. Tüüpiliselt peaks selline koormus esinema hommikul 2 ja 5 vahel. Võimalik, et sooja mai korral on ka nt mai pühapäeva hommikul sarnaselt madal koormus.

Üksiku alamkatse, trafo astmelülituste teostamise, kestvus on eeldatavasti kuni 30 min. Mõõteperioodi vältel peaks koormuskoosseis olema suhteliselt stabiilne, koormuse variatsioon alla 1/3 eeldatavast trafo astmelüliti asendi muutmise mõjust.

Katsete ajastuse põhjendus

Koormuskarakteristikud on ajas muutuvad, muutused toimuvad nii aastaegade, päevade kui ka tundide lõikes. Seetõttu on heade mudelite koostamiseks tarvilik määrata koormuskarakteristikud erinevatel aastaegadel ja nädalapäevadel.

Pingehäiringute tekitamisel on oluline need ajastada nõnda, et võrgus esinevate teiste pingehäiringute hulk oleks minimaalne. Soovituslik on vältida perioode kui koormus on kiirelt kasvav (enne päeva tipukoormust) või kahanev (keskööle eelnev koormuslangus). [2]

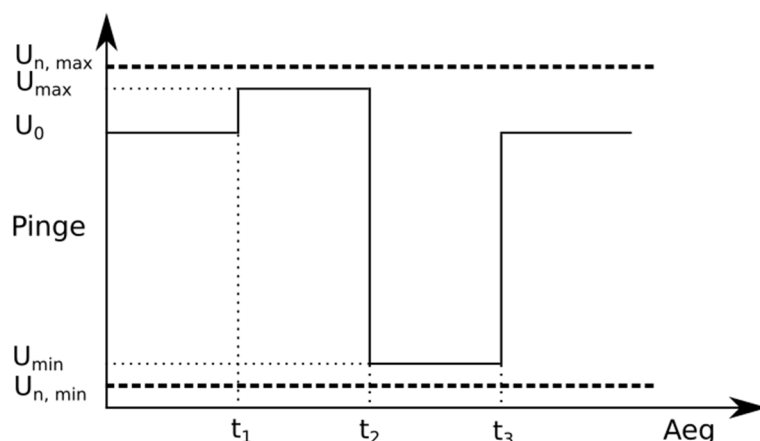
7.6.2 Pinge muutmise protseduur

Pinge muutmise protseduuri koostamisel eeldati, et katsete teostamise käigus peab süsteem püsima normaaltalitluses ehk teostatavate pingehäiringute suurust tuleb piirata nõnda, et pinge püsiks kesk- ja madalpingevõrkudes lubatud piirides. Suuremate pingehäiringute teostamisel on eeldatavasti võimalik koormuskarakteristikuid selgemalt tuvastada.

Lähtudes eelnevalt kirjeldatud katsete tulemustest võiks koormuse staatiliste ja dünaamiliste pingekarakteristikute esmaseks uurimiseks kasutada trafo astmelüliti asendi muutmise esile kutsutud pingemuutust, mida on kirjeldatud järgnevalt ning kujutatud joonisel 7.13.

Keskpingelati pinge alghetkel on U_0 , kuni ajani t_1 teostatakse püsitalitluse mõõtmised (t_1 võiks olla 1...3 minutit).

- Ajahetkel t_1 tõstetakse keskpingelati pinget (vajadusel mitme minimaalse viivitusega astmelülitusega) tasemeni $U_{\max} < U_{n,\max}$. Kus $U_{n,\max}$ on keskpingelati pinge, millega tagatakse normaaltalitlusega lubatud maksimaalne pinge jaotusvõrgus. Tingimuse täitmisel jääb süsteem normaaltalitlusesse.
- Kuni ajahetkeni t_2 jätkatakse mõõtmiste teostamisega. Sobilik ooteaeg $t_2 - t_1$ eeldatavasti umbes 3...10 minutit, sõltub ühendatud seadmete inertsi (koormuse ajakonstandist).
- Ajahetkel t_2 langetatakse keskpingelati pinget (vajadusel mitme minimaalse viivitusega astmelülitusega) tasemeni $U_{\min} > U_{n,\min}$. Kus $U_{n,\min}$ on keskpingelati pinge, millega tagatakse normaaltalitlusega lubatud minimaalne pinge jaotusvõrgus. Tingimuse täitmisel jääb süsteem normaaltalitlusesse.
- Kuni ajahetkeni t_3 jätkatakse mõõtmiste teostamisega. Sobilik ooteaeg $t_3 - t_2$ eeldatavasti umbes 3...10 minutit, sõltub ühendatud seadmetest. Selle aja jooksul võiks koormus stabiliseeruda.
- Ajahetkel t_3 taastatakse tavaline pingetase, ideaaljuhtumil esialgne pinge, ning teostatakse taaskord mõõtmisi, umbes 10 minutit peaks piisama. Eesmärgiks on aeglaselt stabiliseeruvate koormuste tuvastamine.



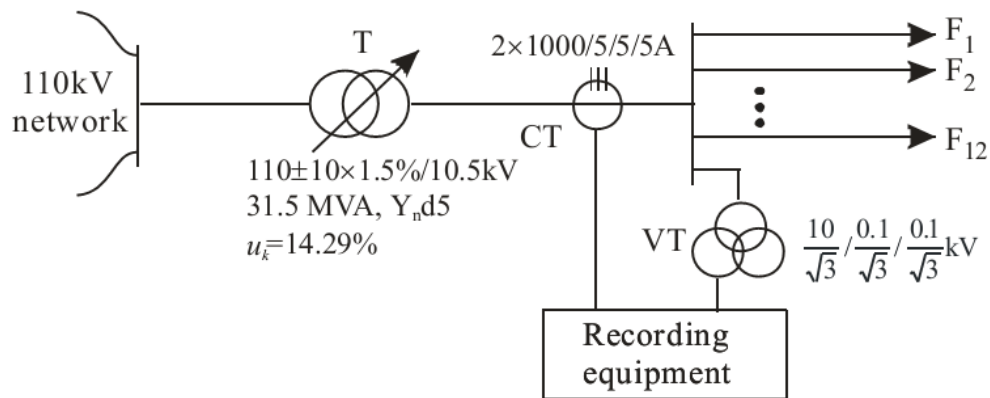
Joonis 7.13. Pinge muutmine koormuskarakteristikute esmaseks tuvastamiseks.

Valitud ajaviidete eesmärgiks on koormuse stabiliseerumine iga pingemuutuse järel, et koormus saavutaks stabiilse talitluse ning väljuks siirdetalitlusest. Piisavalt pikkade ajaviidete kasutamisel peaks kirjeldatava katse esile kutsuma kolm koormuse püsitalitlust ning kolm siirdetalitlust. Ajaviidete osas on [13] soovitanud staatiliste karakteristikute määramiseks 2.5...3 koormuse ajakonstandi pikkust ooteaega. Võttes arvesse allikas [13] määratud ajakonstantide suurusjärku 50...300 sekundit, võiks sobiv ooteaeg olla 125...900 sekundit. Allikas [6] mõõdetud võrgu puhul tuvastati sobiliku mõõteajana 500...550 sekundit ning välistati 900 sekundit lähtudes koormuskooseisu muutlikkusest. Eelnevalt kirjeldatud pingemuutuste korral kasutatud ajaviited 3...10 minutit on kooskõlas kahe eelnevalt nimetatud allikaga.

7.6.3 Mõõteseadmed

7.6.4 Mõõtepunktide valik

Lähtuvalt pingemuutuste teostamise meetodist on tarvilik mõõta alajaamas keskpinge poolel (illustreeritud joonisel 7.14).



Joonis 7.14. Mõõtepunkti valik alajaamas [4].

Esimese mõõtepunktina on kavas kasutada Järveküla alajaama lähtuvalt selle lähedusest, vähesest trafode arvust ja koormusstruktuurist.

Selgitus

Tüüpiline andmete kogumise koht on keskpingetrafo sekundaarpool, millega on ühendatud radiaalsed fiidrid. Võttes arvesse, et mitmetes kirjandusallikates määratakse keskpinge koormussõlmede karakteristikuid, siis on selline mõõtepunkti valik õigustatud. Käesolevas uurimistöös määratakse kõrgepingevõrgu koormussõlmede karakteristikuid ning seetõttu on mõislik mõõta kõrgepingetrafo sekundaarpool, sarnaselt allikas [4] teostatud mõõtmistele, kujutatud joonisel 7.14.

7.7 Koormuskarakteristikute parameetrite väärtuste määramine

7.7.1 Koormusmodeli struktuuri valik

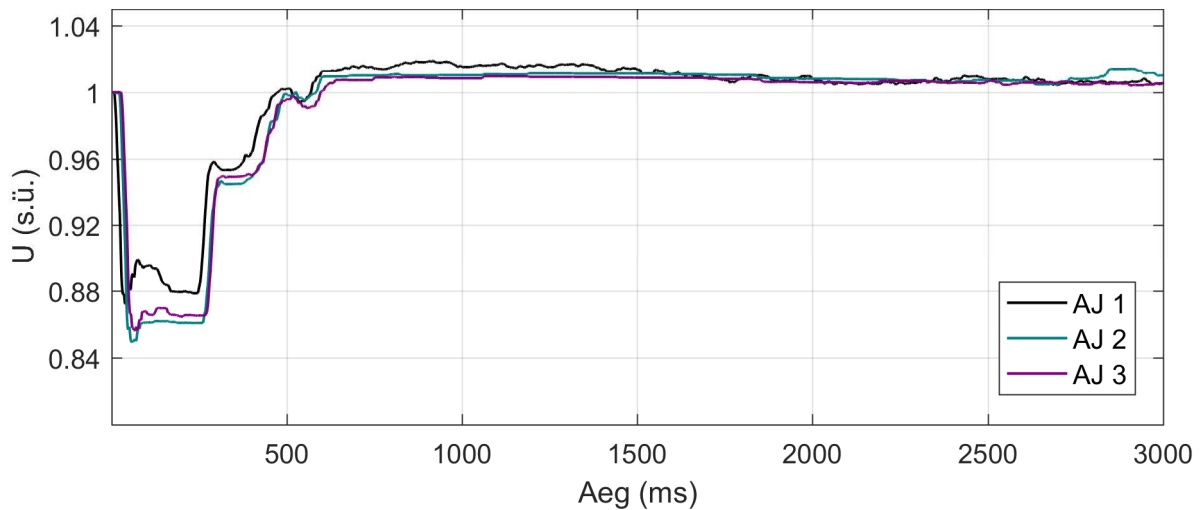
Lähtudes PSCAD kasutatavast koormuse eksponentmudelist ja PSS/E kasutatavast üldisest koormusmudelist, otsustati esmalt kasutada koormusmodeli struktuurina eksponentmudelit, valemid 7.1 ja 7.2 ning polünoommudelit, valemid 7.3 ja 7.4. Polünoommudeli astendajad on valitud vastama püsivõimsusega, püsivooluga ja püsitakistusega koormusele. Kasutatud polünoommudelit saab mõlemas võrguarvutustarkvaras väikse vaevaga rakendada.

7.7.2 Koormusmudeli parameetrite väärtuste määramine

7.7.4 Mõõteandmete töötlemise näide

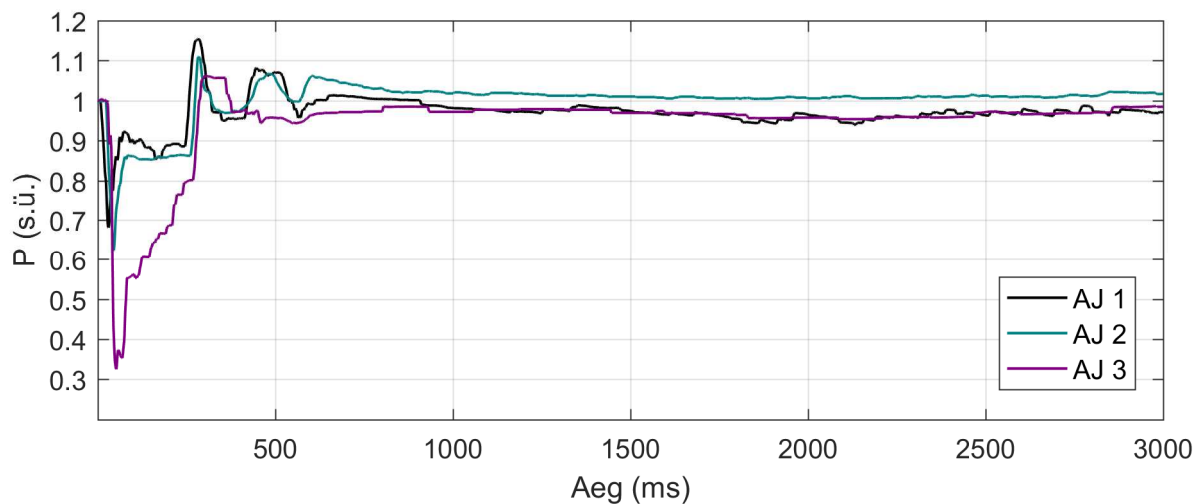
Mõõteandmete töötlemise näites kasutatakse kolmes erinevas koormussõlmes mõõdetud andmeid, mis mõõdeti sama võrgusündmuse käigus. Vaadeldaval juhtumil muutusid pinged alajaamades lähtuvalt joonisest 7.15. Oluline siinkohal on, et normaliseerimisel kasutatakse sündmuse eelseid pinge ja aktiivvõimsuse väärtusi. Faasipingete asümmeetria tegurite (*phase voltage unbalance rate*) väärtused olid mõõdetud sündmuse korral 2..3%, kuid voolude

asümmeetria (*phase current unbalance rate*) esimeses kahes alajaamas 10% ning kolmanda alajaamas 40%.



Joonis 7.15. Mõõdetud pinged koormussõlmedes.

Mõõdetud aktiivvõimsus on kujutatud joonisel 7.16 ning mõõdetud aktiivvõimsuse pingekarakteristikud on kujutatud joonisel 7.17. Jooniste põhjal on võimalik tuvastada, et esimesed kaks koormussõlme käituvad sarnaselt ning kolmas on võimalik märgata häiringu suuremat mõju aktiivkoormusele.



Joonis 7.16. Mõõdetud aktiivvõimsus.

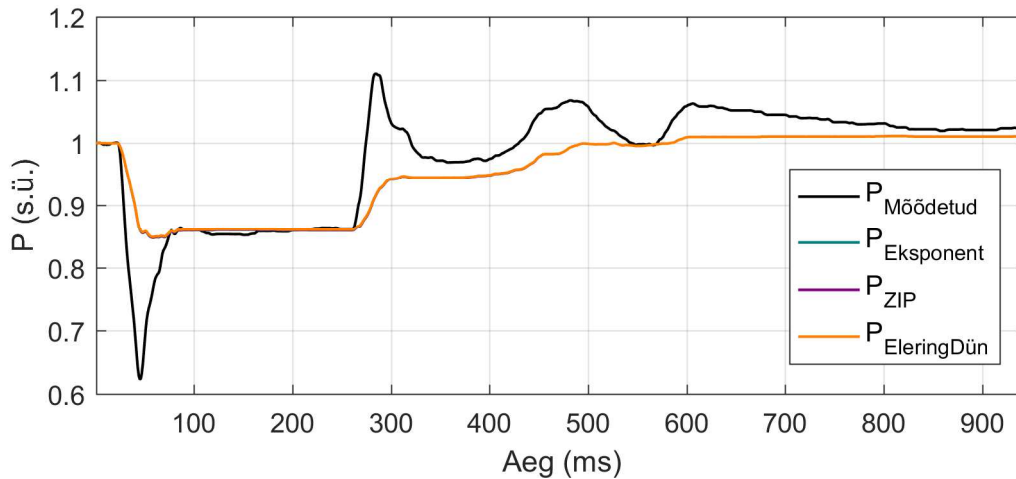
Reaktiivvõimsuse mõõteandmetes (joonis 7.18 ja 7.19) on võimalik märgata teise ja kolmanda alajaama puhul reaktiivvõimsusvoo suunamuutust. Mõõdetud pingekarakteristikute graafikult on võimalik tuvastada, et taaskord käituvad 1. ja 2. alajaam sarnaselt ning kolmas erinevalt.

Kasutades eelnevalt kirjeldatud koormusmudeli parameetrite tuvastamise põhimõtteid on võimalik määrata aktiivkoormuse eksponentmudeli ja polünoommudeli parameetrite väärtused, mis on esitatud tabelis 7.11.

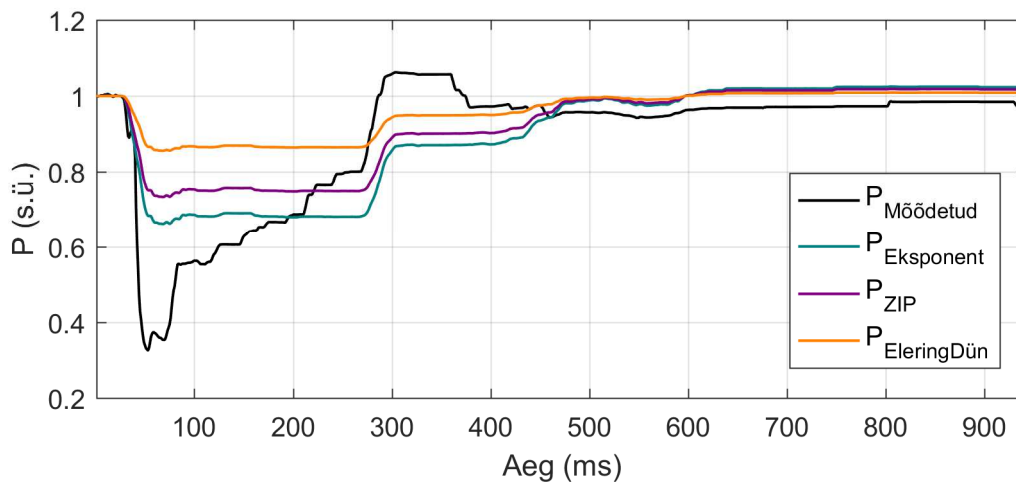
Tabel 7.11. Aktiivkoormuse mudeli parameetrite väärtused.

Määratud väärtuste analüüsil selgub, et esimesel kahel juhtumil tuvastati püsivoolule lähedane koormusmudel, mise eksponentmudeli korral vastaks astendaja väärtusele 1 ning polünoommudeli korral väärtusele $p_2=1$. Kolmandal juhtumil pakuti eksponentmudelile suuremat pingetundlikkust ning polünoommudel omandas suurima võimaliku pingetundlikkuse kasutades püsitakistuse mudelit $p_1=1$. Kui võrrelda modelleerimisviga Eleringi poolt dünaamikaarvutustes kasutatava püsivooluga mudeliga, siis esimeses kahes koormussõlmes olulist erinevust ei esinenud, kolmandas koormussõlmes pakkusid tuvastatud mudelid 3..4 protsendipunktist eelist.

Tabel 7.12. Aktiivkoormuse modelleerimise vea keskmine absoluutväärtus.



Joonis 7.21. Koormussõlm 2, mõõdetud ja modelleeritud aktiivvõimsus.



Joonis 7.22. Koormussõlm 3, mõõdetud ja modelleeritud aktiivvõimsus.

Kasutades eelnevalt kirjeldatud koormusmudeli parameetrite tuvastamise põhimõtteid on võimalik määrata ka reaktiivkoormuse eksponentmudeli ja polünoommudeli parameetrite väärtused, mis on esitatud tabelis 7.13.

Tabel 7.13. Reaktiivkoormuse mudeli parameetrite väärtused.

Määratud väärtuste analüüsil selgub, et esimesel juhtumil toimib polünoommudel püsivõimsusega mudelina ning teisel ja kolmandal juhtumil püsitakistusega mudelina ehk kahel viimasel juhtumil käitub määratud polünoommudel sarnaselt Elering AS poolt

dünaamikaarvutustes kasutatava püsijuhtivusega mudeliga. Eksponentmudeli määramisel on kõigil juhtumitel tuvastatud suur pingetundlikkus – astendajatel on kõrged väärtused ning teisel ja kolmandal juhtumil on määratud piirtingimusele vastava väärtus ehk mudeli pingetundlikkust on optimeerimise käigus eeldatavasti piiratud.

Võrreldes aktiivkoormuse modelleerimise tulemustega on reaktiivkoormuse modelleerimise tulemused oluliselt palju halvemad, see viitab tuvastatud mudeli ebasobivusele. Oluline oleks kaaluda alternatiivsete koormusmudelite kasutamist.

Tabel 7.14. Reaktiivkoormuse modelleerimise vea keskmine absoluutväärtus.

Joonis 7.25. Koormussõlm 3, mõõdetud ja modelleeritud reaktiivvõimsus.

7.8 Kokkuvõte

Käesolevas peatükis kirjeldati kirjandusest lähtudes koormuskarakteristikute mõõtmistepõhise määratlemise meetodikat. Tuvastati koormuskarakteristikute määramiseks sobivate pingehäirete tehnilised parameetrid (jääkpinge, häiringu kestvus, pingeasümmeetria) ja esitati mõõteseadmetele esitatavad nõuded ning tuvastati elektrivõrkudes paiknevad seadmed, mis vastavad esitatud nõudmistele. Elering AS ja Elektrilevi AS mõõteseadmete analüüsi käigus selgus, et kvaliteedianalüsaatorid Qualitrol Qwave Premium / Informa PMD-A, kvaliteedianalüsaatorid Elspec G4430, kvaliteedianalüsaatorid G4500 ja häiresalvestid REMI peaksid vastama enamikule esitatavatest nõuetest.

Mõõdetavate koormussõlmede valiku meetodikatest kirjeldati ühte lähenemisviisi, mis lähtub koormusklasside karakteristikute tuvastamisest.

Koormuskarakteristiku määramiseks koostatud katsekava kirjeldas ühte katsemetoodikat, mis võiks anda teavet nii staatiliste kui ka dünaamiliste pinge karakteristikute kohta. Katsekavas kirjeldatud katsed on kavas peagi teostada, et tuvastada kirjeldatud katsekava sobilikkus mõõtmiste teostamise metoodikana.

7.9 Kirjandus

- [1] Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti I etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.
- [2] Cigre Working Group C4.605. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, CIGRE, 2014, 190 pp.
- [3] EPRI. Measurement-Based Load Modeling. Technical Report. Palo Alto: EPRI, 2006, 284 pp.
- [4] Stojanović, D. P., Korunović, L. M., Milanović, J. V. Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network. Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 2, pp. 228–238, Feb. 2008.
- [5] Hua, K. Q., Vahidnia, A., Mishra, Y., Ledwich, G. (2015) PMU measurement based dynamic load modeling using SVC devices in online environment. Proceedings of the 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE, Brisbane, Qld, pp. 1-5.
- [6] Korunovic, L., Stojanovic, D., Milanovic, J. Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 2, No 2, March 2008, pp 227 - 234.
- [7] Qualitrol. Informa PMD-A Product Brochure. Qualitrol, 2010.
- [8] Микропроцессорный регистратор REMI (16/12): Техническое описание и инструкция по эксплуатации. RTU EEF, 2004, 22 lk.
- [9] Disturbance recorder REMI (32/15): Technical description and operating manual. RTU EEF, 2007, 23 pp.
- [10] Kilter, J., Reinson, A. (2012) Wide Area Applications for Enhancement of Estonian Power System Security. Proceedings of 8th International Conference 2012 Electric

Power Quality and Supply Reliability: 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, Tartu, June 11 - 13, 2012. Ed. Sakkos, T. IEEE, 2012.

- [11] Arbiter Systems. Power Sentinel 1133a. <http://www.arbiter.com/catalog/product/model-1133a-power-sentinel.php> (14.04.2016)
- [12] Navarro, I. R. Dynamic Load Models for Power Systems: Estimation of Time-Varying Parameters During Normal Operation. Licentiate Thesis. Lund: Lund University, 2002, 166 pp.
- [13] Navarro, I. R. Dynamic Power System Load: Estimation of Parameters from Operational Data. Doctoral Dissertation. Lund: Lund University, 2005, 275 pp.
- [14] Vinnal, T. Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks. Doktoritöö. Tallinn: TUT Press, 2011, 216 lk.
- [15] Hasan, K. N., Milanović, J. V., Turner, P., Turnham, V. A step-by-step data processing guideline for load model development based on field measurements. *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, Eindhoven, 2015, pp. 1-6.
- [16] Elspec. G4400 3 Phase Power Quality Analyser. <http://elspec-ltd.com/download/g4400-english/> (15.09.2016)
- [17] Elspec. G4500 3 Phase Power Quality Analyser. <http://elspec-ltd.com/download/g4500-english/> (15.09.2016)
- [18] Elspec. G4400 Series Blackbox User & Installation Guide V1.2. Elspec, 2013.
- [19] Elspec. G4500/G3500 Portable Power Quality Analyzer User & Installation Guide V1.3. Elspec, 2014.

Kokkuvõte

Käesoleva uurimistö II etapi põhilised tulemused:

- on tuvastatud, et PSCAD tarkvara eksponentsiaalse koormusmudeli (*Fixed Load*) kasutamisel lühise olukorras esinevad teatud juhtumitel koormuskõveral tegelikkusele mittevastavad võnkumised, mille summutamiseks tuleb koormusmudeli ette lisada aktiivtakistus kas elemendi *Resistor* või liinimudeli kujul, aktiivtakistuse vajaliku suuruse määramiseks on välja töötatud algoritm;
- on määratletud koormussõlmedesse agregeeritud koormuste koosseisus esinevad koormusklassid ja tehtud kindlaks koormusklasside osakaalud ning nende sesoonse muutlikkus kõikide vaadeldud koormussõlmede jaoks;
- vastavalt koormusklasside koosseisule on moodustatud 10 sarnaste koormussõlmede gruppi kasutades K-keskmiste klasterdamise algoritmi ning tuvastatud igas grupis iseloomulik e nn esindussõlm, mis käitub grupi keskmise lähedaselt;
- on uuritud ja tuvastatud kolme koormusklassi: kodu, äri- ja avaliku sektori tüüpilised tarbimisseadmete koosseisud ning kirjeldatud koosseisude ajalist muutlikkust;
- on uuritud ja kirjeldatud seadmete pingest sõltuvat iseeneslikku väljalülitumist;
- kodutarbijate tüüpkoormusseadmete gruppidele on määratletud staatilised pingekarakteristikud ning loodud vastavad mudelid PSCAD tarkvaras;
- on kirjeldatud ja uuritud otsetoitega asünkroonmootori mudelit PSCAD tarkvaras;
- on uuritud koormuste temperatuurisõltuvusi statistilistel aegridadel põhineva matemaatilise mudeli abil ja kõrvaldatud temperatuurist põhjustatud koormushälbed koormuse modelleerimise tulemustest;
- on selgunud, et statistilistel aegridadel põhineva matemaatilise mudeli abil ei õnnestu ka pärast temperatuurimõjude neutraliseerimist tuvastada pinget ja sageduse olulise konstantsuse tõttu usaldatavaid korrelatiivseid seoseid pinget ja sageduse ning aktiiv- ja reaktiivkoormuste vahel;
- on loodud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuste modelleerimise algoritm koormusklasside sagedussõltuvuste alusel ning määratletud koormusklasside sagedus-tundlikkuse tegurid; lähtudes koormusklasside koosseisule ja sesoonsele muutlikkusele on leitud 10 esinduskoormuse jaoks agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuste staatilised karakteristikud suvel ja talvel;

- on tehtud kindlaks erinevat liiki hajatootmiseseadmete omadused ja käitumine lühiste ning pingelohkude korral ja analüüsitud Eesti elektrisüsteemi ühendatud hajatootjaid liikide alusel ning määratletud nende osakaal sõlmedes agregeeritud koormuste suhtes;
- on tuvastatud, et koormustkarakteristikute leidmisel peaks arvestama kesk- ja madalpingevõrku ühendatud hajatootmiseseadmetega sõltuvalt nende võimsusest ja osakaalust, kuid mikrotootmiseseadmetega arvestamine ei ole oluline;
- mõõtmistepõhise koormuskarakteristikute määramise eesmärgil on määratletud sobivad pingehälbed ja mõõteseadmetele esitatavad tehnilised nõuded ning tuvastatud Eesti elektrivõrkudes kasutatavad nõuetele vastavad mõõteseadmed;
- katselise koormuskarakteristikute määramise teostamiseks on välja töötatud meetodika mõõdetavate sõlmede valikuks ning esitatud katsekava koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute katseliseks määramiseks.

Projekti järgmise, III etapi lõppeesmärk on agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormustele adekvaatsete staatiliste ja dünaamiliste pinge- ja sageduskarakteristikute leidmine ning vastavate tarkvaramudelite parameetrite määramine kõikide ettenähtud sõlmede jaoks.

Selleks on vaja:

- uurida ja määratleda täiendavalt koormuskomponentide osakaale ja nende ajalist muutlikkust tööstus- ja põllumajandus-koormusklasside osas;
- määrata kindlaks avaliku, äri-, põllumajandus- ning tööstussektori koormusklasside tüüpiliste tarbimiseadmete karakteristikud;
- uurida sagedusmuunduriga toidetava asünkroonmootori modelleerimist tarkvaras PSCAD ning analüüsida asünkroonmootori ühendusviisi mõju võrguhäiringute modelleerimise seisukohast;
- määratleda aktiiv- ja reaktiivkoormuste sageduskarakteristikud kõikidele agregeeritud sõlmekoormustele;
- analüüsida kirjeldatud katsekava kasutatavust ja kasutada modelleerimiseks võimalike aktiivsete katsete tulemusi;
- vajadusel ja võimalusel täiendada koormuskarakteristikute mudelite koostamise meetodikat paremate tulemuste saamiseks.