



Karel Liblekas

TUULEPARGI ÜLEKANDELIINI OPTIMEERIMINE

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Elektritehnika eriala

Juhendaja: Jaanus Ojangu

Tallinn 2023

Mina Karel Liblekas tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Jaanus Ojangu

Välisjuhendaja Tarmo Tee

Lõputöö on kaitsmisele lubatud Tehnikainstituudi direktori korraldusega nr kuupäev

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karel Liblekas

sünnikuupäev: 06.03.2000

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tuulepargi ülekandeliini optimeerimine

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas 10.05.2023

(autori allkiri)

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS.....	5
1. TUULEPARKIDE STRUKTUUR	9
1.1 Tuulegeneraator ja tuulepark	9
1.2 Elektri ülekandevõrkude konfiguratsioonid	10
1.3 Tuulepargi ülekandeliini kaablid	12
2. TUULEPARGI ÜLEKANDELIINI LAHENDUSTE VÕRDLUS JA OPTIMEERIMINE	18
2.1 Projekteeritud lahenduse kirjeldus.....	18
2.2 Uute ristlõigete kontroll.....	23
2.3 Lühisvoolu taluvuse kontroll	29
2.4 Võimsuskadude arvutamine	32
3. JÄRELDUS.....	38
KOKKUVÕTE.....	40
SUMMARY	41
KASUTATUD KIRJANDUS	43
LISAD	45
Lisa 1. REKA cables AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3-core kaabli tehniline spetsifikatsioon	46
Lisa 2. Prysmian Group AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV kaablite tehniline spetsifikatsioon.....	48

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärk on optimeerida uuritava tuulepargi ülekandeliini, ja teada saada, kas liini ehitusel teist tüüpi kaabli kasutamine oleks tänastel tingimustel olnud jätkusuutlikum ja taskukohasem. Selline optimeerimine on oluline, et maksimeerida tuulepargi efektiivsust, kulutõhusust, töökindlust ja võimsust, samal ajal vähendades selle mõju keskkonnale.

Maailmas kasutatakse elektri tootmiseks kõige enam fossiilseid kütuseid – neid põletatakse soojuselektrijaamades ning soojusest tekkiv veeaur muundatakse turbiinide abil kineetiliseks energiaks. Taastuvenergia ja eelkõige tuuleenergia üks suurimaid eeliseid Eestis on selle potentsiaal vähendada riigi sõltuvust fossiilkütustest. Eesti on ajalooliselt oma energiavajaduse katmisel tuginenud põlevkivile, taastumatule fossiilkütusele. See on aga kaasa toonud märkimisväärse keskkonnakahju, sealhulgas õhusaaste ja kasvuhoonegaaside heitkogused. [1]

Euroopa Liidu pikaajaline energia- ja kliimapoliitika eesmärk on juhtida liikmesriike vähendama süsinikdioksiidi heitkoguseid, edendades samal ajal taastuvenergia tootmist ja energiatõhusust. Eesti riiklikus energia- ja kliimakava rohepöörde tegevusplaanis on planeeritud 2030. aastaks toota taastuvatest allikatest elektrit sama palju, kui on riigisisene tarbimine. See tähendaks taastuvatest allikatest toodetud energia 65%-ilist osakaalu 2030. aastaks. Et selline eesmärk ellu viia, on vaja luua selleks vajalikud eeldused ning Eesti energiasüsteemi areng peab olema järgmisel kümnel aastal kindlalt sihistatud. Eesti kliimaeesmärkide saavutamisel on see väga oluline just puhta ja modernse elektrisüsteemi loomisel. [2]

Üks perspektiivsemaid taastuvenergia vorme Eestis on tuuleenergia. Eesti sobib tuuleenergia tootmiseks hästi pika rannajoone, ulatuslike metsade ja lagendike poolest. Riigi asukoht Läänemere piirkonnas tagab ka tugeva ja ühtlase tuule puhumise aastaringselt. Nende tegurite koosmõju on muutnud Eesti tuuleenergia investeringute jaoks atraktiivseks sihtkohaks. Samuti on tuuleenergia puhtam ja jätkusuutlikum alternatiiv, mis aitab fossiilsete kütuste põletamisest tingitud probleeme leevendada.

Tuuleenergia tootmisest saadava kasu maksimeerimiseks Eestis on valitsus rakendanud erinevaid poliitikaid ja algatusi. Nende hulka kuuluvad soodustariifid, mis annavad fikseeritud hinna taastuvatest allikatest toodetud elektrile, ja taastuvenergia investeringute toetusskeemi loomine. Samuti on valitsus alustanud Läänemere meretuuleenergia projektide arendamist, millel on potentsiaali oluliselt tõsta Eesti

tuuleenergia võimsust. Vabariigi Valitsuse 2022-2023 tegevusprogrammis on välja toodud, et Riigikantselei rohepöörde koordinaatori suunamisel teostatakse planeeringute, keskkonnamõtjude hindamise ja lubade protsessi auditeerimine, et aidata kaasa taastuveniaprojektide elluviimise kiirendamisele [3]. Lisaks keskkonnakahjude vähendamisele on tuuleenergial Eestile oluline majanduslik kasu. Tuuleenergia sektor on riigis juba loonud arvukalt töökohti ning tööstuse kasvades eeldatakse, et see trend jätkub. Tuuleenergia taristu arendamine annab võimalusi ka Eesti ettevõtjatele tarneahelas osalemiseks.

Siiski on tuuleenergeetika arendamisel Eestis ka väljakutseid. Üks olulisemaid on riigi suurus, mis piirab suuremahuliste tuuleenergiaprojektide potentsiaali. Lisaks võib riigi külm kliima tekitada tuuleturbiinidele tehnilisi väljakutseid, mis võivad vajada spetsiaalseid kohandusi, et tagada optimaalne jõudlus.

Viimastel aastatel on Eesti teinud edusamme tuuleenergia kasutamise suurendamisel. Tuuleenergia moodustab suure osa Eestis toodetavast taastuveniast – 2016. aastal moodustas tuul 6,5% (590 000 MWh) kogu elektrienergiast. Aastal 2019 tõusis tuuleenergia hulk võrreldes 2016. aastaga vaid 100 000 MWh, kuid üldise tootmismahu langemise juures tõusis tuuleenergia osakaal 15,4 protsendini. Aastal 2020 moodustas tuuleenergia võrku jõudnud 2,6 miljonist MWh elektrienergiast 31,9% (824000 MWh). [4]

Tänapäevaks on Eestis tuuleparkide koguvõimsus ≈ 330 MW. Neist esimene tuuleelektrijaam on 3 tuulikuga 1,8 MW võimsusega Virtsu I tuulepark, mis valmis aastal 2002. Aastal 2008 ehitati sinna juurde veel üks tuulik. Hetkel on Eesti suurimaks tuulepargiks Aulepa tuulepark. Kahe etapina on sinna ehitatud kokku 16 elektrituulikut koguvõimsusega 48 MW [5]. 2024. aastaks on planeeritud Põhja-Pärnumaa valda Sopi-Tootsi 255 MW 38 tuulikuga tuulepark, mis on Baltikumi suurim tuulepark. Selle tuulepargi valmimisega kahekordistatakse Eestis toodetav tuuleenergia võimsus ning see tuulepark üksi katab üle 8% Eesti elektritarbimisest. [6]

Võib öelda, et tuuleenergial on märkimisväärne potentsiaal pakkuda Eestile jätkusuutlikku ja puhast energiat. Tuuleenergia infrastruktuuri arendamisel on riik juba teinud edusamme ning valitsuse võetud kohustus suurendada taastuvate energiaallikate kasutamist loob soodsa keskkonna edasiseks kasvuks. Õige poliitika ja investeeringute korral võib tuuleenergiast saada lähiaastatel Eestile suur energiaallikas.

Ülemaailmne tuuletööstus avaldas oma raportis, et aastal 2021 lisas tuuleenergia globaalselt võimsust ligi 94 GW, 2020. aastal oli see number 1,8% võrra suurem. Kuigi 2021. aasta maismaa tuulerajatiste arv oli 18% väiksem kui aastal 2020, siis hüppelise arengu tegid Euroopa, Ladina-Ameerika, Aafrika ning Lähis-Ida. Protsentuaalse languse põhjustas maismaatuuleparkide kasvu aeglustumine kahel suurimal tuuleenergia turul, Hiinas ja USA-s. Avamere tuuleenergia võimsust võeti 2021. aastal kasutusele 21,1 GW, 3 korda rohkem kui sellest eelmisel aastal. Hiina panus 21,1 GW juures oli 80%, viies kogu Hiina avamere tuuleenergia võimsuse 27,7 GW-ni. Globaalse Tuuleenergia Nõukogu (GWEC) andmetel on 2021. aasta seisuga ülemaailmne tuuleenergia installeeritud võimsus üle 800 GW. 2020. aastal moodustas tuuleenergia 7% maailma elektritootmisest ning lähiaastatel on oodata selle märkimisväärset kasvu. Lisaks Hiinale ja USA-le on tuuleenergia võimsuse poolest suurimad riigid ka Saksamaa, India ja Hispaania. Maailmas toodetud tuuleenergia hulk varieerub aga sõltuvalt sellistest teguritest nagu ilmastikutingimused ja tuuleturbiinide kättesaadavus. [7]

Kuigi tuuleenergial on palju positiivseid külgi, nagu näiteks see, et tegu on puhta ning taastuva energiaallikaga, tuleb tähelepanu pöörata ka negatiivsetele külgedele:

1. Katkendlikkus – tuuleenergia tootmine sõltub tuule kiirusest, mis võib aja jooksul muutuda ja olla ettearvamatu. See tähendab, et tuuleenergiale ei saa loota, et tagada pidev elektrivarustus ilma varutoiteallikata.
2. Mürasaaste – tuulegeneraatorid tekitavad müra, mis võib häirida lähedal asuvaid kogukondi. Kuigi kaasaegsed tuulegeneraatorid on projekteeritud olema vaiksemad, võivad need siiski tekitada mürasaastet, eriti kui need asuvad elamupiirkondade läheduses. Tegu on madalsagedusliku müraga, mille mõju tervisele puudub. See on tajutav vibratsioonina kuid see nõrgeneb kiiresti õhus levimisel [8].
3. Visuaalne reostus – tuulegeneraatorid on kõrged ja suured ning mõned inimesed peavad neid silmi riivavaks või loodusmaastike ilu kahjustavaks. Suhtumine sellesse on inimestel erinev.
4. Mõju elusloodusele – tuulegeneraatorid on ohuks lindudele ja nahkhiirtele, eriti kui need asuvad rändeteedel või pesitsusaladel. Uuringud on aga näidanud, et tuulegeneraatorid põhjustavad väga väikese protsendi lindude ja nahkhiirte surmadest võrreldes muu inimtegevusega.
5. Maakasutus – tuulegeneraatorid nõuavad märkimisväärsel hulgal maad, eriti suuremahuliste tuuleparkide jaoks. See võib mõjutada metsloomade elupaiku ja põllumajandusmaa kasutamist. Võrreldes aga päikeseelektrijaamadega, on tuuleparkide maakasutus oluliselt otstarbekam.

6. Maksumus – kuigi tuuleenergia on viimastel aastatel muutunud kulutõhusamaks, nõuab see siiski märkimisväärseid esialgseid investeeringuid ja võib mõnel juhul olla kallim kui muud energiaallikad.

Tuuleparkide ehitusega käib kaasas selline definitsioon nagu „NIMBY - not in my back yard“ ehk taastuvenergeetikat tuuleparkide näol pooldatakse, kuid keegi ei soovi seda enda lähedusse. Põhjuseks eelnevalt mainitud tuulegeneraatorite poolt tekitatav müra ning visuaalne reostus, kuid tuuleparkidel arvatakse olevat ka negatiivne mõju lähipiirkonnas olevale kinnisvara ja maa väärtusele [9]. Energiapoliitika ja -arengu otsuste tegemisel on oluline kaaluda tuuleenergia positiivsed ja negatiivseid külgi.

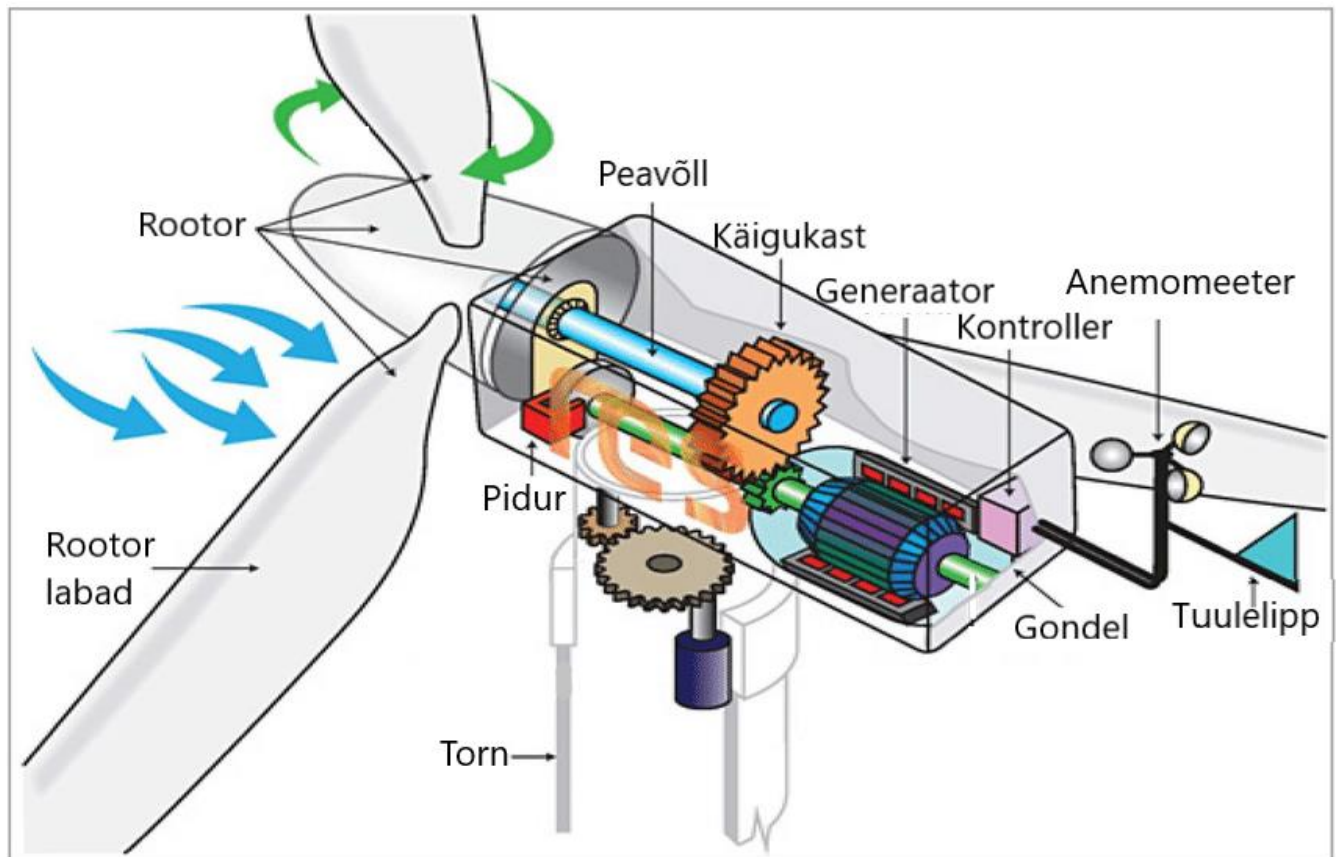
Tuulepargi ehitamine ja haldamine on kulukas mitme teguri tõttu, sealhulgas alginvesteeringu maksumus, jooksvad hooldus- ja tegevuskulud ning tuulepargi elektrivõrguga ühendamise kulud. Tuulepargi ehituse alginvesteeringu maksumus on suur, kuna on vaja spetsiaalseid seadmeid (tuulikud, tornid ja vundamendid), aga ka platsi ettevalmistamise, transpordi ja paigaldamisega seotud kuludel on oma osa. Lisaks vajavad tuuleturbiinid hooldust ja perioodilisi uuendusi, et tagada optimaalne jõudlus, mis võib suurendada tuulepargi tegevuskulusid. Tuulepargi elektrivõrguga ühendamise kulud võivad samuti olla väga suured, eriti avamere tuuleparkide puhul, mis vajavad spetsiifilisi kaableid.

1. TUULEPARKIDE STRUKTUUR

1.1 Tuulegeneraator ja tuulepark

Mis on tuulegeneraator ning kuidas ta toimib?

Tuulegeneraator on seade, mis muundab tuule kineetilise energia elektrienergiaks. See koosneb tavaliselt järgmistest komponentidest [10]:



Joonis 1. Tuulegeneraatori konstruktsioon [11]

1. Torn: Kõrge struktuur, mis toetab teisi generaatori komponente ja tõstab rootorlabad maapinnast kõrgemale, et koguda rohkem tuuleenergiat.
2. Rotorlabad: Kaks või kolm pikka kumerat laba, mis on kinnitatud rootorikasseti. Labad on mõeldud tuuleenergia kogumiseks ja rootori pöörlemise käivitamiseks. Tavaliselt valmistatud

kergetest ja vastupidavatest materjalidest, nagu klaaskiuga tugevdatud polüester või epoksiid- või süsinikkiuga tugevdatud polümeer.

3. Rotor: Rotor koosneb rootorlabadest ja rootorikassetist, mis ühendab rootorilabasid peavõlliga.
4. Peavõll: Võll, mis ühendab rootorikasseti käigukasti ja generaatoriga gondlis.
5. Käigukast: Komponent, mis tõstab rootori kiirust, et generaatoril oleks rohkem pöördeid.
6. Generaator: Seade, mis muundab rootori pöörleva energia elektrienergiaks.
7. Gondel: Karbi kujuline korpus/struktuur, mis hoiab käigukasti, generaatorit ja muid komponente ning on paigaldatud torni tippu.
8. Anemomeeter: Seade, mis mõõdab tuule kiirust ja edastab andmed juhtimissüsteemile.
9. Tuulelipp: Seade, mis mõõdab tuule suunda ja edastab andmed juhtimissüsteemile.
10. Juhtimissüsteem/Kontroller: Arvutisüsteem, mis jälgib tuule kiirust ja suunda ning reguleerib tuulegeneraatori orientatsiooni optimaalse jõudluse saavutamiseks.
11. Pidurdussüsteem: Süsteem mehaaniliste piduritega, rootori peatamiseks hädaolukorras või hoolduse tarbeks.

Tuuliku efektiivsust mõõdetakse tavaliselt kasutegurina, mis on turbiini toodetud võimsuse ja tuules saadaoleva võimsuse suhe. Seda mõjutavad mitmed tegurid, näiteks rootori labade aerodünaamiline disain, tuule kiirus, õhutihedus ja rootori pöörlemiskiirus. Teoreetiliselt on tuulegeneraatori maksimaalne efektiivsus tuntud kui Betzi piir, mis on ligikaudu 59,3% [12]. See piirang põhineb tuule kineetilisel energial, mida rootori labad suudavad kinni püüda. Tegelikult saavutavad tuulikud aga tavaliselt umbes 20-40% kasuteguri, mis on tingitud sellistest teguritest nagu tuule turbulents, labade takistus ja mehaanilised kaod [13]. See tähendab, et nad suudavad muundada umbes 20-40% tuule kineetilisest energiast elektrienergiaks. Praktikas sõltub tuuliku kasutegur paljudest tingimustest, sealhulgas tuule kiirusest, turbiini suuruselt ja kontsruktsioonist, õhu tihedusest ning rootori pöörlemiskiirusest.

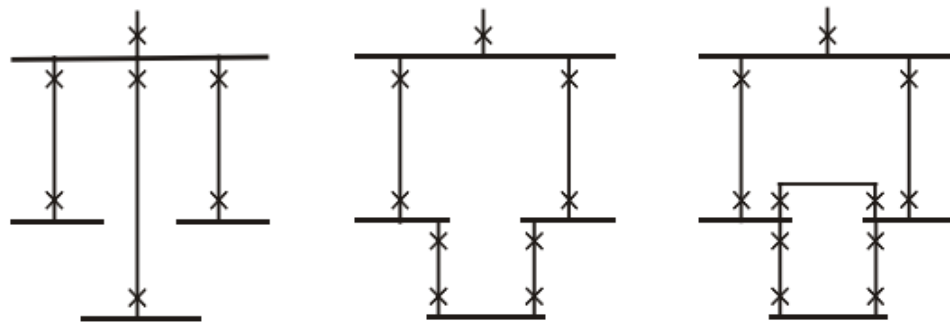
1.2 Elektri ülekandevõrkude konfiguratsioonid

Maailmas on kasutusel kolme erinevat tüüpi elektri ülekandevõrke [14]:

- 1) Radiaalvõrk – lihtne jaotusvõrk, kus vool liigub ühest allikast (tavapäraselt alajaamast) lõpptarbijateni läbi jaotusliinide seeria. Selline jaotusvõrgu tüüp on tavaliselt kasutusel madala asustustihedusega piirkondades või seal, kus elektrivajadus ei ole väga suur.

- 2) Ringvõrk – arenenum jaotusvõrk, mis moodustab suletud ahela. Ringvõrgus saab elekter „voolata“ mõlemas suunas, mis tagab redundanttsuse ja usaldusväärse elektrivarustatuse. Kui ühes võrguosas on rike, saab elektrit suunata ümber teiste võrguosade kaudu. Sellist tüüpi võrgud on kasutusel tavaliselt linnapiirkondades, kus nõudlus elektri järele on suurem.
- 3) Silmusvõrk – kõige arenenum jaotusvõrk, kus võrgu erinevate osade vahel on mitu ühendust. Silmusvõrgus saab elekter „voolata“ mitut teed pidi, mis tagab väga töökindla ja stabiilse elektrivarustatuse. Silmusvõrk on kasutusel kriitilistes rajatistes, nagu haiglad, andmekeskused ja sõjaväerajatised.

Mainitud konfiguratsioonide skeemid on näidatud alljärgneval joonisel (Joonis 2).



Joonis 2. Radiaal-, ring- ja silmusvõrk [15]

Tuulepargi rajamisel sõltub elektrivõrgu liik tuulepargi asukohast ja selle suurusest. Kõige levinum viis tuulepargi elektrivõrguga ühendamiseks on radiaalvõrgu kaudu. Näiteks, kõik Eesti tuulepargid on ehitatud just radiaalvõrgu skeemi järgi. Radiaalvõrku eelistatakse, sest see on kõige kuluefektiivsem viis tuulegeneraatorite ühendamiseks elektrivõrku.

Teiste võrgutüübid on keerukamad ja kallimad, kuna see hõlmab täiendavate ülekandeliinide ja alajaamade ehitamist, et luua tugevam ja omavahel ühendatud võrk. See võib olla eriti keeruline kaugemates piirkondades või piiratud olemasoleva elektritaristuga piirkondades.

Radiaalvõrgu eeliseks on ka see, et see võimaldab elektrivõrku lihtsamalt hooldada ja remontida, selle käit on lihtsam kui on ring- ja silmusvõrgul. Kuna iga alajaam on ühendatud ühe ülekandeliiniga, on võimalikke probleeme lihtsam isoleerida ja parandada, ilma et see mõjutaks võrgu teisi osi.

Veel on üheks radiaalvõrgu eeliseks see, et elektritootmisvõimsuse suurendamine või vähendamine on paindlik. Elektrinõudluse kasvades saab tuuleparki lisada täiendavaid tuulikuid ja ühendada need olemasoleva radiaalvõrguga, mis võimaldab elektri tootmisvõimsust järk-järgult ja kulutõhusamalt laiendada. Tuulepargi radiaalvõrgu suurim miinus on see, et selle töökindlus võrreldes muud tüüpi elektrivõrkudega või olla kehvem, eriti rikke või katkestuse korral.

Kuna radiaalvõrk hõlmab ühte ülekandeliini, mis ühendab tuuleparki lähima alajaamaga, võivad kõik sellel liinil tekkivad probleemid tekitada häireid terves võrgus. See tähendab, et kui ülekandeliin on mingil põhjusel katkestatud või esineb rike, võib kogu tuulepark võrguühendusest ilma jääda. Näide: tuulikud on ühendatud jadamisega ja alajaama poolt esimese tuuliku toitekaabel on rikkis -> kõik rikkekohast tagapool asetsevad tuulikud on rikkis ajal kasutatud elektrienergia tootmise seisukohalt.

Ring- või silmusvõrk on võib selles osas olla töökindlam, kuna see hõlmab mitut omavahel ühendatud ülekandeliini ja alajaama, mis võimaldab elektrikatkestuse või rikke korral teisi ülekandeteid. Lisaks ei pruugi radiaalvõrk elektrijaotuse seisukohalt olla sama tõhus kui muud tüüpi võrgud, sest lähima alajaamani jõudmiseks peab elekter läbima pikema vahemaa mööda ühte ülekandeliini, mis võib põhjustada rohkem kadusid. Siiski väärib mainimist, et radiaalvõrgu võimalikke puudusi saab leevendada nõuetekohase projekteerimise ja ehitusega ning seda tüüpi võrk jääb tänapäeval paratamatult tuuleparkide elektrivõrguga ühendamisel parimaks võimaluseks.

1.3 Tuulepargi ülekandeliini kaablid

Tuulepargi ülekandeliini valikul, eelistatakse maakaablit õhuliinile ning seda mitmel põhjusel. Maakaabelliin on töökindlam ja ohutum, kuna ta on maa all ning kaitstud keskkonnategurite eest paremini kui on õhuliin, lisaks on ka energiakaod väiksemad. Maakaabelliini materjali- ja paigalduskulud on kallimad kui õhuliinil – paigaldamine nõuab suuremas osas kaevetöid, mis on aeganõudvamad kui õhuliinide paigaldamine ning maakaabel on oma isolatsiooni tõttu kallim kui õhuliini haljas juhe. Lisaks tuleb arvestada ka hooldus- ja remondikuludega - kuigi kaabelliin nõuab vähem hooldust kui õhuliin, siis hoolduse või remondi korral tuleb alati arvestada kaevetöödega, mis teevad kogu protsessi kulukaks ja ajamahukaks. Üks suur argument elektri ülekande valikul on esteetika, kuna õhuliin võib ala visuaalset reostada, kuid maakaabel on maa all silmale nähtamatu. Kuigi kaabelliinide paigaldus ja hooldus on

kallim kui õhuliinil, pakuvad need eeliseid eelkõige töökindluse, kuid ka ohutuse, esteetika ja tõhususe osas, mis muudab need paljudes rakendustes eelistatud valikuks.

Maakaabli täpne ülesehitus või struktuur võib olenevalt konkreetsest rakendusest ja pingetasemest erineda. Üldine ülevaade komponentidest, mida leiame kõrgepingekaablist [16]:

1. Juht – põhifunktsiooniks elektrivoolu kandmine, tavaliselt valmistatud vask- või alumiiniumjuhtmest.
2. Isolatsioon – ümbritseb juhti, takistab elektrivoolul kaablist väljumist. Kõrgepingekaablites kasutatakse tavaliselt mitut kihti isolatsiooni, sealhulgas pooljuhtivat varjestust, isoleerivat teipi ja isolatsioonimaterjali mis peab olema kvaliteetne, nagu polüetüleen (XLPE, PE, PEX), etüleenpropüleenkumm (EPR) või polüvinüülkloriid (PVC).
3. Pooljuhtiv varjestus – kiht mis on kantud otse juhile ja on mõeldud isolatsioonikihile mõju vähendamiseks ja elektriliste mahalaadimiste ennetamiseks.
4. Metallvarjestus – tavaliselt valmistatud vasest või alumiiniumist eesmärgiga kaitsta väliskeskkonda kaabli elektromagnetilise mõju eest.
5. Mantel – väliskest, mis on mõeldud kaabli kaitseks füüsiliste kahjustuste ja keskkonnategurite, nagu päikesevalguse, niiskuse ja kemikaalide eest.

Väga levinud kaabel tuuleparkide rajamisel on AHXAMK-W, ehk teisisõnu ja edaspidi Wiski – kaabel. Tegu on kolmesoonelise kokku keeratud keskpinge jõukaabliga kus kolm faasijuhet on keerutatud ümber keskjuhtme. Sellest tuleneb ka antud kaabli suur eelis, sest kaabli paigaldusel paigaldatakse kõik 3 faasi ühe korraga. Seda toodetakse erinevate ristlõigetega, et sobituda erinevate rakenduste ja võimsusnõuetega. Tuuleparkides on enamasti kasutusel $3 \times 120 \text{ mm}^2$, $3 \times 240 \text{ mm}^2$ ja $3 \times 300 \text{ mm}^2$ Wiski - kaablid. Joonis 3. on näha AHXAMK-W 36 kV jõukaabli komponendid ning tabelis on selle konstruktsioon lahti seletatud (

Tabel 1).

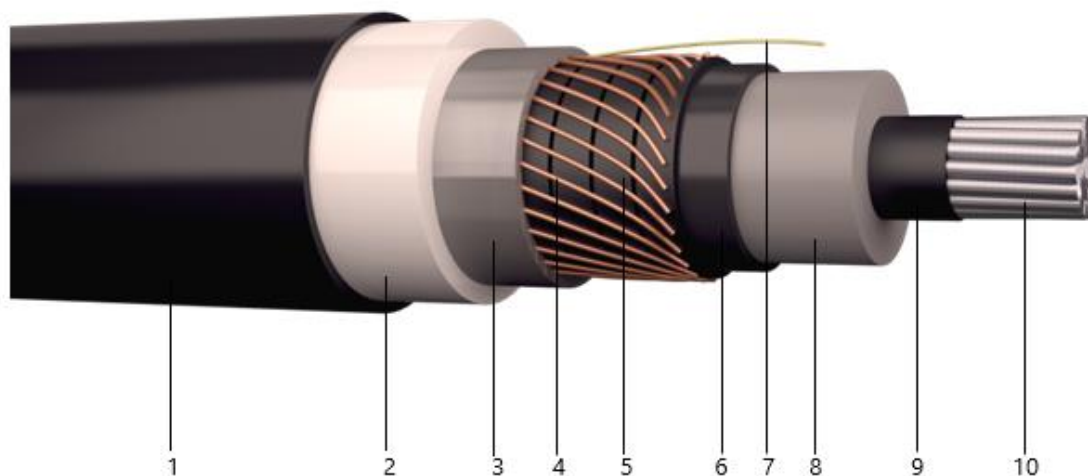


Joonis 3. AHXAMK-W 19/33 (36) kV kaabli komponendid [Lisa 1]

Tabel 1. AHXAMK-W 19/33 (36) kV kaabli konstruktsioon [Lisa 1]

1	Väliskest – UV-kindel PE
2	Varjestus – alumiiniumlaminaat seotud väliskestaga
3	Sisemine kate – juhtiv teip
4	Ekraan - pooljuhtiv PEX
5	Isolatsioon, PEX
6	Ekraan - pooljuhtiv PEX
7	Juht – keerutatud, ümar ja tihendatud alumiiniumjuhe, vastavalt IEC 60228 klass 2, pikisuunas veekindel
8	Keskjuht – ümar, keerutatud ja tihendatud vaskjuhe

Võrreldes Wiski - kaabliga on ühesoonelise kaabli paigaldus aeganõudvam, kuid eeliseks on see, et erinevalt Wiski – kaablist saab seda kaablit paigaldada maksimaalselt 1000m lõikudena, Wiski – kaabli maksimaalne pikkus on 500m, sest seda ei mahutata rohkem kaablitrumlile. Joonis 4. on välja toodud AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV kaabli komponendid ning tabelis 2. on kirjeldatud selle konstruktsioon (Tabel 2).



Joonis 4. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV kaabli konstruktsioon [Lisa 2]

Tabel 2. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV kaabli kontsruktsioon [Lisa 2]

1	Ekstrudeeritud pooljuhtiv UV-kindel väliskest, PE – kasutatakse terviklikkuse kontrolliks
2	Kaabli väliskest, PE – UV-kindlus saavutatakse spetsiaalsete lisandainetega
3	Ristsuunaline veetõke – alumiiniumlaminaat, seotud väliskestaga
4	Varjestus – lõõmutatud vaskjuhtmed koos alumiiniumlaminaadiga
5	Pikisuunaline veekindlus – pooljuhtiv veekindel teip
6	Isolatsiooni ekraan – pooljuhtiv kopolümeerkompaund, elektrivälja ühtlustamine
7	Koorimisnõör – Aramiid.
8	Isolatsioon – XLPE, minimaalne paksus 8,0 mm
9	Soone ekraan – pooljuhtiv kopolümeerkompaund, elektrivälja ühtlustamine
10	Juht – keerutatud, ümar ja tihendatud alumiiniumjuhe, vastavalt IEC 60228 klass 2, pikisuunas veekindel

Tabel 3. kirjeldab projekteeritud lahendusel kasutatud 36kV maakaabli tehnilisi andmeid, mis on hiljem osaliselt vajalikud arvutuste teostamiseks.

Tabel 3. AXLJ-TTCL TSLF 630 mm² maakaabli tehnilised andmed [17]

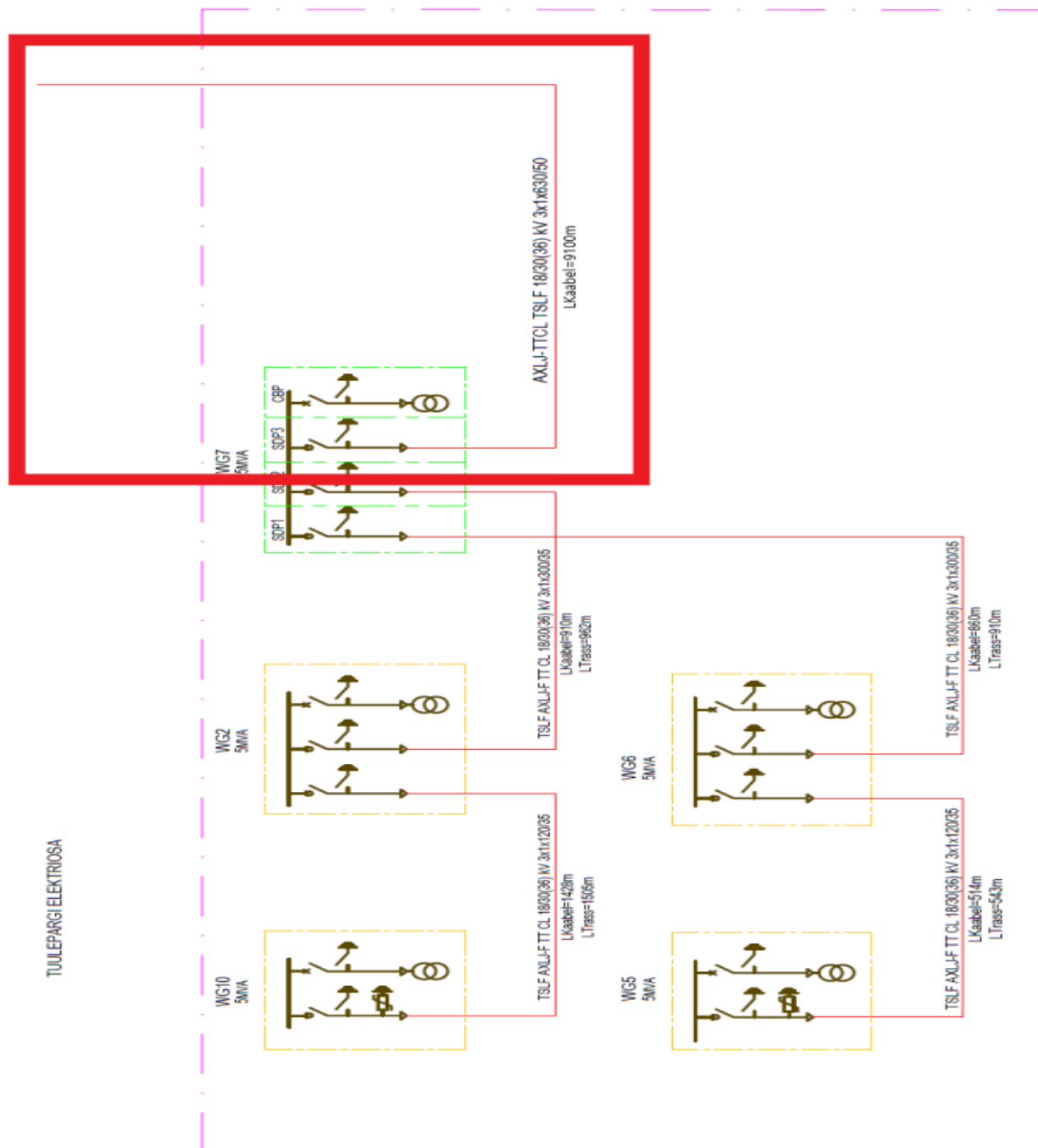
Tüüp: AXLJ-TTCL TSLF		Tootja: Prysmian Group	
Tehnilised parameetrid			
Nimipinge U0/U	18/30	kV	
Lubatud max kestevpinge	36	kV	
Soone töövool (65 °C)	635	A	
Maksimaalne kaabli temperatuur	90	°C	
Maksimaalne kaabli temperatuur lühise korral (1s)	250	°C	
Maksimaalne kaabli ekraani temperatuur lühise korral	250	°C	
Soone materjal	Al	Al/Cu	
Soone ristlõige	630	mm²	
Juhi termiline nimitaluvusvool (1s)	65,6	kA	
Ekraani termiline nimitaluvusvool (1s)	8	kA	
Pikisuunaline veetihedus (jah/ei)	Jah		
Ristisuunaline Al-fooliumist veetõkke olemasolu kesta all (jah/ei)	Jah		
Minimaalne paigaldusraadius	0,85	m	

2. TUULEPARGI ÜLEKANDELIINI LAHENDUSTE VÕRDLUS JA OPTIMEERIMINE

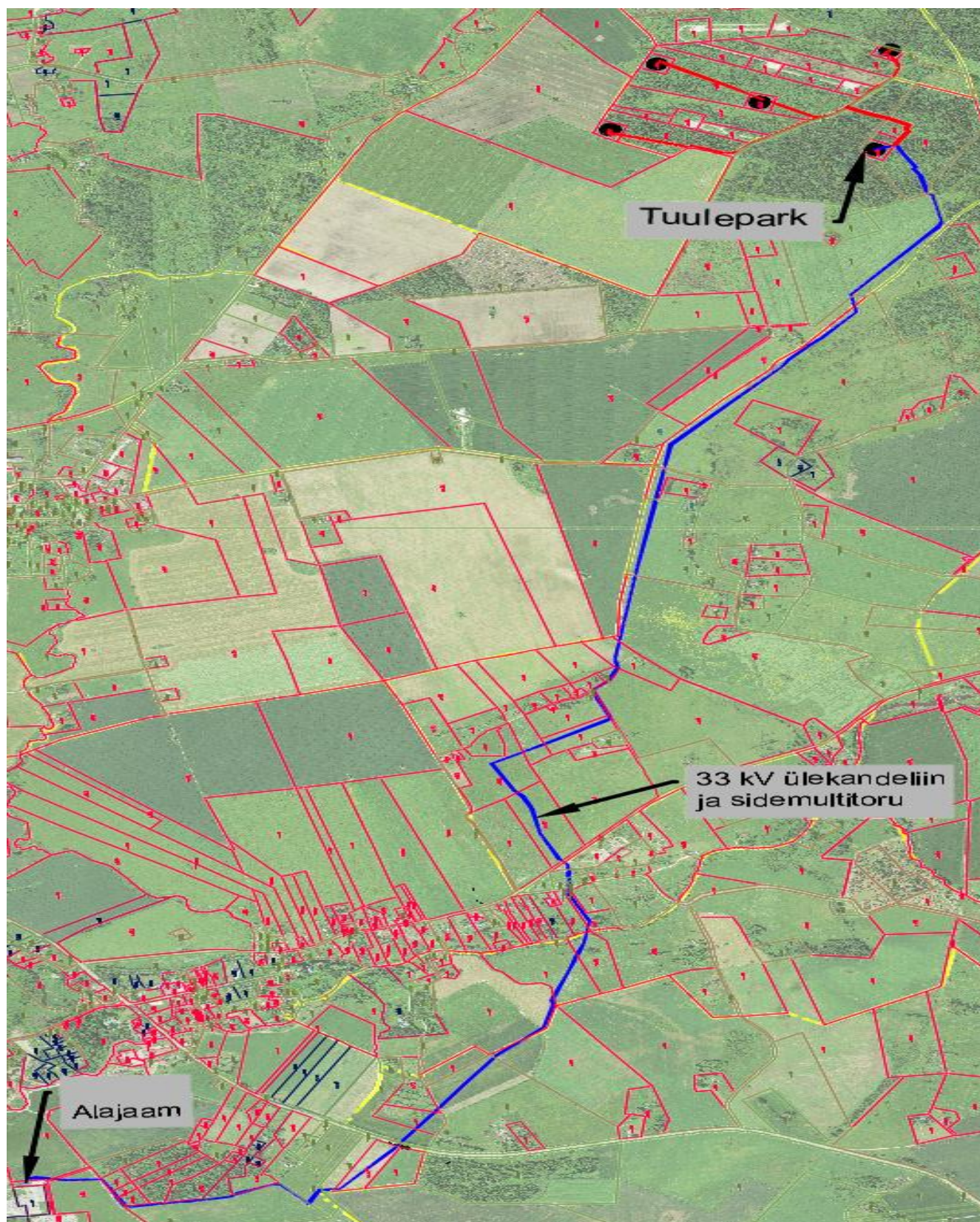
2.1 Projekteeritud lahenduse kirjeldus

Uuritav tuulepark, millele autor otsib optimaalseimat ülekandeliini lahendust, koosneb viiest 4,2 MW tuulikust ning on koguvõimsusega 21 MW. See ehitati 2022-2023 aastal, ning toodab juba elektrienergiat alates 2023. aasta I. kvartali lõpust. Ülekandeliini kaabliks valiti AXLJ-TTCL TSLF 36 kV 1x630 mm². Tuulepargi ülekandeliini kaablitrassi algus on 330 kV alajaama 33 kV jaotlas ja trassi lõpp tuulepargis tuuliku keskpinge jaotlas – kaablitrassi kogupikkus on 9,1 km. Kaabelliin on üheaabelaline ja ahelas on kolm ühesoonelist XLPE plastisolatsiooniga kaablit ning sellel on saatemaandus mõlemas liini otsas. Kaabelliini kolm faasi on kogu trassi ulatuses paigaldatud kolmnurka. Lisaks tuulepargi toitekaablitele, paiknevad kaablitrassis ka ühe päikesepargi toitekaablid identselt tuulepargi omadega. Selle trassi algus on samuti 330 kV alajaama 33 kV jaotlas ning kulgeb tuulepargini koos tuulepargi toitekaablitega – seal on hargnemiskoht kust päikesepargi toitekaablid liiguvad umbes 1,3 km veel edasi tehes selle liini kogupikkuseks 10,4 km. Ühistrassis paigaldatud elektrimaakaablitele on lisaks ehitatud ka sidevõrk, kasutades metallivaba mikrorustikku 4x14/10 mm ja 7x14/10 mm, puhutavaid fiiberoptilisi kaableid (alajaamast kuni maakaabelliini hargnemiskohani 48-kiuline magistraalkaabel ja hargnemiskohast kuni tuulikuni 24-kiuline kaabel), maa-aluseid plastkaevusid ja FOK jätkumuhve. Joonisel 5 on näidatud kaevisel ristlõike, et kaablitrassi paremini visualiseerida (Joonis 5).

joonisel (Joonis 7) tuulepargi ülekandeliini ülevaateplaan. Ülekandeliini ehitusel kasutatud materjalide koguste ja andmete spetsifikatsioon on näha tabelis (Tabel 4).



Joonis 6. Tuulepargi elektriskeem

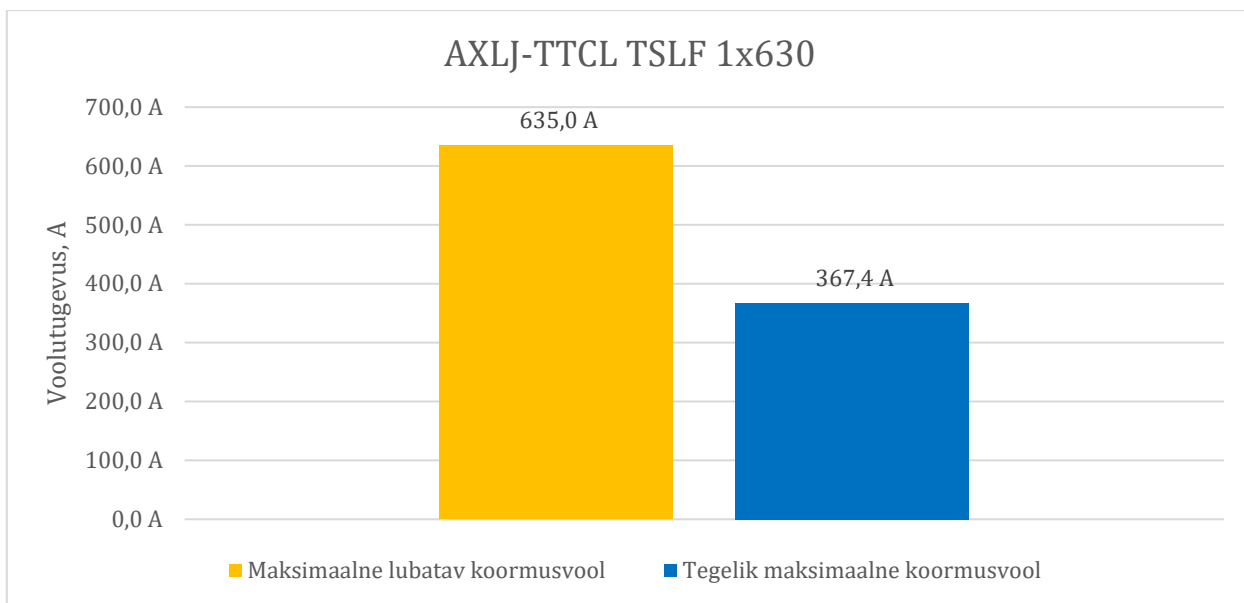


Joonis 7. Tuulepargi ülekandeliini ülevaateplaan

Tabel 4. Tuulepargi ülekandeliini materjalid ja kogused

Jrk. nr.	Nimetus	Tüüp	Kogus	Ühik
1.	33 kV kaabel 630 mm ²	AXLJ-TTCL TSLF 36 kV 1x630 mm ² (Prysmian Group)	27300	m
2.	33 kV kaabli nurkliide	CB 36-630 (1250) 400-630 mm ²	2	kmpl
3.	33 kV kaabli liigpingepiirik	CSA36-10M16 (ENSTO)	2	kmpl
4.	33 kV kaabli jätkumuhv	CJH11.4205C (ENSTO)	52	kmpl
5.	Kaablikaitsetoru kolmele kaablile, 450 N	-	23850	m
6.	Kaablikaitsetoru kolmele kaablile, 750 N	-	1500	m
7.	Kaablikaitsetoru kolmele kaablile, 1250 N	-	1950	m

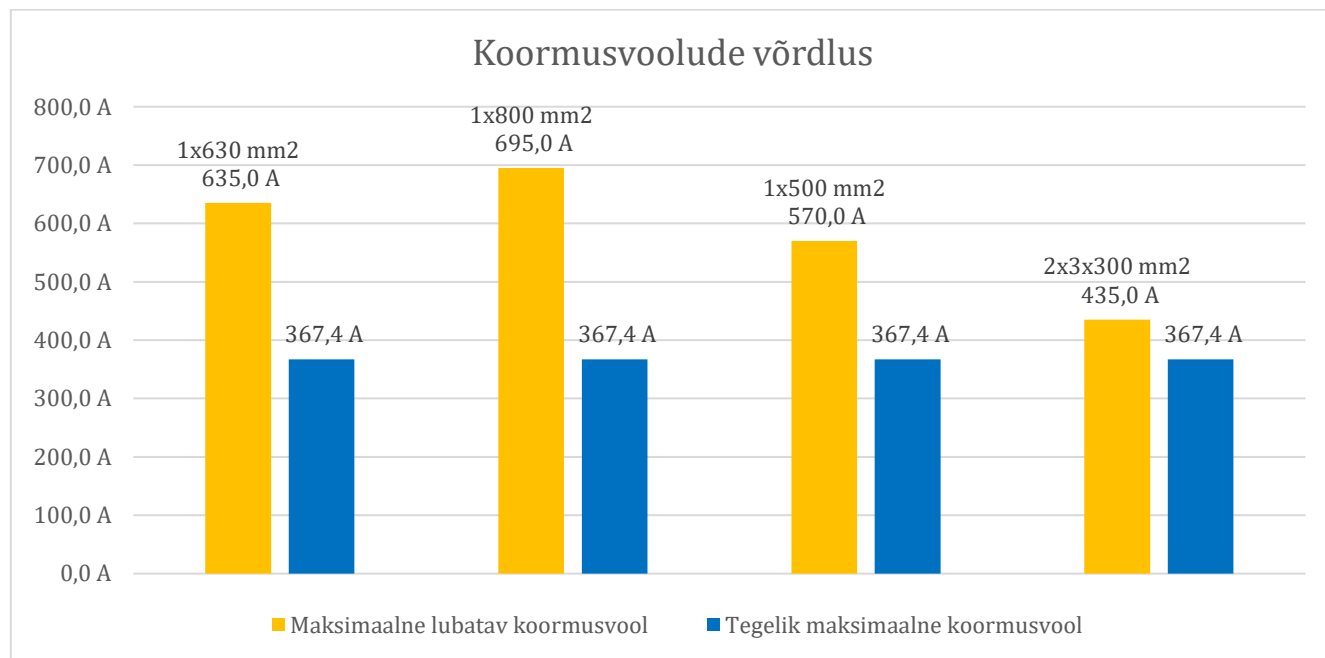
Tuulepargi ülekandeliini kaabli valikul tuleb eelkõige arvestada, et kaabel peab vastu pidama tuulikute maksimumkoormusele, olenemata sellest, et maksimumkoormust esineb harva. Kuna tuulepargis on 5 x 4,2 MW tuulegeneraatorit, on maksimaalseks koormuseks 21 MW. Kaablitootja andmelehel leiame kaabli maksimaalse koormusvoolu. Koormusvoolude suhe on välja toodud joonisel (Joonis 8). Jooniselt võib välja lugeda, et tuulepargi tegelik maksimaalne koormusvool moodustab maksimaalsest lubatud koormusvoolust vaid 60%. Sellest saab järeldada, et kaabelliini lahenduse optimeerimisel on võimalik vähendada kaabli ristlõiget, mis tähendaks maakaabelliini hinna osas odavamalt investeeringut, ning võibolla selle tõttu ka tuulepargi tasuvusaja lühenemist kuid ristlõike vähendamise juures ei tohi ära unustada asjaolu, et mida väiksem on ristlõige, seda suuremad on praegusel juhul võimsuskaod.



Joonis 8. Projekteeritud kaabli maksimaalne lubatud ja tegelik maksimaalne koormusvool

2.2 Uute ristlõigete kontroll

Tuulepargi ülekandeliini optimeerimiseks, teen arvutused ka teiste kaabli valikute kohta, milleks olid AXLJ-TTCL TSLF 18/30 1x800 mm², AXLJ-TTCL TSLF 18/30 1x500 mm² ja 2x AHXAMK-W 3x300 mm². Arvutused teiste kaablite puhul on välja toodud allpool (Joonis 9).



Joonis 9. Koormusvoolude võrdlus

Arvutuste teostamisel oli vaja teada saada kaks suurust – kaablite maksimaalset lubatavat läbilaskevõimsust ning tuulepargi maksimaalset voolu nimivõimsusel. Läbilaskevõimsus P (W) on arvutatud valemiga (1), ja tuulepargi maksimaalne vool I (A) valemiga (2).

$$P = UI\sqrt{3} \cos\varphi, \quad (1)$$

Kus U – pinge, V;
 I – voolutugevus, A;
 φ – pinge ja voolu vaheline nurk.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}, \quad (2)$$

Kus P – võimsus, kW;
 U – pinge, V;
 φ – pinge ja voolu vaheline nurk.

Arvutustes on võetud $\cos\varphi$ väärtuseks 1, et tulemused oleks arvutatud ideaaltingimustes, kuigi tuuleparkide reaalne võimsustegur sõltub mitmetest asjaoludest. Näiteks tuulegeneraatorite suurusest ja võimsusest, võrgupingest ja sagedusest. Üldiselt varieerub tuuleparkide võimsustegur vahemikus 0,9-1,0 – eesmärk on maksimeerida tegelik võimsus ja minimeerida genereeritud reaktiivvõimsus. Madal võimsustegur seevastu tähendab, et reaktiivvõimsuse osa on suur, mistõttu suurenevad süsteemis kaod ning väheneb efektiivsus [18].

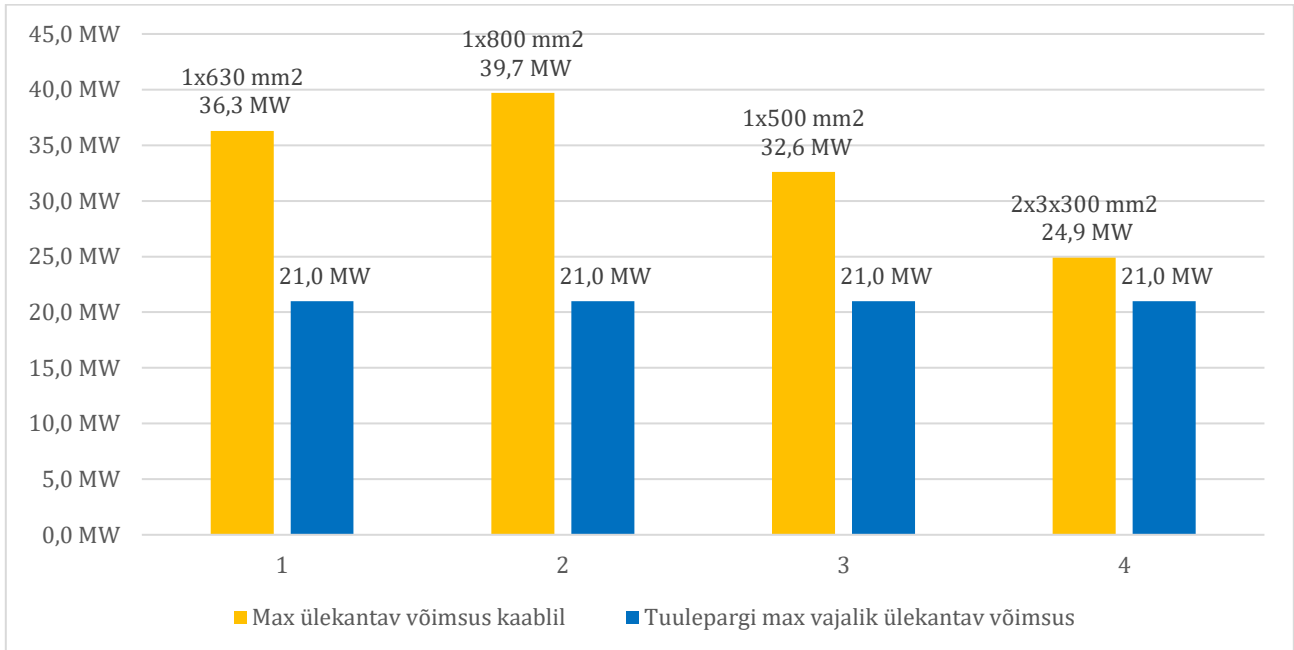
Arvutuste teostamiseks on kasutatud Prysmian Group kaablite AXLJ-TTCL TSLF 18/30 1x800 mm², 1x630 mm², 1x500 mm² ja AHXAMK-W 3x300 mm² 19/33 (36) kV tehnilisi spetsifikatsioone [Lisad 1 ja 2]. Arvutuste tulemused on esitatud Tabel 5.

Tabel 5. Arvutuste tulemused

Kaabli tüüp	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV	AHXAMK-W 19/33 (36) kV
Kaabli ristlõige	1x630 mm ²	1x800 mm ²	1x500 mm ²	2x3x300 mm ²
Nimipinge	33,0 kV	33,0 kV	33,0 kV	33,0 kV
Maksimaalne lubatav koormusvool	635,0 A	695,0 A	570,0 A	435,0 A
Maksimaalne töötemperatuur, maasse paigaldusel	65 °C	65 °C	65 °C	65 °C
Maksimaalne ülekantav võimsus (kaablil)	36,3 MW	39,7 MW	32,6 MW	24,9 MW
Vajalik maksimaalne ülekantav võimsus	21,0 MW	21,0 MW	21,0 MW	21,0 MW
Tegelik koormusvool	367,4 A	367,4 A	367,4 A	367,4 A

Tabelis välja toodud tulemusi analüüsides saab järeldada, et kõik kaablid oma maksimaalse lubatava koormusvoolu järgi tulevad toime tuulepargi tegeliku koormusvooluga. 630 mm² kaablil on koormus

umbes 60%, 800 mm² kaablil 50%, 500 mm² kaablil 65% ja Wiski-kaablil 85% kogu kaablile lubatavast koormusest. Sobivust saab kontrollida ka nii, kui võrrelda kaabli maksimaalset lubatavat võimsust tuulepargi maksimaalse ülekantava võimsusega. Võrdlus on näha Joonis 10.



Joonis 10. Kaabli maksimaalne ülekantav võimsus vs tuulepargi maksimaalne ülekantav võimsus

Optimaalseima ristlõike ja ülekandeliini lahenduse leidmiseks on vajalik ja eelarvestada ehitusmaksumus. Erinevate uuritavate variantide korral varieeruvad nii materjalide kui ka tööde kulud. Näiteks Wiski – kaabliga ülekandeliini ehitus tähendaks kahe kaabli paigaldust kaablikaitsetorusse, kuid kõikide teiste ühesooneliste kaablitega lahenduste korral tuleb kaableid paigaldada kokku 3. Paigalduse vaatepunktist tundub Wiski – kaabel otstarbekam, kuid see tähendaks ka kuuekordset muhvide kogust, mida üritatakse igal juhul vältida. Tabel 6 näitab kõikide kaablilahenduste materjalide koguseid ja hindasid.

Tabel 6. Optimeerimisel kasutatud materjalide mahud ja hinnad

AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 630 mm ²				
Töö nimetus	Mõõtühik	Maht	Ühikhind	Maksumus
Jõukaabel 3x1x630 mm ² (33 kV); kaabel, kaablikaitsetoru, tarvikud, paigaldus (sh kaeviku rajamine, horisontaalpuurimine)	m	9100	135,8125	1 242 843,00 €
Nurkliide; materjal ja paigaldus + ühendamine alajaamas	kmpl	2	1401,25	2 802,50 €
Liigpingepiirikud; materjal ja paigaldus	kmpl	2	2146,25	4 292,50 €
Jätkumuhvid; materjal ja paigaldus	tk	42	695	29 190,00 €
			Summa kokku	1 279 128 €

AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 500 mm ²				
Töö nimetus	Mõõtühik	Maht	Ühikhind	Maksumus
Jõukaabel 3x1x500 mm ² (33 kV); kaabel, kaablikaitsetoru, tarvikud, paigaldus (sh kaeviku rajamine, horisontaalpuurimine)	m	9100	125,425	1 148 327,00 €
Nurkliide; materjal ja paigaldus + ühendamine alajaamas	kmpl	2	1401,25	2 802,50 €
Liigpingepiirikud; materjal ja paigaldus	kmpl	2	2146,25	4 292,50 €
Jätkumuhvid; materjal ja paigaldus	tk	42	695	29 190,00 €
			Summa kokku	1 184 612 €

AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 800 mm²

Töö nimetus	Mõõtühik	Maht	Ühikhind	Maksumus
Jõukaabel 3x1x800 mm ² (33 kV); kaabel, kaablikaitsetoru, tarvikud, paigaldus (sh kaeviku rajamine, horisontaalpuurimine)	m	9100	160,35	1 471 834,00 €
Nurkliide; materjal ja paigaldus + ühendamine alajaamas	kmpl	2	2677,5	5 355,00 €
Liigpingepiirikud; materjal ja paigaldus	kmpl	2	2146,25	4 292,50 €
Jätkumuhvid; materjal ja paigaldus	tk	42	1265	53 130,50 €
			Summa kokku	1 534 612 €

AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3x300 mm²

Töö nimetus	Mõõtühik	Maht	Ühikhind	Maksumus
Jõukaabel 2x3x300 mm ² (33 kV); kaabel, kaablikaitsetoru, tarvikud, paigaldus (sh kaeviku rajamine, horisontaalpuurimine)	m	9100	140,7	1 268 129,00 €
Nurkliide; materjal ja paigaldus + ühendamine alajaamas	kmpl	2	908,75	1 817,50 €
Liigpingepiirikud; materjal ja paigaldus	kmpl	2	2159,475	4 319,80 €
Jätkumuhvid; materjal ja paigaldus	kmpl	28	874,275	24 479,70 €
			Summa kokku	1 298 746 €

Kaabli tüüp	Summa kokku (€)
AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 630 mm ²	1 279 128
AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 500 mm ²	1 184 612
AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 800 mm ²	1 534 612
AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3x300 mm ²	1 298 746

Tabel 6. saab järeldada, et kui ülekandeliin oleks rajatud 500 mm² kaabliga, oleks selle hind olnud umbes 95 000 € võrra odavam. Suurema ristlõike, ehk 800 mm² kaabliga on ülekandeliini ehituse kogumaksumus umbes 255 000 € võrra kallim projekteeritud lahendusest. Kui ülekandeliin oleks rajatud kasutades 2x Wiski – kaablit, oleks kogumaksumus projektipõhisest lahendusest umbes 40 000 € võrra kallim. 500 mm² kaabel on nendest lahendustest kõige odavam, sest ka kaabli hind on väiksema ristlõike korral odavam. 500 mm² ja 630 mm² kaabelliini tarvikute (nurkliited, liigpingepiirikud ja jätkumuhvid) hinnad on täpselt samad, sest mõlema kaabli korral saab kasutada sama tüübi tarvikuid. 800 mm² kaabel on praegusel juhul kõige kallim, sest ristlõike suurenemisel suureneb ka kaabli hind. 800 mm² kaabli tarvikud ja nende paigaldus on umbes 2 korda kallim kui 500 mm² või 630 mm² kaablil. AHXAMK-W 3x300 mm² kaabli tarvikud on rohkem kui 2 korda odavamad 630 mm² kaabli tarvikutest, kuid vaadates Wiski – kaabli enda üsna kallist hinda ning seda, et ka jätkumuhve tuleb teostada rohkem, ei kaalu odavamad paigaldustööd hetkel üle ehituses kasutatud 630 mm² kaabli odavat hinda.

Nagu iga maakaabelliini puhul, on ehitusel tavapäraselt kõige kallim kaabel ning kaevamis- ja paigaldusprotsess. Samuti ka selles projektis moodustab kaabel ning selle paigaldus väga suure osa kogumaksumusest – umbes 95%. Lisaks on ka pinnase tagasitäitmine ja taastamine aeganõudev ning kulukas protsess. Paigaldustööd muutusid veelgi kallimaks, kuna pinnas oli kohati väga paene ning seetõttu oli kaevetööde kulg üsna aeglane.

2.3 Lühisvoolu taluvuse kontroll

Lühisvoolu parameetritele vastamine on ülekandeliinide puhul oluline, kuna lühisvoolud võivad oluliselt kahjustada elektriseadmeid ja ohustada süsteemiga töötavaid inimesi. Lühis tekib siis, kui elektrijuht, näiteks kaabel, on tahtmatult ühendatud maaga või mõne teise madala impedantsiga juhiga, põhjustades suure voolutugevuse. See võib kahjustada elektriseadmeid, nagu näiteks trafod, generaatorid ja

jaotusseadmed, ning põhjustada tulekahjusid või plahvatusi. Tuulepargi ülekandeliini puhul on lühisvoolu taluvus eriti oluline tuulegeneraatorite toodetava suure võimsuse ja vahemaa tõttu, mille võimsus peab võrku jõudmiseks läbima.

Et veenduda kaablite ristlõigete sobivuses, ei piisa ainult koormusvoolu väärtuste kontrollimisest, vaid tuleb kontrollida ka kaablite lühisvoolule vastavust. Tuleb leida kolmefaasiline lühisvool tuulepargi ülekandeliini alguses. Selleks arvutan süsteemi lühisvõimsuse S_{k330} (MVA) valemiga (3), selle takistuse Z_Q (Ω) valemiga (4) ning trafo takistuse Z_T (Ω) kasutades valemit (5) [19]. Lühisvoolu arvutamisel tuleb arvestata ka tuulegeneraatori töötingimustega. Kahjustuste vältimiseks kasutavad tuulegeneraatorid tavaliselt kaitseseadmeid, mis on ette nähtud elektrivoolu tuvastamiseks ja katkestamiseks liiga suure voolu korral. Maksimaalne vool mida projektis kasutatud Vestas V136-4.2 tuulik talub, on maksimaalselt 150% nimivoolu.

$$S_{k330} = I_{k330} * U_{n330} * \sqrt{3}, \quad (3)$$

Kus I_{k330} – 330 kV elektrivõrgu maksimaalne kolmefaasiline lühisvool, kA;

U_{n330} – 330 kV elektrivõrgu nimipinge, kV.

I_{k330} väärtuseks on võetud 24 kA, mis on saadud Elering Püssi alajaama andmetest [20]. Elektrisüsteemi takistuse leidmiseks on vaja leida pingeteguri c väärtust, mis on võetud standardist EVS-EN 60909-0:2016, tabel 1 [21].

Elektrisüsteemi takistus Z_Q (Ω) leitakse valemiga (4) [19].

$$Z_Q = \frac{c * U_{nQ}}{\sqrt{3} * I_{kQ}}, \quad (4)$$

Kus c – pingetegur;

U_{nQ} – 330 kV elektrivõrgu nimipinge, kV;

I_{kQ} – 330 kV elektrivõrgu maksimaalne kolmefaasiline lühisvool, kA.

Trafo takistus Z_T (Ω) ehk primaar- ja sekundaarpinge üleminekutakistus, tuleb arvutada valemiga (5) [19].

$$Z_T = \frac{U_{kr}}{100\%} * \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}, \quad (5)$$

Kus U_{kr} – lühispinge protsentides nimivoolu korral;

U_{rT}^2 – 330 kV trafo nimipinge, kV;

S_{rT} – trafo niminäivvõimsus, MVA.

Lühisvõimsuse S_{k33} (MVA) ja lühisvoolu I_{k33} (kA) arvutustel keskpinge poolel on kasutatud vastavalt valemeid (6) ja **Error! Reference source not found.** [19].

$$S_{k33} = \frac{c * U_{n33}}{(Z_Q + Z_T)}, \quad (6)$$

Kus c – pingetegur;

U_{n33} – 330 kV elektrivõrgu nimipinge, kV;

Z_Q – süsteemi takistus, Ω ;

Z_T – 330 kV trafo takistus, Ω .

$$I_{k33} = \frac{S_{k33}}{U_{n33} * \sqrt{3}}, \quad (7)$$

Kus S_{k33} – lühisvõimsus keskpinge poolel, MVA;

U_{n33} – 330 kV elektrivõrgu nimipinge, kV.

Arvutatud väärtusi tuleb võrrelda kaablite andmelehtedel olevate väärtustega [Lisad 1 ja 2]. Alljärgnevas tabelis on välja toodud arvutatud lühisvoolude väärtused võrdluses kaablitele lubatud maksimaalsete lühisvoolude väärtustega (Tabel 7).

Tabel 7. Kaablite maksimaalsed lubatud lühisvoolud ja arvutatud lühisvoolud

	Kaabli tüüp			
	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 630 mm ²	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 500 mm ²	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 800 mm ²	AHXAMK- W 19/33 (36) kV 3x300 mm ²
Arvutatud lühisvool (kA/1s)	2,52	2,52	2,52	2,52
Kaabli maksimaalne lühisvool (kA/1s) (väärtused kaabli tehnilisest spetsifikatsioonist)	59,5	47,2	75,6	28,3

Tulemused näitavad, et kaablite valik arvestades lühisvoolusid on enam kui sobilik. Lühisvoolude võrdluse alusel saaks kasutada palju väiksema ristlõikega kaableid, kuid kaablivalikul ei saa hinnata vaid lühisvoolusid. Vajalik on, et kaabli koormusvool oleks piisav, mille olen eelnevalt välja arvutanud ning lisaks tuleb arvutada ka kaabelliini aktiivkaod.

2.4 Võimsuskadude arvutamine

Kaabelliinid ei ole ideaalsed ning nendes esinevad võimsuskaod mitmel põhjusel. Üheks põhjuseks on võimsuskaod juhis, mis tekivad elektritakistuse mõjul, sest osa elektrijuhti läbivast elektrienergiast muundub soojuseks. Teine põhjus on dielektriline kadu, mis tekib kaabli isolatsiooni läbiva pingega. Dielektriline kadu on tingitud elektriväljast kaabli isolatsioonis ja seda iseloomustab elektrivälja energia

muundumine soojuseks kaablis. Kui pinge kaablis suureneb, siis suureneb ka elektriväli isolatsioonis ning seetõttu suureneb ka dielektriline kadu. Dielektrilised kaod on otseselt proportsionaalsed pingega kaablis, kusjuures kaabli isolatsiooni materjal ja temperatuur mõjutavad ka kadude suurust. Lisaks võivad kaod tekkida ka kaabli kesta – need kaod on põhjustatud voolust, mis liigub kaabli kesta kaudu. Kui vool tõuseb, siis suureneb ka kaabli kesta liikuva voolu hulk ning seetõttu suurenevad ka kaod. Kaablite juhid ja kestad on valmistatud erinevatest materjalidest, millel on erinevad elektrilised omadused, näiteks takistus. Kui vool liigub kaabli juhis ja kesta, siis tekib nende vahel pingelang, mis omakorda põhjustab soojenemist. Mida suurem on vool, seda suurem on ka pingelang. Samuti võivad võimsuskaod tekkida ka kaabli ekraanis. Need kaod on põhjustatud voolust, mis tekitab elektromagnetilisi välju kaabli ümber. Kaabli ekraan aitab neid elektromagnetvälju summutada, kuid samas tekitavad need kaabli ekraanis ka pöörisvoolusid. Pöörisvoolud tekivad kaabli ekraanis elektromagnetväljade mõjul, mis põhjustavad soojenemise ning võimsuskaod kaablis. On oluline valida kaabli ekraan, mis suudab elektromagnetvälju piisavalt hästi summutada ning pöörisvoolude hulka kaabli ekraanis vähendada.

Sellest tulenevalt on võimsuskaod kaablites mitmetahuline probleem, mida tuleb arvestada ja lahendada erinevate tehniliste võtetega, nagu näiteks:

1. Juhi takistuse vähendamine – kasutades suurema ristlõikega kaableid või materjale, millel on madalam takistus.
2. Kaabli isolatsiooni kvaliteedi parandamine – valida kõrge kvaliteediga isolatsioonimaterjalid, mis on võimelised taluma kõrgemaid pingeid ja vähendama dielektrilisi kadusid.

Võimsuskadude vähendamine kaablis on oluline nii majanduslikult kui ka keskkonna seisukohalt sest nii loome endale stabiilsema ja usaldusväärsema elektrisüsteemi. Kui kaablites on suured võimsuskaod, siis võib see seda mõjutada, kuna kaabel võib ülekoormuse tõttu üle kuumeneda. Võimsuskadude vähendamine pakub säästlikumat energiakasutust ning optimaalset võimsusülekannet. Sel juhul ei pea vooluallikas pakkuma rohkem võimsust kui tarbija tegelikult kasutab – see omakorda vähendab energiakulusid ja ka energiatarbimist. Lisaks tähendab võimsuskadude vähendamine madalamaid hoolduskulusid, sest kui kaablites esineb vähe kadusid, siis on ka nende kasulik eluiga pikem.

Eelkõige moodustavad võimsuskadudest kõige suurema osa aktiivkaod. Kuna reaktiiv- ja dielektriliste kadude arvutamine on komplitseeritud ning nende osakaal võimsuskadudes väike, siis on töös kaovõimsus arvatud ainult aktiivvõimsuskadude alusel.

Tuleb arvutada tuulepargi maksimaalsed kaod kõikide erinevate ülekandeliini lahenduste korra. Selleks arvutan aktiivvõimsuskao P_c (W), kasutades valemit (8) ning siis kaabli takistuse R_c (Ω/km) 65°C juures kasutades valemit (9) [22].

$$P_c = I^2 * R_c, \quad (8)$$

Kus I^2 – kaablit läbiva voolu ruut, A;

R_c – kaabli soone takistus töötemperatuuril, Ω .

Kuna kaabli takistus on sõltuvuses kaabli temperatuuriga, siis võtame aluseks kaabli maksimaalse lubatud töötemperatuuri, mille saame kaabli andmelehel.

$$R_c = [1 + \alpha (\theta_e - 20^\circ\text{C})] * R_{20}, \quad (9)$$

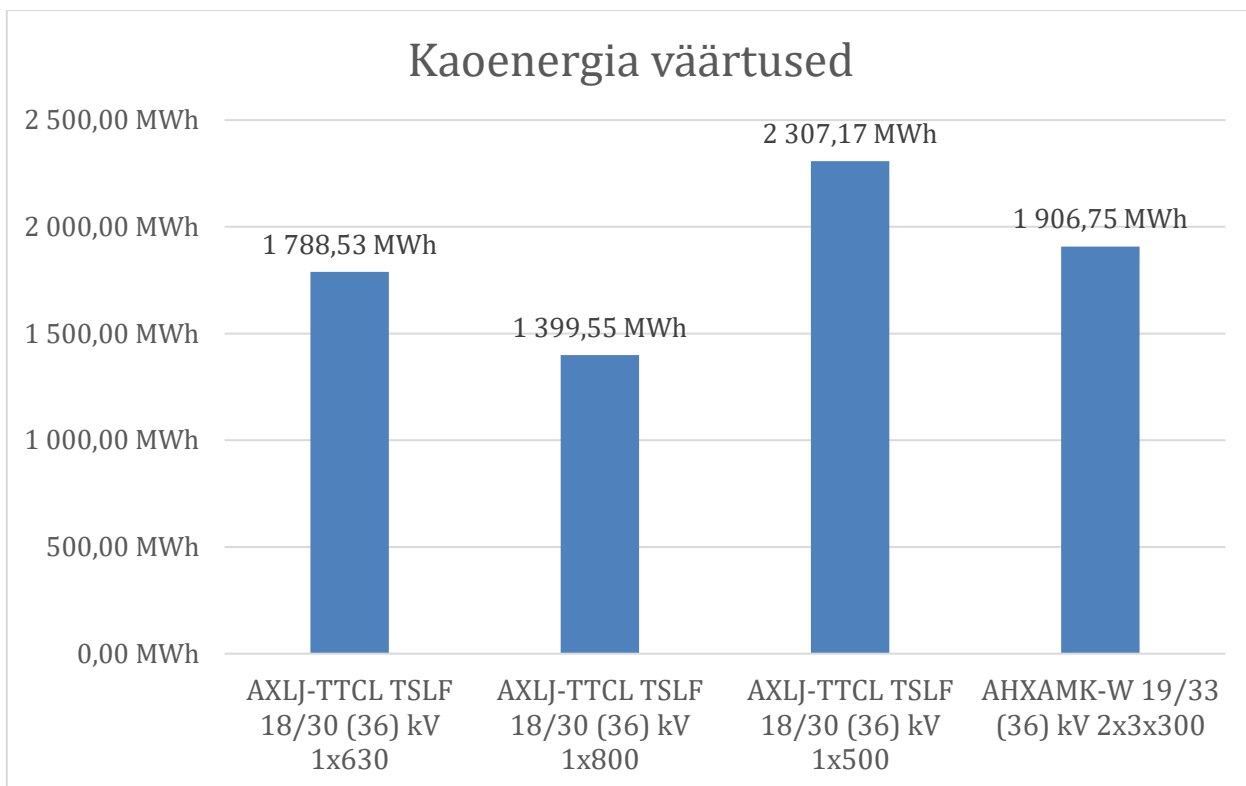
Kus α – alumiiniumsulami tegur, 0,00403 [19];

θ_e – kaabli töötemperatuur, $^\circ\text{C}$;

R_{20} – kaabli takistus 20°C juures, Ω/km .

Antud kadude valemitest arvatud väärtused tuleb korrutada kolmega, et saada kaod mis on tekkinud kõigis kolmes faasis kokku.

Joonis 11. näitab erinevate kaablilahenduste korral tekkivad võimsuskadusid ühe aasta jooksul.



Joonis 11. Arvutatud kaoenergia väärtused

Joonise 11. alusel saab järeldada, et mida suurem on kaabli ristlõige, seda väiksem on ka kaoenergia. Kuna antud tuulepargi aastane toodang on umbes 40 GWh, siis projekteeritud kaabli korral on kadude väärtuse osakaal sellest umbes 4,5% ehk 1,8 GWh. Suurendades alginvesteeringut, on võimalik nende kadude osakaalu vähendada. Näiteks 800 mm² kaablivaliku korral oleks kadude osakaal 3,5% tuulepargi aastasest toodangust. Et teada saada, kas alginvesteeringu suurendamine tasub end ära arvestades tuulepargi eluiga, tuleb kõigepealt arvutada kadude maksumus, ning liita sellele tuulepargi ülekandeliini ehituse maksumus. Selleks võtsin 2022. aasta keskmise elektri börsihinna Elering LIVE kodulehelt, milleks oli 0,1928 €/kWh [23]. Tabel 8. on välja toodud antud andmed põhjal kaoenergia maksumus kõikide erinevate ülekandeliini variantide korral.

Tabel 8. 1 aasta kaoenergia võimsus ja maksumus

	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x630 mm²	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x800 mm²	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x500 mm²	AHXAMK-W 19/33 (36) kV 2x3x300 mm²
1 kWh hind	0,1928 €			
Kaoenergia	1788,53 MWh	1399,55 MWh	2307,17 MWh	1906,75 MWh
Kaoenergia maksumus	344828,79 €	269834,04 €	444821,78 €	367621,31 €

Kaod on arvatud maksimaalsel koormusel – selle alusel pole sobilik hinnata tuulepargi kadude maksumust, sest on teada, et tuulegeneraatorid töötavad enamiku ajast madalal koormusel ning enamik elektrienergiast toodetakse lühikestel perioodidel, mil tuul on tugevaim. Et arvutada tuulepargi „reaalsed“ kaod, on mõistlik võtta kogu kaovõimsusest $\frac{1}{4}$ osa. Seda sellel põhjusel, et kaod on otseselt tingitud kaablit läbiva voolu ruudust – see tähendab, et kui vool kaablis langeb kaks korda, siis vähenevad kaod neli korda. Tuuleparkide eeldatav eluiga on tavaliselt umbes 20 aastat, kuigi mõned turbiinid võivad töötada ka kauem. Tasuvusaeg on oluline, et arvutada optimaalne tuulepargi kaoenergia maksumuse summa.

Tabel 9. on võrreldud erinevate kaablitega lahendatud ülekandeliinide 20 aasta jooksul tekkivate kadude (arvestades 2022. aasta keskmist elektri börsihinda) ja ülekandeliini ehituse maksumuse summasid.

Tabel 9. Ülekandeliini lahenduste maksumused

	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x630	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x800	AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x500	AHXAMK-W 19/33 (36) kV 2x3x300
¼ kadudest	447,13 MWh	349,89 MWh	576,79 MWh	476,69 MWh
¼ osa kadude maksumus	86 207,20 €	67 458,51 €	111 205,45 €	91 905,33 €
¼ osa kadude maksumus 20 aasta jooksul	1 724 143,94 €	1 349 170,20 €	2 224 108,92 €	1 838 106,54 €
Ülekandeliini ehituse maksumus	1 279 128,75 €	1 534 612,50 €	1 184 602,50 €	1 298 746,30 €
Ülekandeliini ehituse ja kadude maksumuse summa	3 003 272, 69 €	2 883 782,7 €	3 408 711,42 €	3 136 852,84 €

Arvutatud maksumuste väärtustele tuginedes saab järeldada, et välja ehitatud ülekandeliini oleks olnud võimalik optimeerida, sest kui tuulepargi eluea kulud kokku liita arvestades kadusid ning 800 mm² kaablit, on kogumaksumus umbes 120 000 € võrra odavam. Teised lahendused (500 mm² ja 2x3x300 mm²) töö autor välistab – ehituse maksumus võib olla küll sama kallis või odavam, kuid arvestades kadusid ei hinda autor neid lahendusi otstarbekaks.

3. JÄRELDUS

Tuulepargi ülekandeliini ehituse maksumuse arvutamisel ei muutu ainult materjalide, vaid ka tööde hinnad. Suuremate ristlõigetega kaablite paigaldus on reeglina ajakulukam ja keerulisem kui väiksemate ristlõigetega kaablite paigaldus. Lisaks tuleb arvestada, et 800 mm² kaabli korral tuleb kasutada suuremaid kaablikaitsetorusid ning lisatarvikuid, kui teiste lahenduste korral. Eelarvestamisel on näha, et valdava osa kogusummat moodustab kaabel ning selle paigaldus. Kõige kallimaks lahenduseks siinkohal on 800 mm² kaabliga ülekandeliini ehitus, sest suure ristlõike tõttu on kaabli materjali kulu koos paigalduse kuludega teistest lahendustest palju suurem. Ainult eelarvestamise järgi tundub 500 mm² kaablilahendus kõige otstarbekam, sest tegu on kõige odavama lahendusega, ning samuti vastas kaabel ka maksimaalsele koormusvoolule. Lõplikku otsust ei saa langetada enne, kui pole välja arvatud ülekandeliini aktiivkaod ning nende hind.

Töös on välja arvatud kaabelliinis tekkivate aktiivkadude suurused, ning võetud kogukadudest 25%, et mitte hinnata kadusid maksimaalsel koormusel, sest tuulepark töötab suurema osa ajast alakoormusel. Arvutades kaovõimsuse, tuleb see ümber arvutada aastaseks kaoenergiaks, mille saab omakorda teisendada rahaliseks summaks kasutades elektri börsihinda (töös tehtud arvutustel on tuginetud 2022. aasta elektrienergia keskmisele börsihinnale). Saadud arvutustulemusi analüüsides näeme, et mida suurem on kaabli ristlõige, seda väiksemad on ka ülekandeliinis tekkivad kaod. 25% kadude väärtus ja kulu tuleb omakorda arvestada kogu tuulepargi eluaja jooksul, sest kaod tekivad igal aastal. Selleks korrutan kaod läbi 20ga. Lisades saadude kadude summale tuulepargi ülekandeliini ehituse kulud, saab alles hinnata, milline valikus olevatest lahendustest on kõige optimaalsem tänasel päeval.

Eelmise aasta kalli keskmise elektrienergia hinna juures, tuleb 800 mm² kaabliga ülekandeliini ehitus umbes 120 000 € võrra odavam, kui on projekteeritud lahenduse kogumaksumus. Siinkohal langevad valikust välja 500 mm² kaabli- ja 3x300 mm² kaablilahendus, sest pole majanduslikult otstarbekas maksta aktiivkadude eest selliseid summasid. Arvutustes kasutatud elektrienergia keskmine hind oli küll 2022. aastal kõrge, ning hetkel on see langevas trendis, kuid vaadates viimase aasta aja (märts 2022. – märts 2023.) keskmist elektrienergia hinda on see 2 €/MWh võrra kallim arvutustes kasutatud elektri keskmisest hinnast. Viimase 5 aasta keskmise elektrienergia hinna alusel (0,0812 €/kWh) [24] on projekteeritud lahendus umbes 100 000 € võrra odavam hinnates kulutusi kogu tuulepargi eluea jooksul. Töö autori hinnangul pole ka viimase viie aasta keskmine elektrienergia hind otsuse langetamiseks

piisavalt täpne, sest nende aastate odavaim ja kalleim keskmine hind erinevaid üksteisest peaaegu 600% ulatuses. 800 mm² kaabelliini ehitus on eluea kulutuste seisukohalt hetkehindade juures optimaalseim, ning see säästmine kompenseerib kallima ehituse hinna. Kuna energia hindade tõus on muutunud üha märgatavamaks, siis on hakatud tuulepargi ülekandeliini ehitusel arvestama ka ülekandeliini kui ka tuulepargi eluea kuludega, ehk et hinnatakse ehitusmaksumust kui ka kadude summat kogu rajatava süsteemi eluea jooksul.

Töös teostatud arvutustele tuginedes pean hetkel kõige optimaalsemaks ülekandeliini ehituseks 800 ruutmillimeetrise ristlõikega kaablit. Pean tähtsaks kalli elektrienergia hinna juures kadude vähendamist ning antud kadude vähendamine teeb ülekandeliini kogumaksumuse soodsaimaks arvestades järgneva 20 aasta kadude kogumaksumust.

KOKKUVÕTE

Tuuleenergia on puhas ja taastuv energiaallikas, mis on kooskõlas Eesti eesmärgiga vähendada süsiniku jalajälge ja liikuda säästvama tuleviku poole. Tuuleparke peetakse Eestis optimaalseks mitme asjaolu tõttu, näiteks pikk rannajoon, tasased alad ja suur tuulekiirus, eriti talvekuudel.

Kuigi tuuleparkidel on Eestis palju eeliseid, siis on nende rajamine siiski ka keerukas. Eestis esineb avalikku vastasseisu tuuleparkide ehitusele, mis on tingitud mürasaastest, visuaalsest mõjust ning võimalikest negatiivsetest mõjudest elusloodusele. Keskmisest rohkem on tuulepargi rajamise vastu just need inimesed, kelle elu- või tegevuspaiga juurde seda planeeritakse.[9] Tuuleparkide rajamiseks vajalike lubade taotlemine võib olla pikk ja bürokraatlik, sest see hõlmab väga paljusid osapooli. Kõige suuremaks probleemiks tänapäeval on tuuleparkide ühendamine riigi elektrivõrguga olemasoleva ülekandeinfrastruktuuri piiratud ülekandevõimsuse tõttu.

Antud bakalaureusetöö peamine eesmärk oli leida töös kirjeldatud tuulepargile kõige optimaalsem ülekandeliini lahendus. Tuulepargi koguvõimsus on 21 MW (5x4,2 MW) ja ülekandeliini ehitusel on kasutatud 36 kV AXLJ-TTCL TSLF 1x630 mm² maakaablit pikkusega 9,1 km.

Projekteeritud lahendust võrdlesin kolme erineva kaablilahendusega:

1. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x500 mm²,
2. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x800 mm²,
3. 2 x AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3x300 mm².

Töös teostatud arvutuste alusel saab järeldada, et käsitletud tuulepargi ülekandeliini ehituseks on olemas mitmeid võimalusi. Otsuse langetamisel tuleb hinnata väga paljusid faktoreid, mis on ka eelnevalt välja toodud. Uurimuses selgus, et tänapäeval pole projekteeritud lahendus kõige optimaalsem. Optimaalseim lahendus tähendaks 800 mm² kaabli kasutust ülekandeliini ehitusel – see tähendab küll suuremaid ehituskulusid, kuid kogu tuulepargi eluea jooksul tekkivate kadude maksumus on 20% odavam kui praegusel lahendusel, mis teeb tuulepargi eluea kogukulud 4% võrra odavamaks.

SUMMARY

Wind energy is a clean and renewable energy source that is in line with Estonia's goal to reduce its carbon footprint and move towards a more sustainable future. Due to several factors, such as a long coastline, flat areas, and high wind speeds, especially during the winter months, the construction of wind farms are considered optimal in Estonia.

Although wind farms have many advantages in Estonia, their construction is still complex. There is public opposition to the construction of wind farms in Estonia, which is due to the noise pollution, visual impact and possible negative effects on wildlife. Those who live or operate near the planned wind farms are particularly against the construction. The process of obtaining the necessary permits for a wind farm construction can be lengthy and bureaucratic, as it involves many parties. Currently, the biggest problem is connecting wind farms to the national electricity grid due to the limited transmission capacity of the existing transmission infrastructure.

The main objective of this bachelor's thesis was to find the most optimal transmission line solution for the wind farm, that's described in this research. It has a total capacity of 21 MW (5x4,2 MW wind turbines). The wind farms' transmission line has a total length of 9,1 kilometres and it was constructed using the 36 kV AXLJ-TTCL TSLF 1x630 mm² underground cable.

Three different solutions were compared to the designed solution:

1. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x500 mm²,
2. AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) kV 1x800 mm²,
3. 2 x AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3x300 mm².

Based on the calculations carried out in the research, it can be concluded that there are several possibilities for construction the transmission line of the wind farm under consideration. When making a decision, it is necessary to evaluate a large number of factors, which have been previously highlighted.

The thesis showed that the designed solution is not the most optimal solution currently available. The most optimal solution would involve using the 800 mm² cable in the construction of the transmission line – this would result in higher construction costs, but the cost of losses incurred over the entire lifespan of

the wind farm would be 20% cheaper than the cost of the current solutions losses. That would make the total cost of the wind farm 4% cheaper over its lifespan.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Energiatalgud, “Elektri tootmine,” detsember 13, 2022. https://energiatalgud.ee/Elektri_tootmine
- [2] Riigikantselei, “Rohepöörde tegevusplaan 2023-2025.” detsember 19, 2022.
- [3] “Taastuenergia arendamise kiirendamine,” jaanuar 30, 2023. <https://valitsus.ee/valitsuse-eesmargid-ja-tegevused/rohepoliitika/taastuenergia-arendamine>
- [4] Merilin Pärli, “Tuule osakaal kogu elektritoodangust on kuust kuusse väga heitlik,” juuli 12, 2021. <https://www.err.ee/1608428123/tuule-osakaal-kogu-elektritoodangust-on-kuust-kuusse-vaga-heitlik>
- [5] Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon, “Tuuleenergia Eestis,” 2023. <https://tuuleenergia.ee/tuuleenergia-eestis/>
- [6] E. Vilgats, “Sopi-Tootsi tuulepargi ehitus algab juba jaanuaris,” jaanuar 18, 2023. <https://www.err.ee/1608854954/sopi-tootsi-tuulepargi-ehitus-algab-juba-jaanuaris>
- [7] Global Wind Energy Council, “Global Wind Report 2022.” <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>
- [8] Henrik Møller and Christian Sejer Pedersen, “Low-frequency noise from large wind turbines.” juuni 14, 2011.
- [9] KANTAR, “Tuuleparkide meelsusuuring.” Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, november 2021.
- [10] Danish Wind Industry Association, “Wind Turbine Components,” mai 10, 2003. <http://xn--drmmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [11] Windmills Tech, “Wind Turbine Components.” <https://windmillstech.com/wind-turbine-components/>
- [12] Wikipedia, “Wind power,” aprill 20, 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power
- [13] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, “Tuuleenergia,” veebruar 03, 2023. <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/taastuenergia/tuuleenergia>
- [14] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, and J. Kilter, *Jaotusvõrgud*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.
- [15] “Elektrisüsteem,” september 28, 2010. https://petz.planet.ee/elekter/infosys_energeetikas/AES3241-2%2520Elektrisusteem.pdf

- [16] “MEDIUM VOLTAGE CABLE CONSTRUCTION,” mai 19, 2018. <https://voltage-disturbance.com/power-engineering/medium-voltage-cable-construction/>
- [17] E. Õun and T. Rannut, “Tuulepargi ülekandeliini ehituse tööprojekt.” 2022.
- [18] P.Srinivas and M.L.S.Devakumar, “Optimization of Power Factor and Energy Management in Wind Energy Station.” detsember 2010.
- [19] Eesti Standardikeskus MTÜ, “EVS-EN 60909-3:2010,” mai 06, 2010. <https://www.evs.ee/et/evs-en-60909-3-2010>
- [20] “Elering AS Püssi 330 kV lahtri ehituse hankedokumendid, AS Connecto Eesti dokumentatsioon.”
- [21] Eesti Standardikeskus MTÜ, “EVS-EN 60909-0:2016,” juuli 05, 2016. <https://www.evs.ee/en/evs-en-60909-0-2016>
- [22] Eesti Standardikeskus MTÜ, “EVS-HD 620 S3:2023,” märts 04, 2023. <https://www.evs.ee/en/evs-hd-620-s3-2023>
- [23] Elering AS, “Börsihinnad (Eesti ajas, EET/EEST).” <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=years&start=2021-12-31T22:00:00.000Z&end=2022-12-31T21:59:59.999Z>
- [24] Nordpool, “Day-ahead prices,” jaanuar 04, 2023. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/EE/Yearly/?view=table>

LISAD

LISA 1. REKA CABLES AHXAMK-W 19/33 (36) KV 3-CORE

KAABLI TEHNILINE SPETSIFIKATSIOON



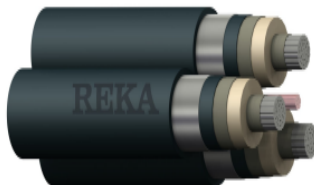
ISO 45001, ISO 14001 and ISO 9001 certified
company REACH and RoHS compliant products

2023-04-20 13:36:13

AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3-core

Medium voltage cable

19/33 (36) kV



Application

Medium-voltage cable DryRex Nordic Wind cables are designed especially to meet the requirements of 36 kV wind farms. May be buried directly in soil, also by ploughing. Cable is longitudinally and radially watertight and therefore it is suitable where wet soil and / or fresh water permanently occurs. Installations must be in accordance with national regulations and rules of installations. The cable is halogen-free, but without fire protection. The cable is not CPR-classified.

Design

Standards	HD 620 10 F, SFS 5636
Certificates	SGS Fimko FI 40519
Conductor	Watertight, circular, stranded aluminium EN/IEC 60228 class 2
Conductor screen	Semiconducting cross-linked polyethylene XLPE
Insulation	Cross-linked polyethylene XLPE
Insulation screen	Semiconducting cross-linked polyethylene XLPE
Cable lay up	Three sheathed cores are laid up around a bare copper earth conductor
Metal screen	Polyethylene laminated aluminium foil, which acts also as a radial water barrier
Oversheath	PE-plastic PELLD
Colour of the oversheath	Black

Temperature limits

Max. conductor temperature °C	90
Max. cond. temp. short circuit max. 5 s °C	250
Min. cable temperature during operation °C	-50
Min. cable temperature during handling °C	-20
Min. cable temperature during transport °C	-40

Technical information		3x95+35 Cu	3x120+35 Cu	3x150+35 Cu	3x185+35 Cu	3x240+35 Cu	3x300+35 Cu	3x300+70 Cu	3x300+70 Cu
AC resistance of phase conductor, screen circuit closed									
Conductor temperature 65 °C Ω/km		0,38	0,30	0,24	0,19	0,15	0,12	0,12	0,12
Conductor temperature 90 °C Ω/km		0,41	0,32	0,26	0,21	0,16	0,13	0,13	0,13
Conductor temperature 40 °C Ω/km		0,35	0,27	0,22	0,18	0,14	0,11	0,11	0,11
Inductance per phase									
In flat formation, free space between cables equal to one cable diam		0,61	0,59	0,58	0,56	0,55	0,54	0,54	0,54
In trefoil formation, cables touching each other mH/km		0,42	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,35	0,35
Electrical values									
Calculated operation capacitance μF/km		0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,23	0,23
Calculated charging current with main voltage A/km		0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4
Calculated earth fault current with main voltage A/km		2,8	3,1	3,3	3,6	4,0	4,2	4,2	4,2
Current ratings									
Cables in air (25 °C)									
Flat, conductor 90 °C, open screen A		320	370	425	485	570	650	650	650
Flat, conductor 90 °C, closed screen A		310	350	395	440	515	580	580	580
Trefoil, conductor 90 °C, open screen A		285	330	380	430	505	580	580	580
Trefoil, conductor 90 °C, closed screen A		280	325	370	425	490	565	565	565
Cables in the ground (15 °C and 1,0 K.m/W), Installation depth 0,7 m									
Trefoil, conductor 65 °C, open screen A		240	270	305	345	395	445	445	445
Trefoil, conductor 65 °C, closed screen A		235	265	300	330	385	435	435	435
Trefoil, conductor 90 °C, open screen A		280	320	360	405	465	525	525	525
Trefoil, conductor 90 °C, closed screen A		275	310	355	390	455	510	510	510
Maximum thermal short circuit current during 1 s									
Phase (initial 90 °C, final 250 °C) kA		8,9	11,3	14,1	17,4	22,6	28,3	28,3	28,3
Metal screen (initial 35 °C, final 250 °C) kA		4,8	5,0	5,2	5,5	6,0	6,2	6,2	6,2
Metal screen (initial 60 °C, final 250 °C) kA		4,4	4,6	4,8	5,0	5,5	5,7	5,7	5,7
Metal screen (initial 85 °C, final 250 °C) kA		4,0	4,2	4,4	4,6	5,0	5,2	5,2	5,2
Bare earth conductor (initial 55 °C, final 200 °C) kA		5	5	5	5	5	5	5	10

LISA 2. PRYSMIAN GROUP AXLJ-TTCL TSLF 18/30 (36) KV KAABLITE TEHNILINE SPETSIFIKATSIOON

Jõukaablid 36 kV

Draka

A Brand of Prysmian Group

AXLJ-TTCL TSLF 18/30(36) kV



Tooteperekonna kirjeldus

Piki- ja põikisuunas veekindel keskpinge jõukaabel keerutatud ja tihendatud alumiiniumjuhtmega. Kaablil on pooljuhtiv väliskiht. Kohtkindlaks paigalduseks välistingimustes, sobib maasse kündmiseks.

Tootepere alternatiivmärgistus

SE-N30XC7A5T5E-AR

Tuletundlikkus

Ei ole kohaldatav

Standard

SS 424 14 16
HD 620 osa 10 jagu K
HD 620 osa 10 jagu M

Konstruksioon

Kaabli kuju	Ümar
Juht	Keerutatud, ümar ja tihendatud alumiiniumjuhe, vastavalt IEC 60228 klass 2, pikisuunas veekindel
Isolatsioon	XLPE, minimaalne paksus 7,1mm
Juhi ekraan	Pooljuhtiv kopolümeerkompaund
Isolatsiooni ekraan	Pooljuhtiv kopolümeerkompaund
Pikisuunaline veekindlus	Pooljuhtiv veekindel teip
Varjestus	Lõõmutatud vaskjuhtmed koos alumiiniumlaminaadiga
Ristsuunaline veetõke	Alumiiniumlaminaat, seotud väliskestaga
Koorimisnõör	Aramiid.
Väliskest	UV-kindel PE
Tähistuse näidis	AXLJ-TTCL TSLF 36kV 1x95 AFR/25 DRAKA "Kuupäev ja kellaaeg", meetrimärk

Temperatuur

Max töötemperatuur	90°C
Min paigaldustemperatuur	-20°C, alla 0°C on ettevaatusabinõud soovituslikud

Omadused

Painderaadius	Ühekordne painutamine lõplikul paigaldusel: 10 x D Paigaldusel: 15 x D. Kündmisel: 8 x D
---------------	--

Elektrilised omadused

Maksimaalne temperatuur lühise korral	250°C
Impulsspinge	170kV

Jõukaablid 36 kV

Kaabli soone ja ekraani ristlõige [mm ²]	Juhi ligikaudne läbimõõt isolatsiooniga [mm]	Kaabli ligikaudne läbimõõt [mm]	Standardpikkus [m]	Standardpakend	EAN/GTIN number	SAP kood
1x50/25	24,3	33,1	500	K14	7330384719087	20114470
1x70/25	25,9	34,7	500	K14	7330384719094	20114471
1x95/25	27,6	36,6	500	K16	7330384713665	20102188
1x120/35	28,9	37,9	500	K16	7330384719100	20114472
1x150/35	30,5	39,7	500	K18	7330384719117	20114473
1x185/35	32,2	41,4	500	K18	7330384713658	20102189
1x240/35	34,4	43,8	500	K18	7330384719124	20114474
1x300/35	36,9	46,5	500	K20	7330384713689	20102190
1x400/35	40,1	49,9	500	K20	7330384713702	20102191
1x500/35	43,0	52,9	500	K22	7330384713672	20102192
1x630/50	46,9	57,0	500	K22	7330384716772	20114469
1x800/50	50,4	60,9	500	K24	7330384718158	20114475

Kaabli soone ja ekraani ristlõige [mm ²]	Faasi juhtme maksimaalne alalisvoolutakistus (20°C) [Ω/km]	Ekraani maksimaalne alalisvoolutakistus (20°C) [Ω/km]	Induktiivsus kolmnurkpaigaldusel / rõõpsel paigaldusel* [mH/km]	Reaktiivtakistus kolmnurkpaigaldusel / rõõpsel paigaldusel* [Ω/km]	Mahtuvus [μF/km]	Laadimisvool / faas [A/km]	Maa lühisvool [A/km]
1x50/25	0,6410	0,727	0,47 / 0,75	0,15 / 0,24	0,13	0,7	2,2
1x70/25	0,4430	0,727	0,44 / 0,71	0,14 / 0,22	0,14	0,8	2,4
1x95/25	0,3200	0,727	0,42 / 0,68	0,13 / 0,21	0,16	0,9	2,7
1x120/35	0,2530	0,524	0,41 / 0,66	0,13 / 0,21	0,17	1,0	2,9
1x150/35	0,2060	0,524	0,39 / 0,64	0,12 / 0,20	0,19	1,1	3,2
1x185/35	0,1640	0,524	0,38 / 0,62	0,12 / 0,20	0,20	1,1	3,4
1x240/35	0,1250	0,524	0,36 / 0,60	0,11 / 0,19	0,22	1,2	3,7
1x300/35	0,1000	0,524	0,35 / 0,58	0,11 / 0,18	0,24	1,4	4,1
1x400/35	0,0778	0,524	0,34 / 0,56	0,11 / 0,18	0,27	1,5	4,6
1x500/35	0,0605	0,524	0,32 / 0,54	0,10 / 0,17	0,29	1,6	4,9
1x630/50	0,0469	0,387	0,31 / 0,52	0,10 / 0,16	0,33	1,9	5,9
1x800/50	0,0367	0,387	0,30 / 0,50	0,09 / 0,16	0,36	2,0	6,1

* Kaablite vahekaugus rõõpsel paigaldamisel = 70mm

Kaabli soone ja ekraani ristlõige [mm ²]	Lubatud koormusvoolud vahetult pinnases** (juhe 65°C) [A]	Lubatud koormusvoolud õhus** (juhe 65°C) [A]	Lubatud koormusvoolud õhus** (juhe 90°C) [A]	Maksimaalne lubatud lühisvool 1 sekundi jooksul, temp 65°C, [kA]	Maksimaalne lubatud lühisvool 1 sekundi jooksul, temp 90°C, [kA]
1x50/25	155	160	195	5,2	4,7
1x70/25	200	190	235	7,2	6,6
1x95/25	235	230	280	9,9	8,9
1x120/35	265	265	325	12,4	11,3
1x150/35	300	300	370	15,6	14,2
1x185/35	330	345	425	19,2	17,5
1x240/35	385	400	490	25,0	22,7
1x300/35	435	460	565	31,2	28,3
1x400/35	510	555	680	41,6	37,8
1x500/35	570	635	775	52,0	47,2
1x630/50	635	720	880	65,6	59,5
1x800/50	695	822	1010	83	75,6

** Kolmnurksel paigaldamisel üldkraan maandatud mõlemas otsas.

Lubatud väärtused on toodud järgmisel tingimustel: pinnase temperatuur 15°C, õhutemperatuur 25°C, pinnase soojuslik eritakistus 1,0 K·m/W, kaabli paigaldamise sügavus, 0,65m, sagedus 50Hz.

Märkus: Ekraani takistus on vasktraatide ja alumiiniumfooliumi summa.