



Hiiumaa avamere tuulepark ja selle liitumine elektrisüsteemidega

**Vahearuanne lepingu nr LEP7112
täitmise kohta**

Instituudi direktor:

Heiki Tammoja

Projekti juht :

Heiki Tammoja

Tallinn 2008

TEADUSTÖÖ LEPING nr LEP7112

Hiiumaa avamere tuulepark ja selle liitumine elektrisüsteemidega

Projekti tellija: Nelja Energia OÜ , Reg. kood 11200305

aadress: Estonia pst 1/3, 10143 Tallinn

Projekti täitja: Tallinna Tehnikaülikool
Elektroenergeetika instituut

aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Projekti algus: 1. november 2007

Projekti lõpp: 1. november 2008

Projekti juht: Heiki Tammoja, professor, tehnikateaduste kandidaat

Projekti põhitäitjad: Matti Keel, vanemteadur, tehnikakandidaat
Rein Oidram, dotsent, tehnikakandidaat
Peeter Raesaar, dotsent, tehnikateaduste kandidaat
Juhan Valtin, professor, tehnikakandidaat

SISUKORD

EESSÕNA.....	4
1. SISSEJUHATUS	5
2. TUULEPARGI SEKTSIOONISISESED ÜHENDUSED	8
3. ENERGIA MAISMAALE EDASTUSSÜSTEEM	12
4. LIITUMINE ÜLEKANDEVÕRGUGA	16
4.1 VAHELDUVVOOLU ÜHENDUS HARKU JA SINDI ALAJAAMADEGA	17
4.2 VAHELDUVVOOLU ÜHENDUS HARKU JA VENTSPILSI ALAJAAMADEGA.....	18
4.3 ALALISVOOLUÜHENDUSED.....	22
5. HIIUMAA TUULEPARGI MAJANDUSLIK HINNANG	24
KIRJANDUS.....	27

EESSÕNA

Käesolev on vahearuanne projekti nr. **LEP7112 “Hiiumaa avamere tuulepark ja selle liitumine elektrisüsteemidega”** täitmise kohta.

Projekti tellijaks on Nelja Energia OÜ ning täitjaks Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituut.

Projekti põhitäitjateks on Heiki Tammoja (projekti juht), Matti Keel, Rein Oidram, Peeter Raesaar, ja Juhan Valtin. Vajalikke arvutusi Eesti põhivõrgu arvutimudeliga sooritas magistrand Oleg Tšernobrovkin. Töös osales ka doktorand Jaanus Ojangu.

Projekti ettevalmistavas staadiumis – hangiti ja töötati läbi vajalik kirjandus ja lähteandmed.

Käesolevas aruandes on toodud lühiülevaade töö senistest tulemustest.

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida Nelja Energia OÜ poolt elektrienergia tootmiseks kavandatava Hiiumaa avamere tuulepargi tehnilisi aspekte.

Hiiumaa Tuulepark on kavandatud rajada koosnevana viiest tuulikute rühmast ehk sektsioonist Hiiumaast põhja, loodesse ja läände jäävatele Apollo, Vinkovi, Glotovi ja Neupokojevi madalatele ning nende lähistele – vt joonis 1. Esialgse visiooni kohaselt soovitakse tuulikud püstitada ligikaudu 10 km² suurusele alale, kus mere keskmine sügavus ei ole üle 15 m. Mereala pindala ja sügavus on täpsustamisel ning määratletakse lõplikult alles KMH koostamise protsessis täiendavalt selguvate asjaolude raames.

Tuulepark on planeeritud võimsusega 1000 MW, rakendades Saksa päritolu tuulikuid RePower 5M võimsusega 5 MW igaüks. Elektrituumikute koguarvuks on plaanitud 200, mis jagunevad sektsioonide vahel vastavalt tabelis 1 toodule.

Tabel 1. Hiiumaa Tuulepargi jaotus sektsioonideks

Sektsioon nr	Tuulikute arv	Koguvõimsus, MW	Paiknemine (vt joon 1)
1	69	345	Neupokojevi madal
2	23	115	Hiiu madala läheduses
3	9	45	Hiiu madala läheduses
4	40	20	Vinkovi ja Glotovi madalad
5	59	295	Apollo madal
KOKKU	200	1000	

Tuuleturbiini RePower 5M tuule käivitavaks kiiruseks on 3,5 m/s, nimivõimsus saavutatakse kiirusel 13 m/s. Tuule piirkiiruseks (väljalülituskiiruseks) on avamere variandil 30 m/s. Generaatoriks on kaksiktoitega 6-pooluseline asünkroongeneraator, pöörlemiskiirusega 670-1170 pöör/minutis. Rootori pingeline on 660V ning staatori pingeline 950V. Staator on võrku ühendatud läbi pulss-modulatsioon IGBT konverteri. Võimsuse juhtimine toimub laba kalde ning libistuse reguleerimisega. Tiiviku läbimõõt on 126 m, rummu kõrgus 100-120 m [Repower 5M]. Trafo väljundpinge on valitav kas 20 või 33 kV.

Avamere tuulepargis võib eristada kolme energia ülekandesüsteemi (vt joonis 1)

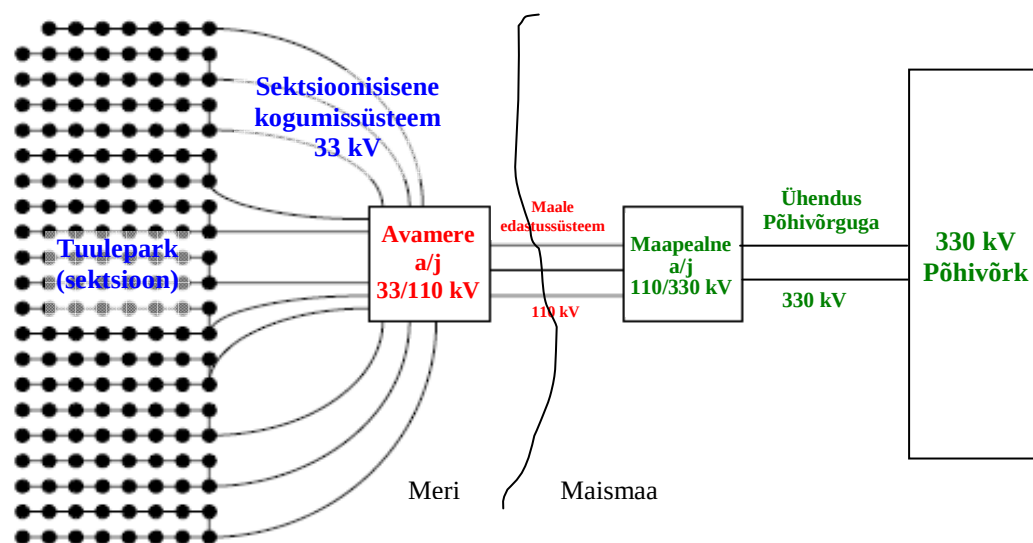
Pargi(sektsiooni-)sisene kogumissüsteem

Maismaale edastussüsteem

Liitumine ülekandevõrguga

Tuulepargi sektsioonisisest ühendust on pakutud teostada 33 kV merekaablitega, Sektsioonid ühendatakse 110 kV mere- ja maakaablitega Hiiumaal paiknevas uues alajaamas. Viimane on kavandatud ühendada Eesti energiasüsteemi põhivõrguga alalis- või vahelduvvoolu mere- ja maakaablite abil Harku ja Sindi (või Lihula) alajaamades, võimalikud on ka ühendused Rootsi või/ja Läti energiasüsteemidega. Hiiumaa tarbijatega ühendust ette pole nähtud.

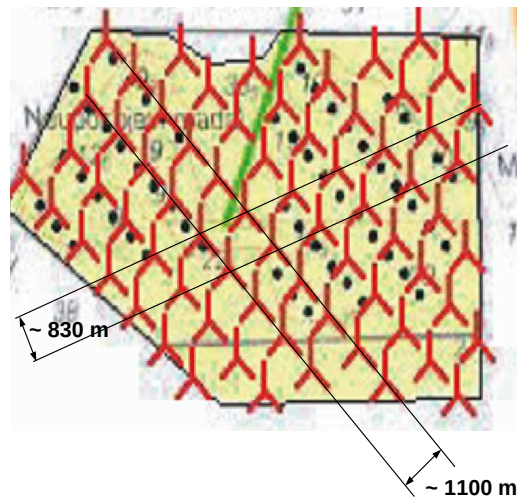




Joonis 2. Avamere tuulepargi põhimõtteline energia ülekandesüsteem

2. TUULEPARGI SEKTSIOONISESED ÜHENDUSED

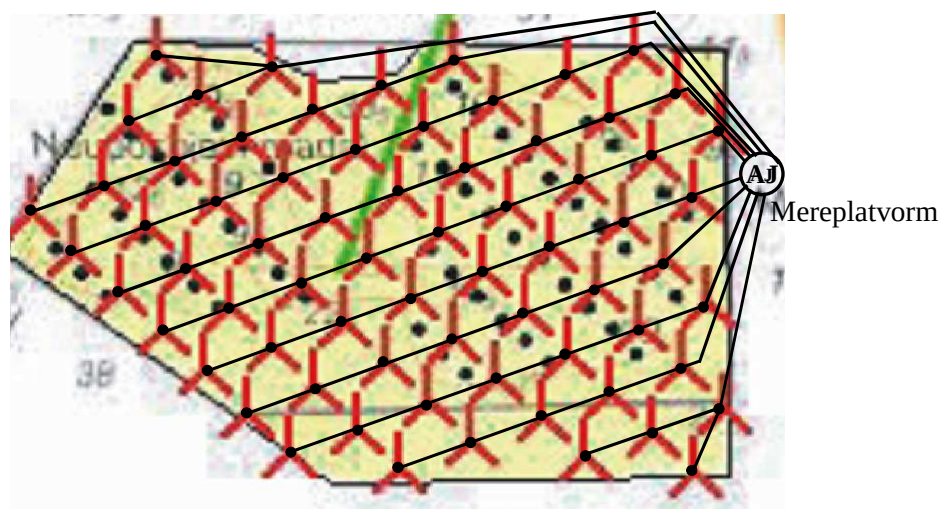
Elektrituulikud paiknevad sektsioonides ridadena ridade vahelise kaugusega keskmiselt 830 m, tuulikute kaugus ridades on keskmiselt 1100 m – vt joonist 3, mis illustreerib tuulikute paigutust sektsioonis 1. Paigutus ülejäänud sektsioonides on analoogiline. Rusikareegli kohaselt tuulikute vahekaugus tuulepargis on 5-9-kordne tiiviku läbimõõt prevaleerival tuule suunal ja 3-5-kordne tiiviku läbimõõt prevaleeriva tuule suunaga risti oleval suunal [Guided Tour...]



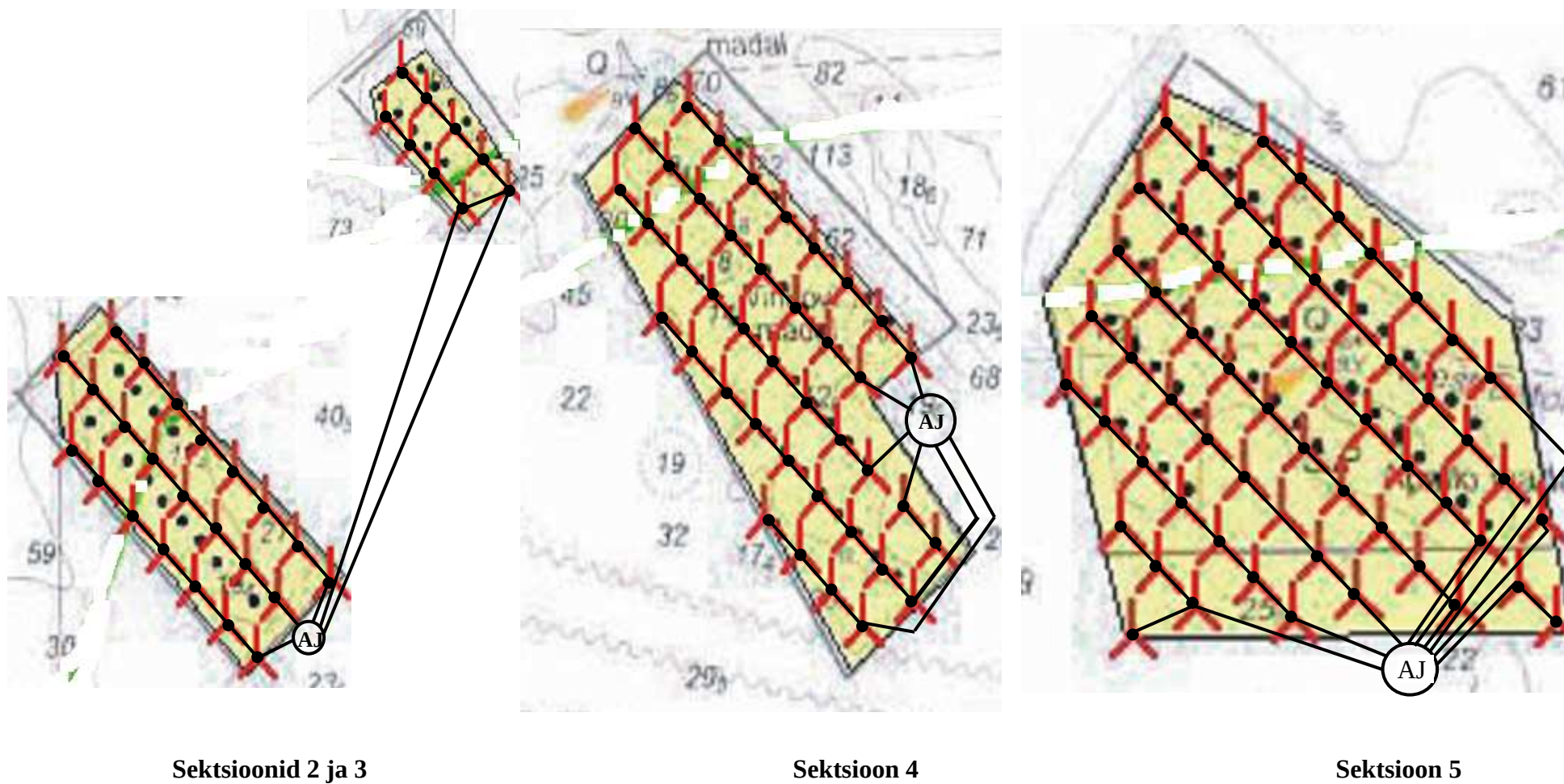
Joonis 3. Tuulikute paiknemine sektsioonis 1

Arvestades Hiiumaa Tuulepargi elektrituulikute võimsusi ja vahekaugusi, on pargi- ehk sektsioonisisese kogumissüsteemi sobivaimaks pingeks keskpinge 33 kV. Tuulikud ridades ühendatakse omavahel kolmesooneliste 33 kV XLPE merekaablitega (standard IEC 60502-2), mis võimaldavad edastada võimsusi kuni 50 MW [Submarine...2004]. Kolmesooneline kaabel vähendab kaabli maksumust ja paigalduskulusid. Väheneb ka elektromagnetiline väli väljaspool kaableid ning kaod kaablites [Wright,...2002].

Igas sektsioonis (v.a sektsioon 4) tuuakse ridade ühendused välja mereplatvormil paikneva 33/110 kV alajaama jaotlasse. Sektsioonil 3 pole alajaama mereplatvormil ette nähtud ja ta ühendatakse sektsiooniga 2 kahe 33 kV kaabliga ($2 \times 630 \text{ mm}^2$). Tuulikute ühendusi sektsioonides illustreerivad joonised 4 ja 5.



Joonis 4. Tuulikute ühendamine sektsioonis 1



Joonis 5. Tuulikute ühendamine sektioonides 2-5

Sektsioonisestest kaablite arvutus on esitatud lisas toodud tabelites L1-L2.

Ühenduskaablite ristlõiked on 185 – 630 mm² (vt tabelid L1-L2).

Arvutuste koontulemused on esitatud tabelis 2:

Tabel 2. Sektsioonisestest kaablite koondandmed

Summaarne nimivõimsus, MW	1000,0
Summaarsed kaod, MW	13,4
Väljastatav võimsus, MW	985,9
Aastane kaoenergia, MWh	28438,2
Kogulaadimisvool IC , A	994,8
Kogulaadimisvõimsus, Mvar	19,0
Kogumahtuvus, µF	57,9

Kaod tuulikute täiskoormusel, MW:

$$\Delta P_{N \text{ tuulik}} = \frac{P_{\text{tuulik väljuv}}^2}{S_{N \text{ kaabel}}^2} \times \Delta P_{\text{eri}} \times l_{\text{kaablilõik}} \times 3 / 1000000$$

kus

$$P_{\text{tuulik väljuv}} = P_{N \text{ tuulik}} - \Delta P_{N \text{ tuulik}}$$

Aastane kaoenergia:

$$\Delta W = \Delta P_{N \text{ tuulik}} \times \tau$$

τ - kaoaeg:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10000} \right)^2 8760$$

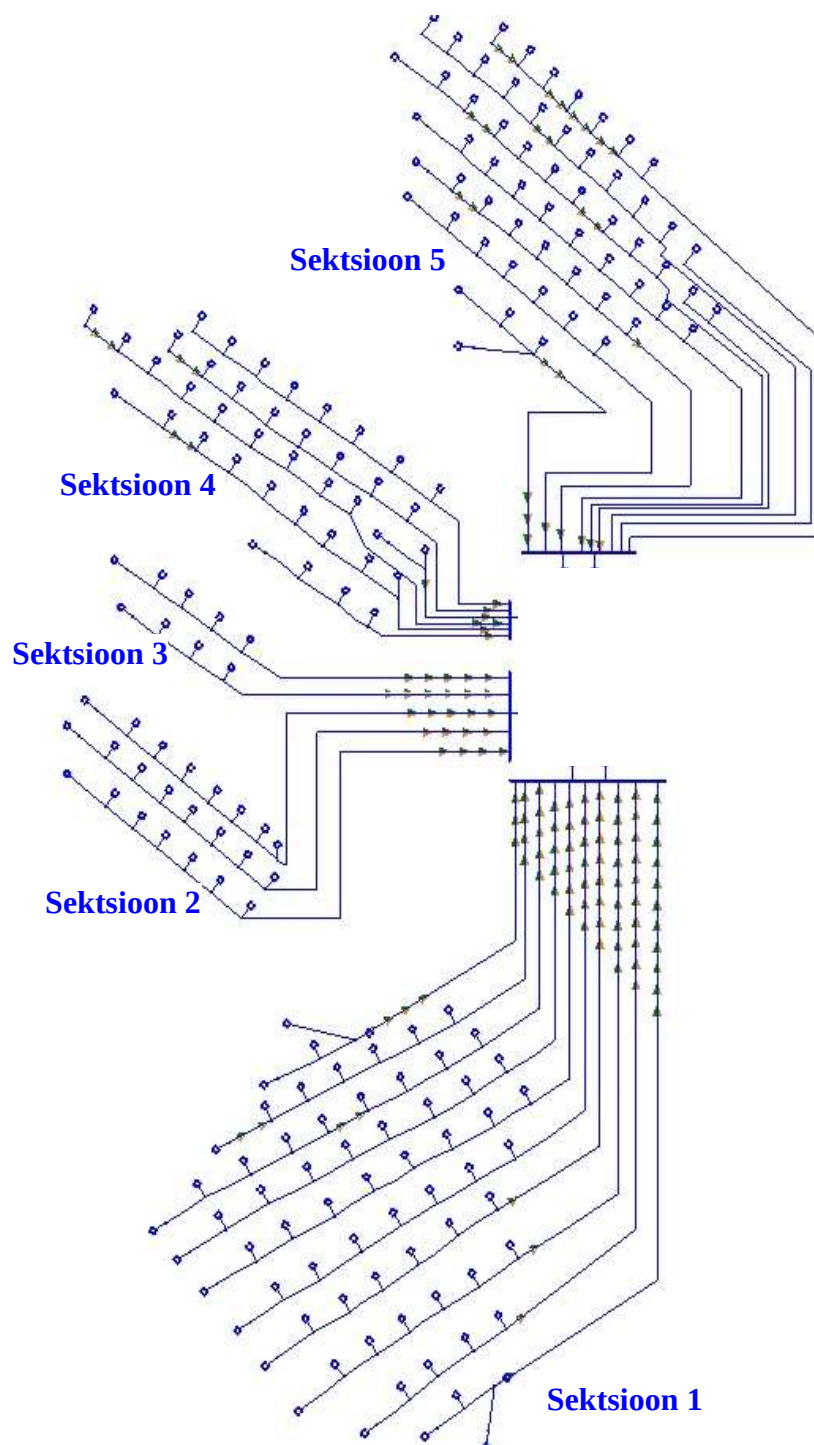
Eeldame tippvõimsuse kasutusajaks 3538 tundi. Siis $\tau = 2000$ h

Kogu sektsioonisestest ühenduste lihtsustatud skeem on toodud joonisel 6.

Sektsioonide mereplatvormidel rajatakse pinget tõstvad 33/110 kV alajaamad ning tuulikute toodetud energia edastatakse maismaale 110 kV kaablitega.

Trafode arv ja võimsused mereplatvormidel on järgmised:

Sektsioon 1	– 2×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 339,8 MW)
Sektsioon 2 ja 3	– 1×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 158,1 MW)
Sektsioon 4	– 1×200 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 197,1 MW)
Sektsioon 5	– 2×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 290,9 MW)



Joonis 6. Sektsioonisiseste ühenduste lihtsustatud skeem

3. ENERGIA MAISMAALE EDASTUSSÜSTEEM

Arvestades sektsioonidest ülekantavaid võimsusi ja sektsioonide kaugusi võimalikust maismaa alajaamast (22-45 km), on Eesti oludes maale edastussüsteemis sobivaim kasutada vahelduvpinget 110 kV.

Maailma kogemustel on vahelduvvoolu variant odavam juhul, kui laadimisvool jääb väiksemaks aktiivvoolust ja kaod ning pingelangud jäävad vastuvõetavale tasemele [Sally..2002]. Siin on laadimisvoolud aktiivvooludest märksa väiksemad – vt tabel 2.

Pinge 110 kV kasutamine võimaldab loobuda suurest arvust 33/330 kV trafodest ja nende paigaldamisest avamere platvormidele. Samuti võimaldab see vältida konverterite avamere platvormidele paigaldamist, kui Põhivõrguga ühendamine peaks toimuma alalisvoolul.

Pinge tõstmine toimub mereplatvormidel paiknevates alajaamades, kuhu ühendatakse tuulepargi sektsioonidest energiat koguvad 33 kV kaablid. Trafode arv ja võimsused mereplatvormidel on järgmised:

Sektsioon 1	– 2×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 339,8 MW)
Sektsioon 2 ja 3	– 1×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 158,1 MW)
Sektsioon 4	– 1×200 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 197,1 MW)
Sektsioon 5	– 2×160 MVA	(tuulikute maksimaalne netovõimsus 290,9 MW)

Sektsioonide maismaaga ühendused tuleks koondada rajatavasse nn Kanapeeksi alajaama samanimelise küla lähedal Kõrgessaare vallas – vt joonis 7.

Ühenduskaablitenä kasutatakse ühesoonelisi XLPE kaableid [XLPE Cable...], [XLPE Submarine...], soone materjaliks vask.

Eeldatud on, et soomuskatte takistus on võrdne (s.t. 100 %) juhi takistusega.

Eeldatud on kaablite kaugpaigutust. Kuigi kaod on siis suuremad, on samas kaablite edastusvõime tunduvalt suurem.

Teatud alternatiiviks on sektsiooni 1 ühenduse maismaa osa teostus 110 kV õhuliiniga – see võimaldaks vähendada 110 kV osa maksumust tänu 110 kV maakaabli asendamisele 40 km ulatuses 110 kV õhuliiniga. Samas võib sellise variandi korral tekkida keskkonnakaitselisi raskusi ja probleeme maade eraldusega õhuliini trassiks.

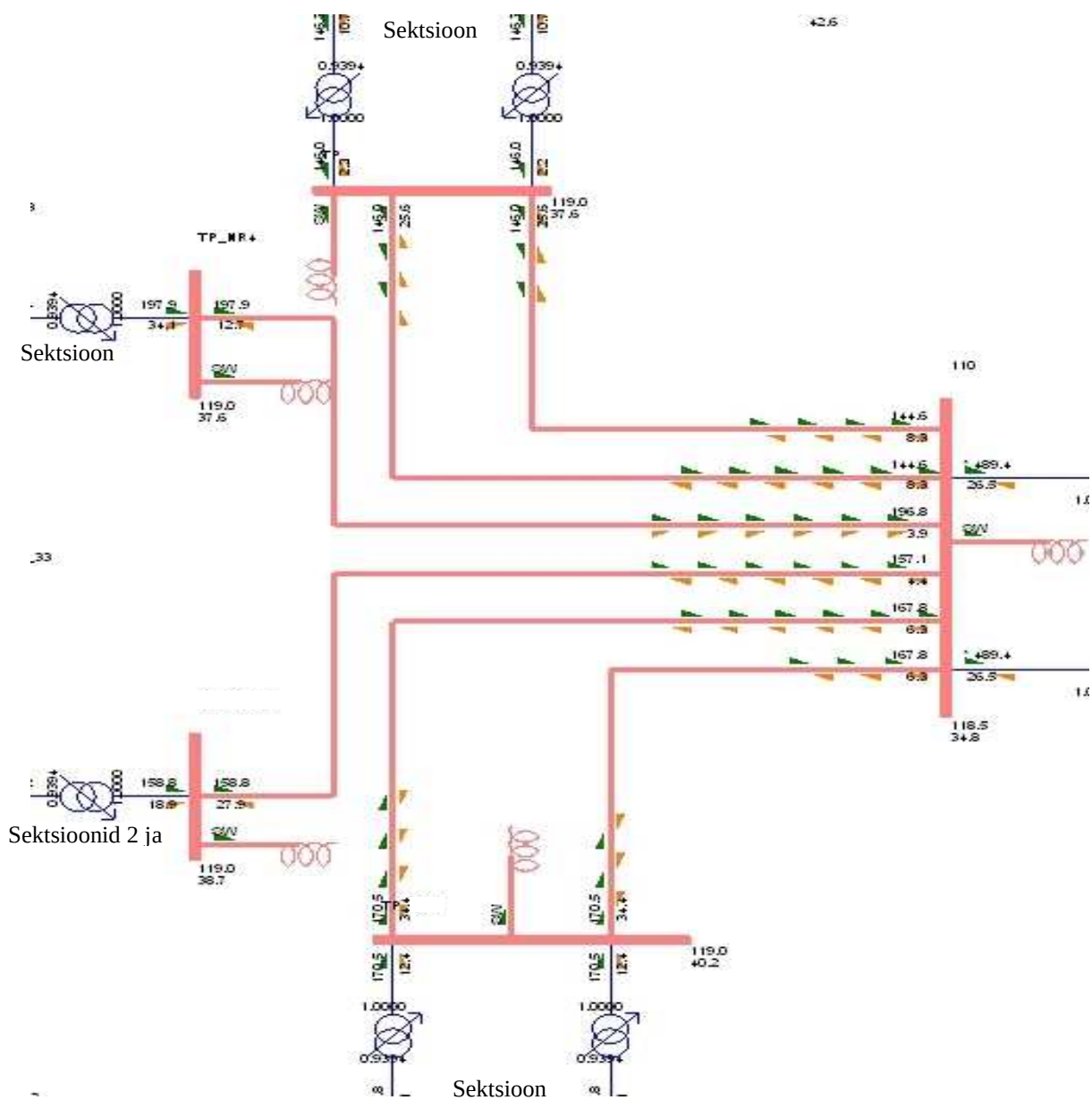


Joonis 7. Hiiumaa Tuulepargi energia maismaale edastussüsteem – liitumine Harku ja Sindi (Lihula) alajaamas

Tabel 2. Maale edastuskaablid XLPE 110 kV

Kaabelliin	Pikkus km	Võimsus P, MW	Vool I, A	Kaabli ristlõige mm ²	Kaabli nimivool I _N , A	Alalisvoolu takistus Ω/km	Induktiiv- sus mH/km	M ahtuvus μF/km	Laadimis- vool, A/km	Koguaktiiv- takistus Ω/faas	Koguinduk- tiivsus, mH	Koguinduk- tiivtakistus Ω/faas	Kogu- mahtuvus μF	Kogulaa- dimisvool A/faas	A ktiiv- võimsus- kadu MW *	Induktiiv- võimsus- kadu Mvar*	Kogulaadi- misvõimsus M var
Sekts1-Kanapeksi	45	340	1785	2x500	1780	0,01415	1,12	0,42	8,2	0,64	50,40	15,83	18,90	369,0	18,25	453,58	70,22
Sekts2+3-Kanapeksi	35	158,2	830	500	890	0,0366	0,56	0,21	4,1	1,28	19,60	6,15	7,35	143,5	7,95	38,19	27,31
Sekts4-Kanapeksi	22	197,1	1035	800	1155	0,0221	0,53	0,25	4,9	0,49	11,66	3,66	5,50	107,8	4,68	35,26	20,51
Sekts5-Kanapeksi	26	290,8	1526	800	1560	0,0235	1,16	0,38	7,4	0,61	30,16	9,47	9,88	192,4	12,81	198,56	36,61
KOKKU	128	986,1											41,63	812,7	43,69	725,59	154,66
															* Täiskoormusel, cosφ=1		
				2x500	2x890	0,0283/2	2x0,56	2x0,21	2x4,1								
				2x400	2x780	0,047/2	2x0,58	2x0,19	2x3.7								

110 kV ühenduste ülevaatlisk skeem on toodud joonisel 8.



Joonis 8. 110 kV ühenduste ülevaatlik skeem

4. LIITUMINE ÜLEKANDEVÕRGUGA

Arvestades ülekantavaid võimsusi, toimub liitumine pingel 330 kV. Üleminek pingele 330 kV toimub Kanapeeksi alajaamas kahe 110/330 kV autotrafo abil kumbki võimsusega 500 MVA.

Liitumiseks ülekandevõrguga käsitleme mitut varianti:

1. Vahelduvvooluühendused

1.1 Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Sindi (Lihula) alajaamadega

1.2 Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Ventspils alajaamadega

2. Alalisvooluühendused

2.1 Alalisvooluühendus Harku alajaama

2.2 Alalisvooluühendus Harku alajaama ja kaabel Rootsi suunas

Sektsioonisisesed ja 110 kV ühendused jäävad kõigi variantide puhul samaks.

Vahelduvvoolu kaablite mahtuvus on väga suur ja see tekitab suure mahtuvusliku laadimisvoolu, mis vähendab kaabli aktiivvõimsuse edastusvõimet ja nõuab selle mahtuvusliku voolu absorbeerimist reaktorite abil. Ülekandesüsteemi projekteerimisel tuleb vältida kaabli mahtuvuste ja energiasüsteemi generaatorite, õhuliinide ning jõuelektroonika reaktantside resonantsi. Vältida tuleb asünkroongeneraatorite iseergutumist. Kaod on vahelduvvoolu kaablites märksa suuremad kui alalisvoolu kaablites.

Samas on alalisvoolu kaabelliinid küps ja hästi mõistetav tehnoloogia ja on paljudel juhtudel, eriti lühematel pikkustel ja mitte väga kõrgetel pingetel, tunduvalt odavamad.

Tabel 3. Andmeid kasutatavate kaablite ja õhuliinide kohta

Pinge kV	Ristlõige mm ²	R Ω/km	X Ω/km	C μF/km	Induktiivsus mH/km	Lubatud vool A	Nimivõimsus MVA
33	185	0,0991	0,119381	0,21	0,38	480	27,4
	300	0,0601	0,113097	0,25	0,36	611	34,9
	400	0,047	0,109956	0,27	0,35	681	38,9
	630	0,0283	0,100531	0,33	0,32	830	47,4
	800	0,0221	0,097389	0,36	0,31	896	51,2
110	400	0,047	0,182212	0,19	0,58	710	135,3
	500	0,0366	0,175929	0,21	0,56	805	153,4
	630	0,0283	0,169646	0,22	0,54	915	174,3
	800	0,0221	0,166504	0,25	0,53	1035	197,2
	1000	0,0176	0,160221	0,27	0,51	1195	227,7
330	Vasksoontega merekaabel						
	800	0,083	0,191637	0,16	0,61	935	534,4
	Õhuliin terasaluminiiumjuhtmetega						
	3x400	0,0242	0,2843	0,0127	0,91	2000	1143,2

4.1 Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Sindi alajaamadega

Selle variandi puhul Kanapeeksi alajaam ühendatakse kahe 330 kV kaabelliiniga Aulepa alajaama – vt joonis 7. Kumbagi liini läbilaskevõime on 535 MVA. Kaabliteks on vasksoontega mere ja maakaablid soone ristlõikega 800 mm². Kaabelliini pikkus on 54 km, sellest 39 km maismaal (s.h 18 km Hiiumaal, 11 km Vormsil ja 10 km Noarootsis).

Aulepa alajaamast jätkub ühendus 330 kV õhuliinidega Harku ja Sindi (või Lihula) alajaama. Õhuliinid teostatakse 3×400 mm² terasalumiiniumjuhtmetega, mis tagab nende läbilaskevõimeks 1140 MVA. Õhuliinid peaks kulgema praeguse Aulepa-Nõva-Rummu-Harku ja Aulepa-Taebbla-Lihula-Sindi 110 kV liinide trassidel. Õhuliinide pikkused:

Aulepa-Harku – 95 km

Aulepa-Sindi – 127 km

Aulepa-Lihula – 59 km

Liinide poolt genereeritava reaktiivvõimsuse absorbeerimiseks tuleb paigaldada reaktorid. Nende võimsuse ja paigutuse leidmiseks viidi läbi seeria arvutusi¹. Arvutused tehti tuulepargi erinevatel väljundvõimsustel kahel eeldusel:

- reaktorite võimsused pole muudetavad
- reaktorite võimsused on muudetavad

Mõned arvutuste tulemused on esitatud tabelis 4, kus on näha reaktorite võimsused alajaamades ja 330 kV kaablitel enne üleminekut merekaabliks (nn Hiiumaa lõpp).

Nagu nähtub, on reaktorite koguvõimsused nii konstantse kui muudetava reaktiivvõimsuse korral ligikaudu võrdsed (vastavalt 590 ja 598 Mvar). Samas on konstantse võimsusega reaktorite puhul 330 kV reaktorite võimsused üleminekul merekaabliks tunduvalt väiksemad. Aastaste energiakadude erinevus on väike – 1000 MWh ehk ca 1%.

Reaktiivvõimsuse tootmiseks või absorbeerimiseks kasutatakse ära ka tuulegeneraatorite reaktiivvõimsuse reguleerimisvõime. Seejuures konstantse võimsusega reaktorite puhul on täisvõimsusel vaja genereerida 140 Mvar, muudetava võimsusega reaktorite puhul 22,1 Mvar.

Vaadeldud variandi alternatiiviks oleks 330 kV kaablite viimine Haapsalu alajaama ning sealt edasi 330 kV õhuliinina Haapsalu-Risti-Kiisa ja 330 kV õhuliinina Haapsalu Sindi (või Lihula). Selle variandi puhul võib tekkida maaeraldusprobleeme.

Muutuva võimsusega reaktorite tänapäevaseks lahenduseks oleks türistorjuhtimisega reaktorid.

Vaadeldud variandi ülevaatlik skeem on toodud joonisel 8.

¹ Arvutused sooritas magistrand Oleg Tšernobrovkin programmikompleksiga PSS/E (koos mooduliga PSS/OPF).

Tabel 4. Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Sindi alajaamadega – arvutuste tulemusi

	Reaktorite reaktiivvõimsus pole muudetav, $Q_r = \text{const}$						Reaktorite reaktiivvõimsust reguleeritakse sujuvalt					
Tuulepargi väljundvõimsus P, % nimivõimsusest	10			100			10			100		
Võimsuskao ΔP , MW	3,2			48,2			3,2			47,7		
Energiakao ΔP , MWh				96400						95400		
Tuulepargi Q_r , Mvar	-24,2			140,0			-24,2			22,1		
Shuntide summaarne $Q_r \Sigma$, Mvar	-590			-590			-598			-456		
Sõlme nimetus	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü
Aulepa AJ 330	-50	356,7	1,08	-50	351,0	1,06	-50	358,2	1,09	-50	355,9	1,08
Sindi AJ 330	-40	352,8	1,07	-40	352,0	1,07	-40	353,3	1,07	-40	354,5	1,07
Harku AJ 330	0	346,8	1,05	0	346,2	1,05	0	347,4	1,05	0	349,2	1,06
Hiiumaa lõpp 1	-120	357,0	1,08	-120	353,2	1,07	-87	358,6	1,09	-68,4	358,3	1,09
Hiiumaa lõpp 2	-120	357,0	1,08	-120	353,2	1,07	-87	358,6	1,09	-68,4	358,3	1,09
Kanapeeksi 110	0	119,7	1,09	0	118,5	1,08	-49,7	117,5	1,07	-29,9	119,3	1,08
Sektsioon 5 110kV	-40	119,0	1,08	-40	119,0	1,08	-49,6	117,1	1,06	-60,4	118,8	1,08
Sektsioon 4 110kV	-20	119,0	1,08	-20	119,0	1,08	-49,7	116,3	1,06	-9,2	119,4	1,09
Sektsioon 2+3 110kV	-40	119,0	1,08	-40	119,0	1,08	-49,5	115,7	1,05	-12,5	120,1	1,09
Sektsioon 1 110kV	-80	119,0	1,08	-80	119,0	1,08	-49,7	117,5	1,07	-40,4	119,9	1,09
Kanapeeksi šunt 1 20kV	-40	21,3	1,06	-40	21,2	1,06	-42,7	21,3	1,07	-38,5	21,5	1,07
Kanapeeksi šunt 2 20kV	-40	21,3	1,06	-40	21,2	1,06	-42,7	21,3	1,07	-38,5	21,5	1,07

4.2 Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Ventspils alajaamadega

Variandi puhul ühendatakse Hiiumaa tuulepark ka Läti elektrisüsteemiga – vt joonis 10. Põhimõtteliselt erineb variant eelmisest selle poolest, et Aulepa-Sindi 330kV õhuliini asemel rajatakse 330kV vahelduvvoolu kaabelliini kahe 800 mm² kaabliga üle Hiiumaa ja Saaremaa ning läbi Riia lahe kuni Läti loode tippu Ventspils 330kV alajaama.

Kanapeeksi-Ventspils kaabelliini pikkus on 210 km, kusjuures Saaremaal, enne kui kaabel merre suubub, on Salme lähedale arvestatud reaktoralajaama rajamisega, kuhu paigaldatakse kaks šuntreaktorit võimsusega á 540 Mvar. Samuti tuleb täiendavad šuntreaktorid võimsusega 360 Mvar paigaldada Kanapeeksi AJ-a ning võimsusega 630 Mvar Ventspils 330kV alajaama.

Tuulepargis toodetud elektrienergia jagunemine Eesti ja Läti vahel sõltub siseriiklikust võimsuste bilansist ning ekspordi ning impordi situatsioonidest vastavate riikide elektrisüsteemides.

Variandi arvutused sooritati tuulepargi erinevatel väljundvõimsustel nii konstantse kui muudetava võimsusega reaktorite puhul. Varianti arvutati mitme stsenaariumiga, kus varieeriti siseriiklikku võimsuste bilanssi ja ka ekspordi ning impordi mahte. Samuti simuleeriti ohtlikumaid elektrivõrgu rikkeid erinevate alamstsenaariumite korral.

Mõned arvutuste tulemused on esitatud tabelis 5, kus on näha reaktorite võimsused alajaamades ja 330 kV kaablitel enne üleminekut merekaabliks (nn Hiiumaa lõpp ja Salme Saaremaal).

Tabel 5. Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Ventspils alajaamadega – arvutuste tulemusi

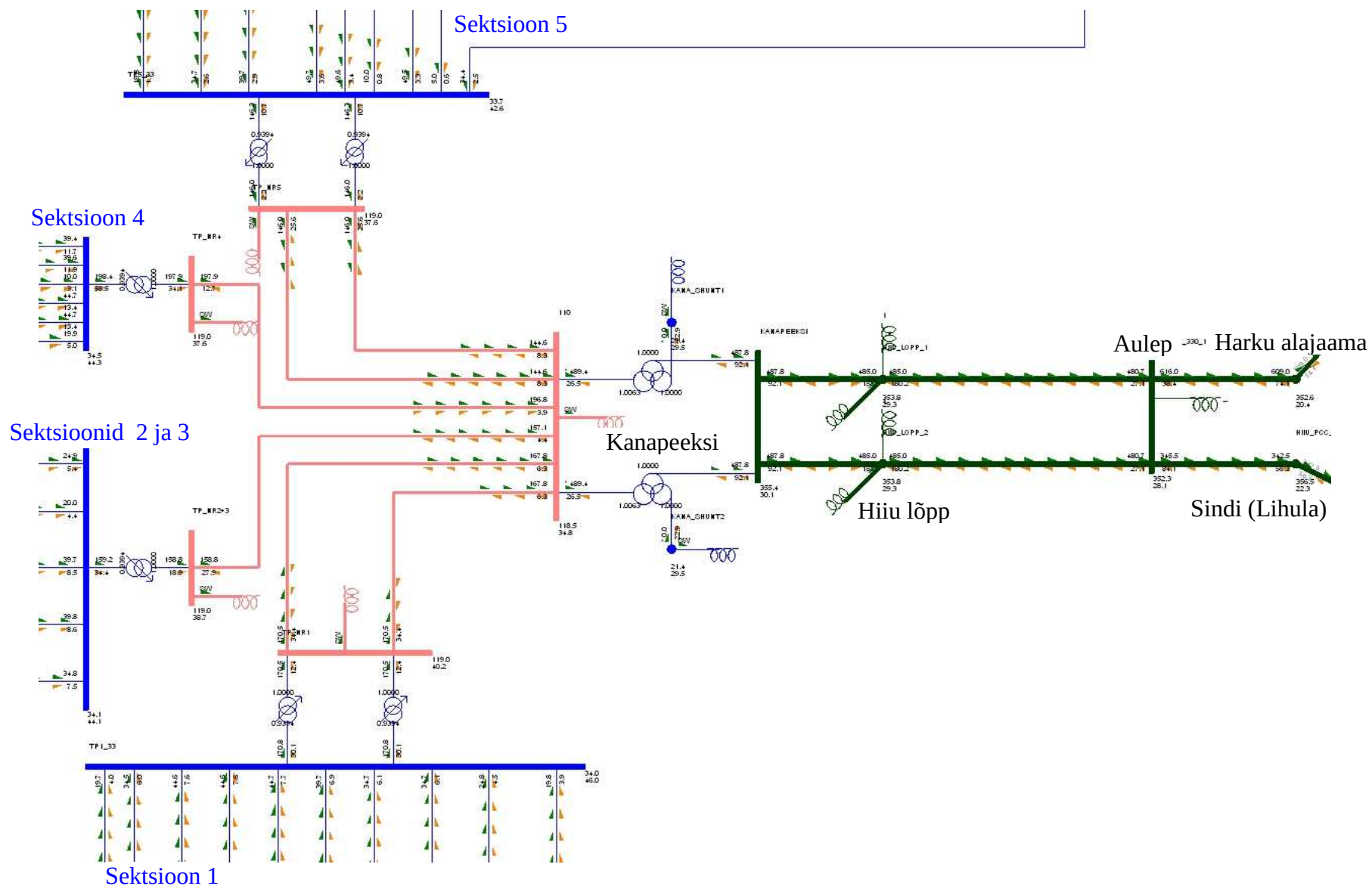
	Reaktorite reaktiivvõimsus pole muudetav, $Q_r = \text{const}$						Reaktorite reaktiivvõimsust reguleeritakse sujuvalt					
Võimsuskaod ΔP , MW	7,0			46,8			5,8			46,2		
Energiakaod ΔP , MWh				93600			5,8%			92400		
Tuulepargi Q_r , Mvar	1,4			130,5			5,8			56,7		
Shuntide summaarne $Q_r \Sigma$, Mvar	-3060			-3060			-3075			-2995		
Sõlme nimetus	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü	Q_r Mvar	U kV	U s.ü
Sektsioon 1 110kV	-80	119,0	1,08	-80	119,0	1,08	-58,3	119,2	1,08	-50,8	120,1	1,09
Sektsioonid 2+3 110kV	-40	119,0	1,08	-40	119,0	1,08	-22,8	119,3	1,08	-17,1	120,3	1,09
Sektsioon 4 110kV	-40	119,3	1,08	-40	118,9	1,08	-32,7	118,8	1,08	-4,6	120,4	1,09
Sektsioon 5 110kV	-60	119,4	1,09	-60	119,0	1,08	-57,3	118,7	1,08	-63,9	119,5	1,09
Kanapeeksi 110	-40	120,1	1,09	-40	118,9	1,08	-72,8	119,4	1,09	-31,4	119,7	1,09
Kanapeeksi šunt 1 20kV	-100	20,7	1,04	-100	20,7	1,04	-77,9	20,8	1,04	-73,4	21,0	1,05
Kanapeeksi šunt 2 20kV	-100	20,7	1,04	-100	20,7	1,04	-77,9	20,8	1,04	-73,4	21,0	1,05
KANAPEEKSI 330kV	-280	357,4	1,08	-280	356,3	1,08	-331	355,0	1,08	-317,9	357,8	1,08
Hiiumaa lõpp 1	-210	356,4	1,08	-210	354,3	1,07	-236,7	353,7	1,07	-211,1	355,6	1,08
Hiiumaa lõpp 2	-210	356,4	1,08	-210	354,3	1,07	-236,7	353,7	1,07	-211,1	355,6	1,08
Harku AJ 330	0	348,1	1,05	0	347,6	1,05	-0,6	346,7	1,05	-65,4	345,4	1,05
Salme_1	-540	358,4	1,09	-540	356,1	1,08	-528,8	357,2	1,08	-530,3	357,2	1,08
Salme_2	-540	358,4	1,09	-540	356,1	1,08	-528,8	357,2	1,08	-530,3	357,2	1,08
Tume AJ 330kV	-100	360,4	1,09	-100	358,5	1,09	-100	360,0	1,09	-100	358,5	1,09
Ventspils AJ 330kV	-720	357,2	1,08	-720	353,6	1,07	-713,1	356,4	1,08	-714,6	353,9	1,07

Reaktorite koguvõimsus on nii konstantse kui muudetava reaktiivvõimsuse korral ligikaudu võrdne (vastavalt 720 ja 713 Mvar). Samas on konstantse võimsusega reaktorite puhul 330 kV reaktorite võimsused üleminekul merekaabliks tunduvalt väiksemad. Aastaste energiakadude erinevus on väike – 1000 MWh ehk ca 1%.

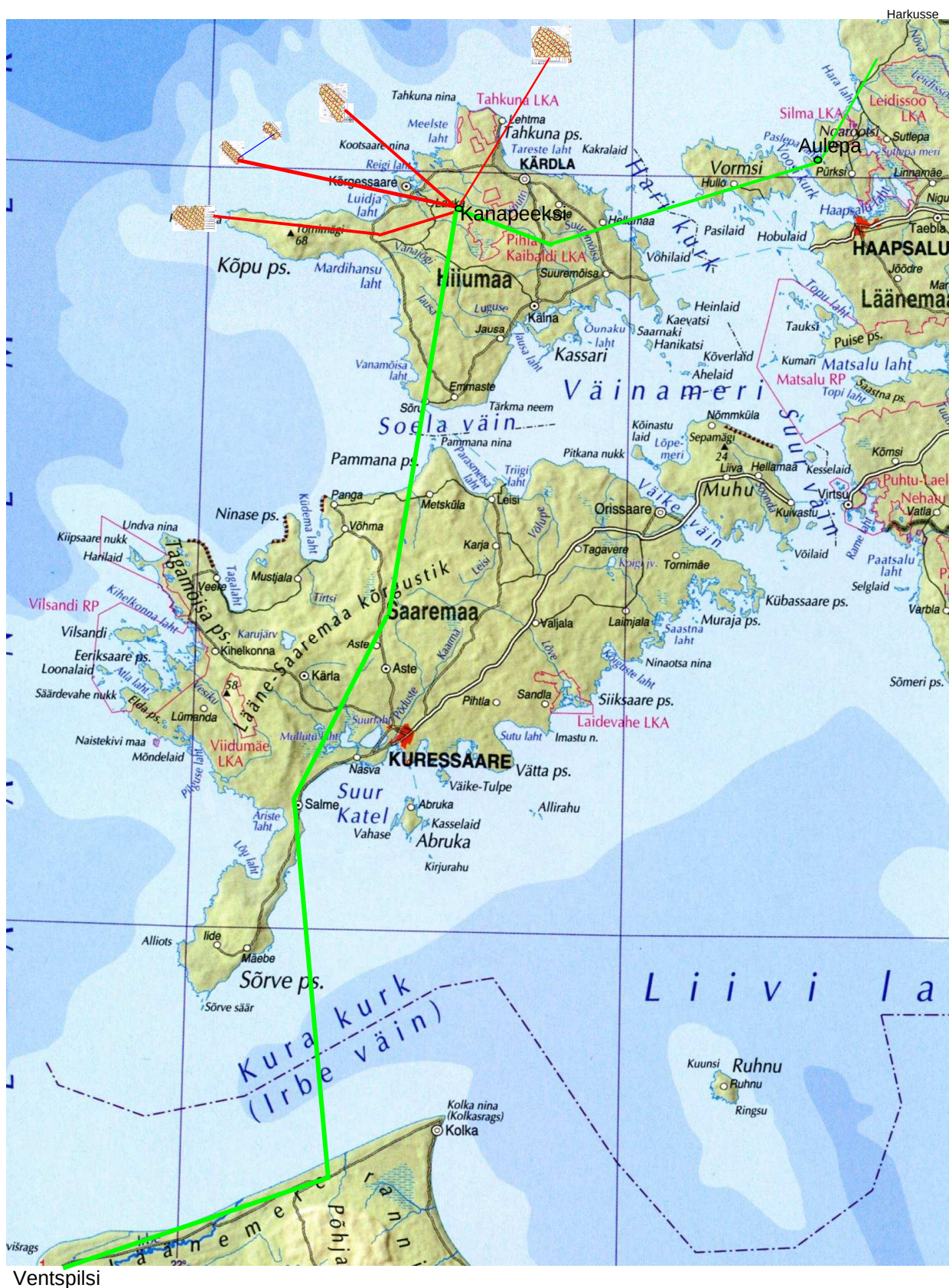
Reaktiivvõimsuse tootmiseks või absorbeerimiseks kasutatakse ära ka tuulegeneraatorite reaktiivvõimsuse reguleerimisvõime. Seejuures konstantse võimsusega reaktorite puhul on täisvõimsusel vaja genereerida 140 Mvar, muudetava võimsusega reaktorite puhul 22,1 Mvar.

Vaadeldud variandi alternatiiviks oleks 330 kV kaablite viimine Haapsalu alajaama ning sealt edasi 330 kV õhuliinina Haapsalu-Risti-Kiisa ja 330 kV õhuliinina Haapsalu Sindi (või Lihula). Selle variandi puhul võib tekkida maaeraldusprobleeme.

Muutuva võimsusega reaktorite tänapäevaseks lahenduseks oleks türistorjuhtimisega reaktorid.



Joonis 9. Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Sindi alajaamadega



Joonis 10. Vahelduvvoolu ühendus Harku ja Ventspils alajaamadega

4.3 Alalisvooluühendused

Tänapäeval üldine seisukoht, et vahelduvvoolu kaabelühendused on ökonoomsemad liini pikkustel kuni 50 km. Liini pikkustel 50-80 km on vahelduv- ja alalisvoolu ühenduste kulud võrreldavad. Pikemate ühenduste puhul osutuvad alalisvoolu ühendused majanduslikult tasuvamateks, eelkõige tänu sellele, et langeb ära vajadus kompenseerimisest järele. Tunduvalt väiksemad on võimsus- ja energiakaod. Puuduseks on kallite konverterseadmete vajadus.

Alalisvoolu ühendus Harku alajaama tuleks rajada kahe 150 kV vasksoontega *HVDC Light* bipolaarkaablina Kanapeeksi–Harku. Liini pikkuseks on 150 km. Bipolaarkaablina kas [HVDC Light...2006]

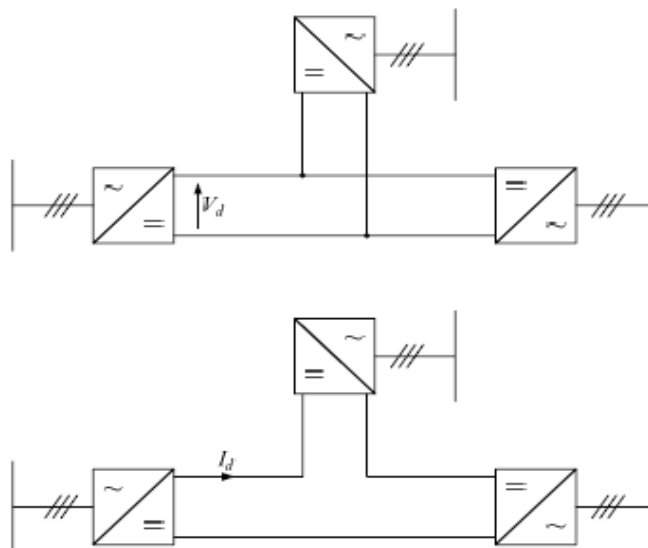
- 1200 mm² soonte eemalpaigutusega – läbilaskevõime 537 MW või
- 1600 mm² soonte lähipaigutusega – läbilaskevõime 516 MW

Kaablitrass mandril võiks jälgida õhuliini Aulepa-Nõva-Rummu-Harku trassi.

Kanapeeksi ja Harku alajaamades tuleb kasutada konvertermooduleid M6 alalisvoolule 1881 A läbilaskevõimega . 574 MW [HVDC Light...2006].

Alternatiiviks on alalisvoolu merekaabel Rootsi suunas. Kaabelliin algaks Kanapeeksi alajaamast ja suunduks Kapellskäri piirkonda. Kaabelliini pikkuseks on 240 km.

Rakendada tuleks nn *MTDC* süsteemi, kus skeemi on lülitatud kolm konverterit – Kanapeeksis, Harkus ja Rootsis [Hendriks,...2006]. Võimalik on konverterite rööp- või jadaühendus. Paindlikum ja töökindlam on rööpühendus.



Joonis 11. Konverterite rööp- ja jadaühendus MTDC süsteemis
[Hendriks,...2006]

Kaablitena võiks kasutada 300 kV vasksoontega bipolaarkaableid ristlõikega 1400 mm² läbilaskevõimega 875 MW (lähipaigutusel) – 1075 MW eemalpaigutusel. Konvertermoodulitena sobib M9 voolule 1881 A läbilaskevõimega 1148 MW [HVDC Light...2006].

Lõpetuseks toome mõned andmed elementide maksumuste kohta.

Tabel 6. Elementide maksumusi

Toode	Ühikhind MEEK
500MVA trafo 35/330kV?	75,00
Kaheahelaline 330kV õhuliin (km)	5,00
Üheahelaline 330 kV õhuliin, (km)	
330 kV lahter	35,7
Prysmian firma kaabel 345 kV, ühe sooneline, maakaabel (km)	4,70
Prysmian firma kaabel 345 kV, kolm soont, maakaabel (km)	14.1
Prysmian firma kaabel 345 kV, ühe sooneline, merekaabel (km)	10,00
Prysmian firma kaabel 345 kV, kolm soont, merekaabel (km)	30,00
Alalisvoolu link Harkusse	4700
Alalisvoolu link Harkusse koos Rootsi kaabliga	8500

5. HIIUMAA TUULEPARGI MAJANDUSLIK HINNANG

Käesolevas uuringus on toodud mitmed tehnilised variandid, et ühendada 1 GW suurust tuuleparki olemasoleva Eesti ülekandevõrguga. Järgnevalt on vaadeldud neid variante ning hinnatud variantide kogumaksumust. Kuna oovime määrata odavaimat lahendust, ei huvita meid need maksumused, mis on kõikide variantide puhul ühesugused. Vaatluse alt jäävad välja tuulikute sektsioonide sisesed liinid, pinget tõstvad alajaamad meres olevatel platvormidel ja liinid nimetatud alajaamadest Kanapeeksi alajaama. Edasi aga tehnilised variandid hargnevad ja neid on hinnatud. Lisaks eespool vaadeldud variantidele on toodud maksumus ka ühele lihtsale lahendusele (variant 5). Antud variandi järgi Kanapeeksi alajaamast suunduvad kaks alalisvoolu kaablit mööda mere põhja otse Harku alajaama.

Variandid 1 (p 4.1), 3 (p 4.3) ja ka variant 5 on sarnased. Need ühendavad tuuleparki Eesti elektrivõrguga. Variantide 2 (p 4.2) ja 4 (p 4.3) korral ühendatakse tuulikud ka vastavalt Läti ja Rootsi elektrivõrkudega. Kahtlemata on need variandid kallimad, kuid sisaldavad ka suuremaid võimalusi elektrienergia müügiks Läti ja Rootsi turul.

Maksumuste hinnangute andmisel tuleb arvestada, et need on ligikaudsed. Kuna ülikõrgepinge mere- ja maakaablite projekte on vähe ja nad on unikaalsed, siis olemasolevate hindade kasutamine sisaldab alati riske. Tegemist on alati pakkumistega, millede puhul hindadel on kõrge hajuvus. Paljude maksumuste hindamisel kasutati eksperthinnanguid ja mitmesuguseid seoseid vanematest teatmeteostest. Seega saadud tulemustesse tuleb suhtuda ettevaatlikult ja tulevikus püüda parima variandi elementide maksumusi edasi täpsustada.

Alljärgnevalt on toodud erinevate variantide kogumaksumused ning ka variandi üksikute osade tehnilised parameetrid ja ühikmaksumused. Kanapeeksi alajaama on tähistatud Ka-ga

Variantide võrdlus (Mkr)

Variant 1. Vahelduvvooluühendus Harku ja Sindi (Lihula) alajaamadega

Merekaabel x 2	Ka-Aulepa	330 kV	535 MVA	15 km	40 Mkr/km	1200
Maakaabel x 2	Ka-Aulepa	330 kV	535 MVA	39 km	20 Mkr/km	1560
Õhuliin	Aulepa-Harku	330 kV	1140MVA	95 km	2,3 Mkr/km	219
Õhuliin	Aulepa-Lihula	330 kV	1140MVA	59 km	2,3 Mkr/km	136
Õhuliin	Lihula-Sindi	330 kV	1140 MVA	68 km	2,3 Mkr/km	156
Reaktorid		330 kV	2x120 Mvar	2 tk	48 Mkr/tk	96
			50 Mvar	1 tk	28 Mkr/tk	28
			40 Mvar	1 tk	27 Mkr/tk	27
		110 kV	80 Mvar	1 tk	17 Mkr/tk	17
			2x40 Mvar	2 tk	15 Mkr/tk	30
			20 Mvar	1 tk	13 Mkr/tk	13
		20 kV	2x20 Mvar	2 tk	6 Mkr/tk	12
	Aulepa alajaam	330 kV	lahter	4 tk	12 Mkr/tk	48
Liitumistasu						502
(Harku, Veskimetsa, Järve alajaamade ja liinide rek)						
Laiendus	Lihula, Sindi	330 kV	lahter	3 tk	20 Mkr/tk	60
Liitumistasu Lihula-Sindi						200
Kokku						4304

Variant 2. Vahelduvvooluühendus Harku ja Ventspils alajaamadega

Merekaabel x 2	Ka-Aulepa	330 kV	535 MVA	15 km	40 Mkr/km	1200
Maakaabel x 2	Ka-Aulepa	330 kV	535 MVA	39 km	20 Mkr/km	1560
Õhuliin	Aulepa-Harku	330 kV	1140MVA	95 km	2,3 Mkr/km	219
Merekaabel x 2	Ka-Läti	330 kV	535 MVA	70 km	40 Mkr/km	5600
Maakaabel x 2	Ka-Läti	330 kV	535 MVA	140 km	20 Mkr/km	5600
Reaktorid		330 kV	720 Mvar	1 tk	145 Mkr/km	145
			2x540 Mvar	2 tk	112 Mkr/km	224
			280 Mvar	1 tk	72 Mkr/km	72
			2x210 Mvar	2 tk	59 Mkr/km	118
			100 Mvar	1 tk	45 Mkr/km	45
		110 kV	80 Mvar	1 tk	17 Mkr/km	17
			60 Mvar	1 tk	16 Mkr/km	16
			3x40 Mvar	3 tk	15 Mkr/km	45
		20 kV	2x100Mvar	2 tk	22 Mkr/km	44
Aulepa alajaam		330 kV	lahter	3 tk	12 Mkr/tk	36
Liitumistasu						502
(Harku, Veskimetsa, Järve						
Alajaamade ja liinide rek)						
Liitumistasu Lätis						500
Kokku						15943

Variant 3. Alalisvooluühendus Harku alajaama (üle Aulepa)

Merekaabel x 2	Ka-Harku	150 kV	15 km	12 Mkr/km	360
Maakaabel x 2	Ka-Harku	150 kV	135 km	6 Mkr/km	1620
Konverterjaam		574MW	4 tk	600 Mkr/tk	2400
Liitumistasu					502
(Harku, Veskimetsa, Järve					
Alajaamade ja liinide rek)					
Kokku					4882

Variant 4. Alalisvooluühendus Harku alajaama ja Rootsi

Merekaabel x 2	Ka-Harku	150 kV	15 km	12 Mkr/km	360
Maakaabel x 2	Ka-Harku	150 kV	135 km	6 Mkr/km	1620
Merekaabel x 2	Ka-Rootsi	150 kV	240 km	12 Mkr/km	5760
Maakaabel x 2	Rootsis	150 kV	10 km	6 Mkr/km	120
Konverter		1148 MW	6 tk	1180 Mkr/tk	7080
Liitumistasu Eestis					502
Liitumistasu Rootsis					500
Kokku					15942

Variant 5. Alalisvooluühendus Harku alajaama merd mööda (töös mitte vaadeldud)

Merekaabel x 2	Ka - Harku	150 kV 130 km	12 Mkr/km	3120
Maakaabel x 2	Ka - Harku	150 kV 10 km	6 Mkr/km	120
Konverterjaam		574 MW 4 tk	600 Mkr/tk	2400
Liitumistasu				502
(Harku, Veskimetsa, Järve Alajaamade ja liinide rek)				
Kokku				6142

Erinevate variantide kokkuvõtlik võrdlustabel

Vahelduvvooluühendus Harku ja Sindi (Lihula) alajaamadega, variant 1	4304
Alalisvooluühendus Harku alajaama, variant 3	4882
Alalisvooluühendus Harku alajaama meres (töös mitte vaadeldud), variant 5	6142
Alalisvooluühendus Harku alajaama ja Rootsi, variant 4	15942
Vahelduvvooluühendus Harku ja Ventspils alajaamadega, variant 2	15943

Kokkuvõttes tuli odavaimaks variant 1 ühendustega vahelduvvoolul,. Variantide võrdlus kinnitas teadaolevat tõsiasja, et kõige odavam on kasutada õhuline, siis maakaableid ja siis merekaableid.

Järgnevalt on püütud hinnata ligikaudselt kogu projekti maksumust.

Elektrivõrk

Sektsioonide 1,2,3,4 sisene merekaabel	33 kV, 310 km	10 Mkr/km	3100
Alajaamad mereplatvormidel: 33/110 kV, kokku 680MVA	4 tk		850
Edastussüsteem maismaale:			
Sekts-Kana	merekaabel 110 kV 63 km	18 Mkr/km	1134
	maakaabel 110 kV 63 km	9 Mkr/km	567
Kokku			1701
Kanapeeksi alajaam:	110/330 kV 2*500 MVA		350
Liitumine ülekandevõrguga (odavaim variant) 330 kV, vahelduvvool			4300
Kokku elektrivõrk			10300

Kogu projekti maksumus:

Tuulikud	1000 MW	35 Mkr/MW	35000
Elektrivõrk	1000 MVA		10300
Elektrijaam (bilansi tagamiseks)	1000 MW	10 Mkr/MW	10000
Kokku			55300

Elektrituulikute rajamise kogumaksumus on hinnanguliselt 55 miljardit krooni (3,7 miljardit €), mis on umbes pool Eesti riigi ühe aasta eelarvest. Elektrivõrgu osa on 18% ja tuulikute osa 64%.

KIRJANDUS

1. Green J., Bowen A., Fingersh L.J., Wan Y. Electrical Collection and Transmission Systems for Offshore Wind Power. Preprint. To be presented at the 2007 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, April 30 – May 3, 2007, 10 pp.
2. Guided Tour on Wind Energy <http://www.windpower.org/en/tour.htm>
3. Hendriks R. L., den Boon J. H., Paap G. C., Kling W. L. Connecting Offshore Wind Farms to (VSC-)HVDC Interconnectors. Nordic Wind Power Conference, 22-23 May, 2006, Espoo, Finland.
4. HVDC Light® Cables. Submarine and land power cables. ABB's high voltage cable unit in Sweden, 2006, 8 pp. www.abb.com/cables
5. Lazaridis, L. P. Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reliability. Master's Thesis. Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Stockholm 2005, 182 pp.
6. Sally D. Wright, Anthony L. Rogers, James F. Manwell, Anthony Ellis. Transmission Options for Offshore Wind Farms in the United States. AWEA 2002, 12 pp.
7. REpower 5M. <http://www.repower.de/index.php?id=237&L=1>
8. Submarine cables for inter-turbine connections. ABB Power Technologies AB, High Voltage Cables, 2004, 2 pp. www.abb.com/cables
9. Wright, S.D., Rogers, A. L., Manwell, J. F., Ellis, A. Transmission Options for Offshore Wind Farms in the United States. AWEA 2002, 12 pp.
10. XLPE Cable Systems. User's guide. ABB's high voltage cable unit in Sweden. 2008, 32 pp. www.abb.com/cables
11. XLPE Submarine Cable Systems. Attachment to XLPE Cable Systems - User's guide. ABB's high voltage cable unit in Sweden, 2008, 5 pp. www.abb.com/cables

Tabel L1. Sektsioonisestest kaablite arvutus. Sektsioon 1

Fiider	Kaabli lõik	Võimsus, MW	Ristlõige, mm ²	Kaabli I _N , A	Kaabli S _N , MVA	Erikaod kaabli täiskoormusel ΔP W/faas m	Kaabli lõigu pikkus, m	Kaod tuulikutel täiskoormusel, MW	Võimsus lõigu lõpul, MW	Mahtuvuslik laadimisvool, A/faas km	Mahtuvus, μF/km	Mahtuvuslik kogulaadimisvool I _C , A	Kogu- mahtuvus, μF
	1 - 4	5,00	185	480	27,4	32,5	2000	0,01	4,99	1,1	0,20	6,60	0,40
	2 - 3	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	3 - 4	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	4 - J	19,98	185	480	27,4	32,5	8400	0,44	19,54	1,1	0,20	27,72	1,68
I	1,2-J	20,00	185	480	27,4	32,5	12600	0,46	19,54			41,58	2,52
	5 - 6	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	6 - 7	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	7 - 8	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	8 - 9	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	9 - 10	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	10 - 11	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	11 - J	34,72	300	611	34,9	34,9	5000	0,52	34,20	1,3	0,25	19,50	1,25
II	5-J	35,00	185, 300	480, 611	27,4; 34,9		11600	0,80	34,20	8,1		41,94	2,63
	12 - 13	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	13 - 14	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	14 - 15	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	15 - 16	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	16 - 17	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	17 - 18	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	18 - 19	34,72	300	611	34,9	34,9	1100	0,11	34,61	1,3	0,25	4,29	0,28
	19 - 20	39,61	630	830	47,4	39,2	1100	0,09	39,52	1,8	0,33	5,94	0,36
	20 - J	44,52	630	830	47,4	39,2	2500	0,26	44,26	1,8	0,33	13,50	0,83
III	12 - J	45,00					11300	0,74	44,26			46,17	2,84
	21 - 22	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	22 - 23	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	23 - 24	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	24 - 25	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22

	25 - 26	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	26 - 27	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	27 - 28	34,72	300	611	34,9	34,9	1100	0,11	34,61	1,3	0,25	4,29	0,28
	28 - 29	39,61	630	830	47,4	39,2	1100	0,09	39,52	1,8	0,33	5,94	0,36
	29 - J	44,52	630	830	47,4	39,2	1800	0,19	44,33	1,8	0,33	9,72	0,59
IV	21 - J	45,00					10600	0,67	44,33			42,39	2,61
	30 - 31	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	31 - 32	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	32 - 33	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	33 - 34	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	34 - 35	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	35 - 36	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	36 - 37	34,72	300	611	34,9	34,9	1100	0,11	34,61	1,3	0,25	4,29	0,28
	37 - 38	39,61	630	830	47,4	39,2	1100	0,09	39,52	1,8	0,33	5,94	0,36
	38 - J	44,52	630	830	47,4	39,2	1000	0,10	44,41	1,8	0,33	5,40	0,33
V	30 - J	45,00					9800	0,59	44,41			38,07	2,34
	39 - 40	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	40 - 41	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	41 - 42	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	42 - 43	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	43 - 44	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	44 - 45	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	45 - 46	34,72	300	611	34,9	34,9	1100	0,11	34,61	1,3	0,25	4,29	0,28
	46 - J	39,61	400	681	38,9	36,3	500	0,06	39,55	1,5	0,27	2,25	0,14
VI	39 - J	40,00					8200	0,45	39,55			28,98	1,79
	47 - 48	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	48 - 49	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	49 - 50	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	50 - 51	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	51 - 52	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	52 - 53	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	53 - J	34,72	300	611	34,9	34,9	2000	0,21	34,51	1,3	0,25	7,80	0,50

VII	47 - J	35,00					8600	0,49	34,51			30,24	1,88
	54 - 55	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	55 - 56	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	56 - 57	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	57 - 58	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	58 - 59	24,89	185	480	27,4	32,5	1100	0,09	24,80	1,1	0,20	3,63	0,22
	59 - 60	29,80	300	611	34,9	34,9	1100	0,08	29,72	1,3	0,25	4,29	0,28
	60 - J	34,72	300	611	34,9	34,9	2000	0,21	34,51	1,3	0,25	7,80	0,50
VIII	54 - J	35,00					8600	0,49	34,51			30,24	1,88
	61 - 62	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	62 - 63	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	63 - 64	14,98	185	480	27,4	32,5	1100	0,03	14,95	1,1	0,20	3,63	0,22
	64 - 65	19,95	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,89	1,1	0,20	3,63	0,22
	65 - J	24,89	185	480	27,4	32,5	3000	0,24	24,65	1,1	0,20	9,90	0,60
IX	61 - J	25,00					7400	0,35	24,65			24,42	1,48
	69 - 68	5,00	185	480	27,4	32,5	2000	0,01	4,99	1,1	0,20	6,60	0,40
	66 - 67	5,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,00	5,00	1,1	0,20	3,63	0,22
	67 - 68	10,00	185	480	27,4	32,5	1100	0,01	9,98	1,1	0,20	3,63	0,22
	68 - J	19,98	185	480	27,4	32,5	6000	0,31	19,66	1,1	0,20	19,80	1,20
X	68, 69 - J	20,00	185	480	27,4	32,5	10200	0,34	19,82			33,66	2,04
		345,00			Kokku kaod	ja väljuv võimsus	(täisvõimsusel)	5,36	339,80			357,69	21,99

Tabel L2. Sektsioonisestest kaablite arvutus. Sektsioon 2

Fiider	Kaabli lõik	Võimsus, MW	Ristlõige, mm ²	Kaabli I _N , A	Kaabli S _N , MVA	Erikaod kaabli täiskoormusel ΔP W/faas m	Kaabli lõigu pikkus, m	Kaod tuulikute täiskoormusel, MW	Võimsus lõigu lõpul, MW	Mahtuvuslik laadimisvool, A/faas km	Mahtuvus, μF/km	Mahtuvuslik kogulaadimisvool I _C , A	Kogu-mahtuvus, μF
	1 - 2	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	2 - 3	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	3 - 4	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	4 - 5	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	5 - 6	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	6 - 7	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	7 - 8	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	8 - J	39,70	400	681	38,9	36,3	1200	0,14	39,57	1,5	0,27	5,40	0,32
I	1 - J	40,00					7010	0,43	39,57			25,57	1,57
	9 - 10	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	10 - 11	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	11 - 12	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	12 - 13	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	13 - 14	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	14 - 15	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	15 - 16	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	16 - J	39,70	400	681	38,9	36,3	500	0,06	39,65	1,5	0,27	2,25	0,14
II	1 - J	40,00					6310	0,35	39,65			22,42	1,38
	17 - 18	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	18 - 19	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	19 - 20	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	20 - 21	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	21 - 22	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	22 - 23	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	23 - J	34,79	300	611	34,9	34,9	1200	0,12	34,66	1,3	0,25	4,68	0,30
III	1 - J	35,00					6180	0,34	34,66			21,61	1,34

		115,00			Kokku kaod	ja väljuv võimsus	(täisvõimsusel)	1,12	113,88			69,60	4,29
--	--	--------	--	--	------------	-------------------	-----------------	------	--------	--	--	-------	------

Tabel L3. Sektsioonisiseste kaablite arvutus. Sektsioon 3

Fiider	Kaabli lõik	Võimsus, MW	Ristlõige, mm ²	Kaabli I _N , A	Kaabli S _N , MVA	Erikaod kaabli täiskoormusel ΔP W/faas m	Kaabli lõigu pikkus, m	Kaod tuulikute täiskoormusel, MW	Võimsus lõigu lõpul, MW	Mahtuvuslik laadimisvool, A/faas km	Mahtuvus, μF/km	Mahtuvuslik kogulaadimisvool I _C , A	Kogu- mahtuvus, μF
	1 - 2	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	2 - 3	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	3 - 4	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	4 - 5	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	5 - J	24,92	185	480	27,4	32,5	500	0,04	24,88	1,1	0,20	1,65	0,10
I	1 - J	25,00					3820	0,12	24,88			12,61	0,76
	6 - 7	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	7 - 8	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	8 - 9	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	9 - J	19,96	185	480	27,4	32,5	500	0,03	19,94	1,1	0,20	1,65	0,10
II	6 - J	20,00					2990	0,06	19,94			9,87	0,60
		45,00			KOKKU KAOD	JA VÄLJUV VÕIMSUS	(Täisvõimsusel)	0,18	44,82			22,47	1,36
S2-S3		44,82	2 X 630	1660	94,8	78,4	10000	0,53	44,29	3,6	0,33	108,00	3,30
		45,00			Kokku kaod	ja väljuv võimsus	(täisvõimsusel)	0,71	44,29			130,47	4,66

Tabel L4. Sektsioonisestest kaablite arvutus. Sektsioon 4

Füider	Kaabli lõik	Võimsus, MW	Ristlõige, mm ²	Kaabli I _N , A	Kaabli S _N , MVA	Erikaad kaabli täiskoormusel ΔP W/faas m	Kaabli lõigu pikkus, m	Kaod tuulikutel täiskoormusel, MW	Võimsus lõigu lõpul, MW	Mahtuvuslik laadimisvool, A/faas km	Mahtuvus, μF/km	Mahtuvuslik kogulaadimisvool I _C , A	Kogu- mahtuvus, μF
	1 - 2	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	2 - 3	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	3 - 4	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	4 - 5	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	5 - 6	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	6 - 7	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	7 - 8	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	8 - J	39,70	300	611	34,9	34,9	5600	0,76	38,94	1,3	0,25	21,84	1,40
I	1-J	40,00	185, 300	480, 611	27,4; 34,9		11410	1,06	38,94			42,01	2,65
	9 - 10	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	10 - 11	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	11 - 12	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	12 - 13	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	13 - 14	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	14 - 15	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	15 - 16	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	16 - J	39,70	630	830	47,4	39,2	4500	0,37	39,33	1,8	0,33	24,30	1,49
II	9 - J	40,00					10310	0,67	39,33			44,47	2,73
	17 - 18	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	18 - 19	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	19 - 20	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	20 - 21	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	21 - 22	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	22 - 23	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	23 - 24	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	24 - 25	39,70	630	830	47,4	39,2	830	0,07	39,63	1,8	0,33	4,48	0,27
	25 - J	44,63	630	830	47,4	39,2	2000	0,21	44,43	1,8	0,33	10,80	0,66

	26 - 27	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	27 - J	10,00	185	480	27,4	32,5	500	0,01	9,99	1,1	0,20	1,65	0,10
III	17 - J	55,00					9970	0,58	54,42			39,84	2,44
	28 - 29	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	29 - 30	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	30 - 31	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	31 - 32	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	32 - 33	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	33 - 34	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	34 - 35	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	35 - 36	39,70	630	830	47,4	39,2	830	0,07	39,63	1,8	0,33	4,48	0,27
	36 - J	44,63	630	830	47,4	39,2	1200	0,13	44,51	1,8	0,33	6,48	0,40
IV	28 - J	45,00					7840	0,49	44,51			31,13	1,91
	37 - 38	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	38 - 39	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	39 - 40	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	40 - J	19,96	185	480	27,4	32,5	1100	0,06	19,91	1,1	0,20	3,63	0,22
V	39 - J	20,00					3590	0,09	19,91			11,847	0,72
		200,00			Kokku kaod	ja väljuv võimsus	(täisvõimsusel)	2,89	197,11			169,30	10,45

Tabel L5. Sektsioonisestest kaablite arvutus. Sektsioon 5.

Fiider	Kaabli lõik	Võimsus, MW	Ristlõige, mm ²	Kaabli I _N , A	Kaabli S _N , MVA	Erikaod kaabli täiskoormusel ΔP W/faas m	Kaabli lõigu pikkus, m	Kaod tuulikute täiskoormusel, MW	Võimsus lõigu lõpul, MW	Mahtuvuslik laadimisvool, A/faas km	Mahtuvus, μF/km	Mahtuvuslik kogulaadimis- vool I _C , A	Kogu- mahtuvus, μF
	1 - 2	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	2 - 3	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	3 - 4	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	4 - 5	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	5 - 6	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	6 - 7	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	7 - J	34,79	300	611	34,9	34,9	6600	0,69	34,10	1,3	0,25	25,74	1,65
I	1-J	35,00					3320	0,90	34,10			42,67	2,69
	8 - 9	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	9 - 10	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	10 - 11	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	11 - 12	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	12 - 13	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	13 - 14	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	14 - 15	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	15 - 16	39,70	630	830	47,4	39,2	830	0,07	39,63	1,8	0,33	4,48	0,27
	16 - 17	44,63	630	830	47,4	39,2	830	0,09	44,55	1,8	0,33	4,48	0,27
	17 - J	49,55	800	896	51,2	39,2	4000	0,44	49,11	2,0	0,36	24,00	1,44
	18 - J	5,00	185	480	27,4	32,5	3500	0,01	4,99	1,1	0,20	11,55	0,70
II	8-J	55,00					14970	0,90	54,10			64,68	3,93
	19 - 20	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	20 - 21	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	21 - 22	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	22 - 23	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	23 - 24	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	24 - 25	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	25 - 26	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21

	26 - 27	39,70	630	830	47,4	39,2	830	0,07	39,63	1,8	0,33	4,48	0,27
	27 - 28	44,63	630	830	47,4	39,2	830	0,09	44,55	1,8	0,33	4,48	0,27
	28 - J	49,55	800	896	51,2	39,2	2000	0,22	49,33	2,0	0,36	12,00	0,72
III	19 - J	50,00					9470	0,67	49,33			41,13	2,51
	29 - 30	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	30 - J	10,00	185	480	27,4	32,5	1200	0,02	9,98	1,1	0,20	3,96	0,24
IIIa		10,00					2030	0,02	9,98			6,70	0,41
	31 - 32	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	32 - 33	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	33 - 34	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	34 - 35	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	35 - 36	24,92	300	611	34,9	34,9	830	0,04	24,88	1,3	0,25	3,24	0,21
	36 - 37	29,88	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,81	1,3	0,25	3,24	0,21
	37 - 38	34,81	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,72	1,3	0,25	3,24	0,21
	38 - 39	39,72	630	830	47,4	39,2	830	0,07	39,66	1,8	0,33	4,48	0,27
	39 - 40	44,66	630	830	47,4	39,2	830	0,09	44,57	1,8	0,33	4,48	0,27
	40 - J	49,57	800	896	51,2	39,2	500	0,06	49,51	2,0	0,36	3,00	0,18
IV	30 - J	50,00					7970	0,49	49,51			32,63	2,01
	41 - 42	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	42 - 43	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	43 - 44	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	44 - 45	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17
	45 - 46	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	46 - 47	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	47 - 48	34,79	300	611	34,9	34,9	830	0,09	34,70	1,3	0,25	3,24	0,21
	48 - J	39,70	630	830	47,4	39,2	2000	0,17	39,54	1,8	0,33	10,80	0,66
V	41 - J	40,00					7810	0,46	39,54			30,97	1,91
	49 - 50	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	50 - 51	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	51 - 52	14,99	185	480	27,4	32,5	830	0,02	14,96	1,1	0,20	2,74	0,17
	52 - 53	19,96	185	480	27,4	32,5	830	0,04	19,92	1,1	0,20	2,74	0,17

	53 - 54	24,92	185	480	27,4	32,5	830	0,07	24,85	1,1	0,20	2,74	0,17
	54 - 55	29,85	300	611	34,9	34,9	830	0,06	29,79	1,3	0,25	3,24	0,21
	55 - J	34,79	300	611	34,9	34,9	2400	0,25	34,54	1,3	0,25	9,36	0,60
VI	49 - J	35,00					7380	0,46	34,54			26,29	1,64
	59 - 58	5,00	185	480	27,4	32,5	1200	0,00	5,00	1,1	0,20	3,96	0,24
	56 - 57	5,00	185	480	27,4	32,5	830	0,00	5,00	1,1	0,20	2,74	0,17
	57 - 58	10,00	185	480	27,4	32,5	830	0,01	9,99	1,1	0,20	2,74	0,17
	58 - J	19,98	185	480	27,4	32,5	4000	0,21	19,78	1,1	0,20	13,20	0,80
X	58, 59 - J	20,00	185	480	27,4	32,5	6860	0,22	19,82			22,64	1,37
		295,00			Kokku kaod	ja väljuv võimsus	(täisvõimsusel)	4,13	290,87			267,72	16,47