



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV õhuliin *versus* kaabelliin

Ekspert hinnang

Lepingu nr Lep13025 – TTÜ, 1.1-4/13/32 – Elering AS lõpparuanne

Instituudi direktor: */allkirjastatud digitaalselt/*

Heiki Tammoja

Lepingu vastutav täitja : */allkirjastatud digitaalselt/*

Paul Taklaja

Tallinn 2013

Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV õhuliin *versus* kaabelliin

Lepingu tellija: Elering AS
Registrikood: 11022625
KMRN: EE100889639
Aadress: Kadaka tee 64, 12915 Tallinn

Lepingu täitja: Tallinna Tehnikaülikool
Registrikood: 74000323
KMRN: EE100224841
Aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Lepingu algus: 13. veebruar 2013
Lepingu lõpp: 20. mai 2013

Lepingu vastutav täitja: Paul Taklaja, assistent
Lepingu põhitäitja: Jaan Niitsoo, doktorant
Lepingu põhitäitja: Petri Hyvönen, professor

Sisukord

| | |
|--|----|
| Sissejuhatus | 4 |
| Vahelduvvoolu liinides edastatavad võimsused..... | 5 |
| Õhu- ja kaabelliinide genereeritavad reaktiivvõimsused | 7 |
| Õhu- ja kaabelliinide reaktiivvõimsuste kompenseerimine | 9 |
| Probleemid tekkiva kaosoojusega | 11 |
| Kaabliirikete kestus | 16 |
| Kaablite hind ja kaabelliini rajamise maksumus..... | 17 |
| Kokkuvõte õhuliinide ja kaabelliinide eelistest ning puudustest | 18 |
| Erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest koosnev nn kombineeritud ülekandeliin | 19 |
| Ekspert hinnangu järelendus | 21 |
| Kasutatud kirjandus | 22 |

Sissejuhatus

Antud eksperthinnangus on toodud peamised erinevused vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepinge õhu- ning kaabelliinide vahel. Eksperthinnangu eesmärgiks on selgitada peamisi lähtekohti ning valikuid tulevaste 330 ja/või 110 kV liinide rajamisel. Eksperthinnangus on kasutatud näidetena rajatava *Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV* liini erinevaid konfiguratsioone.

Eesti põhivõrgu ettevõtte Elering AS-i transiitelektrivõrgus kasutatakse peamiselt nimipingeklasse 330 ja 110 kV. Võimsad, 330 kV nimipingega transiitelektriliinid moodustavad Eesti elektrivõrgu nn selgroo ning ühtlasi ühendavad meid ka naaberelektrisüsteemidega (Venemaa Föderatsioon ja Läti Vabariik). Rikked selles võrgus võivad seega mõjutada väga suurt hulka tarbijaskonda. 110 kV nimipingega ülekandeliinid kannavad edasi väiksemaid võimsuseid ning on olulisteks lülideks siseriiklikul elektrienergiaülekandel. Rikked 110 kV võrgus võivad samuti mõjutada üsna olulisel määral tarbijaid.

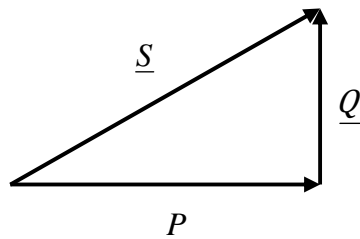
Tänapäeva madal- ja keskpinge (Eestis vastavalt 0,4 kV ja 6–35 kV) elektrijaotusvõrkudes on õhuliinide asemel aina enam hakatud kasutama maakaabelliine. Seda eriti just linnades ning suuremates asulates, kus elektrienergia tarbimine on suurem ning kliente rohkem. Maakaablid asetatakse üldjuhul *ca* 1 meetri sügavusele pinnasesse. Viimasel kümnendil on maakaabelliinide laiema leviku teinud võimalikuks kaablite kvaliteedi jätkuv paranemine ning hindade langemine. Kaabelliinide vaieldamatuks eeliseks on visuaalse reostuse puudumine, suur ilmastikukindlus ja liinitrassi hooldamise vajaduse puudumine või selle oluline vähenemine.

Kuna aina enam madal- ja keskpingeline rajatakse maakaabelliinidena, siis on inimestel tekkinud lihtsustatud eeldus, et ilma suurema kulu või probleemideta võib tulevikus kõik vahelduvpinge õhuliinid asendada maakaabelliinidega. Tegelikuses aga tuleb arvestada asjaoludega, et vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingeliinide (110 ja 330 kV) korral on juba pelgalt kehtivate füüsikaseaduste tõttu kaablite kasutamine tehniliselt oluliselt keerukam ning seega ka märkimisväärselt kallim kui õhuliinide puhul. Olulised erinevused on ka potentsiaalsete rikete arvudes ja nende kestustes, mis omakorda mõjutavad kogu elektrisüsteemi töö- ning tõrkekindlust.

Eksperthinnangu sisu on proovitud reastada võimalikult loogilises järjestuses, seda parima ülevaate saamiseks ning teema hõlpsamaks ja kiiremaks mõistmiseks. Järgnevates peatükkides on toodud peamised positiivsed ning negatiivsed erinevused vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepinge õhu-, kaabel- ning kombineeritud liinide vahel.

Vahelduvvoolu liinides edastatavad võimsused

Vahelduvpingeliin kannab edasi näivvõimsust (Joonis 1). Näivvõimsus koosneb aktiiv- ja reaktiivvõimsuse komponentidest. Elektriartbijatele on oluline üle kanda aktiivvõimsust.



Joonis 1. Näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsuste vektordiagramm

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

kus:

S – näivvõimsus (VA)

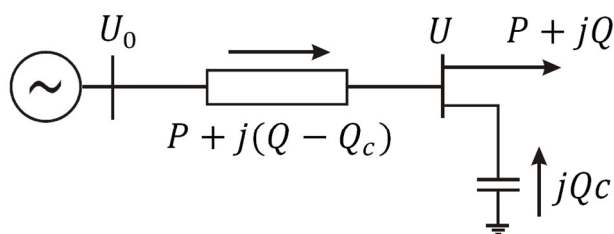
P – aktiivvõimsus (W)

Q – reaktiivvõimsus (VAr)

Reaktiivvõimsust edastada pole elektrivõrgus otstarbekas, kuna see suurendab energiakadusid ja pingekadu. Reaktiivvõimsust on otstarbekam toota ning tarbida kohapeal, aktiivvõimsuse tarbija lähedal. Kadude vähenemise kõrval suureneb sel juhul ka liinide ja trafode läbilaskevõime ning paraneb pinge kvaliteet. Aktiivvõimsuse osakaalu suurendamiseks ning reaktiivvõimsuse osakaalu vähendamiseks edastatavas näivvõimsuses tuleb reaktiivvõimsust liinis kompenseerida.

Elektrivõrgus loetakse induktiivset elementi reaktiivvõimsuse tarbijaks ning mahtuvuslikku elementi reaktiivvõimsuse tootjaks.

Järgnevalt vaadeldakse lihtsat võrku (Joonis 2 ja Joonis 3) mis koosneb toiteallikast (sõlm 0) ja tarbijat (koormusega $\underline{S} = P + jQ$) toitvast liinist. Tarbija juurde on paigaldatud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks, Joonis 2 korral kondensaatorpatarei võimsusega Q_c ja Joonis 3 korral šuntreaktor võimsusega Q_x .



Joonis 2 Reaktiivvõimsuse kohalik kompenseerimine, selle genereerimine. [1] [2]

Liinis edastatav võimsus $\underline{S}_L = P + j(Q - Q_c)$ või $\underline{S}_L = P + j(Q + Q_x)$ ning võimsus- ja pingekao vähenemine tingituna reaktiivvõimsuse kompenseerimisest ilmneb ligikaudsetest valemitest (2–5).

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{U_n^2} \cdot R \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q - Q_c) \cdot X}{U_n} \quad (3)$$

kus:

ΔP – liini aktiivvõimsuskadu

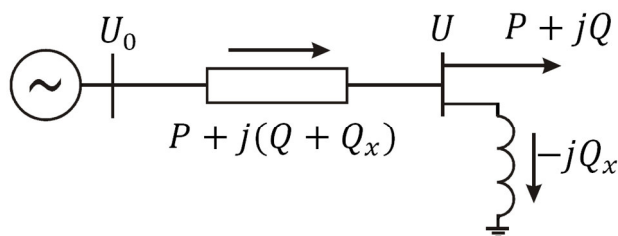
ΔU – liini pingekadu

$-Q_c$ – liinis edastatav reaktiivvõimsus, selle tarbimine

R – liini aktiivtakistus

X – liini reaktiivtakistus

U_n – liini nimipinge



Joonis 3 Reaktiivvõimsuse kohalik kompenseerimine, selle tarbimine.

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q + Q_x)^2}{U_n^2} \cdot R \quad (4)$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q + Q_x) \cdot X}{U_n} \quad (5)$$

kus:

$+Q_x$ – liinis edastatav reaktiivvõimsus, selle tootmine

Kuna reaktiivvõimsuse tarbimine ja tootmine sõltub ka aktiivvõimsuse tarbimisest, on liinides edastatavate reaktiivvõimsuste kompenseerimisvajadus ilmne. Elektrisüsteemi suurimateks reaktiivvõimsuse tarbijateks on üldjuhul trafod ja elektrimootorid ning vajadusel ka sünkroongeneraatorid. Elektrisüsteemi suurimateks reaktiivvõimsuse tootjateks on enamjaolt ülekandeliinid ning kondensaatorpatareid ja vajadusel ka sünkroongeneraatorid.

Kui kõrgepinge elektrivõrgus on tarbimine suhteliselt väike, siis võib elektrivõrk toota reaktiivvõimsust liigselt ning seda ülejääki tuleb šuntreaktoritega tarbida. Kui elektrivõrgus on tarbimine suhteliselt suur, siis võib elektrivõrgu toodetud reaktiivvõimsusest jääda vajaka ning sel juhul tuleb puudujääv osa kondensaatorpatareidega toota.

Olenemata pingeklassist, jaotuvad vahelduvvoolu õhuliinide parameetrid (pikiinduktiivsused, põikimahtuvused) tehnilises mõttes küllaltki sobilikult, sest nende vajadus reaktiivvõimsuse kompenseerimisele on üsnagi mõõdukas. Kõrge- ja ülikõrgepinge vahelduvvoolu kaabelliinide korral on aga olukord oluliselt komplitseeritum.

Õhu- ja kaabelliinide genereeritavad reaktiivvõimsused

Õhuliinide faasijuhid asuvad üksteisest ning maapinnast suhteliselt kaugel. Maakaabelliinide faasijuhid asuvad üksteisele ning maapinnale oluliselt lähemal, peamiselt seetõttu on kaabelliinide mahtuvused *ca* 10–20 korda suuremad kui õhuliinide mahtuvused. Suured mahtuvused aga põhjustavad suuremaid genereeritavaid reaktiivvõimsuseid kaabelliinide poolt.

Pikka kaabelliini võib võrrelda suure mahtuvusega kondensaatoriga. Mida suurem on mahtuvus või laadimispinge, seda suuremad on ka kondensaatori laadimisvoolud ja selle genereeritavad reaktiivvõimsused. See tähendab, et mida pikem liin ja mida suurem liinipinge, seda suurem on ka kaabli laadimisvool (6) ning genereeritav reaktiivvõimsus (7).

$$I_f = U_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \quad (6)$$

kus:

I_f – kondensaatori laadimisvool (elektriliini faasivool) (A)

U_f – kondensaatori pinge (elektriliini faasipinge) (V)

π – konstant

f – elektrivõrgu sagedus (Hz)

C_f – kondensaatori mahtuvus (elektriliini faasimahtuvus) (F)

$$Q_f = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \quad (7)$$

kus:

Q_f – kondensaatori (elektriliini ühes faasis) genereeritav reaktiivvõimsus (VAr)

Valemitest (6) ja (7) nähtub, et kaabelliinide 10–20 korda suuremad mahtuvused põhjustavad ka ligi 10–20 korda suuremaid laadimisvoole ning genereeritavaid reaktiivvõimsusi. Oluline on siinjuures märkida asjaolu, et genereeritavat reaktiivvõimsust nii õhu- kui ka maakaabelliinide korral mõjutab enim liini pingeklass. Järgnevates tabelites (Tabel 1 ja Tabel 2) on toodud tekkivate laadimisvoolude ning reaktiivvõimsuste erinevused õhu- ja kaabelliinide korral.

Tabel 1 on näitena toodud ühe ja sama õhuliini korral (330 kV üheaabelaline õhuliin, mille faasijuhiks on kolmeste lõhisfaasidega 3x402 mm² standardsed alumiiniumjuhid, õhuliini faasijuhi mahtuvuseks on arvutustes võetud 133 nF/km, õhuliini faasijuhi suurimaks lubatavaks kestevvoolu väärtuseks on võetud 2 300 A) tekkivad mahtuvuslikud laadimisvoolud ning genereeritavad reaktiivvõimsused erinevate liinipingete korral.

Tabel 1. Õhuliin

| U_l | I_f | Q_l | S_l | l |
|-------|-------|---------|-------|--------|
| kV | mA/km | kVAr/km | MVA | km |
| 330 | 800 | 455 | 1 320 | 2 880 |
| 110 | 270 | 50 | 440 | 8 650 |
| 20 | 55 | 8 | 80 | 43 230 |

Tabel 2 on näitena toodud ühe ja sama kaabli korral (2500 mm² vaskjuhiga ja 25 mm XLPE isolatsiooniga, kaabelliini faasijuhi mahtuvuseks on arvutustes võetud 2 500 nF/km, kaabelliini faasijuhi suurimaks lubatavaks kestevvoolu väärtuseks on võetud 1 345 A) tekkivad mahtvuslikud laadimisvoolud ning genereeritavad reaktiivvõimsused erinevate liinipingete korral.

Tabel 2. Kaabelliin

| U_l | I_f | Q_l | S_l | l |
|-------|--------|---------|-------|-------|
| kV | mA/km | kVAr/km | MVA | km |
| 330 | 15 000 | 8 550 | 770 | 90 |
| 110 | 5 000 | 950 | 255 | 270 |
| 20 | 900 | 140 | 45 | 1 480 |

kus:

U_l – liinipinge,

I_f – faasijuhis tekkiv mahtvuslik laadimisvool ühe liinikilomeetri kohta,

Q_l – liini poolt genereeritav reaktiivvõimsus ühe liinikilomeetri kohta,

S_l – liini edastatav näivvõimsus faasijuhile suurima lubatava kestevvoolu väärtuse korral,

l – liini pikkus, kui laadimisvoolu väärtus võrdub faasijuhile suurima lubatava kestevvoolu väärtusega.

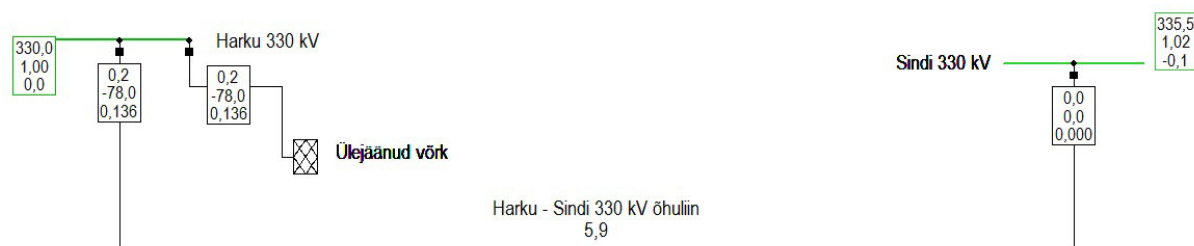
Tabelites (Tabel 1 ja Tabel 2) toodud väärtused on ligikaudsed ning mõeldud võimalikult näitliku ülevaate saamiseks. Arvutused on tehtud lihtsustatult, liinide koondparameetrite alusel. Tabelites näidatud tulp l on toodud laadimisvoolu mõju lihtsaks hindamiseks liini läbilaskevõimele, selle praktiline väärtus, eriti õhuliinide korral, on tagasihoidlik. Pikemate liinide kui 200...300 km tuleb õigete arvutuste saamiseks arvestada liini jaotatud parameetritega. Seda eelkõige seetõttu, et väga pikkade liinide korral on liinide pikkused võrreldavad juba liini lainepikkusega λ ning arvestada tuleb ka laine protsessi mõjudega.

Tabelitest (Tabel 1 ja Tabel 2) nähtub, et näitena toodud kaabelliini *ca* 19 korda õhuliinist suurem mahtvus põhjustab ka sama arv korda suuremaid laadimisvoolusid ning genereeritavaid reaktiivvõimsuseid. Eriti ilmekas on tulp l Tabel 2, kust selgub, et kui 330 kV maakaabelliini korral ületada 90 km piir, siis ületab laadimisvool kaabli suurimat lubatavat kestevvoolu. Siit võib järeldada, et järelikult pole üheainsa üle 90 km pika reaktiivvõimsuse kompenseerimiseta kaabelliini ehitamine mõttekas, kuna – piltlikult öeldes – kaabel lihtsalt sulaks ära, kui see vooluvõrku lülitada.

Õhu- ja kaabelliinide reaktiivvõimsuste kompenseerimine

Nagu eelpool mainitud, jaotuvad vahelduvvoolu õhuliinide parameetrid (pikiinduktiivsused, põikimahtuvused), olenemata nende pingeklassidest, tehnilises mõttes küllaltki sobilikult, sest nende vajadus reaktiivvõimsuse kompenseerimisele on üsnagi mõõdukas.

Järgnevalt on toodud näiteid rajatava *Harku-Lihula-Sindi 330 kV* liini alusel, mille kogupikkuseks on planeeritud 170 km. Joonis 4 on toodud nn lihtne võrk, mis koosneb toiteallikast (sõlm *Harku*), õhuliinist (*Harku-Sindi*) ja tarbijast (sõlm *Sindi*), mille koormuseks 0, ehk liin on nn tühijooksul. (Joonised, Joonis 4 – Joonis 6 ja Joonis 13 on toodud ka töö lisas, Lisa 1.)



Joonis 4. *Harku-Sindi 330 kV* kompenseerimata üheahelalise õhuliini modelleerimine

Joonis 4 on näha modelleerimisprogrammiga DIgSILENT PowerFactory tehtud arvutused. Tühijooksul oleva *Harku-Sindi* õhuliini mahtuvustest põhjustatud laadimisvoolud (136 A) piiravad liini läbilaskevõimet 5,9% ulatuses ning genereeritud reaktiivvõimsuse (78 MVar) tulemusena tekib Sindi sõlmes 5,5 kV pingetõus. On ilmne, et vaadeldava õhuliini reaktiivvõimsuse kompenseerimisvajadus on mõõdukas.

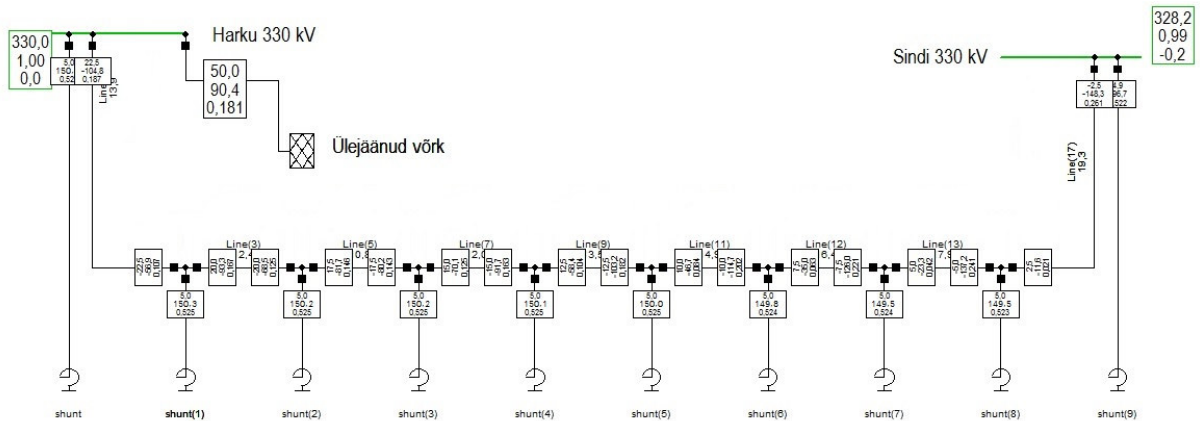


Joonis 5. *Harku-Sindi 330 kV* kompenseerimata üheahelalise maakaabelliini modelleerimine

Joonis 5 on näha, et tühijooksul oleva *Harku-Sindi* üheahelalise kaabelliini mahtuvustest põhjustatud laadimisvoolud (2 805 A) piiravad liini läbilaskevõimet 207,8% ulatuses, see tähendab, et tekkivad laadimisvoolud ületavad *ca* 2 kordselt kaablile lubatavaid kestvaid koormusvoolusid. Piltlikult öeldes – kaabel lihtsalt sulaks ära, kui see vooluvõrku lülitada.

Genereeritava reaktiivvõimsuse (1 603 MVar) tulemusena tekiks Sindi sõlmes 67,7 kV pingetõus. Tasub mainida, et Eesti elektrijaamade koguvõimsus jääb samasse suurusjärku, mida antud kaabel reaktiivvõimsuse näol genereeriks. Seega – kui kaabel taluks *ca* 2 korda suuremaid koormusvoolusid, läheks vaja pea kõikide Eestis olemas olevate elektrijaamade sünkroongeneraatoreid, et kompenseerida (tarbida) kaabli poolt genereeritud reaktiivvõimsust.

Eelnevast võib järeldada, et kõrge- ja ülikõrgepinge kaabelliinide korral on reaktiivvõimsuste kompenseerimisvajadus hädavajalik.



Joonis 6. Harku-Sindi 330 kV kompenseeritud üheahelalise maakaabelliini modelleerimine

Optimaalse kaabelliini pikkuse, mille järel tuleb reaktiivvõimsust tarbida, määramine on tehnilis/majanduslik kalkulatsioon. Siin lähtutakse peamiselt kaablite ja šuntreaktorite maksumuselt. Kuna kaablis tekib mahtuvuslik vool piirab kaabelliini edastusvõimsust, siis oleks tehniliselt mõistlik, kui šuntreaktorid asetseksid võimalikult lühikestel kaabliõikudel, et tekiks mahtuvuslik vool tarbitaks n-ö kohapeal ning see ei voolaks mööda liinijuhti. Kuna aga šuntreaktorid on väga suure maksumusega elektrivõrgu seadmed, siis eelistatakse neid majanduslikel põhjustel süsteemi lisada nii vähe kui võimalik.

110 kV kaabelliinide korral peetakse optimaalseks lahendust, kui reaktiivvõimsust kompenseerida iga ca 50 km järel. Kompenseerimine 330 kV kaabelliinide korral tähendab aga seda, et kaabli genereeritavat reaktiivvõimsust (Tabel 2 Q_i) oleks otstarbekas iga ca 20 km järel šuntreaktoritega tarbida.

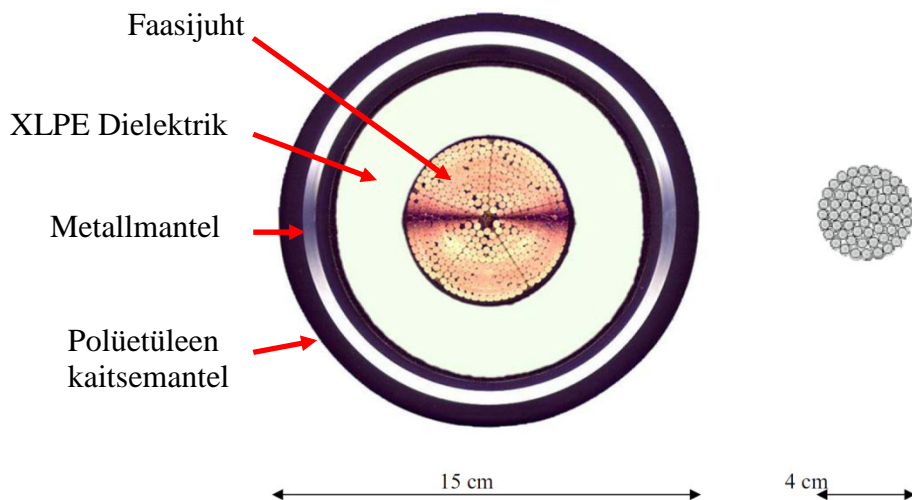
Ehitatava Harku-Lihula-Sindi kaabelliini korral oleks liinile vajalik rajada ca 10 vastavat reaktiivvõimsuse tarbimise punkti (st jaotada liin üheksaks, ligi 20 km pikkusteks osadeks) (Joonis 6). Iga selline reaktiivvõimsuse tarbimise punkt koos vajaliku tehnilise seadmestikuga võrdub sisuliselt keskmise suurusega kõrgepinge alajaama rajamisega. Kui jätta välja Harku, Lihula ja Sindi alajaamad, siis tuleks 330 kV kaabelliini korral rajada täiendavalt veel 7 uut alajaama. Tuleb märkida, et ülikõrgepingeliste alajaamade rajamine on kulukas ning võimsate ja gabariitidelt suurte šuntreaktorite (Joonis 7) hinnad ei erine oluliselt võimsustrafode omast, mis on teatavasti ühed kalleimad ning olulisimad seadmed elektrivõrkudes.



Joonis 7. 400 kV, 160 MVar šuntreaktor reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks, selle tarbimiseks. [3]

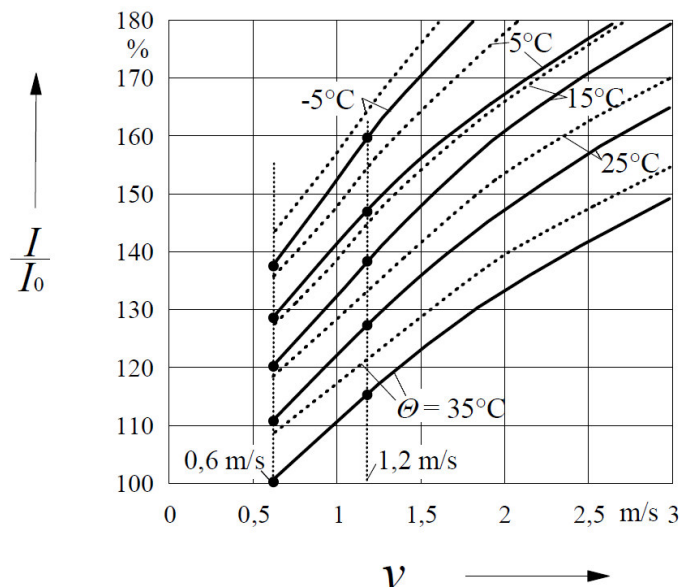
Probleemid tekkiva kaosoojusega

Vahelduvvoolu maakaabelliinide ja õhuliinide edastatavad võimsused sarnaste elektrijuhi ristlõigete korral erinevad teineteisest oluliselt (Joonis 8). Peamiseks probleemiks osutub siin kaovõimsusest tingitud soojuse eemale juhtimine elektrijuhilt, selle jahtumine.



Joonis 8. Maakaabli (vasak) ja õhuliini (parem) faasijuhi suhtelised suurused sarnaste läbilaskevõimsuste korral. [3]

Õhuliinide faasijuhtideks on paljasjuhtmed ning neis eralduv kaosoojus kandub otse edasi juhti ümbritsevale õhule. Liikuv õhk ehk tuul suurendab oluliselt soojusülekannet juhi ja õhu vahel. Külmemate ning tuulisemate ilmade korral saab õhuline olulisel määral n-ö üle koormata (Joonis 9).



Joonis 9. Õhuliini ülekoormatavuse potentsiaal, kui faasijuhtideks on 243-AL1/39-ST1A tüüpi juhid. Talutava koormusvoolu I suhte nimivoolu I_0 sõltuvus tuule kiirusest v (tuule suund on faasijuhtidega risti ning puhub neile küljelt) erinevatel õhutemperatuuridel, kus pidevjoon tähistab ilma soojuskiirgusega ja katkendlik joon soojuskiirgusega soojusülekannet. [4]

Siit tuleneb ka õhuliinidele lubatava ülekandevõimsuse sesoonne erinevus: külmal ajal veikuudel võib 330 kV üheahelalisi ja kolmeste lõhisfaasidega $3 \times 402 \text{ mm}^2$ standardsete alumiiniumjuhtidega õhuliine koormata enam – ca 2900 A, kui soojematel suvekuudel – ca 2300 A. Õhuliini projekteerimise tehniliste nõuetega määratakse faasijuhi suurim lubatud temperatuur, mis seab piirangud liini lubatud kestvale koormusvoolule. Uutele õhuliinidele Eestis on lubatud suurim temperatuur +60 °C, vanadel õhuliinidel on see üldjuhul +35 °C.

Kaablis katab elektrijuhti tahkest dielektrikust isoleermaterjal (Joonis 8), mille peamisteks ülesanneteks on taluda sellele rakenduvaid suuri elektriväljatugevusi, mis kaablis valitsevad ning mitte juhtida elektrit, st isoleerida elektriliselt faasijuhti.

Isoleermaterjaliks olevas dielektrikus, milleks on enamasti immutatud paber või XLPE (ristlülige polüetüleen), tekivad vahelduvpinge tõttu lisaks juhtivuskadudele ka polarisatsioonikaod. Neid kadusid nimetatakse dielektrikuskadudeks P_{df} . Isolatsioonikadusid mõõdetakse ning hinnatakse kaotangensi ($\tan \delta$) vääruste alusel. Immutatud paberi ja XLPE isolatsiooni kaotangensi suurused jäävad üldjuhul suurusjärku, vastavalt $23 \cdot 10^{-4}$ ning $1 \cdot 10^{-4}$ [5].

$$P_{df} = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \cdot \tan \delta \quad (8)$$

kus:

P_{df} – kondensaatoris (elektriliini ühes faasis) tekkiv dielektriline kaovõimsus (W)

U_f – kondensaatori pingeline (elektriliini faasipinge) (V)

π – konstant

f – elektrivõrgu sagedus (Hz)

C_f – kondensaatori mahtuvus (elektriliini faasimahtuvus) (F)

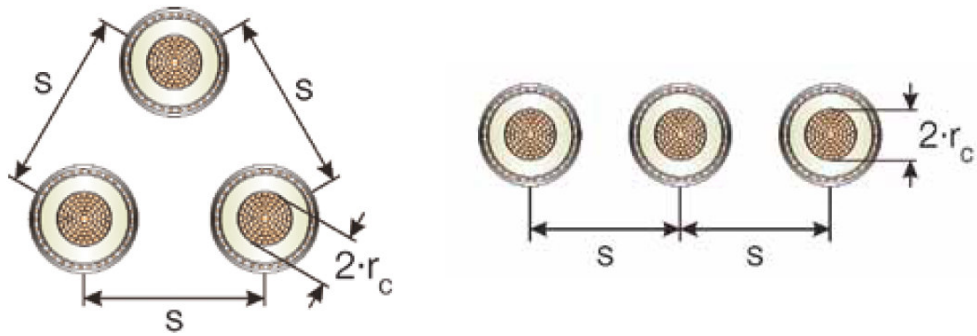
$\tan \delta$ – dielektriku kaotangens

Kui kaabli dielektrikuna kasutada immutatud paberit, jääks ligi 170 km pikkusega *Harku-Lihula-Sindi* 330 kV üheahelalises vahelduvvoolu kaabelliinis tekkiv dielektriline kaovõimsus suurusjärku 10 MW. Kui kaabli dielektrikuna kasutada XLPE'd, jääks sama pikkusega kaabelliini kaovõimsus suurusjärku 0,5 MW. Siit järeldub, et kui kasutada XLPE dielektrikuga kaableid, siis jäävad dielektrikuskaod üsna mõõdukateks.

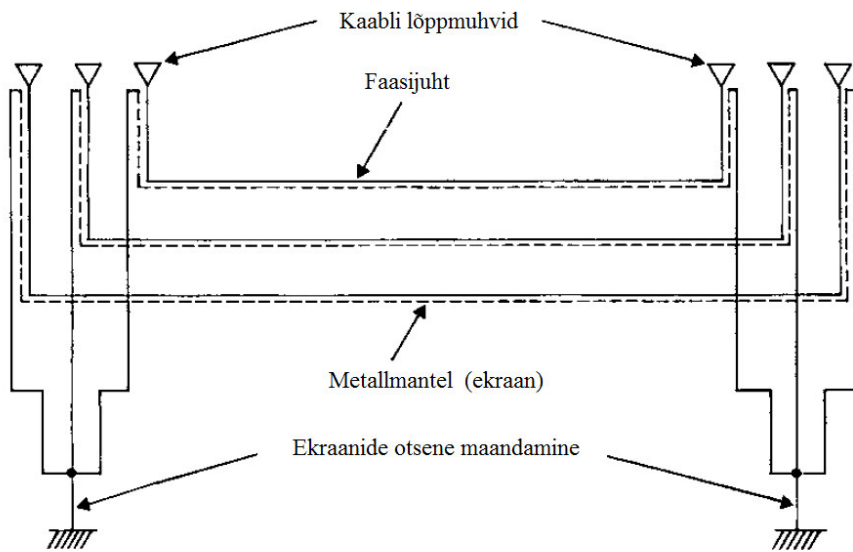
Lisaks headele dielektrilistele isoleerivatele omadustele on dielektrikutel ka termiliselt head isoleerivad omadused. See aga tähendab, et kaablijuhis tekkiv kaosoojus ei kandu kaablist seda ümbritsevasse keskkonda edasi sama kergelt kui õhuliinide korral. Isoleermaterjali kiht takistab soojusülekannet.

Vältimaks faasijuhi liigset kuumenemist, suurendatakse selle ristlõiget (Joonis 8) ja piiratakse lubatud voolutihedust vastavas kaablis. Suurt mõju maakaabelliinide soojusülekandele seda ümbritsevale keskkonnale omab selle ümbritseva keskkonna iseloom, kaablite paigutus (Joonis 10) ja kaablite metallmantlite omavaheline ühendus- ning maandamisviis (Joonis 11 ja Joonis 12).

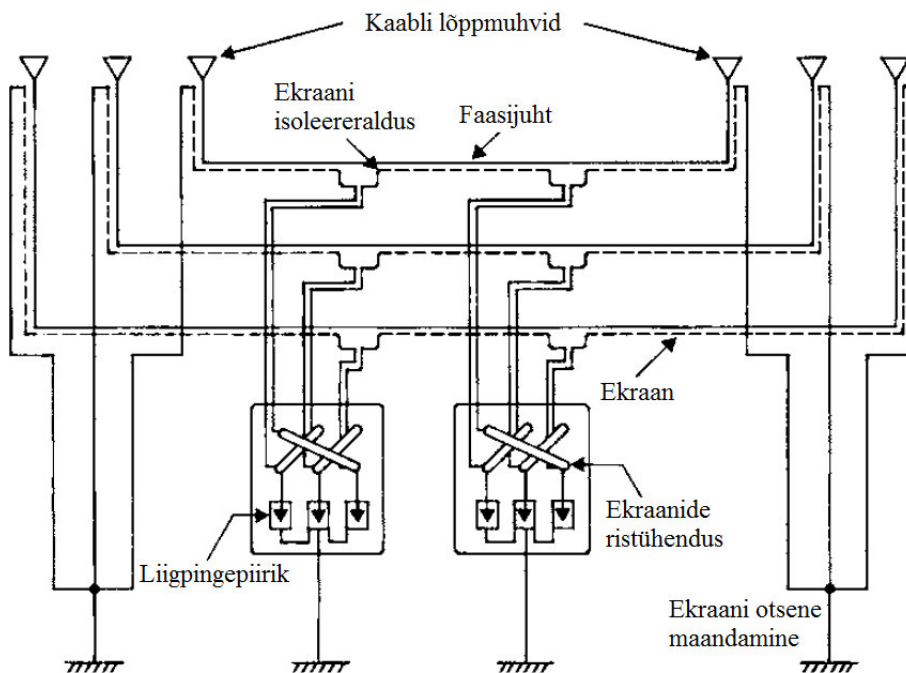
Kaablite paigaldusviiside mõju võib olenevalt kaablist, kaabli metaallmantlite ühendus- ning maandamisviisidest mõjutada kaablile lubatavaid koormusvoole ligi 1,3 korda.



Joonis 10. Kaablite kolmnurkpaigaldus (vasak) ja tasapindpaigaldus (parem) [5]



Joonis 11. Kaablite ekraanide (metallmantlite) otsene maandamine mõlemal pool otstes



Joonis 12. Kaablite ekraanide (metallmantlite) ristühendus (transponeerimine)

Maakaabel võidakse paigutada nt märga või kuiva pinnasesse (kusjuures rolli mängib ka pinnase koostis: liiv, muld, kivi, savi jne), ventileeritavasse või mitteventileeritavasse kaabli-kanalisse.

Pinnasesse paigaldatud võimsatel kaablitel võivad lubatavad koormusvoolud, olenevalt maandus- ja paigaldusviisist, olla 20–35% madalamad kui vabasse õhku paigaldatud kaablitel. Probleemiks on siin kaabli ümber oleva pinnase soojenemine ja ka selle võimalik kuivamine, mistõttu halveneb pinnase soojusjuhtivus, mis omakorda põhjustab kaabli tasakaalu-temperatuuri tõusu. Vältimaks kaabli liigset soojenemist, tuleb sellele lubatavaid koormusvoolusid vähendada.

Pikkade liinide korral võivad kaablitrassi pinnase omadused (soojusjuhtivused) olla vägagi erinevad, mistõttu võib olla vajalik juhtmete vahekauguste (Joonis 10, s) suurendamine kohtades, kus pinnase soojusjuhtivus on madalam. Juhtmete vahekauguste suurendamine aga põhjustab kaabli induktiivsuse kasvu (9) ning kohtades, kus kaabli induktiivsus on suurem, on ka reaktiivtakistused ning kaod suuremad, mis omakorda põhjustavad nendes kohtades lisa kaosoojuse teket.

$$L = 0,05 + 0,2 \cdot \ln\left(\frac{K \cdot s}{r_c}\right) \quad [6](9)$$

kus:

L – kaabelliini induktiivsus ühe kilomeetri kohta (mH/km)

K – paigalduskonstant, $K=1$ – kolmnurkpaigalduse puhul, $K=1,26$ – tasapindpaigalduse puhul

s – kaablitevaheline kaugus, juhtme tsentrist mõõdetuna (mm)

r_c – kaabli faasijuhi raadius (mm)

Kui soovida vältida maapinnase soojusjuhtivuste erinevustest tingitud probleeme, tuleb maakaabelliin rajada ventileeritavatesse või spetsiaalsete vesijahutusüsteemidega kaabli-kanalitesse või -tunnelitesse. Võib eeldada, et selliste ventileeritavate või vesijahutus-süsteemidega maa-aluste rajatiste rajamine ning ekspluatatsioon on märkimisväärselt kulukam kui mitteventileeritava kaablikanali rajamine.

Kuna mitteventileeritavas kaablikanalis asub maakaabel ligi 1,5 m sügavusel pinnases, kus on aastaringselt suhteliselt konstantne temperatuur, siis pole kaabelliinidel ka sesoonseid erinevusi lubatavatel ülekandevõimsustel (nagu eelpool toodud, on suurima saadaoleva 2500 mm² vaskjuhiga ja 25 mm XLPE isolatsiooniga 330 kV maakaabli, mis asub suhteliselt kuivas pinnases, suurim lubatud kestevvool *ca* 1 345 A – viimane oleneb ka kaablite paigalduslaadist ning metallmantlite ühendus- ning maandusviisidest). Maakaabelliine saab aga lühiajaliselt ülekoormata. Maakaablitele lubatavad suurimad juhitemperatuurid sõltuvad tugevalt kaablitüübist, kuid üldjuhul ei ületa need +90 °C.

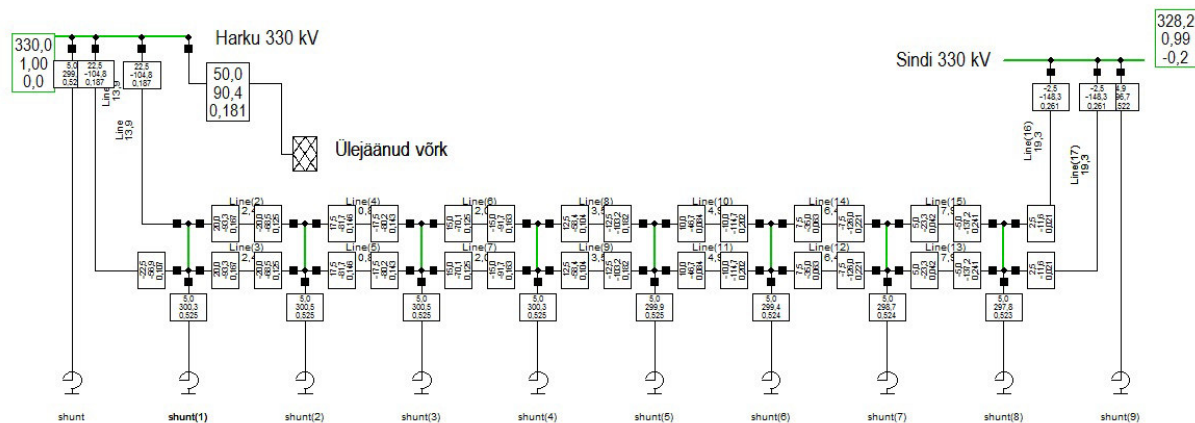
Vahelduvvoolu kaabelliinide läbilaskevõimsustele ja kaablite metallmantlites tekkivatele kadudele avaldavad suurt mõju nende metallmantlite (ekraanide) omavaheline ühendus- ning maandamisviis. Kaablite metallmantlite omavaheline ühendus- ning maandamisviis võivad kaablite tasapindpaigalduse korral mõjutada kaablitele lubatavaid koormusvoole ligi 2 korda ja kolmnurkpaigalduse korral *ca* 1,4 korda.

Peamiseks põhjuseks on siin kaabli faasijuhi koormusvooludest põhjustatud elektripingete indutseerimine kaabli ekraani. Kuna ekraani indutseeritud pinge on nii kaablile, seadmetele kui ka elusolenditele ohtlik, siis tuleb ekraan maandada. Lihtsaimaks ekraani maandamise

mooduseks on selle otsene maandamine mõlemal pool kaabli otstes (Joonis 11). Otsene maandamine aga põhjustab metallmantlis üsna suurte indutseeritud voolude voolamist, mis põhjustavad kadusid ning tõstavad kaabli temperatuuri, piirates sellega kaabli läbilaskevõimet.

Kadude vähendamiseks ning kaabli läbilaskevõime suurendamiseks ühendatakse kaabelliini kaablite metallmantlid teatud vahekauguste järel (muhvikohtades) transponeeritult (ristühendatuna), et vähendada indutseeritavaid pingeid ning metallmantlis voolavaid voolusid (Joonis 12). Kuna kaablite ekraanid ühendatakse transponeeritult, siis toimub neis küll teatav pinge indutseerimine, kuid metallmantlis voolavad voolud on väga väikesed. Suurimad indutseeritavad pinged ekraanis esinevad ekraanide transponeerimise punktides. Nendesse kohtadesse on vajalik lisada ekraanidele ka liigpingepiirikud, mis kaitsevad metallmantlit kaitsevast välist isolatsioonikihti ülepingetest tulenevate ohtude eest. Lisanduvad liigpingepiirikud aga tõstavad kaabelliini rajamise maksumust.

Eelnevast saab järeldada, et kaosoojuse põhjustatud lisaprobleemide tõttu tuleks sama võimsuse edasikandmiseks ühe õhuliini (Joonis 4) asemel ehitada kaks paralleelset maakaabelliini (Joonis 13).



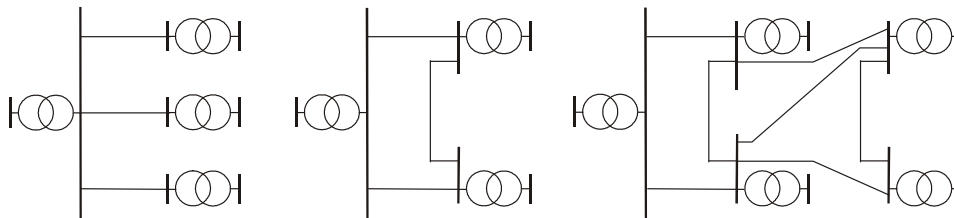
Joonis 13. *Harku-Sindi* 330 kV kompenseeritud kaheaahelalise maakaabelliini modelleerimine

Kaks paralleelset maakaabelliini toodavad kaks korda enam mahtuvuslikku reaktiivvõimsust (*ca* 3 200 MVar), mida tuleb kompenseerida. Joonis 13 on näha, et *Harku-Sindi* kaabelliini reaktiivvõimsuste kompenseerimiseks läheb tarvis ligi 10 šuntreaktorit, ühikvõimsusega 300 MVar. Selline šuntreaktorite arv ja koguvõimsus on juba võrreldavad praeguste, ülikõrgepingevõrgus talitlevate trafode arvu ning nende koguvõimsusega. Viimasena mainitu peaks ilmekalt tooma esile tõiga, et säärase kaheaahelalise kompenseeritud ülikõrgepingelise vahelduvvoolu maakaabelliini rajamine õhuliini asemel tähendab väga suurt lisakulu.

Kaablirikete kestus

Õhuliinid on altimad erinevatele võimalikele riketele (tormid, langenud puud, jääted, saastumised jne) kui kaabelliinid. Õhuliinide rikete altisus sõltub nt liinipingetest, 110 kV õhuliinidel esineb sagedamini rikkeid kui 330 kV õhuliinidel. Kuna kõrgema pingega liinid edastavad suuri võimsusi, on ka nende töö ja töökindluse nõuded rangemad. Mida vähem on rikkeid ning mida lühemad on rikete kestused, seda töökindlam on ka elektrivõrk. Kuna õhuliinid on lihtsa konstruktsiooniga ning enamasti kergesti ligipääsetavad, saab rikkekoha kiiresti kindlaks määrata ning rikke üldjuhul ka suuremate raskusteta eemaldada.

Kõrge- ja ülikõrgepinge õhuliinide rikked on enamjaolt lühiajalised ning nende kestust mõõdetakse tavaliselt sekundites, mõnikord tundides, harvemini päevades ning väga harva nädalates. Kõrge töökindluse tagamiseks on kõrgepingeliinid võrku ühendatud silmuseliselt (ringtoide) (Joonis 14), st et moodustuvad kinnised kontuurid ning ühe liini väljalülitamisel ei toimu tarbijaile toitekatkestust (n-1 kriteerium). Sellise konfiguratsiooniga elektrivõrgus pole üksikute liinide lühiajalised tõrked kuigi suureks probleemiks.



Joonis 14. Radiaal-, ring- ja silmusvõrk

Maakaabelliinid on üldjuhul välise, atmosfääriliste mõjutuste (tormid, vihmad jne) suhtes tundetud. Välispidiseid probleeme valmistavad kas väga võimsad stiihilised loodusjõud või kooskõlastamata ning ebaprofessionaalsed kaevetööd. Kaablite sisemiste rikete peamiseks allikateks võivad olla niiskuse sattumine kaablisse ja osalahendused, mis põhjustavad lõpuks isolatsiooni täieliku läbilöögi.

Kuna kaablid asuvad pinnases ligi 1,5 m sügavuses, on rikete tuvastamine ja eemaldamine aeganõudev töö. Kõrgepingekaabli isolatsioonirikke parandamine nõuab väga spetsiifilisi eriteadmisi ning -oskusi. Kuigi kaablirikkeid toimub suhteliselt harva, on nende kestused väga pikad. 110 või 330 kV kaablirikke kestusi võib üldjuhul mõõta nädalates ja isegi kuudes. Üksikute liinide pikaajalised tõrked on ohuks elektrivõrgu töö- ning töökindlusele.

Kaablite hind ja kaabelliini rajamise maksumus

Keerulisema konstruktsiooni ja spetsiaalsete erimaterjalide tõttu on kaabelliinide eeldatavad eluead 1,5–2 korda lühemad õhuliinide eeldatavast elueast. Õhuliinide eeldatavaks tehniliseks elueaks on ligi 60 aastat. Seega vajavad kaabelliinid rekonstrueerimist iga *ca* 30 aasta järel. Rekonstrueerimine aga tähendab sisuliselt uue kaabelliini ehitamist. Kuuekümneme aasta jooksul tehtavad topeltinvesteeringud kaabelliinidesse on nende selge puudus pikaajalistele õhuliinide ees.

Kuna kaablite valmistamisel tuleb kasutada suurema ristlõikega juhte ning spetsiaalseid isoleer- ja katematerjale, siis on kaablite hinnad kõrgemad kui õhuliini paljasjuhtidel. Toodetavate ülikõrgepingeliste maakaablite pikkused ei ületa üldjuhul 2 km, olenevalt sellest, kui rasked või kui suurte ristlõigetega need on, võivad üksikute kaablite pikkused olla ka oluliselt lühemad. Kaablite pikkusele seavad piiri kaablitrumli suurus ning transportmasina kandevõime. Pikemate ülikõrgepingeliinide rajamise korral tuleb kõik need maksimaalselt *ca* 2 km pikkused kaablijupid jätkumuhvide abil ühendada üheks pikaks liiniks. Nagu eelpool mainitud, on ülikõrgepingeliinide korral jätkumuhvide, mis samamoodi tähendab ka kaabli parandamist, paigaldamine kulukas.

Kui *Harku-Lihula-Sindi* liin rajada kaheaheelalise 330 kV ja üheaheelalise 110 kV kaabelliinina, siis oleks tarvis paigaldada vähemalt 800 jätku- ja/või otsamuhvi. Kaabelliini rajamise kulud tõstavad ka kaevandatava pinnase maht. Olulisima osa liini hinnatõusu annavad siiski kaablid ja nende muhvid ning ka vajavad šuntreaktorid koos sinna kuuluva lisa-seadmestikuga.

Ülemaailmse Kõrgepinge Elektrisüsteemide Nõukogu CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) töögrupi WG B1.07 tehtud uurimuse „*Statistics of AC underground cables in Power networks*” ja ICF Consulting poolt Euroopa Komisjonile koostatud aruande „*Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe*” baasilt võib järeldada, et eri-pingeklasside korral on õhu- ja kaabelliinide rajamise hinnavaheerused erinevad ning suure varieeruvusega.

Kui 110 kV õhu- ja kaabelliini rajamise hinnaerinevused kipuvad jääma 2–4 kordseks, siis 330 kV õhu- ja kaabelliini rajamise hinnaerinevused võivad küündida 5–21 kordseks. Kuna väiksemad hinnaerinevused on üldjuhul toodud suhteliselt lühikeste, alla 20 km kaabelliinide korral, siis pikemate ja mitmeaheelaliste kaabelliinide planeerimisel tuleb arvestada pigem suurema hinnaerinevusega. Liini täpsem ja lõplik hind selgub üldjuhul alles pärast liini ehitamist. Liini esialgse hinna määramist raskendavad oluliselt rajatava elektriliini konfiguratsiooni võimalikud variatsioonid. Samuti mõjutab olulisel määral hindu kaablite hetkeline maailmaturu hind, mis on omakorda sõltuvuses müüjatele esitatud tellimuste määrast ning kaabli toormaterjalide kättesaadavustest ja nende turuhindadest.

Praeguse seisuga on aastatel 2016–2019 rajatava *Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV* õhuliini maksumuseks planeeritud 45 M€. Kui vastav vahelduvpinge õhuliin on soov asendada vahelduvpinge kaabelliiniga, siis tuleks arvestada tehtavate kulutustega, mis jäävad suurusjärku 450–900 M€.

Sellise, ligi kümne- kuni kahekümnekordse lisakulutuse põhjendamine peab elektritarbijatele olema väga hästi põhjendatud, sest vastav hiigelinvesteering tõstaks märkimisväärselt võrgutasusid.

Kokkuvõte õhuliinide ja kaabelliinide eelistest ning puudustest

Lühidalt eelnevat kokku võttes võib vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingele **õhuliinide** korral nende positiivseteks omadusteks pidada:

- ehituslikku lihtsust,
- suhtelist töökindlust,
- rikete tuvastamise ja eemaldamise kiirust,
- pikaealisust,
- suurt ülekandevõimsust võrreldavatel juhiristlõigetel,
- sesoonset (talvist) ülekoormatavust,
- odavust.

Peamisteks negatiivseteks külgedeks võib pidada:

- visuaalset reostust,
- liinitrassi laiude koridore, mida tuleb teatud vältusega hooldada (metsade korral tähendab see üldjuhul lageraiet liinikoridorides).

Kõrge- ja ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu **kaabelliinide** peamisteks positiivseteks omadusteks on:

- visuaalse reostuse puudumine,
- lühiajalise ülekoormamise võimalus,
- rikete vähesus,
- tormikindlus.

Negatiivseteks omadusteks on:

- suur mahtuvus,
- väiksem läbilaskevõimsus,
- eeldatav lühem tehniline eluiga,
- rikete kõrvaldamise pikk kestus,
- kõrge maksumus.

Erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest koosnev nn kombineeritud ülekandeliin

Ülekandeliinide, mis on kombineeritud erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest, rajamisel tuleb arvestada ka nende eritüübiliste liinide kombineeritud positiivsete ning negatiivsete omadustega.

Kõrge- ja ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu **kombineeritud** tüüpi ülekandeliini positiivseteks omadusteks on:

- visuaalse reostuse puudumine soovitatavates liinilõikudes,
- eeldatav madalam ehitusmaksumus, kui liini rajamine terves ulatuses maakaabelliinina.

Mõne üksiku (1–2 tk) ja väga lühikese (kuni 2 km) maakaabelliini lõigu rajamisel on tehniliselt võimalik ka n-õ mööda vaadata spetsiaalsete lisašuntreaktorite vajadusest. Küll aga tuleb arvestada muude probleemidega, mida põhjustab liini kombineeritud olemus.

Negatiivsed tehnilised omadused on järgmised:

- kaob õhuliini positiivne omadus seda sesoonselt ülekoormata,
- kaob kaabelliini positiivne omadus seda lühiajaliselt ülekoormata,
- oht sagedasematele riketele maakaabelliinilõikudes, kuna õhuliinidelt võivad edasi kanduda erinevad äikeseliigpinged,
- äikese liigpingete kaablisse edasikandumise vältimiseks tuleb kaabli otstes kasutada liigpingepiirikuid, mis aga ei suuda tagada täielikku tõrkekindlust (üldjuhul suudavad liigpingepiirikud kaitsta kaableid äikese liigpingete eest *ca* 80% tõenäosusega),
- rikete pikemad kestused isegi sellistel juhtudel, kui rikked toimuvad õhuliini lõikudes (lähtuda tuleb sellest, et vigastatud on maakaabelliinilõik, mistõttu on raskendatud ka automaatse taaslülitamise kasutamine, mis aga omakorda põhjustab katkestuse kestuse pikenedamist, samuti on liini kaitseautomaatika ning taaslülituse seadistused ja sätted keerukamad),
- rikkekoha tuvastamise oluliselt pikem kestus,
- rikke toimumisel maakaabelliini lõigus on rikete kestused väga pikad (nädalad ja kuud),
- kombineeritud liinide pikaajalised tõrked on ohuks elektrivõrgu töökindlusele (eriti ohtlik on olukord, kus kombineeritud liinil toimub rike ajal, kui mõni muu sama alajaama toitev liin ehk ringtoiteliin on hoolduses),
- kui maakaabelliinilõikude osakaal kombineeritud liinis kasvab suureks, tekib vajadus reaktiivvõimsuste kompenseerimisele,
- õhuliinist kõrgem hind.

Olulisimate tehniliste puudustena kombineeritud liinis võib tuua maakaabelliinide lõigud, mis on nn nõrgimateks lülideks ketis.

Negatiivseteks eetilisi/poliitilisteks külgedeks on:

- võrdse kohtlemise reegli eiramine (osades liinilõikudes/asulates on visuaalne reostus, osades mitte – tuleb koostada erisuste lubamise põhimõtted ja reeglid, millede praktiline ning kõiki osapooli rahuldav teostus on aga äärmiselt komplitseeritud ja aeganõudev ülesanne),
- võrdse kohtlemise reegli teostamine (praktilikas tähendaks see liini rajamist täispikkuses maakaabelliinina)

Olulisimaks eetilisi/poliitiliseks probleemiks kombineeritud liinidel on võrdse kohtlemise reegel. Võib eeldada, et isegi ühe erisuse lubamine viib olukorrani, kus suur enamus maaomanikke, kelle maid liinitrass läbib, soovivad või nõuavad ka enda maale jääva liiniosa maakaablistesse viimist. See aga tähendab, et vältimaks kauakestvaid vaidlusi, oleks mõttekas juba terve liin sellisel juhul rajada maakaabelliinina. Nagu eelpool mainitud, on maakaabelliini rajamine finantsiliselt oluliselt kulukam kui õhuliini rajamine.

Eksperthinnangu järeldus

Eksperthinnangu järeldusena on soovitatav *Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV* liin täies ulatuses rajada õhuliinina. Ülikõrgepingeliste maakaabelliinide rajamine on väga kulukas ning nende planeerimised peavad olema eelkõige elektritarbijatele väga hästi põhjendatud, sest 10–20 korda kallimate kaabelliinide ehitamine tõstab võrgutasude hinda ja aeglustab ülejäänud ülekandevõrgu osade kaasajastamist.

Samuti on nii tehnilistest, finantsilistest kui ka eetilis/poliitilistest põhjustest lähtuvalt soovitatav mitte rajada erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest koosnevat nn kombineeritud vahelduvvoolu ülikõrgepingeliini.

Kasutatud kirjandus

- [1] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: TTÜ Elektroenergeetika instituut, 1997.
- [2] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [3] CIGRE, “*Statistics of AC underground cables in power networks,*” *CIGRE Working Group B1.07*, 2007.
- [4] *University of Duisburg Essen.*
- [5] ABB, *XLPE Land Cable Systems, User's Guide*, ABB, 2013.
- [6] A. Aurairatch, “*A Preliminary Study of Loss Factor in Dielectric of Cable Produced in Thailand,*” *King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok*, Bangkok, 2006.
- [7] V. Popov ja S. Nikolajev, *Üldelektrotehnika ja elektroonika alused*, Tallinn: Valgus, 1984.
- [8] R. Benato and D. Napolitano, “*Overall cost comarison between cable and overhead lines including the cost for repair after random failures,*” *Electra*, vol. 256, no. December, pp. 4-13, 2012.
- [9] ICF Consulting, „*Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe,*“ London, 2003.

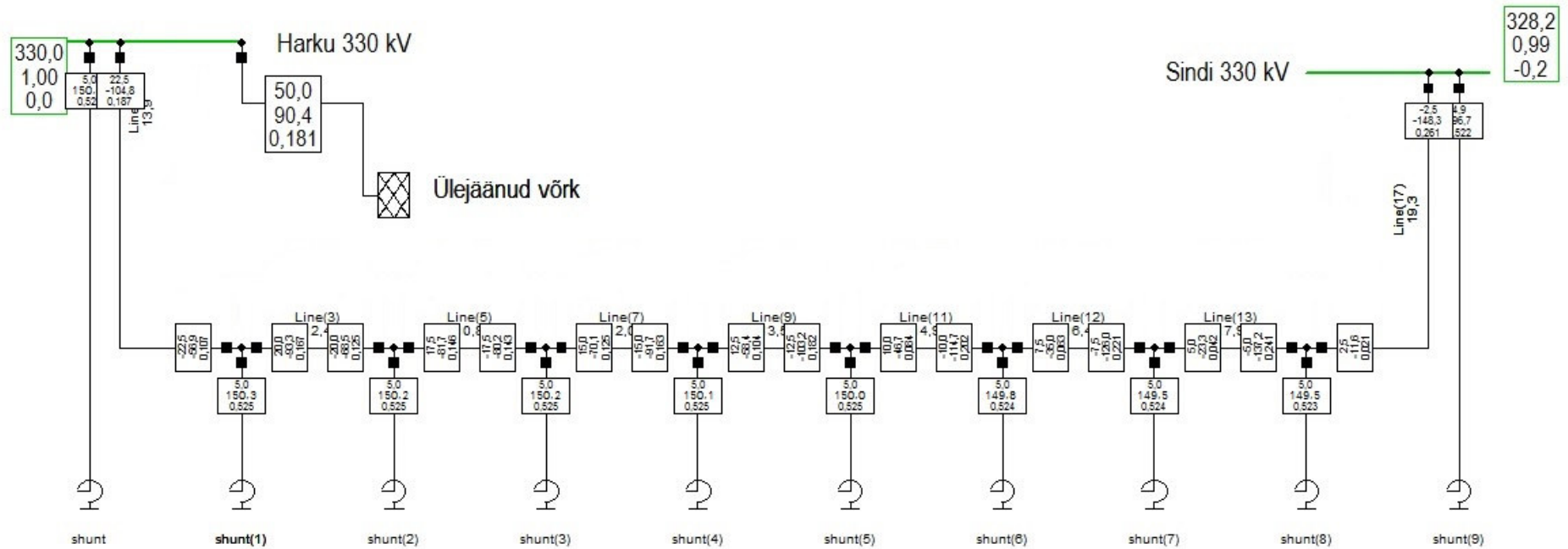
Lisa 1. Modelleerimisprogrammiga DIgSILENT PowerFactory teostatud arvutused kompenseerimata ja kompenseeritud vahelduvvoolu ülikõrgepingeliste õhu- ning maakaabelliinide kohta, kui liinide koormuseks on 0, ehk liinid on tühijooksul.



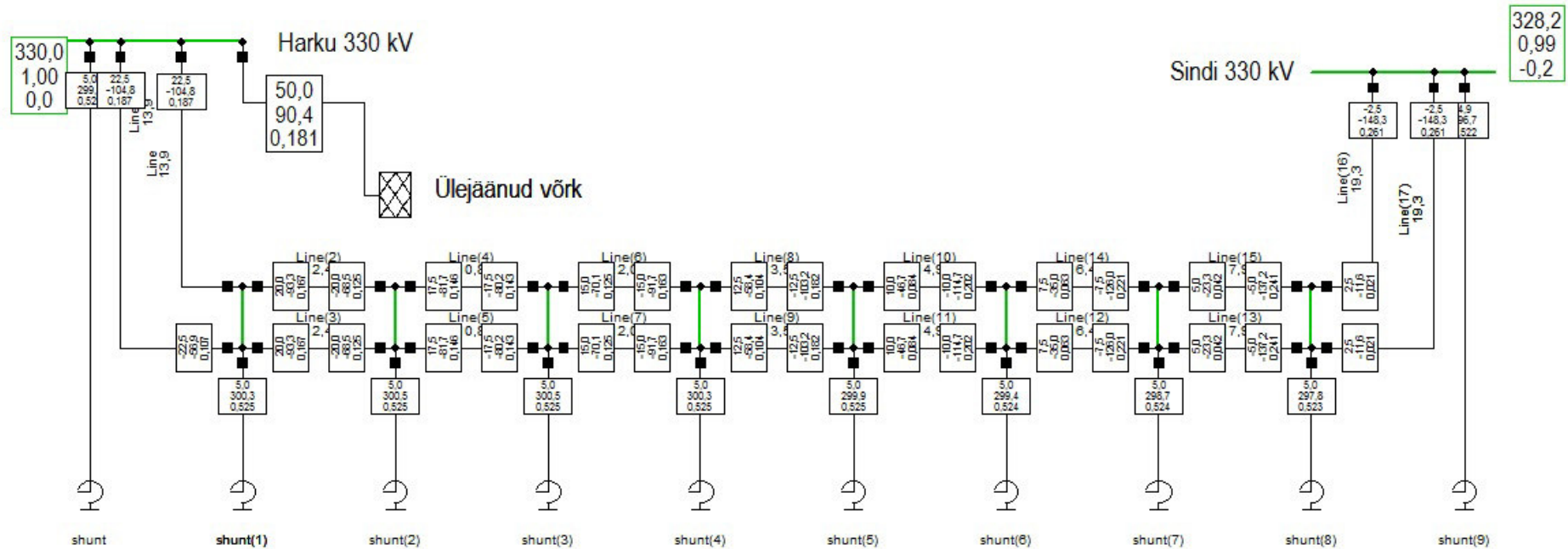
Harku-Sindi 330 kV kompenseerimata üheahelalise õhuliini modelleerimine



Harku-Sindi 330 kV kompenseerimata üheahelalise maakaabelliini modelleerimine



Harku-Sindi 330 kV kompenseeritud üheaahelalise maakaabelliini modelleerimine



Harku-Sindi 330 kV kompenseeritud kaheaheelalise maakaabelliini modelleerimine