Jussi Keskikuru

Energian kerääminen kapasitiivisesti keski- ja suurjännitelinjasta

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Automaatio ja tietotekniikka
Diplomityö

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Jussi Keskikuru
Tutkielman nimi: Energian kerääminen kapasitiivisesti keski- ja suurjännitelinjasta
Tutkinto: Diplomi-insinööri
Oppiaine: Automaatio ja tietotekniikka
Työn ohjaaja: Pekka Ruuskanen
Työn valvoja: Timo Mantere
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 77

TIIVISTELMÄ:
IoT-laitteilla voidaan mitata monia asioita lämpötilasta ilmanpaineeseen. Yleisin energianlähde näille laitteille on paristo. Mutta kun paristo tyhjenee, se täytyisi vaihtaa ja siitä syntyy kustannuksia muun muassa työnä ja uusina paristoina. Mikäli laitteita on todella paljon, paristojen vaihtoa voidaan joutua tekemään jatkuvasti. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on kerätä energia laitteelle paikan päältä ilman paristoa.

Tässä työssä on tutkittu energiankeräämistä suurjännitelinjoista IoT-laitteelle. Menetelmänä käytetään potentiaalieroa suurjännitelinjan ja maapotentiaalin välillä. Tutkimus tehtiin kahdella menetelmällä, jossa energiakeräin oli matalassa potentiaalissa ja korkeassa potentiaalissa. Korkeassa potentiaalissa energiakeräin kiinnitetään suoraan voimalinjaan kiinni, jossa sähkökenttä on voimakkaimmillaan. Matalassa potentiaalissa keräin on kiinni maapotentiaalissa ja mahdollisimman lähellä sähkökenttää. Sähkölinjoja on Suomessa erikokoisia ja tässä on enimmäkseen testattu 20 kV ja 110 kV siirtolinjojen sähkökenttiin. Muutamia kokeita tehtiin myös matalassa potentiaalissa 400 kV linjan alla.

Kapasitiivisesta energiakeräimestä tehtiin kolme prototyyppiä, joilla suoritettiin mittauksia. Ensimmäisellä testattiin vain ylipäätään mahdollisuus toimia laboratorio-olosuhteissa. Toisella haluttiinkin sitten jo optimoida keräystehoa ja varastoida energiaa. Viimeinen prototyppi yhdisti energiakeräimen energianhallinnan kanssa ja tarkoitus oli sähköistää RuuviTag IoT-laite.

Energiakeräin ja energianhallinta pystyivät keräämään tarpeeksi energiaa IoT-laitteelle 20 kV ja 110 kV jännitteillä laboratorioympäristössä. Keräin laitettiin sekä korkeaan että matalaan potentiaaliin. Maadoitettujen seinien läheisyyden takia 400 kV jännitettä ei kokeiltu mutta simulaatioiden ja oletusten perusteella energiankeräysteho voidaan olettaa olevan suuri.

Lopuksi energiakeräimelle tehtiin kenttäkoe yhdessä Vaasan Sähköverkon kanssa Gerbyn sähköasemalla. Kapasitiivinen energiakeräin asetettiin maadoitettuun tolppaan noin kahden metrin päähän 110 kV jännitejohtimesta. IoT-laitteen lähettämät tiedostot kerättiin Raspberry Pi pienoistietokoneella. Koejakson jälkeen todettiin kapasitiivisen energiakeräimen toimivan kentällä. Puutteita oli eniten vastaanottimessa mutta niistäkin huolimatta voidaan todeta keräimen toimivan.

AVAINSANAT: energian kerääminen, energia, energialähteet, energianhallinta, energiansiirto

Sisällys

1 Johdanto 9

2 Sähkömagnetismi 11

2.1 Sähkökenttä 12

2.2 Magneettikenttä 13

2.3 Sähkökenttä korkeajännitelinjan ympäristössä 14

2.4 Kapasitanssi 17

2.5 Sähkönsiirto 20

2.5.1 Vaihtovirta sähkönsiirtoverkossa 20

2.5.2 Suurjänniteverkko 21

3 Energian kerääminen suurjännitejohdoista 23

4 Tehtävän asettelu 32

4.1 Tiedonsiirto menetelmät 32

4.2 IoT-laite RuuviTag 33

4.3 Vastaanotin 36

5 Kapasitiivinen energiakeräin 37

5.1 Prototyyppi n. 1 38

5.1.1 Piirilevyn suunnittelu ja valmistus 39

5.1.2 Piirilevyn kalustaminen 40

5.1.3 Laboratoriotestit 42

5.1.4 Kenttätesti 45

5.2 Prototyyppi n. 2 45

5.2.1 Piirilevyn kalustaminen 46

5.2.2 Energianhallintapiiri 49

5.2.3 Laboratoriotestit 50

5.2.4 Kenttätestit 53

5.3 Kapasitiivinen yhdistelmäenergiakeräin – Energiakeräin ja -hallinta samalla piirilevyllä 54

5.3.1 Piirilevyn suunnittelu 54

5.3.2 Laboratoriotestit 57
5.3.3 Kenttätesti Vaasan Sähköverkon sähköasemalla 60
6 Simulointi 62
6.1 Tietokonesimulointi 62
6.1.1 Komparaattorin toiminnan mallintaminen 63
6.1.2 Energiakeräimen ulostulojännite 20 kV siirtolinjassa 66
6.1.3 Energiakeräimen ulostulojännite 33 kV siirtolinjassa 67
6.1.4 Energiakeräimen ulostulojännite 100 kV siirtolinjassa 68
6.1.5 Energiakeräimen ulostulojännite 110 kV siirtolinjassa 69
6.1.6 Energiakeräimen ulostulojännite 400 kV siirtolinjassa 70
6.1.7 Yhteenveto simuloinneista 71
6.2 Kokeelliset tutkimukset 72
7 Yhteenveto 73
Lähteet 75

Kuvat

Kuva 1. Sähkökenttä ja magneettikenttä samassa kuvassa. Sähkökenttä punaisella ja magneettikenttä sinisellä (R. Nave, 2025). 11

Kuva 2. Pistevarausten muodostamat sähkökentät, kun niihin ei vaikuta muita voimia (ScienceFacts.net, 2025). 12

Kuva 3. Sähkökentän muodostuminen kahden pistevarauksen välille (Ylinen, 2025). 13

Kuva 4. Johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä (Faizan, 2018). 14

Kuva 5. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 metrin korkeudella maasta etäisyyden funktiona 110 kV johtimen keskilinjasta (Puranen, 2017). 16

Kuva 6. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 metrin korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV kaksoisjohdon keskilinjasta (Puranen, 2017). 17

Kuva 7. Kahden levyn välillä vaikuttava sähkökenttä. E on sähkökentän voimakkuus, V on levyjen välinen jännite ja d on levyjen välinen etäisyys. 18

Kuva 8. Kapasitanssin muodostuminen kahden levyn välille. a) Kahden kondensaattorilevyn asettelu. b) Levyjen välillä vaikuttava sähkökenttä (Young & Freedman, 2020). 19

Kuva 9. Erilaisia kapasitiivisia energiankeräysmenetelmiä. a) suora kontakti. b) matala potentiaali. c) korkea potentiaali (Yang ja muut, 2020). 23

Kuva 10. Morgen ja muiden (2015) kapasitiivisesta energiakeräimestä, joka asetetaan kiinni jännitelinjaan. 24

Kuva 11. Zhao ja muiden (2012) kehittämä korkeajännitelinjaan kiinnitettävä energiakeräin. 25

Kuva 12. Kang ja muiden (2017) toteuttama kapasitiivinen energiakeräin, joka on sijoitettu jännitelinjan alle. 26

Kuva 13. Li ja muiden (2019) kapasitiivisen energiakeräimen koejärjestely. a) Kokeen periaatekuva. b) todellinen energiakeräin. 27

Kuva 14. Kang ja muiden (2017) toteuttaman kapasitiivisen energiakeräimen koejärjestelyt. 28

Kuva 15. Gupta ja muiden (2010) toteuttama induktiivinen energiakeräin. a) koejärjestelyt. b) kuva todellisesta koejärjestelystä. 29
Kuva 16. Najafin ja muiden (2018) tekemän induktiivisen energiakeräin. a) periaatekuva b) todellinen koejärjestely. 30
Kuva 17. RuuviTag IoT-laite. Mittaa lämpötilaa, ilmankosteuden ja -paineen sekä liikkeen. Normaalisti paristokäyttöinen. Numero viisi on itse tehty tunniste. 34
Kuva 18. RuuviTagin käyttöjännite on keskimäärin 3,1 V. 35
Kuva 19. RuuviTagin virrankulutus. Lähetyksen aikana virtapiikki on 3,27 mA. Keskimääräinen virrankulutus 6 s aikana on 3,3 µA. 35
Kuva 20. Raspberry Pi 3 Model B -pienoistietokone. 36
Kuva 21. Periaatekuva kapasitiivisen energiakeräimen toimintaketjusta. 37
Kuva 22. Kapasitiivisen energiakeräimen periaatekuva korkeassa potentiaalissa. 38
Kuva 23. Piirikaavio kapasitiiviselle energiakeräimelle (Vähämäki ja muut, 2003). 39
Kuva 24. Ensimmäinen kapasitiivinen energiakeräin prototyyppi kalustettuna. a) pintaliitoskomponentit. b) läpiladottavat komponentit, mittapisteet ja johdin elektrodilta. 40
Kuva 25. Komparaattorin lähettämä 6,5 V pulssisignaali, joka kestää 13,8 µs. 40
Kuva 26. Pulssisignaalien väli, joka on 15,99 ms. 41
Kuva 27. Mittausjärjestely. Kapasitiivinen energiakeräin on kytketty suoraan jännitelinjaan Jacobin tikkaiden kautta. Keräin on eristetty yksipuolisen FR4 levyn päälle ja on vain kapasitiivisesti yhteydessä maahan. Kytkentä on korkea potentiaalissa. 43
Kuva 28. Mittaustulokset. a) Ulostuloon kytketyn säätövastuksen yli mitattu jännite. b) Jännite sähkölinjassa, johon kapasitiivinen energiakeräin on kiinnitetty. 44
Kuva 29 Testijärjestely keräimelle. Keräin on johtimen ympärillä, johon syötetään 10 kV. Säätövastuksessa on 5 kΩ. Keräimen tuottama jännite saadaan jännitemittarilla, jonka lukema on 0,0745V. 45
Kuva 30 Prototyyppi 2 piirilevy kalustettuna pintaliitoskomponenteilla. 46
Kuva 31. Komparaattorin ohjaussignaalin kesto ja jännite. 47
Kuva 32. Komparaattorin ohjaussignaalien esiintymisväli. 48
Kuva 33. Texas Instrumentin BQ25570EVM koekytkentälevy. 50

Kuva 34. Superkondensaattorin latautuminen korkeassa potentiaalissa 20 kV linjassa ajan funktiona. 51
Kuva 35. Superkondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 20 kV linjan alla ajan funktiona. 52
Kuva 36. Kapasitiivinen energiakeräin matalassa potentiaalissa 120 cm 63,5 kV jännitelinjan alla. 53
Kuva 37 Yhdistelmä energiakeräin komponentti puolelta. (Ylhäällä: itse tehty; Vasen: komponenteilla; Oikea: kalustamatta) 55
Kuva 38 Yhdistelmä energiakeräin säädin ja liitin puolelta. (Ylhäällä: itse tehty; Vasen: kalustettu; Oikea: kalustamatta) 55
Kuva 39. Yhdistelmäenergiakeräimen toteutus testeissä. a) Yhdistelmäenergiakeräin kotelossa häiriösuojattuna ja kytkettynä RuuviTagiin. b) Alumiinikerros kannen sisäpinnalla. 57
Kuva 40. Latautuminen korkeajännitepotentiaalissa 20 kV jännitelinjassa. 58
Kuva 41. Kondensaattorin latautumien matalassa potentiaalissa 20 kV linjan alla 120 cm etäisyydellä linjasta. 59
Kuva 42. Kondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 63,5 kV linjan alla 120 cm. 60
Kuva 43. Raspberry Pi 3-pienoistietokoneen keräämä ja tallentama data RuuviTagin lähetyksistä. Harmaaviiva (1) on lämpötila (℃), ruskeaviiva (2) on ilmanpaine (hPa), sininen viiva (3) on Ruuvitagin käyttöjännite (mV), ja keltainen viiva (4) on ilmankosteus (%). X-akseli on mittauspisteen numero. 61
Kuva 44. Komparaattorin toiminnan simulointipiirikaavio. Jännitelähde on kytketty komparaattorin käyttöjännitteeseen, jännite on 5 V. 63
Kuva 45. Komparaattorin ulostulosignaali. 64
Kuva 46. Komparaattorien ulostulo signaalien väli on 9,8 ms. 65
Kuva 47. Komparaattorin signaalin pituus ja korkeus. pituus 5,47 µs ja korkeus on 4,9 V. 66
Kuva 48. Kapasitiivinen energiakeräimen simuloinnissa käytetty piiri ja arvot 20 kV:n linjassa. 67

Kuva 49. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 33 kV jännitteellä. Teho on noin 10,2 µW. 68
Kuva 50. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 100 kV jännitteellä. Teho on noin 8 µW. 69
Kuva 51. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 110 kV jännitteellä. Simulointi kesti vain 280 ms. Teho on noin 13,2 µW. 70
Kuva 52. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 400 kV jännitteellä. Simulointi kesti vain 150 ms. Teho on noin 11,0 µW. 71

Taulukot

Taulukko 1. Tulokset eri energiakeräinten tehoista. 31
Taulukko 2. Eri tiedonsiirtomenetelmien energiankulutus (Kazeem ja muut, 2017; Mahmoud & Mohamad, 2016)..... 33
Taulukko 3. Vertailu komparaattorien toiminnasta. 48
Taulukko 4. Simuloinneista saadut tulokset ja simuloinnin kesto. 72

Symbolit

λ	Aallonpituus
û	Vaihejännite
A	Ampeeri
I	Virta
P	Teho
U	Jännite
V	Voltti
W	Watti

Lyhenteet

AC	Alternating Current
FET	Field-Effect transistor
IoT	Internet of Things
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect transistor
PMIC	Power Management Integrated Circuit
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

1 Johdanto

Sähköverkko siirtää sähköenergiaa tuotantolaitoksista kuluttajille. Sähkömarkkinalain (588/2013) 51 §:ssä on säädetty enimmäiskestot jakeluverkon sähkökatkoksille. Asemakaava-alueella sähkökatkos ei saa ylittää kuutta tuntia, ja asemakaava-alueiden ulkopuolella keskeytyksen enimmäiskesto on 36 tuntia. Kantaverkkoa Suomessa ylläpitää Fingrid Oyj ja kantaverkon alhaalla olo voi vaikuttaa paikallisyhtiöihin hyvin paljon. Sähköverkon tilaa valvotaan jatkuvasti ja nykyään paikallisverkot pyrkivät lisäämään omaa valvontaansa. Ongelma suurjännitelinjoissa on laitteiden huolto esimerkiksi paristojen vaihto, koska työympäristö on vaarallinen. Johdinten jatkuva valvominen kiinnostaa silti siirtoyhtiöitä. Yksi vaihtoehto olisi kerätä energia antureille suoraan siirtolinjasta.

Suurjänniteverkko on otollinen kohde automaattisille IoT-laitteille, jotka keräävät oman energiansa. Suurjänniteverkossa korkeajännite muodostaa sähkökentän ja virran kulku muodostaa magneettikentän johtimen ympärille. Näitä kahta kenttää voidaan käyttää energian keräämisessä. Verkkoa ylläpitävät tahot haluavat tietää sähkölinjojen toiminnasta erilaisia tietoja, joita ei voida mitata sähköasemilla. Tällä hetkellä mittalaitteet sijaitsevat sähköasemilla ja ne eivät voi suoraan mitata johtimien kuntoa. Johtimia ja verkkoa aktiivisesti tarkkailemalla voidaan ennakoida huoltotoimenpiteitä mm. lumen ja jään kertymistä linjan päälle tai puun kaatumisen.

Tutkimuksia energiakeräimistä, jotka keräävät tarvitsemansa energian jännitelinjoista on tehty ja tuloksia on saatavilla. Niistä huomataan, että saatavilla olevan energian määrään vaikuttaa jännitteen suuruus ja energiakeräimen etäisyys johtimesta. Kaupallisia laitteita sähköverkkojen kunnon valvontaan on olemassa, mutta ne toimivat paristolla. Muutamia laitteita löytyy, jotka keräävät osan energiastaan induktiivisesti magneettikentästä. Tämä tosin vaatii, että linjassa kulkee virta.

Tässä työssä tutkittiin Vaasan yliopistossa E4IoT-projektissa kehitettyä kapasitiivista energiakeräintä, joka kerää itse tarvitsemansa energian voimakkaasta sähkökentästä. Rahoittajina projektissa olivat Pohjanmaan liitto, Vaasan yliopisto ja suomalaisia

teollisuusyrityksiä. Työn tuloksia voidaan hyödyntää muun muassa jatkotutkimuksissa. Tuloksista hyötyvät myös esimerkiksi energiakeräinten ja jännitelinjojen kunnonvalvonnan parissa työskentelevät tutkijat ja alan asiantuntijat. Työ tarjoaa pohjatietoa energiankeräämisen mahdollisuuksista kunnonvalvonnan tarpeisiin.

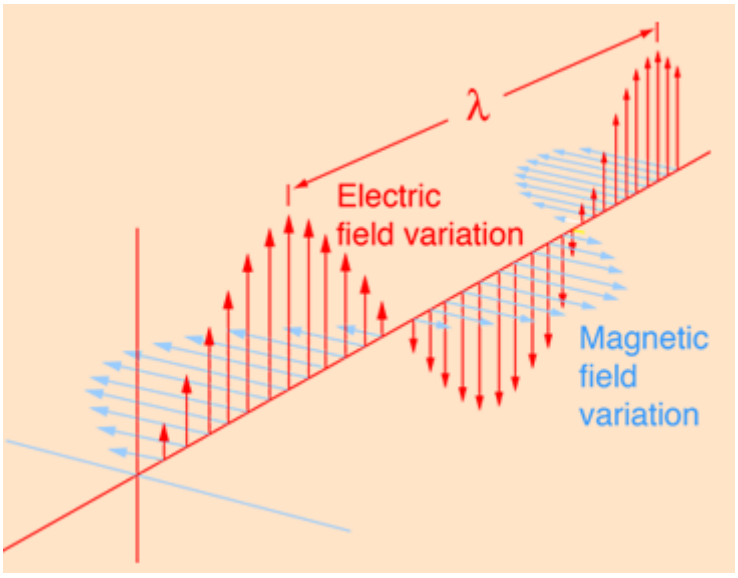
Energiakeräimellä kerätty energia varastoidaan superkondensaattoriin tai pieneen litium akkuun. Varastoitu energia käytetään IoT-laitteella, joka mittaa lämpötilaa, ilmankosteutta ja ilmanpainetta. Tiedot lähetetään langattomasti vastaanottimelle. Keräin voidaan asettaa sekä 20 kV että 110 kV linjaan ja sitä voidaan käyttää korkeassa potentiaalissa eli kiinnittää korkeajännitelinjaan. Keräintä voidaan käyttää myös matalassa potentiaalissa irti johtimesta. Testit suoritettiin laboratorio-olosuhteissa ja kenttätesteissä oikean jännitelinjan läheisyydessä.

Aluksi kappaleessa 2 tutustutaan teoriaan ja ilmiöihin, joita energiakeräimen toimintaan, tarvitsee ymmärtää. Kappaleessa 3 esitellään aiheesta tehtyjä tutkimuksia ja niiden tuloksia. Näitä tuloksia vertaillaan yhteenvedossa testeissä saatuihin. Kappaleessa 4 määritellään työ tarkemmin. Kappaleessa 5 on kerrottu energiakeräinten valmistuksesta ja testeistä. Energiakeräimiä valmistettiin lopulta kolme versiota ja niiden kehitys ja mittaustulokset on esitetty tässä kappaleessa. Kappaleessa 6 esitetään simuloinnin tulokset. Simulointiin käytettiin LTspice-ohjelmistoa. Simuloinnilla pyrittiin toistamaan laboratoriotulokset ja käyttämään niitä energiakeräinten optimoinnissa. Kappaleessa 7 on yhteenveto työntuloksista. Tässä kappaleessa myös verrataan omia tuloksia muiden tutkimusten tuloksiin sekä simulointien tuloksiin.

2 Sähkömagnetismi

Sähkömagneettinen vuorovaikutus on yksi luonnossa esiintyvistä perusvuorovaikutuksista. Sähkömagnetismin ilmiöitä ovat sähkökenttä ja magneettikenttä. Sähkökenttä syntyy sähkövarauksen ympärille, kun taas magneettikenttä syntyy liikkuvien sähkövarausten ympärille.

Kuvassa 1 esitetään sähkömagneettinen kenttä, joka koostuu sähkökentästä ja magneettikentästä. Kentät ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Yhdessä nämä kaksi kenttää muodostavat sähkömagneettisen aallon, jonka aallonpituutta merkitään symbolilla λ. Näiden kahden kentän välistä vuorovaikutusta kuvaavat Maxwellin yhtälöt. Maxwellin yhtälöihin kuuluvat Gaussin laki sähkökentille, Faradayn laki, Ampèren-Maxwellin laki ja Gaussin laki magnetismille. Maxwellin yhtälöt muodostavat perustan sähkömagnetismin teorialle. Ne ovat olennaisessa osassa monissa fysikaalisissa ilmiöissä. Työssä tarkastellaan erityisesti sekä sähkö- että magneettikenttiä, ja niistä kerättävissä olevaa energian määrää (Young & Freedman, 2020, luku 29.7).

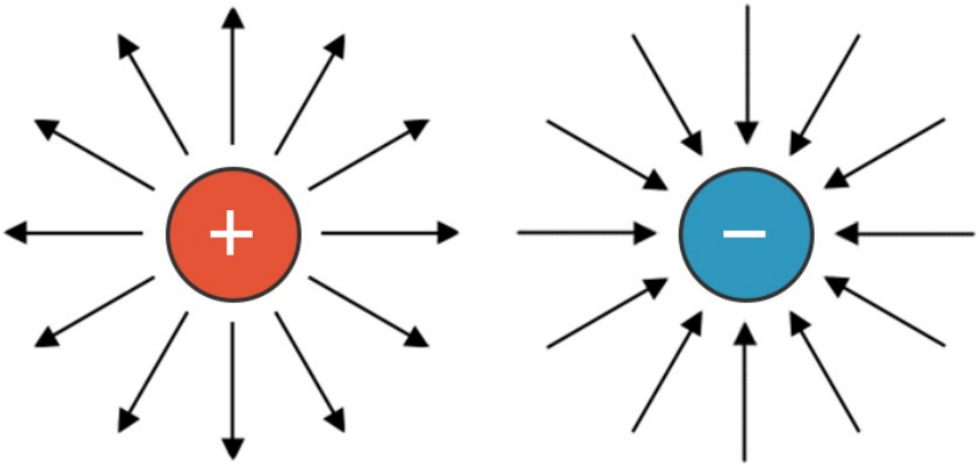


Kuva 1. Sähkökenttä ja magneettikenttä samassa kuvassa. Sähkökenttä punaisella ja magneettikenttä sinisellä (R. Nave, 2025).

2.1 Sähkökenttä

Sähkökenttä on fysikaalinen kenttä, joka syntyy sähkövarauksesta tai ajassa muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta. Sähkökenttää kuvataan sähkökenttäviivoilla. Sähkökenttäviivat näyttävät sähkökentän suunnan. Yleensä lähekkäiset kenttäviivat tarkoittavat voimakasta sähkökenttää ja harvat kenttäviivat heikkoa sähkökenttää. Sähkökenttäviivat eivät ikinä leikkaa toisiaan (Young & Freedman, 2020, s. 728).

Pistevarauksen ympärillä vaikuttaa sähkökenttä, jonka suuntaan vaikuttaa varauksen napaisuus. Kuvassa 2 esitetään positiivisen ja negatiivisen pistevarauksen muodostavan sähkökentän suunta, kun niihin ei vaikuta muita voimia. Positiivisessa varauksessa sähkökenttä kulkee poispäin pisteestä, kun taas negatiivisessa varauksessa sähkökentän suunta on kohti pistettä. Sähkökentän suuruuteen vaikuttaa varauksen voimakkuus.



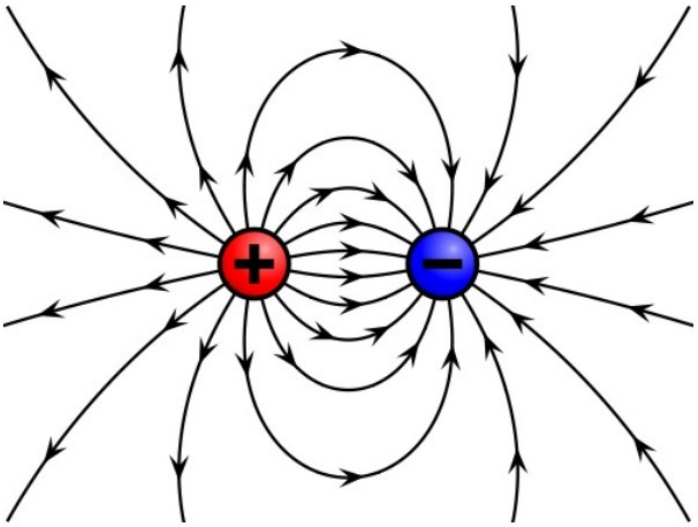
Kuva 2. Pistevarausten muodostamat sähkökentät, kun niihin ei vaikuta muita voimia (ScienceFacts.net, 2025).

Kuvassa 3 esitetään kahden pistemäisen varauksen välille syntyvää sähkökenttää. Sähkökenttä kulkee positiivisesta varauksesta negatiiviseen varaukseen. Kuvasta nähdään selkeästi, kuinka sähkökenttä eroaa kuvan 2 suorista viivoista, kun niihin vaikuttaa toisen varauksen voima. Coulombin lain avulla voidaan kuvata sähkökentän voimakkuutta ja

suuntaa. Sen avulla voidaan myös määrittää pistevarausten sähkökentän voiman vaikutusta toiseen pistevaraukseen yhtälöllä:

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \tag{1}$$

missä k on Coulombin vakio, q_1 ja q_2 ovat sähkövarauksia, r on varausten etäisyys toisistaan. Coulombin lakia soveltamalla voidaan todeta, että pistemäiseen kappaleeseen vaikuttaa tyhjässä tilassa varautuneen kappaleen aiheuttama voima (Young & Freedman, 2020, s. 713). Coulombin laki sanoo, että kahden pistevarauksen välinen sähköinen voima on suoraan verrannollinen varausten tuloon ja kääntäen verrannollinen niiden välisen etäisyyden neliöön (Young & Freedman, 2020, s. 713–715).



Kuva 3. Sähkökentän muodostuminen kahden pistevarauksen välille (Ylinen, 2025).

2.2 Magneettikenttä

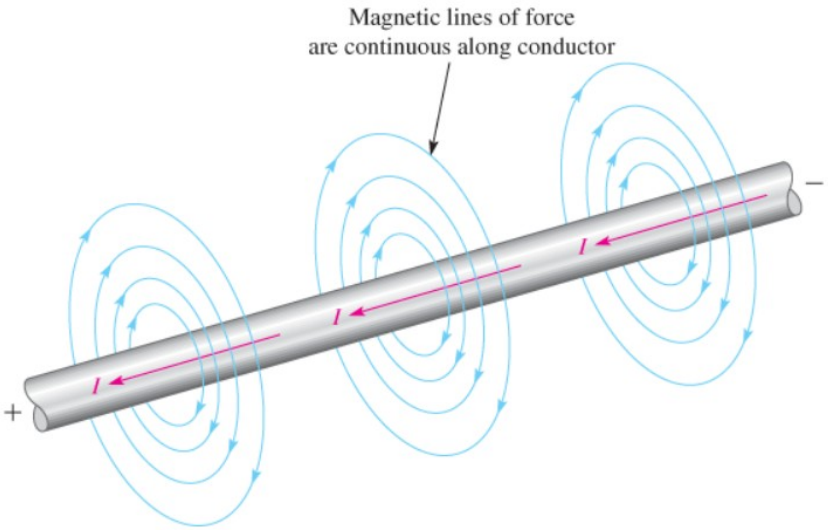
Magneettikenttä muodostuu liikkuvan varauksen tai virran ympärille. Kuten sähkökentässä myös magneettikentässä kentän voimakkuutta ja suuntaa voidaan esittää kenttäviivoilla. Magneettikentän kenttäviivoille pätee samat säännöt, kuin sähkökentän kenttäviivoille. Kun kenttäviivat ovat lähekkäin, se tarkoittaa voimakasta kenttää, harvassa olevat kenttäviivat heikkoa kenttää ja kenttäviivat eivät missään kohtaa risteä toisiaan. Toisin

kuin sähkökentän viivat magneettikentän viivoilla ei ole päätepistettä, vaan ne muodostavat suljetun kehän (Young & Freedman, 2020, s. 908–913).

Kuvassa 4 on esitetty johtimen ympärille muodostunut magneettikenttä. Johtimessa kulkevan virran suuruus määrittää magneettikentän suuruuden Amperen lain avulla. Amperen laissa oletetaan johtimen olevan pitkä ja suora, jossa virta kulkee. Lain avulla voidaan laskea magneettikentän voimakkuus H johtimen ympärillä kaavalla

$$H = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \tag{2}$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, I on virta ja r on etäisyys johtimesta (Young & Freedman, 2020, s. 951–952).



Kuva 4. Johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä (Faizan, 2018).

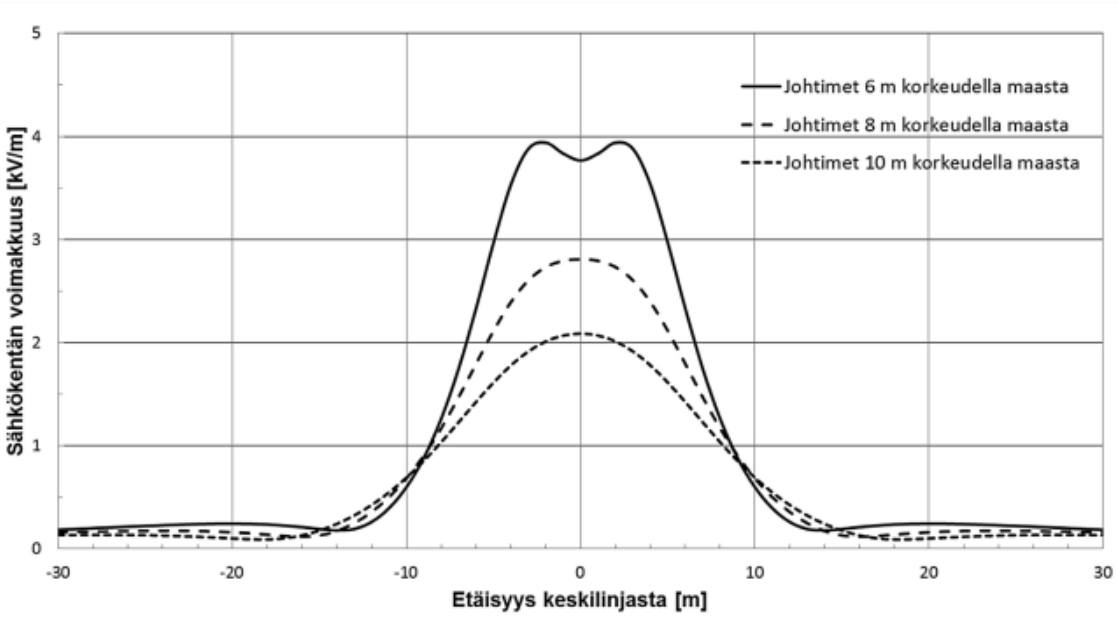
2.3 Sähkökenttä korkeajännitelinjan ympäristössä

Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa johtimen jännite, eli onko kyseessä 20 kV, 110 kV vai 400 kV linja. Myös johdinten asettelu vaikuttaa merkittävästi sähkökentän voimakkuuteen. Tilanteessa, jossa samassa vaiheessa olevat johtimet ovat vierekkäin, muodostuu merkittävästi suurempi sähkökenttä kuin tilanne, jossa ylimmät ja alimmat johtimet ovat eri vaiheissa. Ero voi olla jopa 5 kV/m (Puranen, 2023), (Suojanen ja muut, 2000).

Sähkökentän voimakkuus vaikuttaa suoraan energiakeräimen kykyyn kerätä energiaa käyttöönsä.

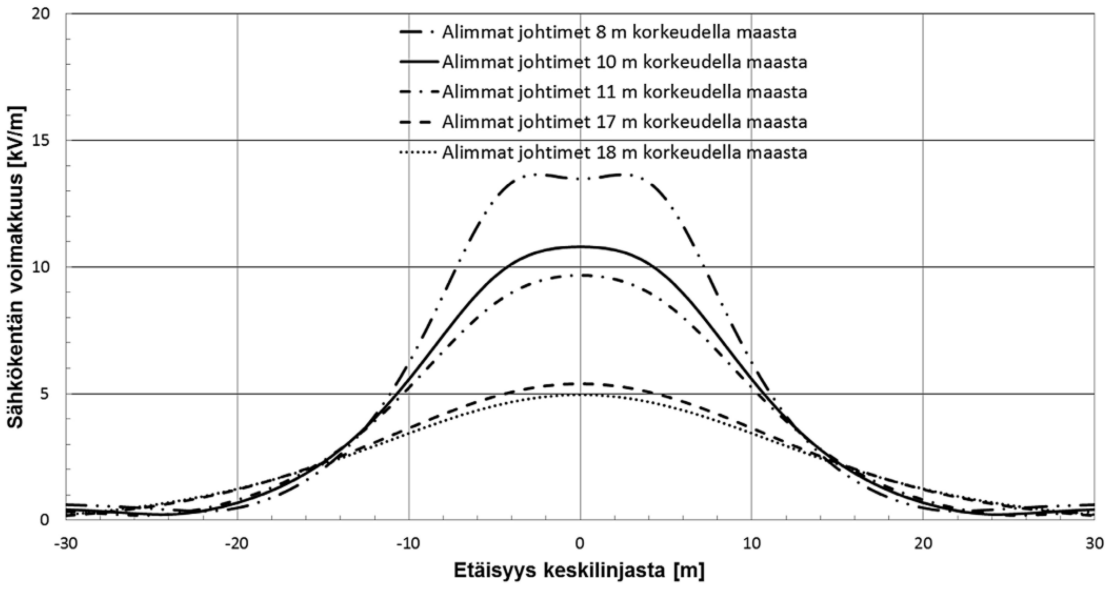
Kun korkeajännitelinjan johdin varautuu ja sen ympärille muodostuu sähkökenttä. Sähkökenttä on voimakkainta viereisiin vaihejohtimiin, koska jännitteet ovat erivaiheessa. Myös sähkökenttä maata vasten on voimakas. Sähkökenttä heikkenee nopeasti, kun siirrytään kauemmas korkeajännitelinjasta (Young & Freedman, 2020, s. 713).

Sähkökentän voimakkuus esitetään kuvassa 5 etäisyyden funktiona keskilinjasta. Kuvan johtimessa on 110 kV jännite ja mittaus on tehty 2 metrin korkeudella maanpinnasta. Kuten kuvasta nähdään, sähkökenttä on voimakkainta keskilinjan ja noin 2 metrin etäisyydellä keskilinjasta. Keskilinjan pieni notkahdus johtuu pääasiassa sähkökenttien toisiaan kumoamista voimista. Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa myös kuvassa esitetty johtimen korkeus maasta. Matalalla olevat johtimet muodostavat voimakkaamman sähkökentän laskentapisteeseen kuin korkealla olevat johtimet. Korkeammalla olevien johtimien sähkökentät eivät kumoa toisiaan niin selkeästi kuin matalalla olevien johtimien.



Kuva 5. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 metrin korkeudella maasta etäisyyden funktiona 110 kV johtimen keskilinjasta (Puranen, 2017).

Kuvassa 6 esitetään 400 kV johtimen muodostaman sähkökentän voimakkuus etäisyyden funktiona keskilinjasta. Verrattuna kuvaan 5 on kuvan 4 sähkökenttä huomattavasti voimakkaampi. Sen vaikutusalue myös pysyy korkeampana etäämmälle keskilinjasta. Mutta edelleen johtimen korkeus maasta vaikuttaa huomattavasti sähkökentän voimakkuuteen.



Kuva 6. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 metrin korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV kaksoisjohdon keskilinjasta (Puranen, 2017).

2.4 Kapasitanssi

Kapasitanssi on sähköstatiikan suure, joka ilmaisee kahden johtavan levyn välillä olevan sähköisen potentiaalieron. Tämä muodostaa systeemistä kondensaattorin. Toinen levyistä on varautunut korkeampaa potentiaaliin eli on positiivinen varaus. Toinen levy taas varautuu matalampaan potentiaaliin ja on negatiivinen varaus. Sähkökenttä näiden välillä kulkee korkeammasta potentiaalista matalampaan. Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa kappaleiden välinen potentiaaliero sekä kappaleiden välinen etäisyys.

Mitkä tahansa kaksi erillistä johdinta, jotka on erotettu joko eristeellä tai tyhjiöllä, muodostavat kondensaattorin. Kondensaattorin lataaminen tapahtuu useimmissa käytännön sovelluksissa siirtämällä elektroneja johtimesta toiseen. Tämän jälkeen johtimilla on yhtä suuret vastakkaisenmerkkiset varaukset. Kondensaattorin varausta kuvataan kirjaimella Q. Kuvassa 7 esitetään kahden levyn muodostamaa kondensaattoria. Sähkökenttä E missä tahansa pisteessä levyjen välissä on verrannollinen levyjen varauksen Q suuruuteen. Tästä syystä levyjen välinen potentiaaliero V_{ab} on verrannollinen varaukseen Q. Eli

jos levyjen varausten suuruus kaksinkertaistetaan, myös sähkökenttä ja levyjen välinen potentiaaliero kaksinkertaistuvat. Tätä suhdetta kutsutaan kondensaattorin kapasitanssiksi C. Tämä yhteys esitetään yhtälössä

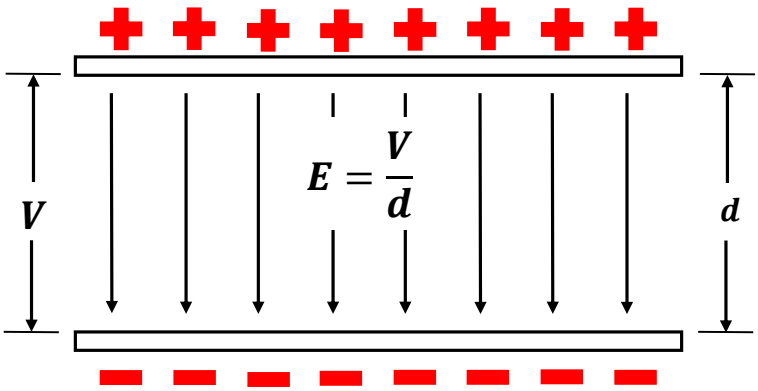
$$C = \frac{Q}{V_{ab}}, \tag{3}$$

jossa C on kondensaattorin kapasitanssi, Q on levyjen varausten suuruus ja V_{ab} on potentiaaliero levyjen välillä. Kapasitanssin yksikkö on faradi F, joka on yhtä suuri kuin coulombi per voltti. Tämä saadaan kaavalla

$$F = \frac{C}{V}. \tag{4}$$

Mitä suurempi kapasitanssi C kondensaattorilla on, sitä suurempi varaus levyihin muodostuu. Lisäksi levyjen välinen jännite-ero V_{ab} kasvaa ja täten varastoitavan energianmäärä kasvaa sähkökenttä (Young & Freedman, 2020, s. 810–811).

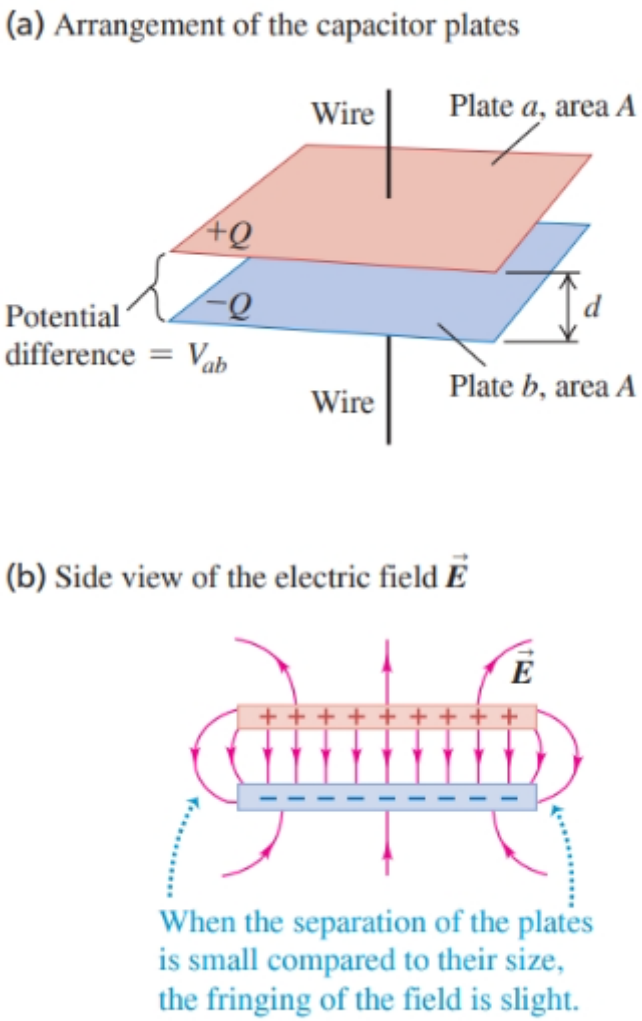
Kuvassa 7 esitetään kahden varautuneen levyn välillä vaikuttavaa sähkökenttää. E kuvaa sähkökentän voimakkuutta, V on levyjen välillä oleva jännite ja d on levyjen välinen etäisyys.



Kuva 7. Kahden levyn välillä vaikuttava sähkökenttä. E on sähkökentän voimakkuus, V on levyjen välinen jännite ja d on levyjen välinen etäisyys.

Kapasitanssi ilmaisee näiden kahden komponentin muodostaman systeemin sähkönvarauskykyä. Tätä varausta voidaan hyödyntää esim. IoT-laitteen käytössä. Sähkönvarauskykyyn vaikuttavat monet asiat esimerkiksi materiaali, etäisyys ja pinta-ala.

Yksinkertaisin kondensaattori saadaan aikaan kahdella johtavalla levyllä. Kuvassa 8a on esitetty kahden levyn muodostama kondensaattori. Levyjen välissä vaikuttaa kuvassa 8b esitetty sähkökenttä. Levyjen ollessa hyvin lähellä toisiaan lähes koko sähkökenttä vaikuttaa vain levyjen välissä.



Kuva 8. Kapasitanssin muodostuminen kahden levyn välille. a) Kahden kondensaattorilevyn asettelu. b) Levyjen välillä vaikuttava sähkökenttä (Young & Freedman, 2020, s. 811).

2.5 Sähkönsiirto

Sähköverkko siirtää sähköenergian tuotantolaitoksista kuluttajille. Linjat voidaan toteuttaa kahdella tavalla, ilmajohdolla tai kaivamalla kaapelit maahan. Ilmajohtimien ollessa paljaana ympäristön uhille on niiden monitoroinnista alettu kiinnostua. Kaatuneet puut, katkenneet kaapelit ja muut vauriot olisi hyvä paikantaa heti niiden tapahduttua. Parhaassa tapauksessa tieto johtimen katkeamisesta tai sen uhasta voitaisiin saada jo ennakkoon. Tätä varten tiheä mittauksia tekevä IoT-laitteisto voisi olla suureksi avuksi linjojen kunnon tarkkailuun.

Suomen sähköjärjestelmä koostuu sähköä tuottavista voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista ja sähkön kuluttajista. Jakeluverkko koostuu keskijännitejakeluverkosta 1–20 kV ja suurjännitteisestä jakeluverkosta 110 kV (Säteilyturvakeskus, 2021). Kantaverkosta vastaa Fingrid ja se kattaa kaikki silmukoidut käytössä olevat yli 110 kV suurjännitejohdot aina 400 kV asti, sekä näiden sähköasemat (Fingrid, 2024).

2.5.1 Vaihtovirta sähkönsiirtoverkossa

Vaihtovirta (AC) on ajan funktiona muuttuva sähkövirta. Suomessa sinimuotoista vaihtosähköä 230 voltin nimellisjännitteellä ja 50 hertsin (Hz) taajuudella käytetään kotitalouksissa verkkovirtana. Siirtoverkossa on sama 50 Hz taajuus mutta jännitteet ovat huomattavasti suurempia 1 kV aina 400 kV asti.

Vaihtovirtajärjestelmässä on muutamia huomattavia etuja, joiden takia se on parempi kuin tasavirtajärjestelmä. Vaihtovirtajärjestelmässä jännitettä voidaan muuttaa helposti muuntajalla. Myös sähkönsiirto on tehokkaampaa, koska jännitettä voidaan nostaa ja tällöin siirrosta aiheutuvat häviöt pienevät. Tästä syystä siirtojohtimista voidaan tehdä ohuempia, joka säästää valmistuskustannuksia.

Energian keräämiseen vaihtosähkö vaikuttaa juuri diodisillan tarpeella. Induktiiviselle keräimelle vaihtosähkö on erittäin tärkeä, sillä keräimen toiminta perustuu virtamuuntajaan. Johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä indusoi keräimen käämiin jännitteen. Ja näin saadaan energiaa ilman kytkentöjä.

Vastaavasti kapasitiiviselle keräimelle vaihtosähkö aiheuttaa haittaa. Jos siirtoverkossa on 3-vaiheiset johdot vierekkäin ja keräin asetetaan täsmälleen keskelle, ei keräimellä saada kerättyä energiaa. Kolmen erivaiheessa olevan jännitteen voimat kumoavat toisensa. Tähän on hyvä kiinnittää huomiota kapasitiivista keräintä suunnitellessa.

2.5.2 Suurjänniteverkko

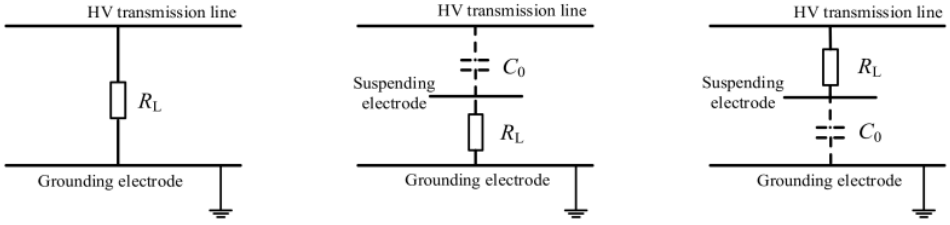
Suurjänniteverkolla tarkoitetaan yli 110 kV voimalinjoja. Suurjänniteverkkoa ovat siis sekä kantaverkko kokonaan, että jakeluverkko osittain. Kantaverkkoa ylläpitää ja valvoo Suomessa Fingrid. Kantaverkkoon kuuluvat kaikki silmukoidut käytössä olevat 400, 220 ja 110 kV suurjännitejohdot sekä sähköasemat (Fingrid, 2024).

Jakeluverkko, jolla sähkö tuodaan kuluttajalle, on alle 110 kV. Suurjännitteinen jakeluverkko on 110 kV. Lisäksi näihin kuuluvat niiden sähköasemat. Suurjännitteistä jakeluverkkoa ylläpitää ja valvoo suurjännitteisen jakeluverkonhaltija. Jakeluverkkoa hallinnoivilla jakeluverkonhaltijoilla ja suljetun jakeluverkon haltijoilla voi olla ylläpidettävänään myös suurjännitteistä jakeluverkkoa (Energiavirasto, 2025).

Suurjänniteverkolla on pieni virta, joka vähentää sähkön siirrosta aiheutuvia häviöitä. Pienemmällä jännitteellä virta kasvaa, joka aiheuttaa häviötä johtimissa. Häviöihin voi myös vaikuttaa suurentamalla johtimia, jolloin virta pääsee kulkemaan paremmin. Tämä vaatii kuitenkin enemmän materiaalia johtimiin, jolloin paino kasvaa ja tämä voi aiheuttaa johtimien katkeamisriskin. Suurjänniteverkossa virran ollessa pieni ei ole tarvetta suuremmille johtimille ja voidaan säästää johdinten materiaalikustannuksissa sekä painossa.

Joka vuosi myrskyt ja pakkautunut lumi katkovat sähköjohtimia eri puolilla Suomea. Vaikka valvonta ja huolto ovat parantuneet, voi sähköt olla välillä poikki pitkiäkin aikoja. Myös syrjäisillä ja vaikeakulkuisilla paikoilla katkenneen kohdan löytyminen voi olla haastavaa ja aikaa vievää. Pienet IoT-laitteet, jotka tarkkailevat johtimia ovat jo mahdollisia mutta ne toimivat vuosia paristoilla. Kun paristot tyhjenevät laitteista tulee hyödyttömiä. Paristojen vaihto olisi niin työlästä ja aikaa vievää, ettei se olisi taloudellisesti järkevää. Siksi on alettu kehittelemään IoT-laitteita, jotka keräisivät energiansa ympäristöstään. Tässä tapauksessa sähköjohtimista. Seuraavassa kappaleessa tutustutaan olemassa oleviin tutkimuksiin energian keräämisestä sähköjohtimista.

3 Energian kerääminen suurjännitejohdoista

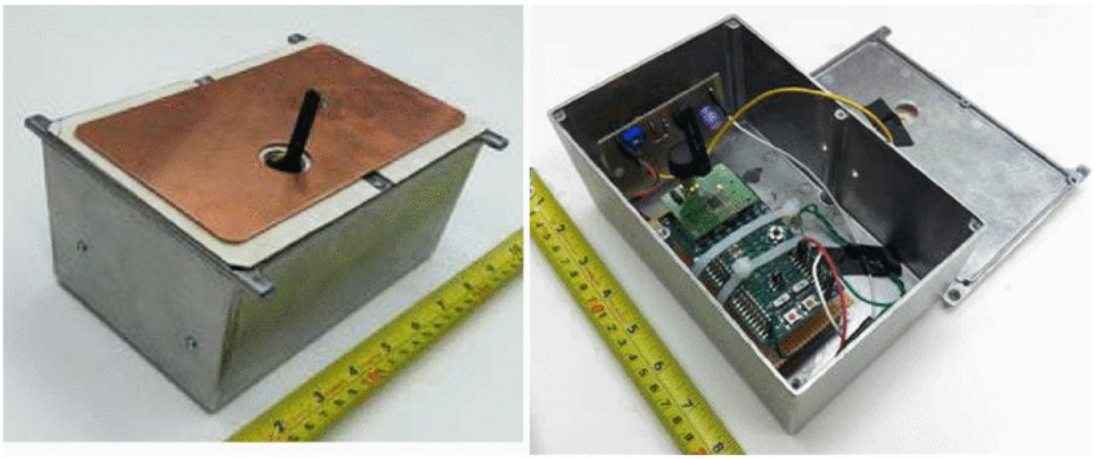


a) b) c)

Kuva 9. Erilaisia kapasitiivisia energiankeräysmenetelmiä. a) suora kontakti. b) matala potentiaali. c) korkea potentiaali (Yang ja muut, 2020).

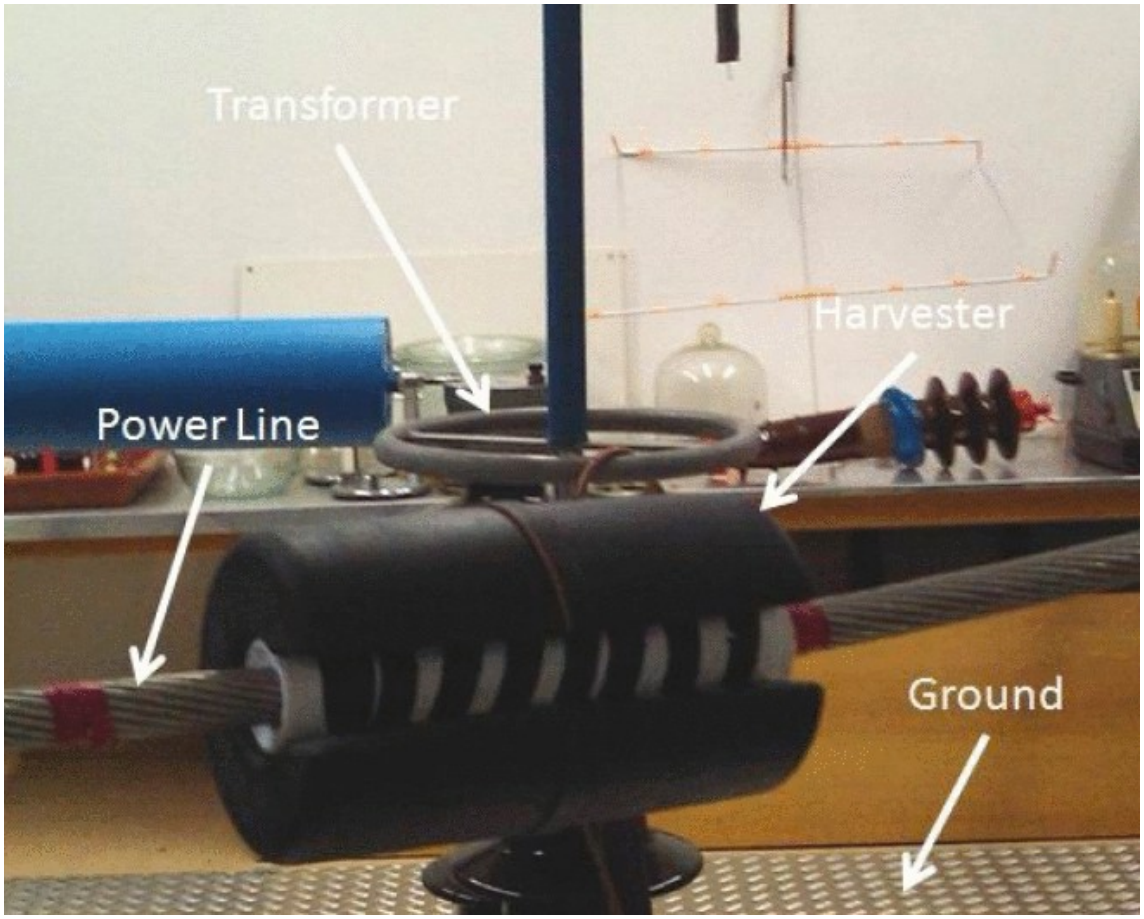
Aikaisempia tutkimuksia kapasitiivisista energiakeräimistä on tehty monia ja kaikki eroavat hiukan toisistaan. Vertailu on osittain erittäin hankalaa, koska elektrodien materiaalit ja koot eroavat suuresti toisistaan ja nämä ominaisuudet vaikuttavat suoraan keräinten tehoon. Myös voimalinjojen jännite vaihtelee 35 kV ja 765 kV välillä. Osa energiakeräimistä on matalassa potentiaalissa ja osa taas korkeassa. Elektrodien etäisyys vaihtelee paljon eri tutkimusten kesken ja vaikuttaa erittäin paljon tuloksia vertaillessa. Yhteenvedossa tullaan vertaamaan tässä työssä saatuja tuloksia näihin tuloksiin.

Moghe ja muut (2015) ovat tehneet kuvan 10 mukaisen korkeassa potentiaalissa olevan energiakeräimen. Energiakeräimen elektrodina toimi alumiinilaatikko, jonka sisään elektroniikka oli laitettu. Laatikko kiinnitettiin sähköjohtimeen ja laatikon päälle oli asetettu kuparilevy, joka oli suorassa kontaktissa johtimen kanssa. Kuparilevy eristettiin muusta laatikosta eristävällä kannella. Kuparilevyn ja alumiinilaatikon väliin jätettiin noin 1 mm eristeväli. Kuparilevy oli mitoiltaan 12,7 cm x 7,6 cm x 1 mm. Kokeessa korkeajännite vaihteli välillä 5 kV ja 35 kV. Kuorma vaihteli 25 Ω ja 5 kΩ välillä. 50 Ω kuormalla ja 35 kV jännitteellä saatiin jatkuvasti lähes 17 mW.



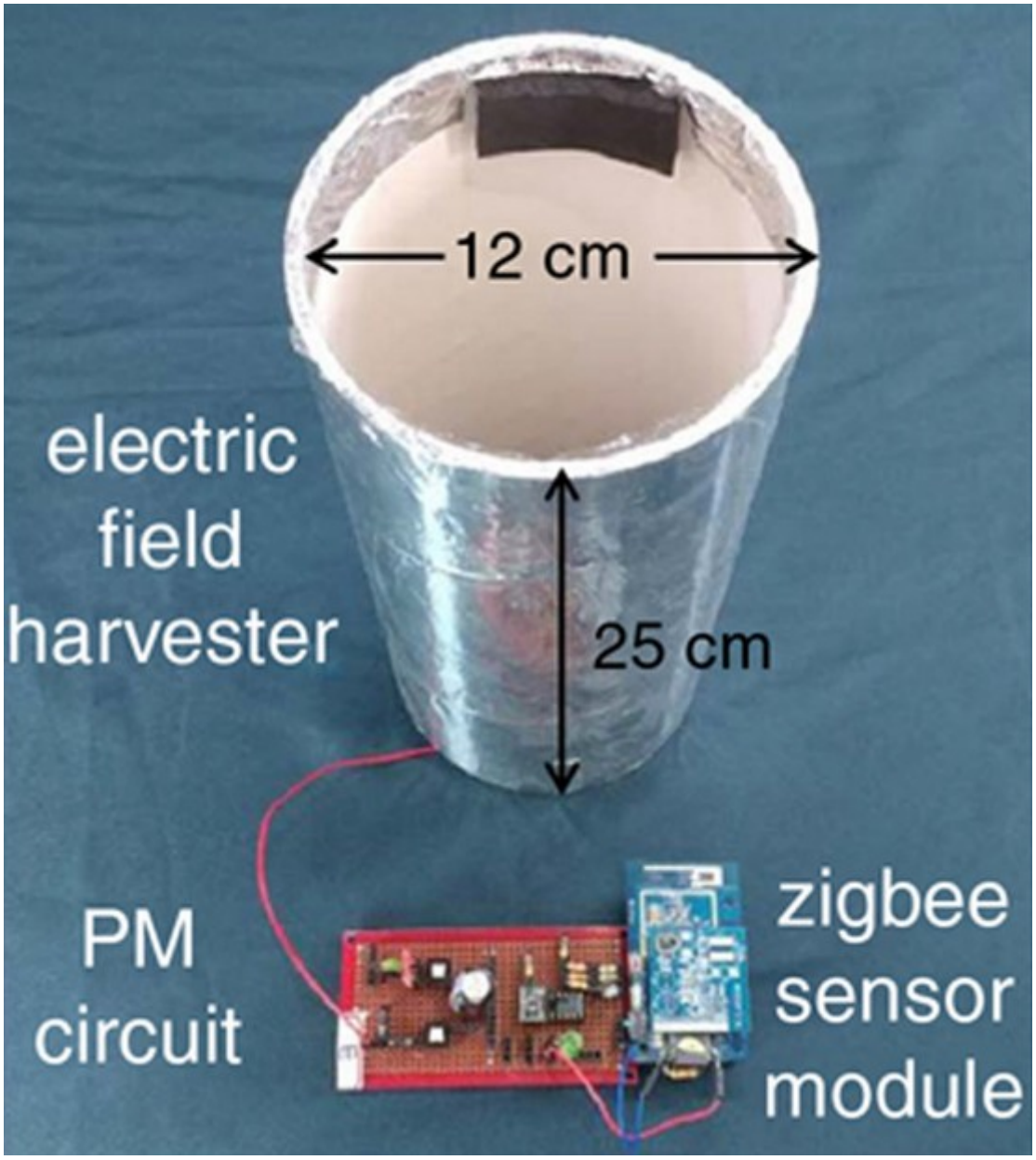
Kuva 10. Morgen ja muiden (2015) kapasitiivisesta energiakeräimestä, joka asetetaan kiinni jännitelinjaan.

Zhao ja muut (2012) ovat tehneet kuvan 11 mukaisen korkeapotentiaalisen energiakeräimen. Itse keräimestä ei paljoa mainita raportissa mutta energian hallinnassa käytettiin muuntajaa jännitteen alentamiseksi ja tehokkaan energian keräämisen mahdollistamiseksi. Keräin asetettiin johtimen ympärille ja kuvien perusteella se noin kolminkertaisti johtimen paksuuden ja oli noin 10–20 cm pitkä. Keräimessä käytettyjä materiaaleja ei mainita, joten ulkokuoren elektrodin materiaalista ei ole täyttä varmuutta. Keräimellä saatiin kuitenkin kenttätestissä 110 kV linjasta, joka oli 15 metrin korkeudessa, 16,3 mW.



Kuva 11. Zhao ja muiden (2012) kehittämä korkeajännitelinjaan kiinnitettävä energiakeräin.

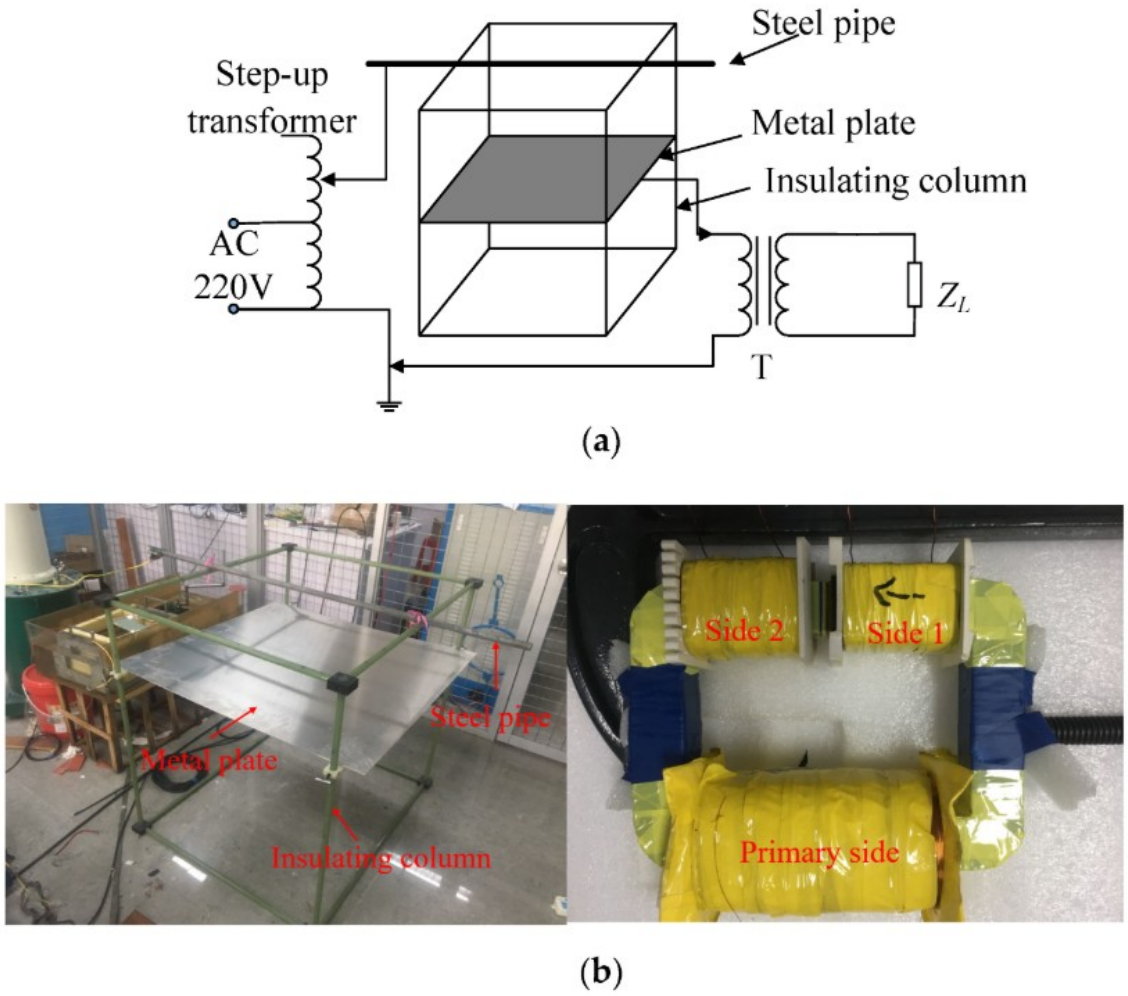
Kang ja muut (2017) ovat tehneet kuvan 12 mukaisen matalassa potentiaalissa toimivan energiakeräimen. Tässä tutkimuksessa elektrodina toimii lieriö, jonka halkaisija oli 12 cm ja pituus 25 cm. Lieriön ulkopinta on vuorattu alumiinilla, joka siis toimii elektrodin materiaalina. Energiakeräimen elektroniikka sijaitsee lieriön sisällä. Keräin asetettiin 765 kV linjan alle, joka oli noin 34 m korkeudessa maanpinnasta. Energiakeräimen ollessa neljän metrin korkeudessa, teho oli 0,17 mW.



Kuva 12. Kang ja muiden (2017) toteuttama kapasitiivinen energiakeräin, joka on sijoitettu jännitelinjan alle.

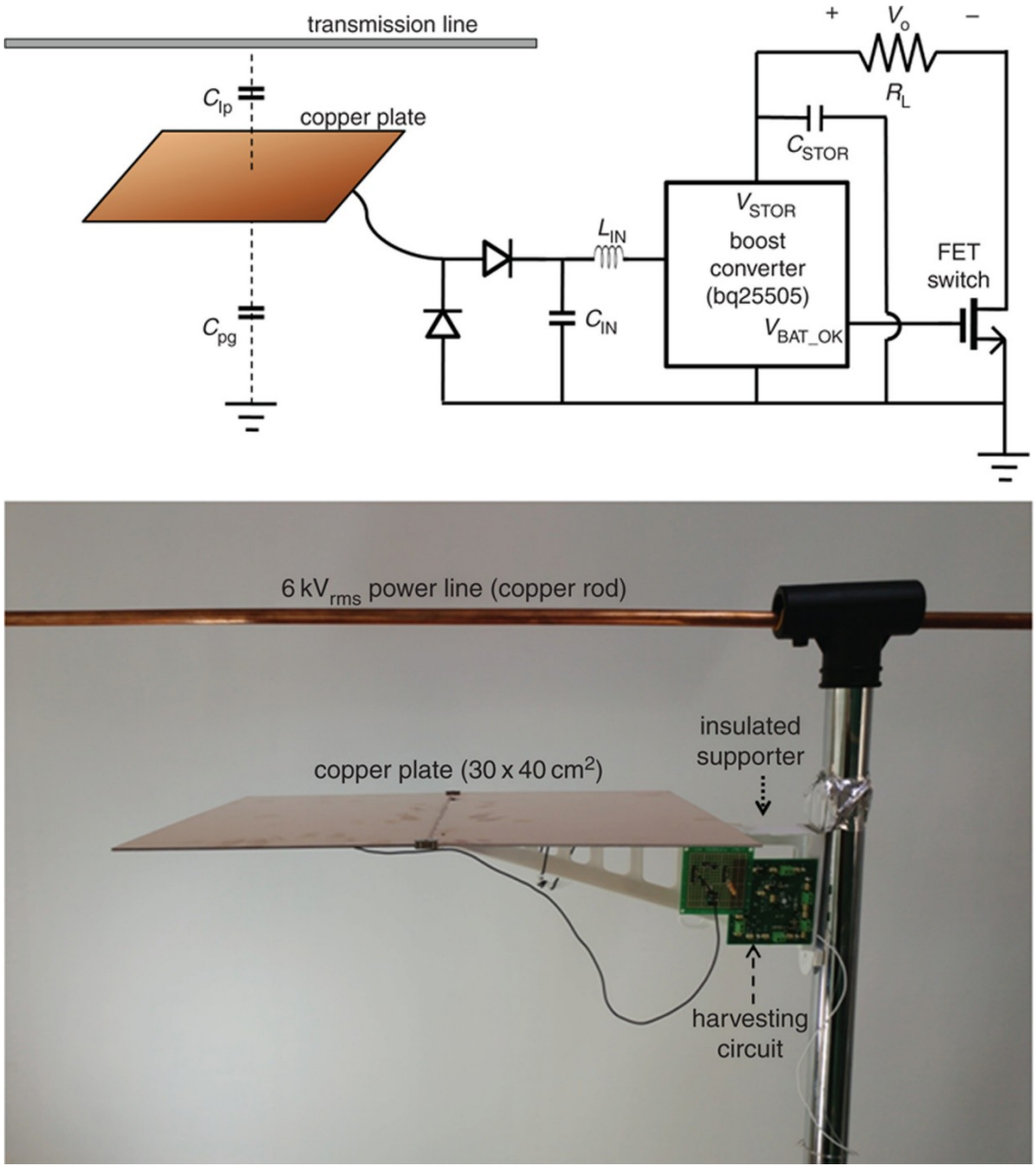
Li ja muut (2019) ovat tehneet kuvan 13 mukaisen matalan potentiaalin energiakeräimen. Keräintä testattiin laboratorioon rakennetulla testiympäristöllä. Testissä korkeajännitelinjana toimi 1,5 m pitkä teräsputki, johon syötettiin 50 Hz vaihtosähköä 50 kV jännitteellä. Elektrodina toimi 1×1 m metallilevy, joka oli sijoitettu suoraan teräsputken alapuolelle. Teräsputken ja metallilevyn välinen etäisyys oli 30 cm. Energiakeräimen

elektroniikkana käytettiin muuntajaa, jonka avulla jännite ja virta saatiin elektroniikalle sopiviin arvoihin. Testistä Li ja muut saivat energian keräimellä kerättyä 5mW tehon.



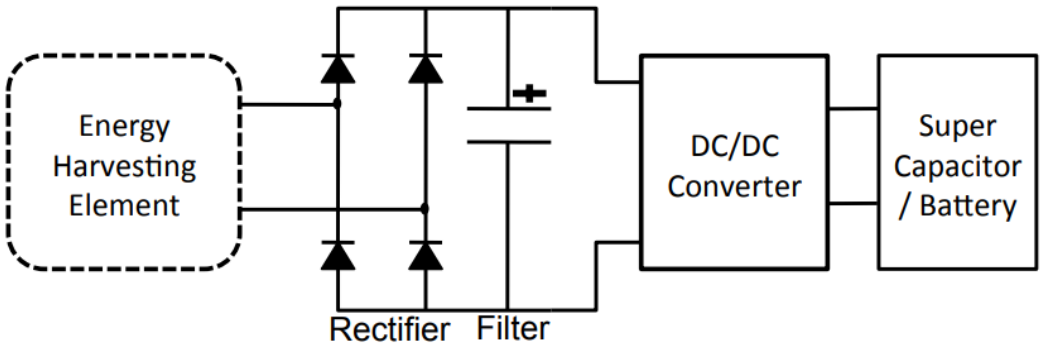
Kuva 13. Li ja muiden (2019) kapasitiivisen energiakeräimen koejärjestely. a) Kokeen periaatekuva. b) todellinen energiakeräin.

Kang ja muut (2017) ovat toteuttaneet kapasitiivisen energiakeräimen, joka esitetään kuvassa 14. Koejärjestelyssä jännitelinjaa kuvaava kupariputki on halkaisijaltaan 10 mm ja 1,5 m korkeudessa maasta ja vaihejännite on 6 kV. Kuparilevy on 30 x 40 cm ja sen etäisyys kupariputkesta on 15 cm. Keräimen tarkkoja tehoja ei mitattu, mutta ne olivat nW luokkaa.

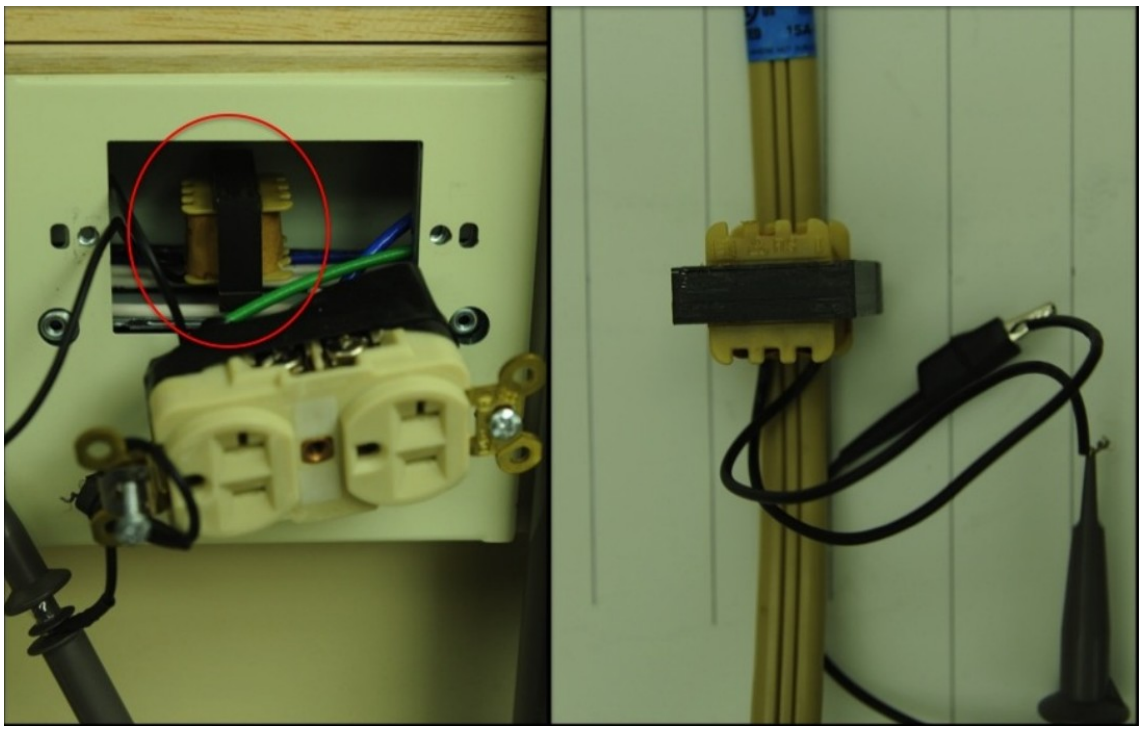


Kuva 14. Kang ja muiden (2017) toteuttaman kapasitiivisen energiakeräimen koejärjestelyt.

Gupta ja muut (2010) ovat tehneet kokeita induktiivisella energiakeräimellä. Tässä työssä energia kerättiin tuomalla induktiivinen energiakeräyselementti lähelle johdinta, jossa kulki virta. Kokeissa johtimessa kulki noin 8,4 A virta. Keräyselementin ollessa tarpeeksi lähellä, heidän mukaansa olisi mahdollista kerätä jopa 1–2 mW. Kuvassa 15 esitetään koejärjestelyt.



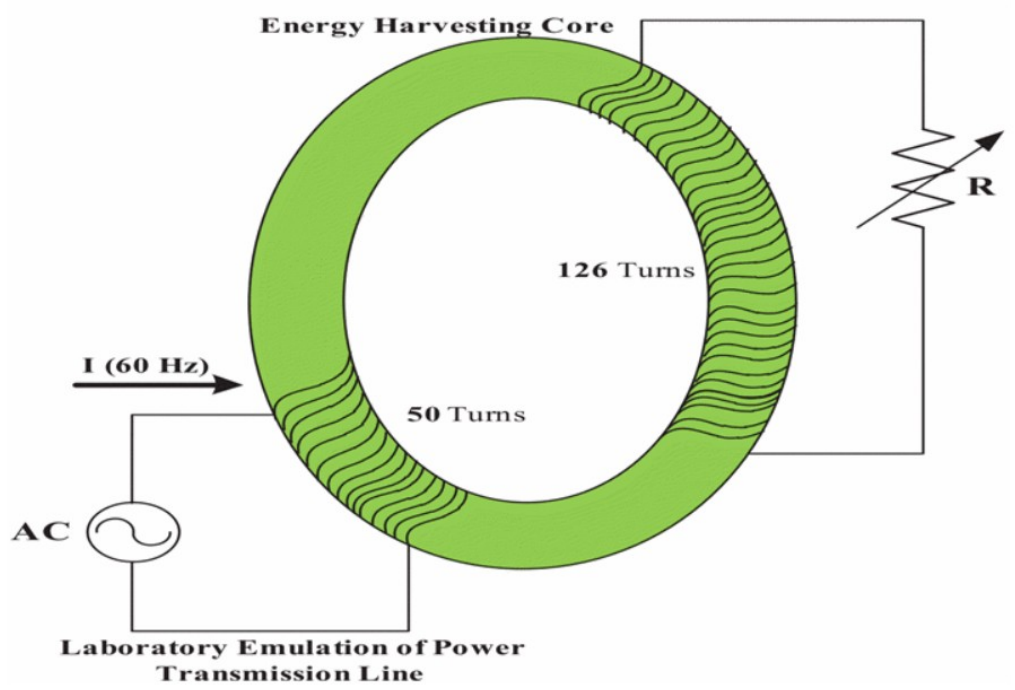
a)



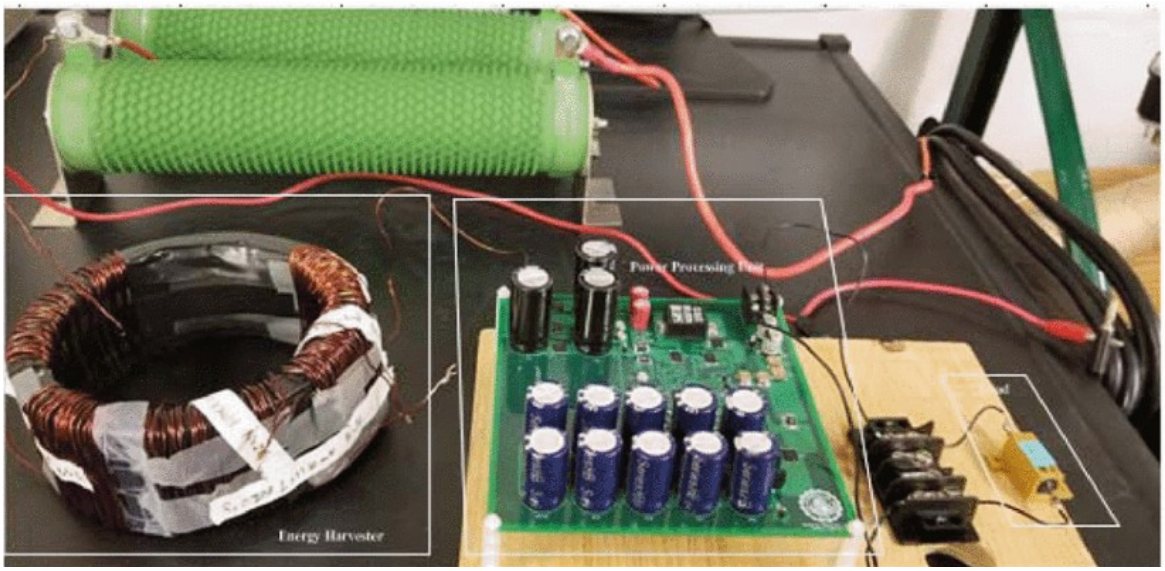
b)

Kuva 15. Gupta ja muiden (2010) toteuttama induktiivinen energiakeräin. a) koejärjestelyt. b) kuva todellisesta koejärjestelystä.

Najafi ja muut (2018) ovat tehneet tutkimuksen induktiivisesta energiakeräimestä, joka esitetään kuvassa 16. Tässä kokeessa virtajohtimen ympärille asetettiin pyöreä korkean permeabiliteetin toroidi, jonka ympärille kiedottiin johtoa. Kierrosten määrä näkyy kuvassa 16. Induktiivisen energiakeräimen teho kasvaa lineaarisesti johtimen virran mukana. Tässä tutkimuksessa suurimmalla virralla 615 A saatiin keräimelle 55 W teho.



a)



b)

Kuva 16. Najafin ja muiden (2018) tekemän induktiivisen energiakeräin. a) periaatekuva b) todellinen koejärjestely.

Taulukoon 1 on koottu edellä mainittujen tutkimusten tulokset. Vaihtelut aiheutuvat suurelta osin keräimen elektrodin ja jännitelinjan välisistä eroista. Myös jännitteen ja

virran määrä vaikuttavat tuloksiin huomattavasti. Kaikilla menetelmillä kuitenkin saatiin kerättyä energiaa.

Taulukko 1. Tulokset eri energiakeräinten tehoista.

Tekijä	Menetelmä	Jännite	Teho
Moghe ja muut	Kapasitiivinen (korkea)	35 kV	17 mW
Zhao ja muut	Kapasitiivinen (korkea)	110 kV	16,3 mW
Kang ja muut	Kapasitiivinen (matala)	765 kV	0,17 mW
Li ja muut	Kapasitiivinen (matala)	50 kV	5 mW
Kang ja muut	Kapasitiivinen (matala)	6 kV	1–4 nW
Guptu ja muut	Induktiivinen	8,4 A	1–2 mW
Najafi ja muut	Induktiivinen	615 A	55 W

4 Tehtävän asettelu

Tässä työssä tutkittiin Vaasan yliopistossa E4IoT-projektissa kehitettyä energiakeräintä. Rahoittajina projektissa olivat Pohjanmaan liitto, Vaasan yliopisto ja suomalaisia teollisuusyrityksiä. Energiakeräin on suunniteltu toimimaan korkeajännitteisen voimalinjan ympäristössä. Työssä tutkittiin kuvan 9 mukaisten kytkentöjen eroja tehon saannin kannalta eli kuinka suuri ero korkea- ja matalapotentiaalisilla kytkennöillä on. Työn tuloksia vertaillaan edellisessä luvussa esitettyihin muiden tekemiin tutkimustuloksiin. Kerätyllä energialla tullaan myös sähköistämään pienikulutuksellinen IoT-laite.

Kokeet tehtiin pääosin laboratorioympäristössä. Laboratorioon tehtiin korkeajännitelinjaa simuloiva ympäristö, jolloin mittaukset on mahdollisimman lähellä oikeassa ympäristössä toteutettavia mittauksia. Korkeajännitelinjoissa käytettävät johtimet korvattiin alumiiniputkilla, joiden halkaisija on 15 mm. Toiseen johdetaan korkeajännite ja toinen pidetään maapotentiaalissa. Näiden kahden putken etäisyyttä toisiinsa voidaan säädellä.

4.1 Tiedonsiirto menetelmät

Kapasitiivisesti kerätyn energiamäärän odotettiin jäävän pieneksi, joten tiedonsiirron kulutukseen oli syytä kiinnittää erityistä huomiota. Taulukossa 2 esitetään muutamia tiedonsiirto menetelmiä ja niiden käyttämiä virtoja tiedonsiirron erivaiheissa. Energiakulutukseen vaikuttaa myös kantavuus ja tiedoston koko. Taulukon 2 lähetysmenetelmistä Bluetooth ja ZigBee lähettävät tiedostoja kymmenen metriä. Wi-Fin kantavuus voi olla satoja metrejä, kun taas LoRaWAN pystyy lähettämään jopa kymmeniä kilometrejä (Mahmoud & Mohamad, 2016).

Taulukko 2. Eri tiedonsiirtomenetelmien energiankulutus (Kazeem ja muut, 2017; Mahmoud & Mohamad, 2016).

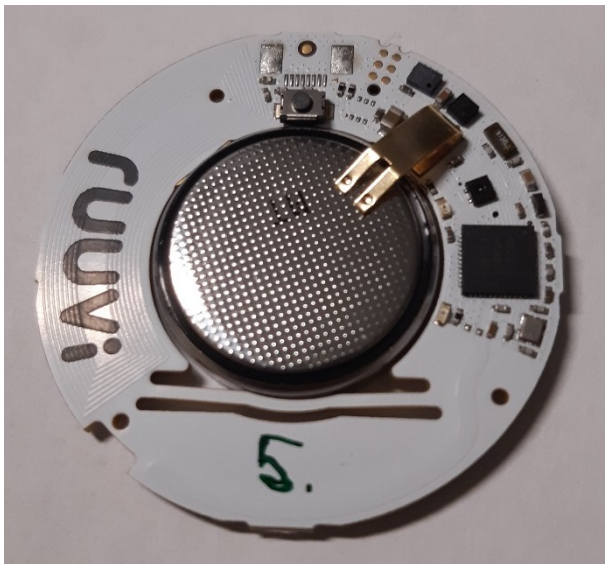
	Bluetooth	LoRaWAN	ZigBee	Wi-Fi
Lepotila	9 µA	10 µA	12 µA	30 µA
Valmiustila	35 mA	30 mA	50 mA	245 mA
Lähetys	39 mA	39 mA	52 mA	251 mA
Vastaanotto	37 mA	14 mA	54 mA	248 mA
Jännitelähde	3,3 V	3,3 V	3,3 V	5 V

Kuten taulukosta 2 nähdään, Bluetooth on yksi vertailujoukon energiatehokkaimmista tiedonsiirtomenetelmistä. Tässä työssä IoT-laitteena käytettiin RuuviTag-laitetta, joka käyttää matalaenergistä Bluetoothia. RuuviTagin käyttämä energia mitattiin tarkemmin ja tulokset esitetään seuraavassa kappaleessa.

4.2 IoT-laite RuuviTag

Kapasitiivisen energiakeräimen energiaa käytetään IoT-laitteeseen. Tässä työssä IoT-laitteena käytetään kuvan 17 RuuviTag sensoria. Normaalisti RuuviTag käyttää 3,3 V paristoa, jolle Ruuvi lupaa 12–24 kuukautta toiminta-aikaa. Pariston luvataan sisältävän 1 000 mAh. Ruuvitag sensori mittaa lämpötilaa, ilmankosteutta, ilmanpainetta ja liikettä. Lisäksi se pystyy ilmoittamaan käyttämänsä paristojännitteen (Ruuvi Innovations Oy, 2023). Paristojännite on energianhallinnan ulostulon jännite.

RuuviTag -sensori käyttää Bluetooth lähetystekniikkaa. Bluetoothin lähetysteho sisätiloissa on noin 5–20 metriä ja ulkona 20-100 metriä (Ruuvi Innovations Oy, 2023).

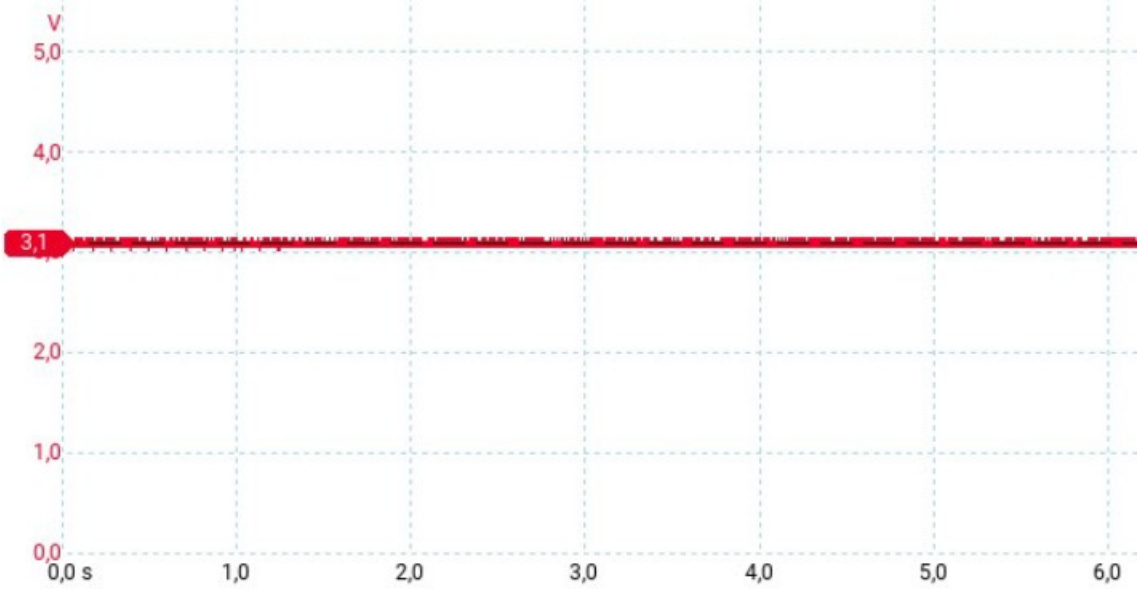


Kuva 17. RuuviTag IoT-laite. Mittaa lämpötilaa, ilmankosteuden ja -paineen sekä liikkeen. Normaalisti paristokäyttöinen. Numero viisi on itse tehty tunniste.

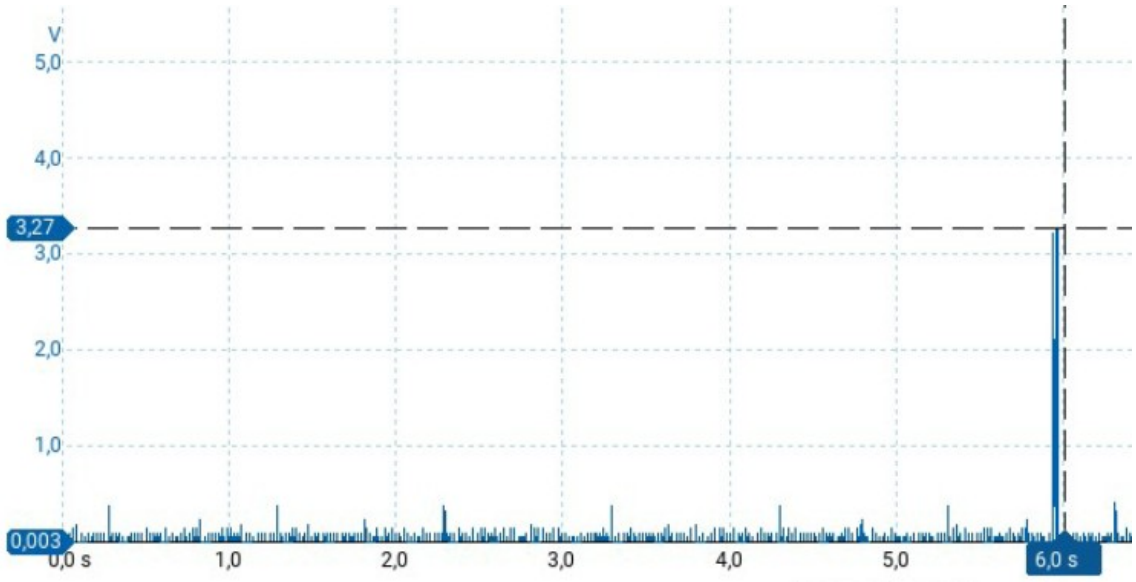
Työssä käytetylle RuuviTagille tehtiin tehon kulutusmittauksia. Mittauksissa käytettiin virran mittaamiseen CurrentRanger-virtamittaria. Laitteen avulla voidaan PicoScopella määrittää virta. PicoScopella mitattiin RuuviTagin käyttöjännite. Teho saadaan kaavalla

$$P = UI, \tag{5}$$

jossa I on RuuviTagin käyttämä virta ja *U* on käyttöjännite. Mittaustulokset esitetään kuvissa 18 ja 19.



Kuva 18. RuuviTagin käyttöjännite on keskimäärin 3,1 V.



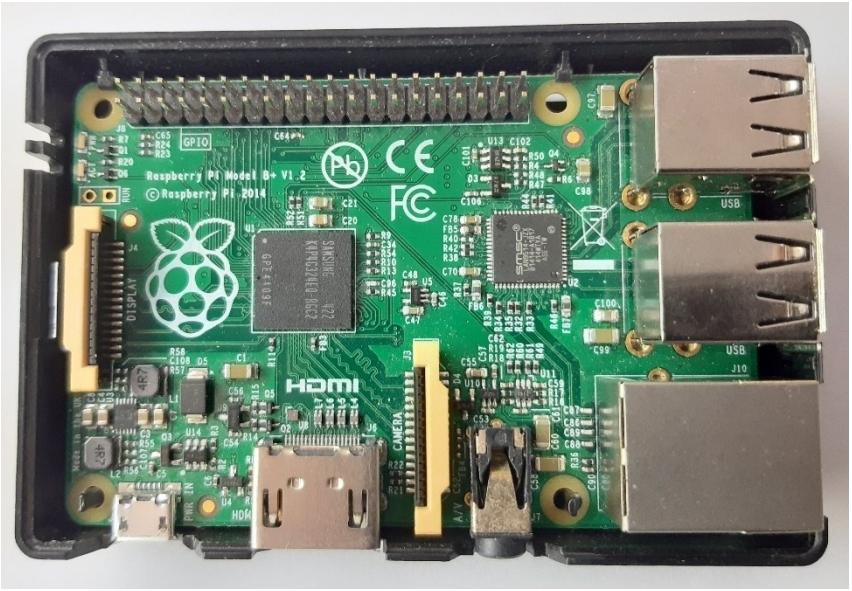
Kuva 19. RuuviTagin virrankulutus. Lähetyksen aikana virtapiikki on 3,27 mA. Keskimääräinen virrankulutus 6 s aikana on 3,3 µA.

RuuviTagin tehonkulutus on keskimäärin 7,2 µW. Lähetyshetkellä RuuviTag kuluttaa hetkellisesti 10,3 mW. Mittauksen aikana RuuviTag teki lähetykset 6 sekunnin välein. Pienemmät piikit virrankulutuksessa ovat hetkiä, jolloin RuuviTag suorittaa mittauksia. Niiden huiput ovat noin 0,4 mA.

4.3 Vastaanotin

Vastaanottimena voidaan käyttää mitä vain laitetta, joka pystyy vastaanottamaan Bluetoothin kautta lähetettyä tietoa. Tässä työssä RuuviTag lähettää matalaenergistä salaamatonta Bluetooth signaalia, joten sitä ei tarvitse parittaa vastaanottimen kanssa. Työssä on käytetty vastaanottimena tavallista matkapuhelinta, jossa on RuuviTagin sovellus tiedon lukemiseksi.

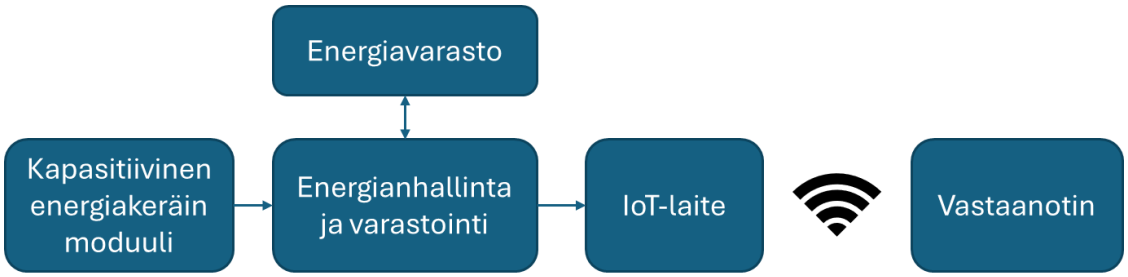
Raspberry Pi 3 pienoistietokoneella tehtiin pitkäaikainen mittaus sähköasemalla ja se tallensi RuuviTagin lähettämän datan. Raspberry Pi oli kytketty suoraan sähköverkkoon, koska sen energiankulutus on suuri. Suositeltu virtalähde on 5 V ja 2,5 A, sisääntuloliittimenä toimii mikro-USB.



Kuva 20. Raspberry Pi 3 Model B -pienoistietokone.

Tulokset tästä testistä esitetään myöhemmin kappaleessa 5.3.3.

5 Kapasitiivinen energiakeräin

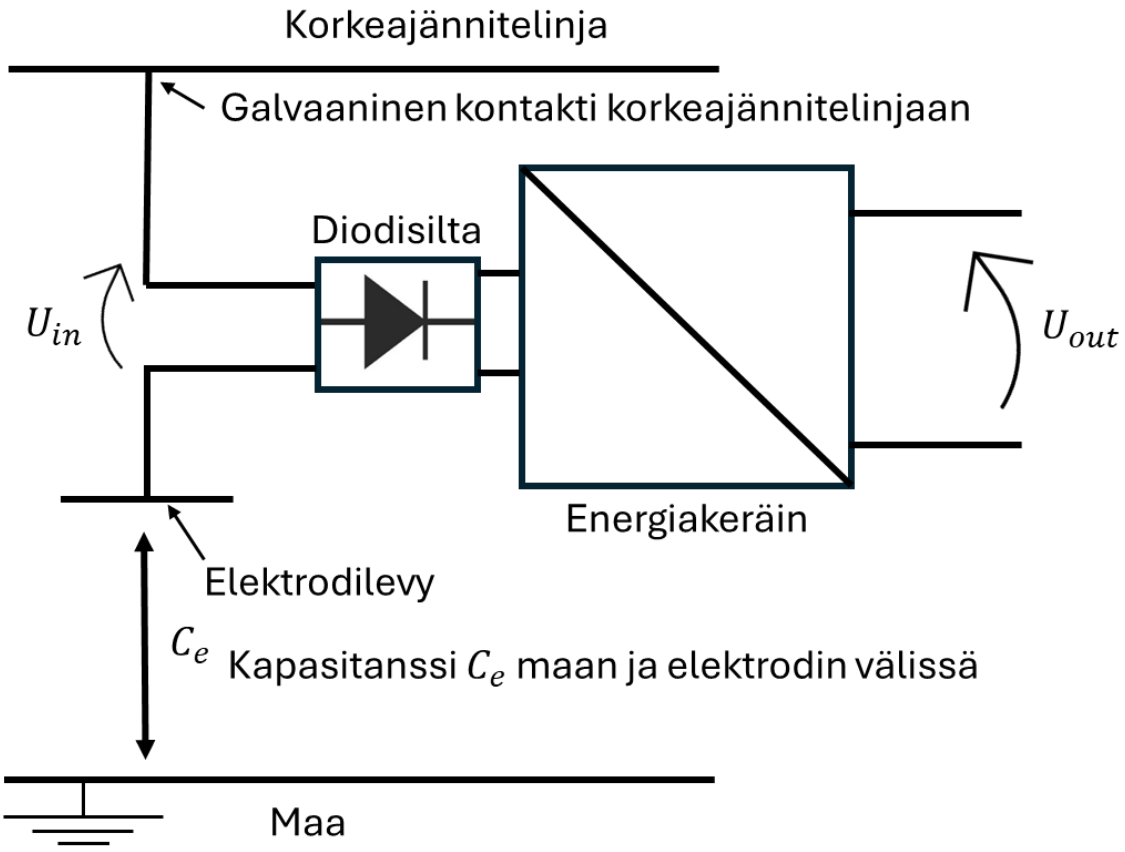


Kuva 21. Periaatekuva kapasitiivisen energiakeräimen toimintaketjusta.

Kapasitiivinen energiakeräin koostuu neljästä osasta: 1 elektrodilevystä, johon muodostuu jännite-ero. 2 Energian keräyselektroniikasta, joka kerää energiaa talteen jännite-erosta. 3 Energian varastointielektroniikasta, joka varastoi kerätyn energian superkondensaattoriin tai pieneen akkuun, sekä 4 energiankeräyspiiristä. Vaikka kerätyn energian määrä on pieni, sitä tulee saada kerättyä jatkuvasti. Kerätyn energian hallintaan ja varastointiin käytettiin Texas Instrumentin piiriä BQ25570, joka itse kuluttaa hyvin vähän energiaa. Energia varastoidaan superkondensaattoriin, josta voidaan ottaa varastoitu energia IoT-laitteelle, kunhan superkondensaattori on varautunut tarpeeksi.

Kondensaattorin tai pienen akun energian varastointikyvyn valintaan vaikuttavat muun muassa saatavilla olevan energian määrä ja kuinka paljon energiaa IoT-laitteen tiedonsiirto vaatii. Lähetystekniikoissa on suuria eroja energiankulutuksen suhteen ja niihin ei tässä työssä perehdytä tarkemmin. Yleisesti suuremman energiankulutuksen lähetystekniikka vaatii suuremman energiavaraston, mikä taas pidentää energiankeräimen latausaikaa ennen kuin haluttu jännitetaso saavutetaan. Seuraavaksi esitetään energiakeräimen valmistusta ja siitä saatuja mittaustuloksia.

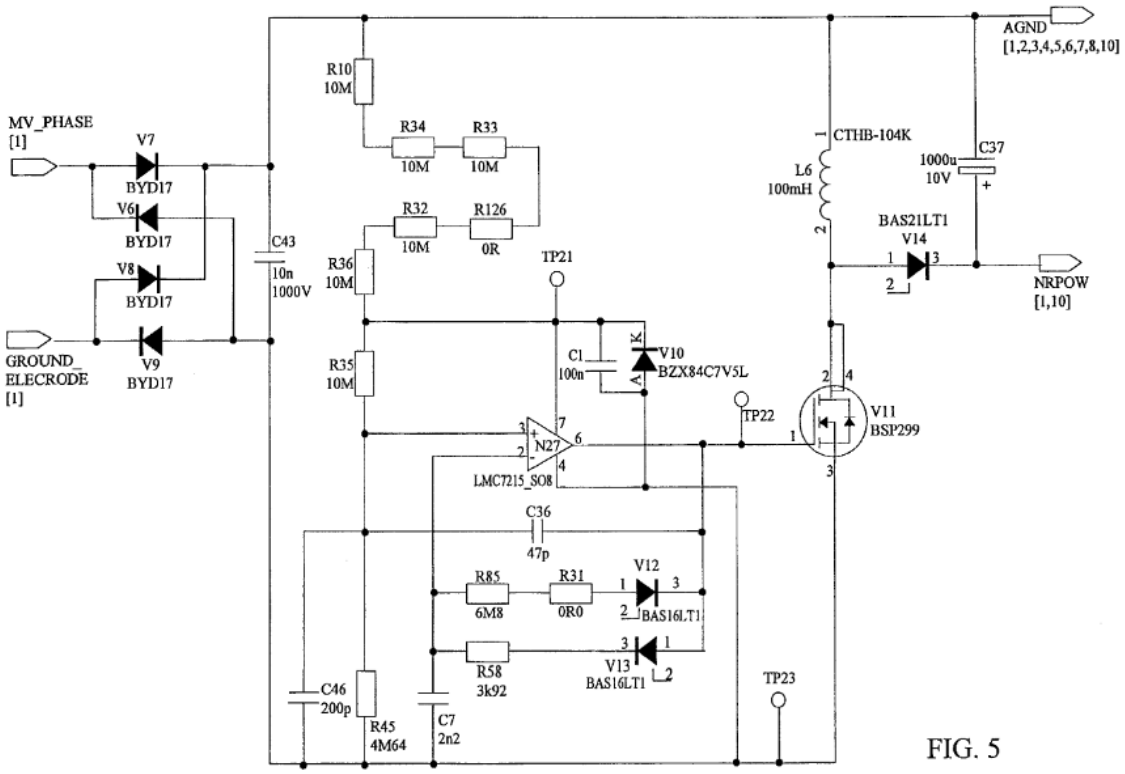
5.1 Prototyyppi n. 1



Kuva 22. Kapasitiivisen energiakeräimen periaatekuva korkeassa potentiaalissa.

Ensimmäinen versio kapasitiivisesta energiakeräimestä suunniteltiin hyödyntäen ABB:n kehittämää kapasitiivistä energiakeräintä, josta löytyi vanhentunut patentti US 6646859 B2 (Vähämäki ja muut, 2003). Tällä prototyypillä testattiin esitetyn laitteen todellinen toimivuus käytännössä. Keräimen toiminta kuvaillaan tekstissä tarkasti ja suositeltu asennustapa on korkeaan potentiaaliin. On myös varmistettu, että samalla menetelmällä voidaan kerätä eri tavoilla ja olosuhteissa sekä eri käyttökohteista energiaa (Vähämäki ja muut, 2003).

Kuvassa 23 on esitetty piirikaavio, jota käytettiin suunnittelutyön. Kuvan 23 työtä käytettiin pohjana ensimmäiselle prototyypille. Ensimmäisellä versiolla haluttiin selvittää alustavia jännitteitä, virtoja ja tehoja, joita on mahdollista saada.

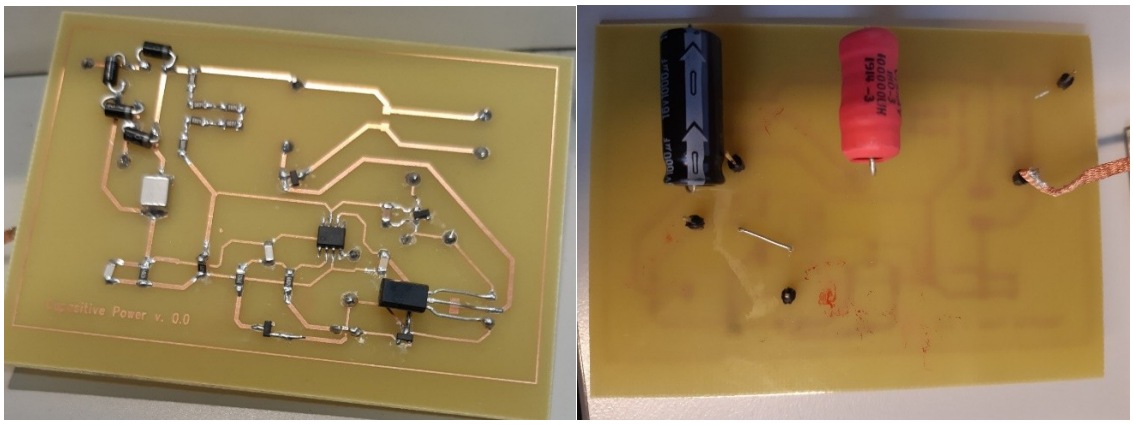


Kuva 23. Piirikaavio kapasitiiviselle energiakeräimelle (Vähämäki ja muut, 2003).

5.1.1 Piirilevyn suunnittelu ja valmistus

Kuvassa 24 esitetään ensimmäinen kapasitiivisen energiakeräimen prototyyppi kalustettuna. Prototyyppi valmistettiin itse Technobothnian elektroniikanlaboratoriossa 1-puoliselle FR4 piirilevymateriaalille. Komponentteina käytettiin pääasiassa pintaliitoskomponentteja, joiden lisäksi muutamia läpiladottavia komponentteja. Komponentit juotettiin paikoilleen käsin. Juotteiden ja kuparireititysten johtavuus varmistettiin yleismittarilla. Testimittauspisteitä varten laitettiin yksittäisiä piikkejä, joihin saatiin mittausjohtimet kiinni. Myös sisääntuloille laitettiin yksittäiset piikit. Ulostulona käytetään kuvan 24b mustan kondensaattorin jalkoja.

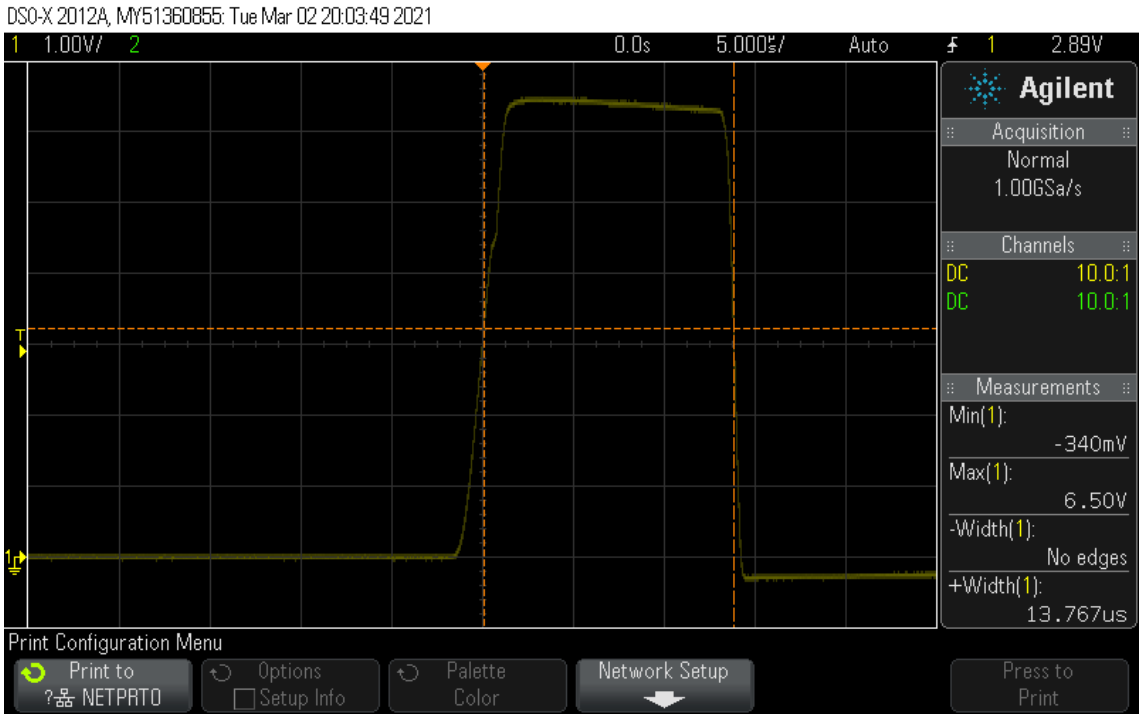
5.1.2 Piirilevyn kalustaminen



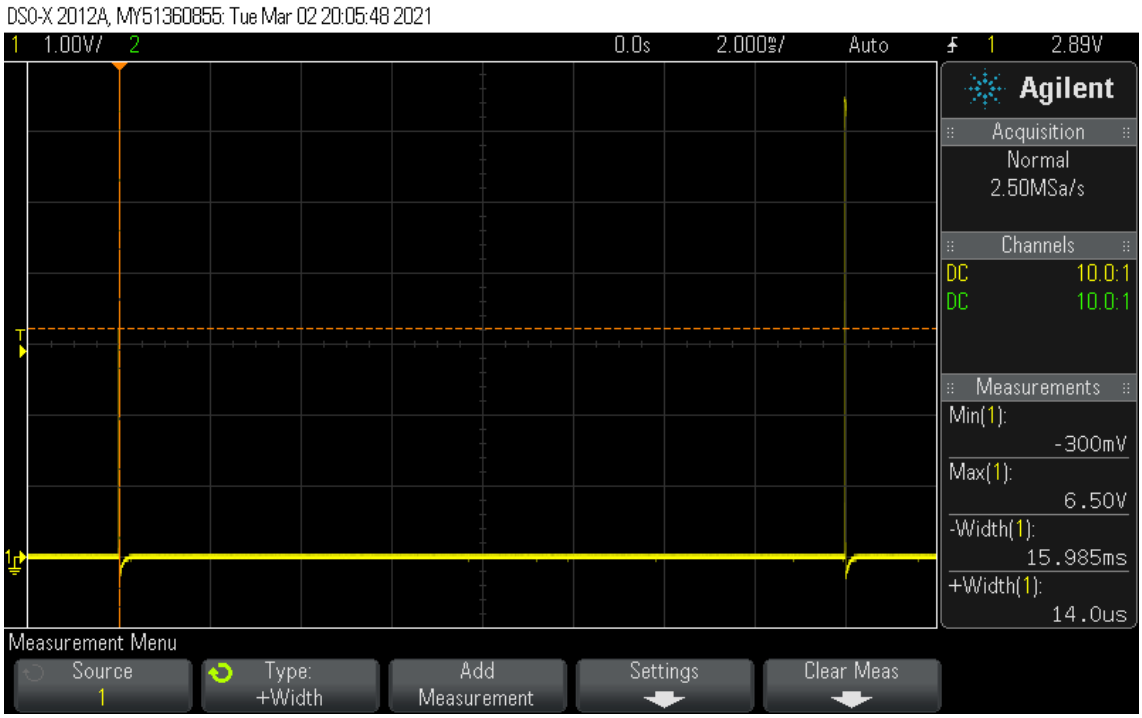
a) b)

Kuva 24. Ensimmäinen kapasitiivinen energiakeräin prototyyppi kalustettuna. a) pinta-liitoskomponentit. b) läpiladottavat komponentit, mittapisteet ja johdin elektrodilta.

Komparaattorin pulssisignaalien toiminta mitattiin oskilloskoopilla. Tulokset signaalin jännitteestä, kestosta ja väliajasta on esitetty kuvissa 25 ja 26.



Kuva 25. Komparaattorin lähettämä 6,5 V pulssisignaali, joka kestää 13,8 µs.



Kuva 26. Pulssisignaalien väli, joka on 15,99 ms.

Komparaattorin pulssisignaalilla ohjataan energiakeräimen MOSFET:iä, joka katkaisee kondensaattorin purkausvirtapiirin. Aina kun ohjaussignaali on päällä, energiakeräimen ulostulon kondensaattori latautuu. Virtapiirin pitää olla myös välillä kiinni, koska johtaessa virta purkautuu sisääntulon kondensaattorista. Virta kulkee kelan läpi, joka vastustaa virran muutosta. Aina kun virtapiiri aukeaa pulssisignaalin takia, kela pakottaa virtaa ulostulon kondensaattoriin. Pulssin jälkeen purkausvirtapiiri sulkeutuu ja virran kulku kelan läpi kiihtyy uudestaan. Kuvassa 25 esitetään komparaattorin pulssisignaali, jonka ajan kelan läpi kulkema virta ohjautuu ulostulon kondensaattoriin. 6.5 V jännite pitää FET:n ohjauksen auki noin 14 µs. Kuvassa 26 esitetään kahden pulssisignaalin väli, joka on noin 16 ms. Tämän ajan sisääntulon kondensaattori purkautuu ja purkautumisvirta kulkee kelan läpi. Tällä ajan jaksolla ulostulon kondensaattori ei lataudu.

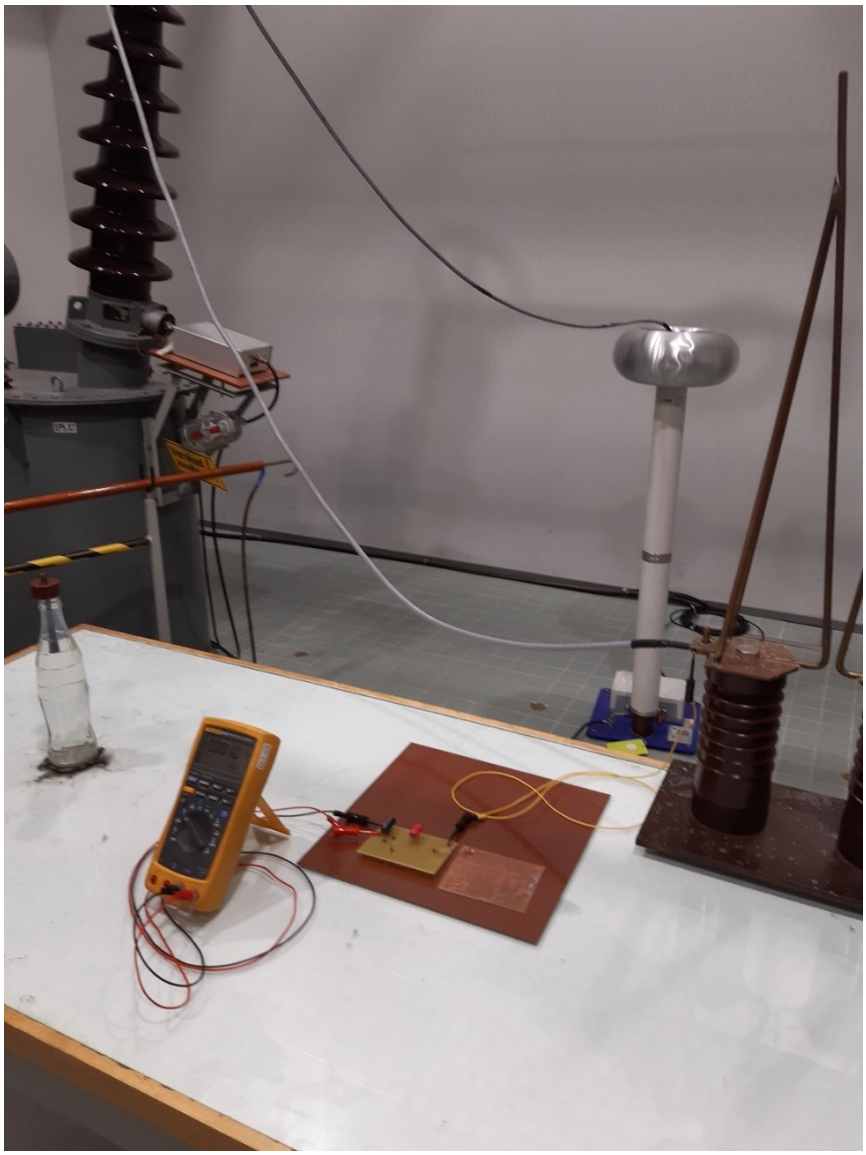
Tulosten perusteella voidaan olettaa kapasitiivisen energiakeräimen toimivan, mikäli sisääntulon kondensaattori latautuu. Komparaattorin toimintaa säätelevät vastukset ja kondensaattorit, joiden arvoja muuttamalla signaalipulssin kestoa ja väliä voidaan säätää.

Tässä vaiheessa ei ollut tietoa ovatko nämä arvot kaikkein optimaaliset. Näillä arvoilla suoritettiin ensimmäisen prototyypin testit.

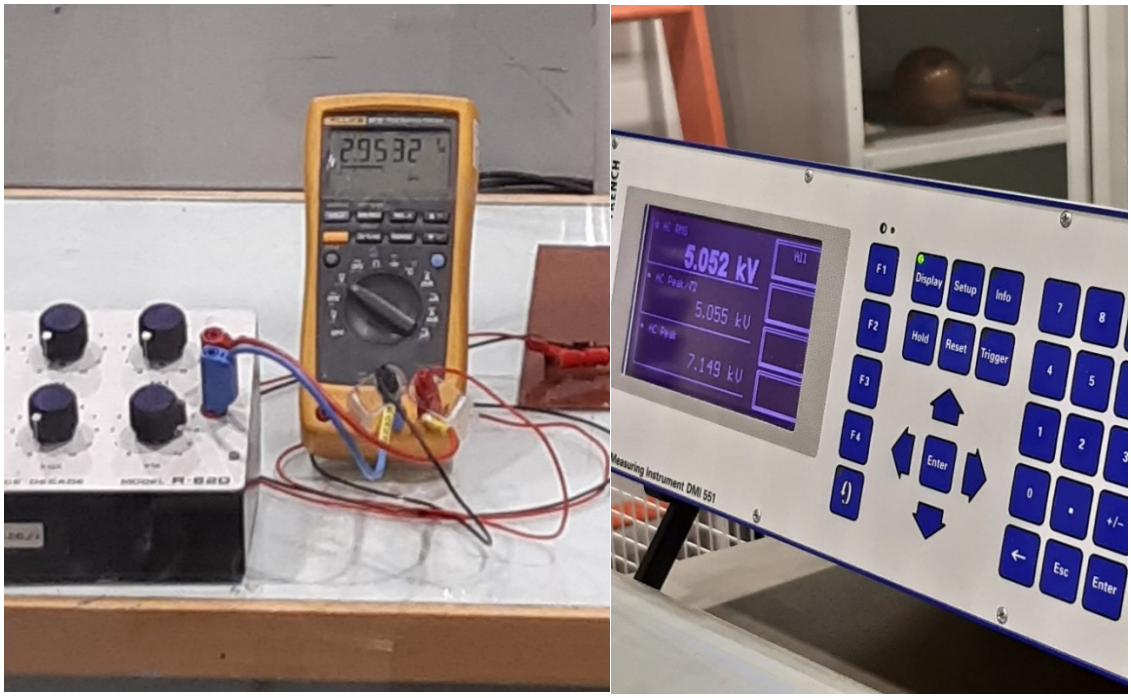
5.1.3 Laboratoriotestit

Laboratoriotestit suoritettiin Technobothnian suurjännitelaboratoriossa, jossa saadaan simuloitua ilmajohdossa kulkeva jännite aina 200 kV asti. Testit tehtiin 20 kV ja 110 kV jännitteillä, koska ne ovat yleisimpiä siirtojännitteitä Suomessa.

Testissä kapasitiivinen energiakeräin oli kytketty korkeaan potentiaaliin. Keräin oli kytketty suoraan kiinni suurjännitelinjaan ja elektrodi levy oli asetettu maapotentiaalia vasten. Elektrodilevynä toimi FR4-levy, jollaiseen piiri oli tehty. Energiakeräimen piirilevy ja elektrodi olivat eristetty yksipuolisella FR4-levyllä, jonka toisella puolella oli maapotentiaali. Elektrodin ja maapotentiaalin etäisyys on 0,5 cm ja välissä on eriste. Yleismittari mittaa jännitettä keräimen ulostulossa olevan kondensaattorin yli. Kondensaattorin jännite on sama, jota käytetään ulostulona. Mittauksessa kondensaattorin rinnalle kytkettiin säätövastus, joka kuvastaa ulostulon kuormaa. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Mittausjärjestely. Kapasitiivinen energiakeräin on kytketty suoraan jännitelinjaan Jacobin tikkaiden kautta. Keräin on eristetty yksipuolisen FR4 levyn päälle ja on vain kapasitiivisesti yhteydessä maahan. Kytkentä on korkea potentiaalissa.



a) b)

Kuva 28. Mittaustulokset. a) Ulostuloon kytketyn säätövastuksen yli mitattu jännite. b) Jännite sähkölinjassa, johon kapasitiivinen energiakeräin on kiinnitetty.

Kuvassa 29 on säätövastus, joka on kytketty kapasitiivisen energiakeräimen perään. Säätövastukseen on asetettu 8 kΩ vastus. Yleismittari on kytketty mittaamaan energiakeräimen ulostulon jännitettä vastuksen yli. Kuvassa 29 on jännitelinjaan syötetty jännite 5,052 kV. Näillä tiedoilla voidaan laskea kapasitiivisen energiakeräimen ulostulon teho kaavalla

$$P = UI, \tag{6}$$

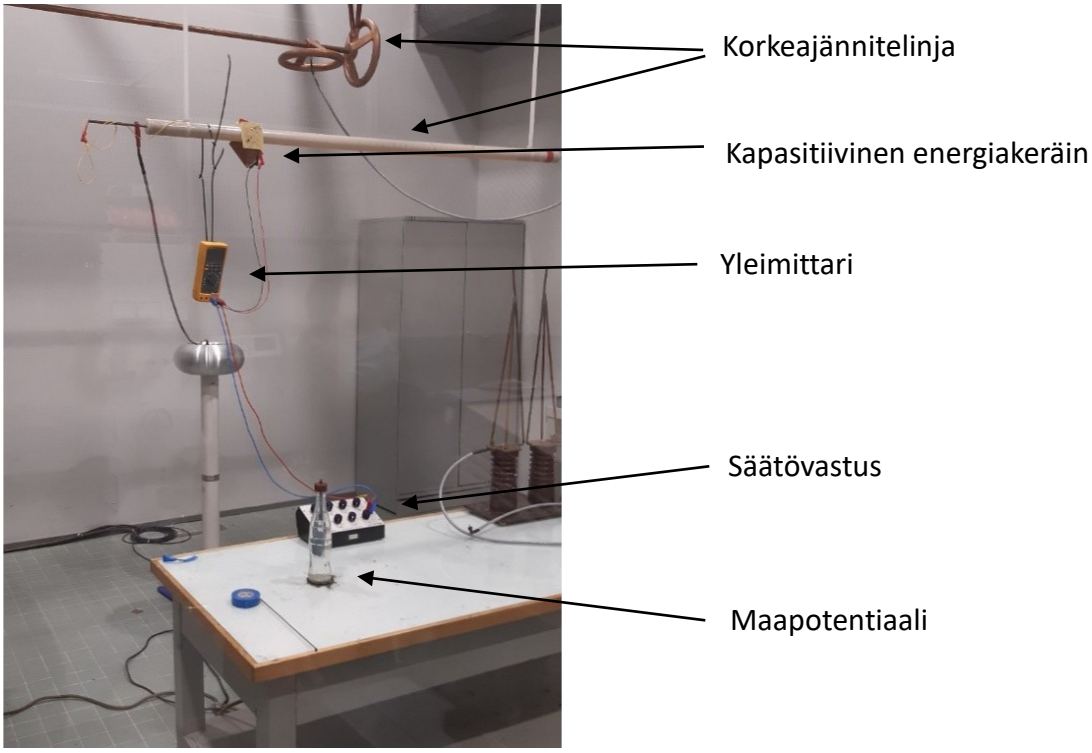
kun

$$I = \frac{U}{R}. \tag{7}$$

Näitä yhdistämällä saadaan

$$P = \frac{U^2}{R}, \tag{8}$$

jolla voidaan laskea ulostulon teho. Ulostulon teho on noin 1,1 mW.



Kuva 29 Testijärjestely keräimelle. Keräin on johtimen ympärillä, johon syötetään 10 kV. Säätövastuksessa on 5 kΩ. Keräimen tuottama jännite saadaan jännitemittarilla, jonka lukema on 0,0745V.

5.1.4 Kenttätesti

Laboratoriotesteissä prototyypistä hajosi FET, joten sillä ei ehditty tekemään kenttätestejä. Vian löytäminenkin kesti niin kauan, että päätettiin jo ennen sen löytymistä alkaa valmistamaan seuraavaa prototyyppiä. FET vika löytyi vasta myöhemmin, kun ymmärrettiin paremmin jännitteiden suuruuksia ja alettiin epäilemään FET:n kestävyyttä.

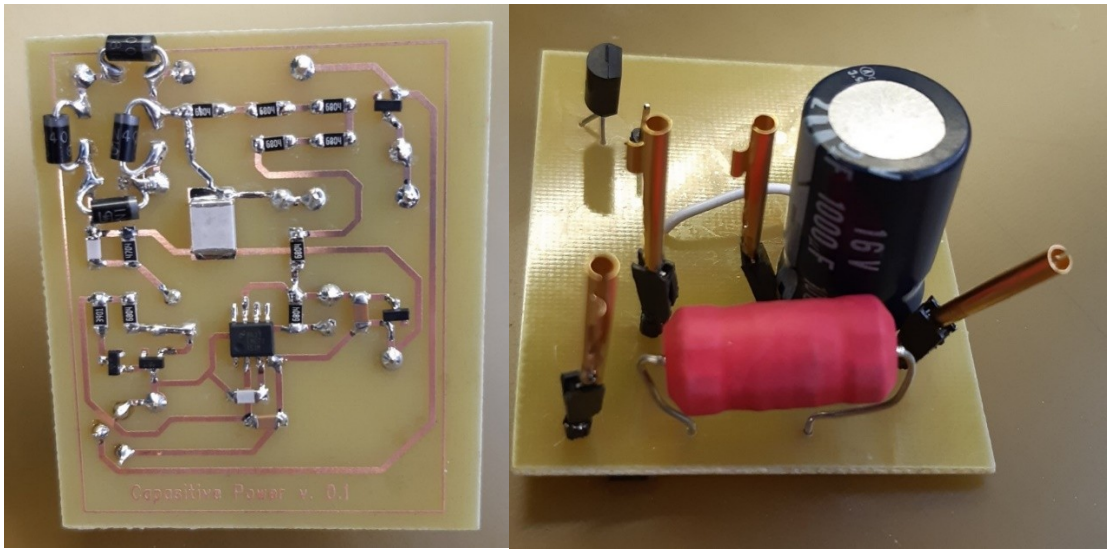
5.2 Prototyyppi n. 2

Ensimmäinen prototyyppi hajosi kenttätesteissä ja sen suuri koko koettiin suureksi ongelmaksi, joten seuraavasta versiosta päätettiin tehdä pienempi. Suunnittelussa mietittiin myös testien kasvava tarve, joten johtimien liittämiseksi tehtiin helpotuksia. Koon pienemisen ajateltiin myös vähentävän häviöitä, mutta johtimien vastus on niin pieni, ettei siitä havaittu tässä olevan merkitystä.

Tässä kohtaa tuli myös olennaiseksi varastoida energia kondensaattoriin, josta IoT-laite voisi saada tarvitsemansa energian. Seuraavaksi tutustutaan toiseen versioon kapasitiivisesta energiakeräimestä ja sitten energian hallintaan.

5.2.1 Piirilevyn kalustaminen

Kuvassa 30 esitetään energiakeräimen toinen prototyyppi kalustettuna. Nyt piirilevyn koko on huomattavasti pienempi. Johteiden resistanssiin tällä ei kuitenkaan juuri ole vaikutusta, vaikka reititykset ovat nyt lyhyemmät. Tämä versio suunniteltiin testejä varten, joten levylle laitettiin liittimet johdinten kiinnittämisen helpottamiseksi. Muuten komponentit ovat samat kuin ensimmäisessä prototyypissä.

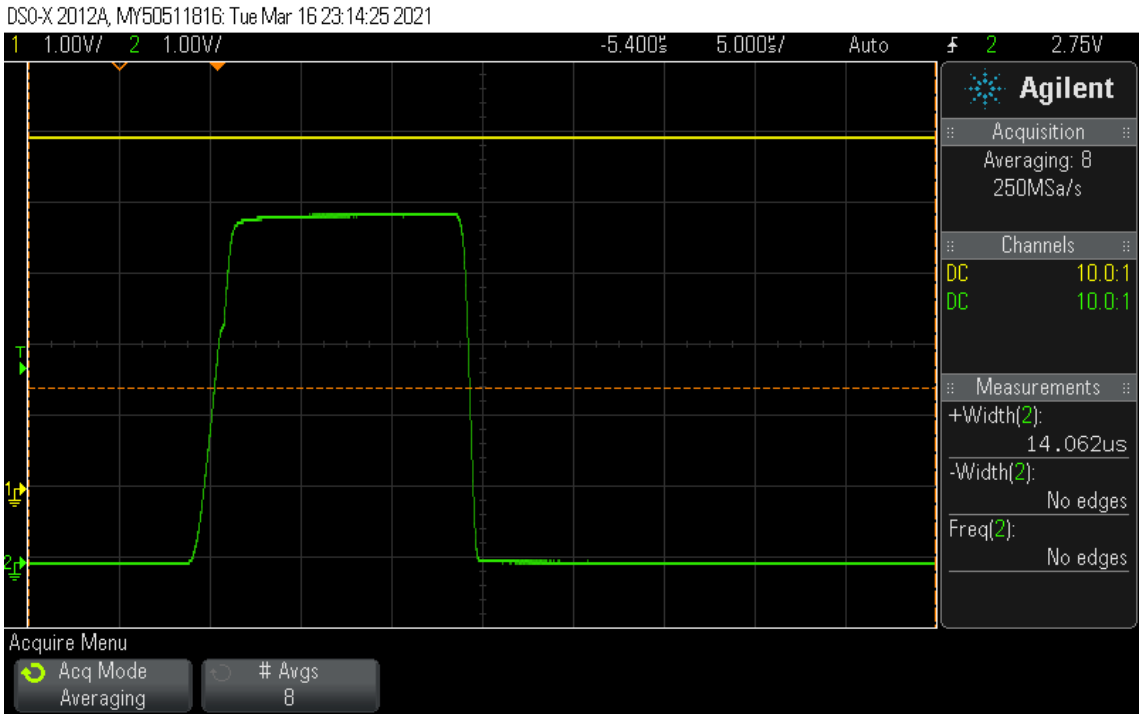


Kuva 30 Prototyyppi 2 piirilevy kalustettuna pintaliitoskomponenteilla.

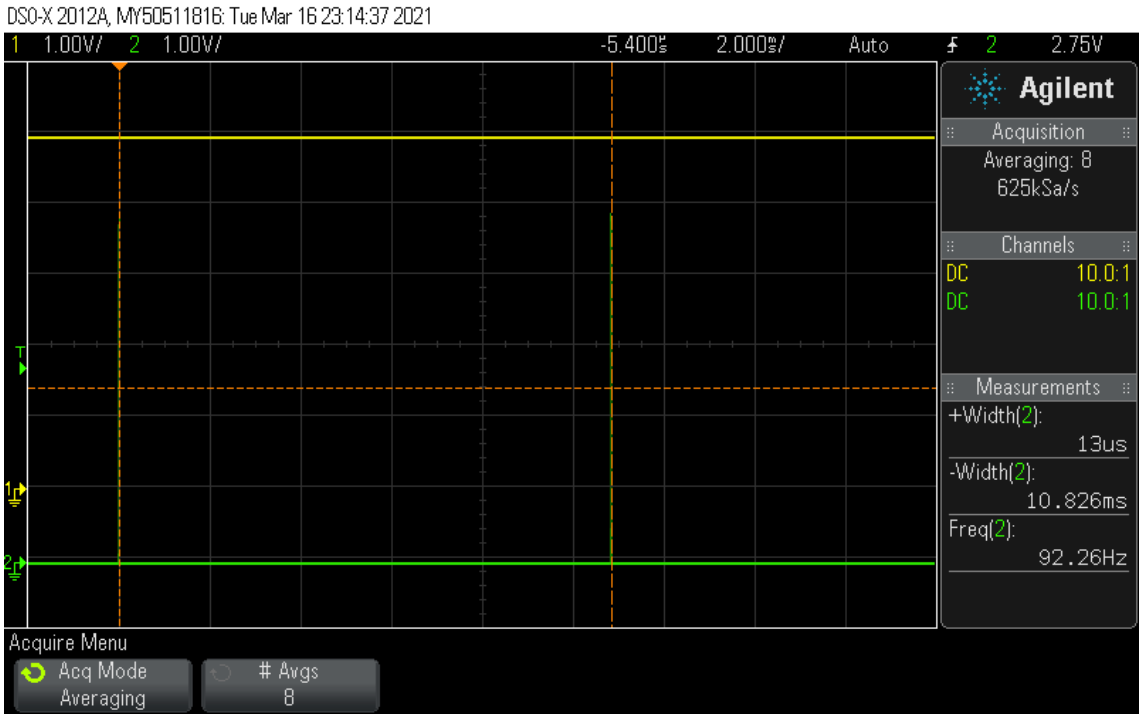
Kuvassa 30 näkyy läpiladotut komponentit ja mittauksia varten tehdyt mittauspisteet. Etualalla näkyvät johtoliittimet ovat tarkoitettu keräimen sisään- ja ulostuloiksi. Kondensaattorin vieressä olevat liittimet taas ovat kerätyn energian ulostulot ja niistä energia ohjataan eteenpäin energianhallinta piirille.

Toisen prototyypin perään lisättiin energianhallintaelektroniikka. Energianhallinta-elektroniikaksi päätettiin kokeilla Texas Instrumentin bq25570 koekytkentälevyä. Sitä suositellaan erityisesti pienivirtaisten energiakeräinten käyttöön sen pienen kulutuksen takia.

Komparaattorin suoritusmittaukset on esitetty kuvissa 31 ja 32. Kuvassa 31 on komparaattorin ohjaussignaalin kesto, joka on noin 14,06 µs ja jännite nousee noin 4,8 V. Kuvassa 32 esitetään ohjaussignaalien väli, joka on 10,83 ms.



Kuva 31. Komparaattorin ohjaussignaalin kesto ja jännite.



Kuva 32. Komparaattorin ohjaussignaalien esiintymisväli.

Molempien energiakeräinten komparaattorien toiminta on koottu taulukoon 3. Laskemalla signaalin jännitettä voidaan signaalin kestoa pidentää, jolloin enemmän virtaa ohjautuu energiahallintapiirille. Signaalien väli myös lyheni, eli aikaväli, jolloin energia ei siirry ulostuloon. Taulukko 3 osoittaa, että toinen version kapasitiivisesta energiakeräimestä siirtää useammin ja kauemmin virtaa ulostuloon, kuin ensimmäisen versio.

Taulukko 3. Vertailu komparaattorien toiminnasta.

	Ensimmäinen versio	Toinen versio
Signaalin jännite (V)	6,5 V	5,8 V
Signaalin kesto	13,767 us	16,062 us
Signaalien väli	15,985 ms	10,826 ms

5.2.2 Energianhallintapiiri

Kapasitiivinen energiakeräin varastoi energia superkondensaattoriin, jonka lataus tapahtuu kuitenkin hitaasti. Suoraan superkondensaattoriin kytketty laite kuluttaa varausta välittömästi. Tällöin laite ei saa tarvitsemaansa määrää energiaa suorittaakseen mittauksen ja lähetyksen. Koska energiakeräimen teho on pieni, tarvitaan energian varastointia, joka lataa kondensaattoria enemmän ennen kuin IoT-laite alkaa kuluttaa energiaa.

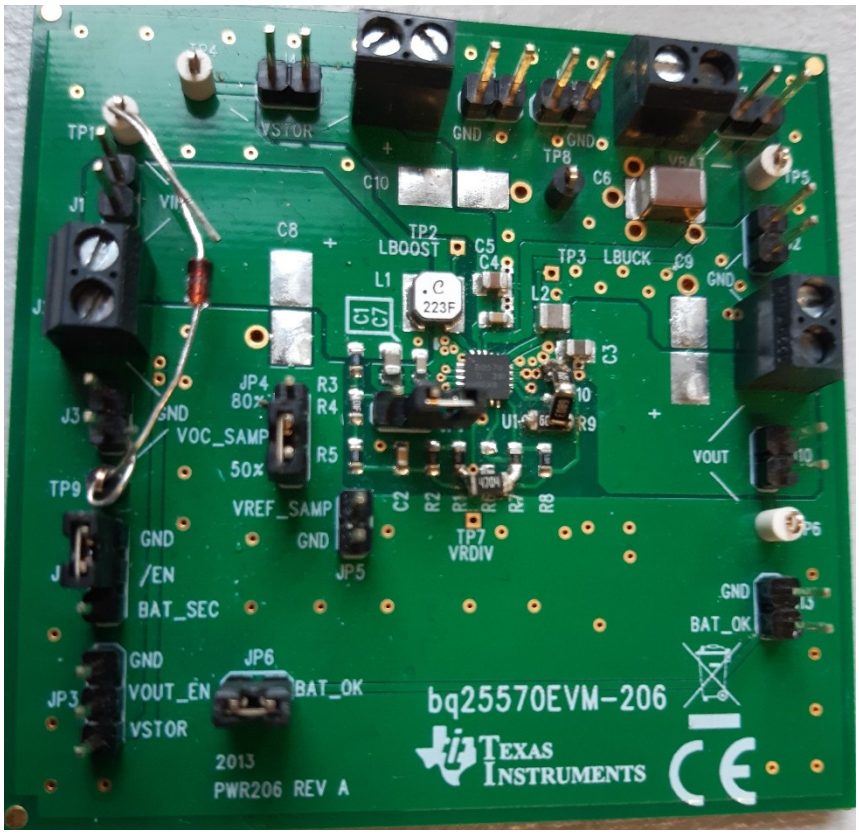
Tässä työssä käytetään Texas Instrumentin bq25570 akunlatauskoekytkentäpiirilevyä, joka on suunniteltu käytettäväksi PMIC-piirinä (Power Management Integrated Circuit). Piiri kykenee ottamaan talteen energiaa matalajännitteisistä lähteistä, kuten aurinkokennoista, lämpöenergiaa hyödyntävistä termoelektrisistä generaattoreista (TEG) tai piezosähköisistä ilmiöistä (Texas Instruments, 2019).

Kylmäkäynnistysjännitteeksi riittää 600 mV. Sen jälkeen piiri on erittäin pienivirtainen ja jatkuva energian keräys alkaa jo 100 mV syöttöjännitteellä. Syöttöjännitteen maksimi kapasiteetti on 5,1 V. Ulostulojännite voidaan säätää 2 V ja 5,5 V välillä (Texas Instruments, 2019).

Tällä koekytkentälevyllä on mahdollista vastusten arvoja vaihtamalla ohjelmoida ladattavan superkondensaattorin ylijännitesuojaa, ulostulojännitettä ja ulostulon aktivointijännitettä. Näillä säädöillä on tärkeä merkitys, koska näillä voidaan varmistaa kondensaattorin varaus ennen ulostulon kytkemistä. Ulostulon jännitteen säädöillä voidaan taata IoT-laitteille sopiva jännite. Suurin ongelma tällä koekytkentälevyllä on virransyöttö, sillä ulostulo pystyy vain 110 mA piikkeihin. Jatkuva virransyöttö on noin 100 mA (Texas Instruments, 2019).

Testeissä käytetään pääsääntöisesti 0,47 mF kondensaattoria, jonka jännitteen kestävyys on 5,5 V. IoT-laitteena toimii RuuviTag, joka suorittaa mittaukset ja lähetystekniikkana toimii Bluetooth. Osassa testeissä ei ole käytetty IoT-laitetta vaan on laskettu kondensaattorin latautumista.

Tämä on ongelma, koska osa lähetystekniikoista vaativat huomattavasti enemmän virtaa, kuten kappaleessa 4.1 esitettiin. Varsinkin jos lähetystehoa halutaan lisätä niin, että kuuluvuus kantaa kilometrejä, voidaan tarvita suurempia virtapiikkejä. Tässä työssä on käytetty Bluetooth-lähetystekniikkaa, jonka kantavuus on kymmeniä metrejä.



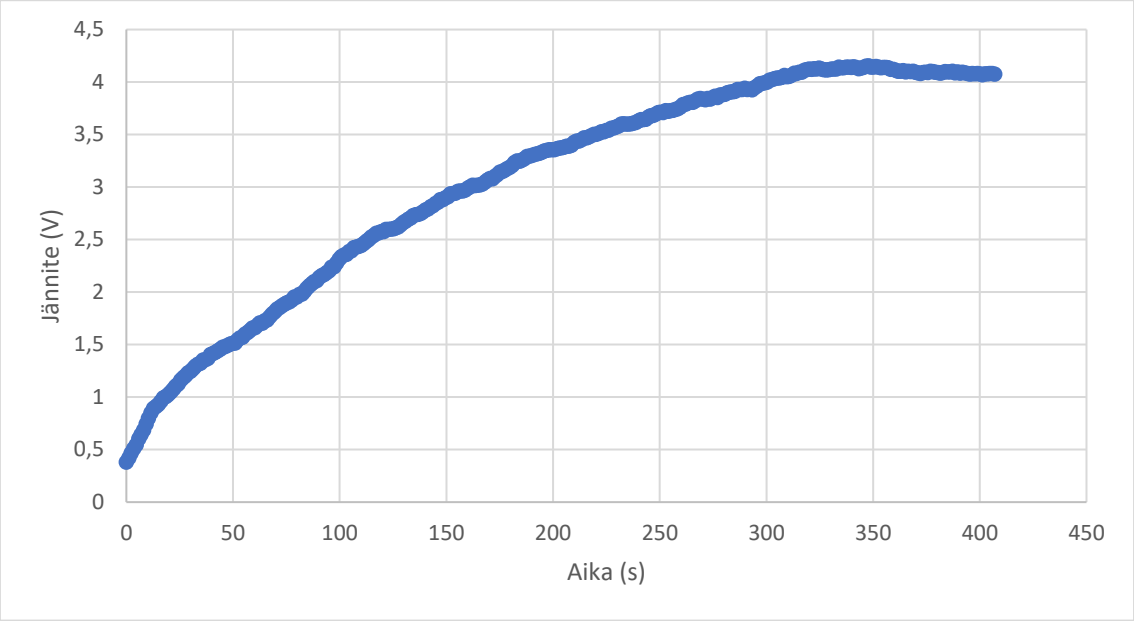
Kuva 33. Texas Instrumentin BQ25570EVM koekytkentälevy.

5.2.3 Laboratoriotestit

5.2.3.1 Korkeassa potentiaalissa 20 kV linjassa

Kapasitiivisen energiakeräimen toinen versio testattiin korkeassa potentiaalissa. Energiakeräin asetettiin korkeajännitelinjaan galvaanisella yhteydellä. Viereinen jännitelinja oli 110 cm päässä ja oli maadoitettu. Kokeessa tavoitteena oli selvittää superkondensaattorin latausteho. Kondensaattoriin kerätty energia käytettäisiin IoT-laitteelle. Kuvassa 34

esitetään kondensaattorin latautuminen ajan funktiona. Kondensaattorina toimii 0,047 F superkondensaattori, joka kestää 5,5 V jännitettä. Elektrodina toimii alumiiniteipistä tehty levy, jonka koko on 11 cm x 11 cm. Keräimen energian hallinnassa käytetään Texas Instrumentin bq25570 koekytkentälevyä. Koekytkentälevy oli säädetty lataamaan superkondensaattori enintään 4,2 V, jottei sen jännitteenkestävyys ylity. Tästä syystä varaus tasoittuu 4,2 V paikkeille.



Kuva 34. Superkondensaattorin latautuminen korkeassa potentiaalissa 20 kV linjassa ajan funktiona.

Kuvan 34 graafista voidaan laskea keskimääräinen tehon muutos kondensaattorin latautumiselle kaavalla

$$P_{tot} = P_{300} - P_0, \tag{9}$$

jossa P_{300} on teho ajan hetkellä 300 s ja P_0 teho ajan hetkellä 0. Teho lasketaan kaavalla

$$P = \frac{E}{t}, \tag{10}$$

jossa *E* on energia ja t on aika sekunteina. Energia saadaan laskettua kaavalla

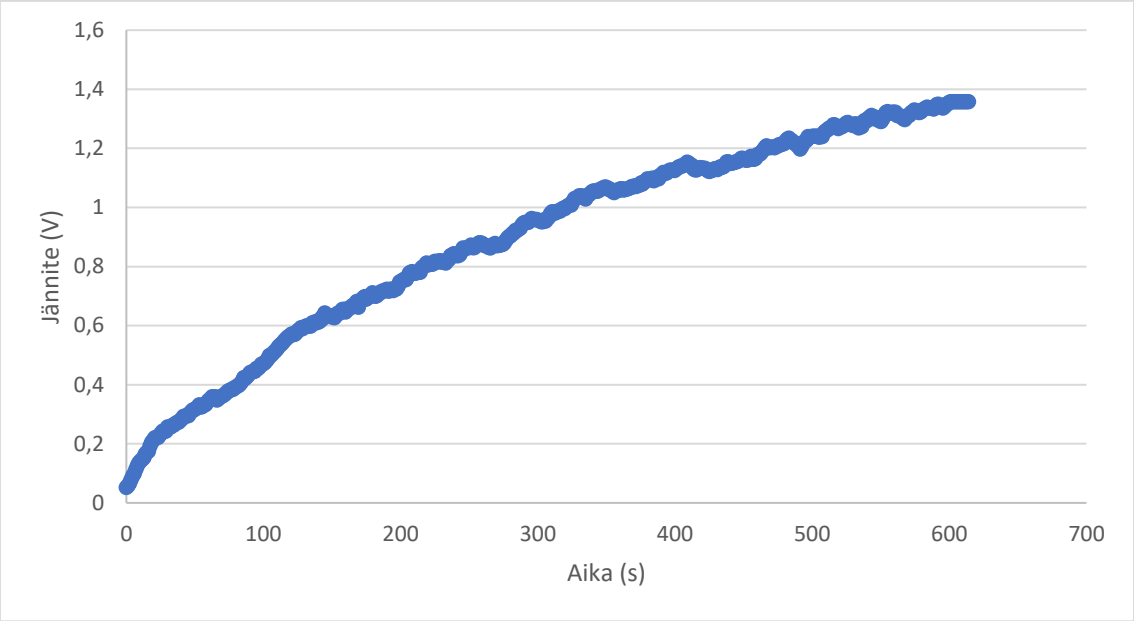
$$E = \frac{1}{2}CU^2, \tag{11}$$

jossa *C* on kapasitanssi ja *U* on kondensaattorin jännite. Nyt voidaan laskea kondensaattorin energia ajan hetkellä 0 ja 300 s. Siitä lasketaan energian muutos 300 sekunnin

aikana ja näin saadaan keskimääräinen kondensaattorin latautumisteho. Keskiarvoiseksi tehoksi saadaan noin 1,4 mW.

5.2.3.2 Matalassa potentiaalissa 20 kV linjassa

Keräin testattiin myös matalassa potentiaalissa. Tässä testissä energiakeräin asetettiin 120 cm suoraan jännitelinjan alle. Kuvassa 35 on kuvattu kondensaattorin latautuminen 20 kV jännitelinjan alla kapasitiivisella energiakeräimellä.



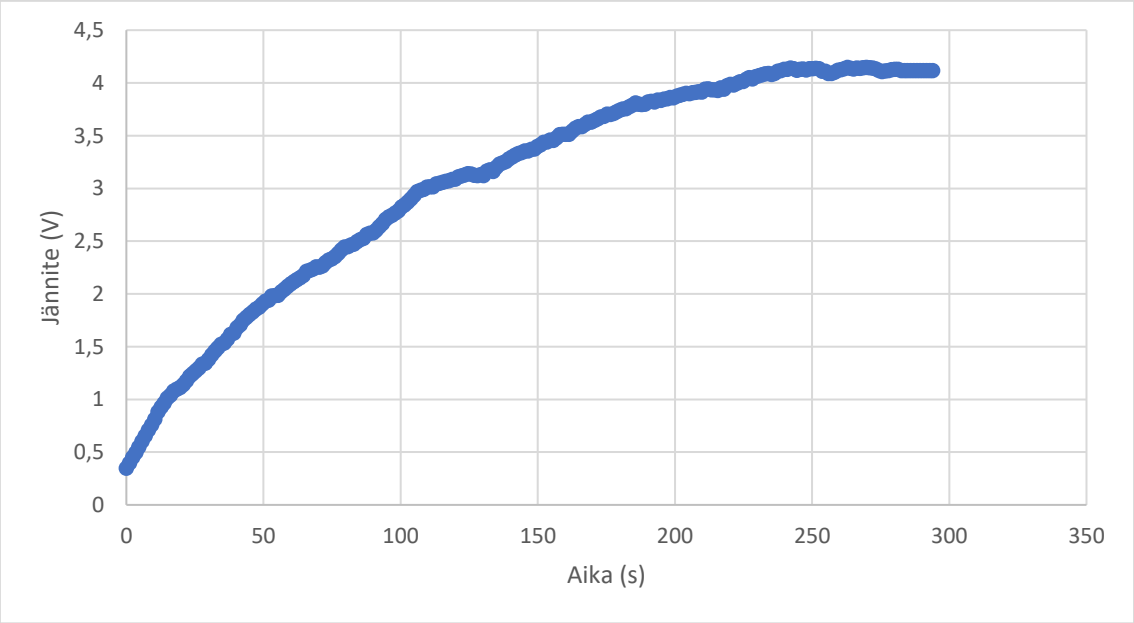
Kuva 35. Superkondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 20 kV linjan alla ajan funktiona.

Kuten aiemmin myös tästä voidaan laskea keskimääräinen teho, jolla kondensaattori latautuu. Tässä teho on noin 0,08 mW.

Keskimääräinen teho on matalampi matalassa potentiaalissa, koska sähkökenttä on heikompi, kuin korkeassa potentiaalissa. Tämä vaikuttaa suoraan kerättävän energian määrään. Kondensaattori ei latautunut edes täyteen asti 10 minuutin aikana. Oikeassa ympäristössä tässä pitäisi vain ottaa huomioon tarpeeksi pitkä latausaika, koska energiaa olisi koko ajan tarjolla.

5.2.3.3 Matalassa potentiaalissa 63,5 kV linjassa

Kuvassa 36 esitetään kondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 120 cm jännitelinjan alapuolella. Jännite on nostettu 63,5 kV, joka kuvastaa 110 kV pääjännitteen vaihejännitettä kolmivaihejärjestelmässä. Kondensaattorin jännite tasoittuu 4,2 V paikkeille ylijännitteen välttämiseksi. Keskimääräinen teho tässä on 1,8 mW.



Kuva 36. Kapasitiivinen energiakeräin matalassa potentiaalissa 120 cm 63,5 kV jännitelinjan alla.

5.2.4 Kenttätestit

Energiakeräimellä tehtiin kenttätestit 110 kV ja 400 kV jännitelinjojen alla. Etäisyys jännitelinjoihin oli noin 17 metriä ja se mitattiin silmämääräisesti. Elektrodilevy oli nostettu n. 250 cm korkeuteen ja energiakeräin oli maadoitettu. Testeissä ei käytetty energianhallintapiiriä, vaan testeissä mitattiin energiakeräimen ulostulon kondensaattorin jännitteen muutosta yleismittarilla.

Testissä kondensaattorin jännite nousi tasaisesti 0,1 V/min, kun kondensaattorilla ei ollut kuormaa. 1,42 V kohdalla kytkettiin vastus, jonka läpi meni 1 mA virta. 13 sekunnin aikana jännite putosi 1,42 V:sta 1,32 V:iin. Vastus irrotettiin ja kondensaattorin jännite nousi 1,46 volttiin. Vastus kytkettiin takaisin ja tällä kertaa se vastasi noin 100 mW kulutusta. 10 sekunnin aikana jännite putosi 1,46 V:sta 0,97 V:iin, kun kulutus oli noin 100 mW. Latautuminen nollasta 1,5 volttiin kesti energiakeräimeltä noin 15 minuuttia.

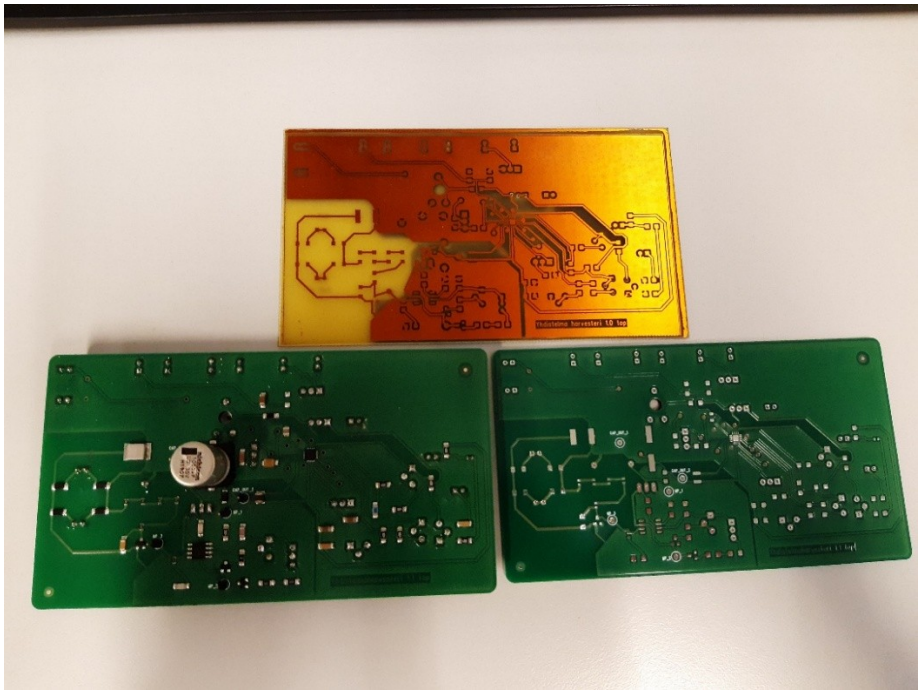
400 kV jännitelinjan alla etäisyys oli yli 20 metriä ja elektrodi oli samalla tavalla n. 250 cm korkeudessa. Kondensaattori saatiin pysymään 0,69 V jännitteessä jatkuvalla 0,1 mA kulutuksella. Jatkuva tehon kulutus oli näin ollen 69 µW. Elektrodina käytettiin 29,8 mm x 21 mm kuparilevyä.

5.3 Kapasitiivinen yhdistelmäenergiakeräin – Energiakeräin ja -hallinta samalla piirilevyllä

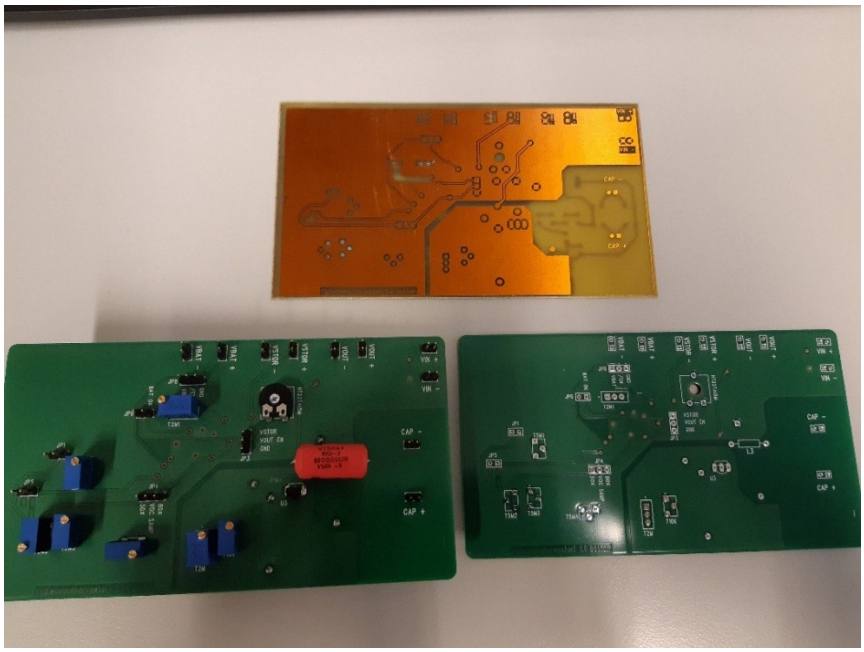
5.3.1 Piirilevyn suunnittelu

Prototyypissä n.3 yhdistettiin kapasitiivinen energiankeräys ja energianhallinta yhdelle piirilevylle. Etuna tässä on, ettei energian keräys- ja hallintapiiriä tarvitse enää kytkeä toisiinsa, vaan ne ovat jatkuvasti yhdessä. Energianhallintapiiriä voi kuitenkin käyttää ilman kapasitiivistä keräintä. Piirien välille asennettiin diodi, joka estää virran vuotamisen hallintapiiristä keräimen puolelle. Yhdistetyt piirilevyt ovat esitetty kuvissa 37 ja 38. Tätä piiriä ei enää valmistettu itse vaan se tilattiin paikalliselta yritykseltä.

Kiinteät vastukset, joilla säädellään energiakeräimen ja energianhallintapiirin toimintaa, korvattiin säätövastuksilla. Vastusarvojen muuttaminen helpottui, koska nyt ei tarvitse korvata vastuksia uusilla vaan resistanssi muuttuu säätövastuksella. Säätövastuksilla voidaan esimerkiksi säätää ulostulojännitettä ja ladattavan kondensaattorin ylijännitettä. Säätövastukset näkyvät kuvassa 38 sinisinä palikoina vasemmanpuolisessa piirilevyssä.



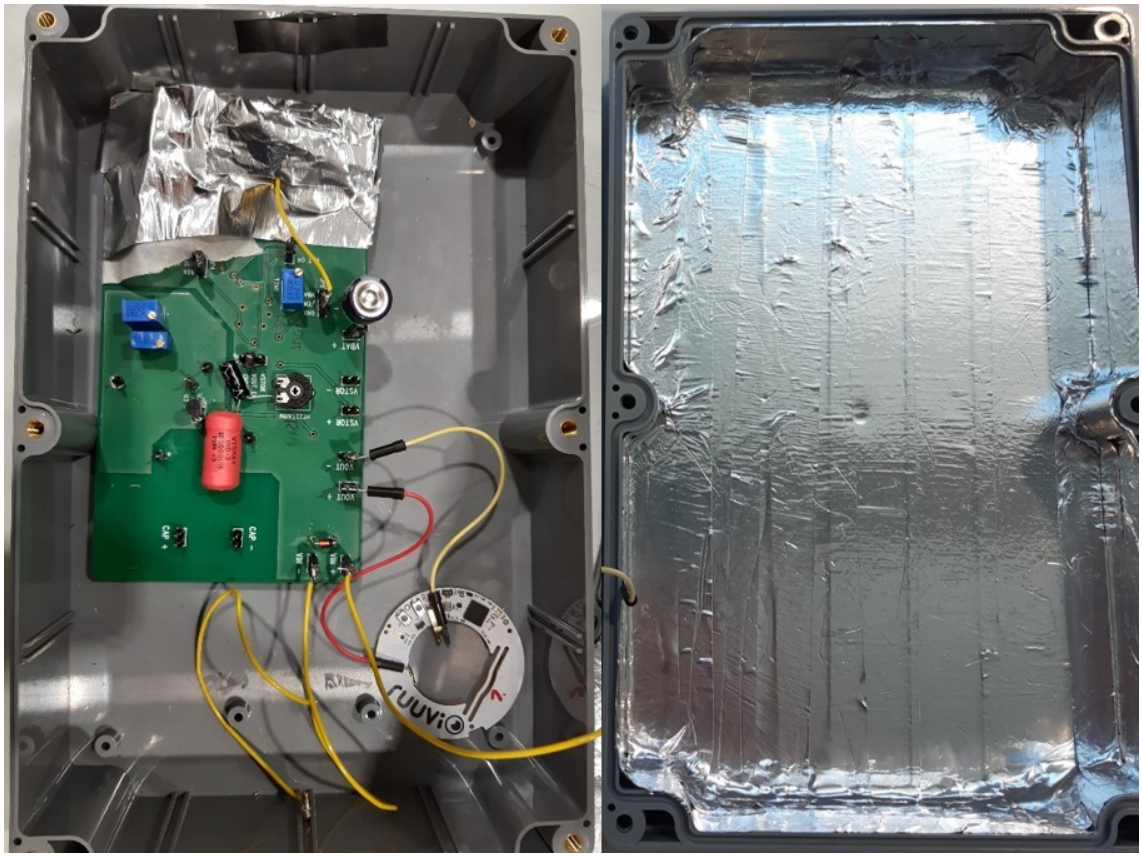
Kuva 37 Yhdistelmä energiakeräin komponentti puolelta. (Ylhäällä: itse tehty; Vasen: komponenteilla; Oikea: kalustamatta)



Kuva 38 Yhdistelmä energiakeräin säädin ja liitin puolelta. (Ylhäällä: itse tehty; Vasen: kalustettu; Oikea: kalustamatta)

Kuvassa 39 on esitetty mittausjärjestely yhdistelmäenergiakeräimelle. Vasemmalla on yhdistelmäpiiri asennettuna muovikoteloon ja oikealla on kotelon kansi, jonka pinnalle kiinnitetty energiankeräyselektrodi. Yhdistelmäkeräin on kytketty laatikon kannessa olevaan elektrodiin ja kotelon ulkopuoliseen liittimeen, johon kytketään maapotentiaali. Piirilevy on osittain peitetty alumiiniteipillä ja tällä on tarkoitus vähentää sähkökentän aiheuttamaa häiriötä säätövastuksissa. Energiavarastona toimii 5,5 V maksimissaan nouseva 4,7 mF kondensaattori. Ulostuloon on kytketty kaupallinen IoT-laite RuuviTag, joka sähköistettiin superkondensaattorilta saatavalla energialla.

Oikealla on kotelon kansi, jonka sisäpuolelle on laitettu alumiiniteippiä. Alumiinikerros muodostaa elektrodi levyn, joka viedään sähkökenttään. Elektrodin ja maapotentiaalin välinen jännite ohjataan kapasitiivisen energiakeräimen läpi. Kotelon koko on 222 x 146 x 75 mm. Alumiiniteipillä vuoratun kannen sisäpinnan pituus on 211,88 mm ja leveys 165,88 mm ja korkeus 32 mm. Koko sisäpinta on peitetty alumiinilla. Elektrodi on kytketty johtimella yhdistelmäenergiakeräimeen.



a) b)

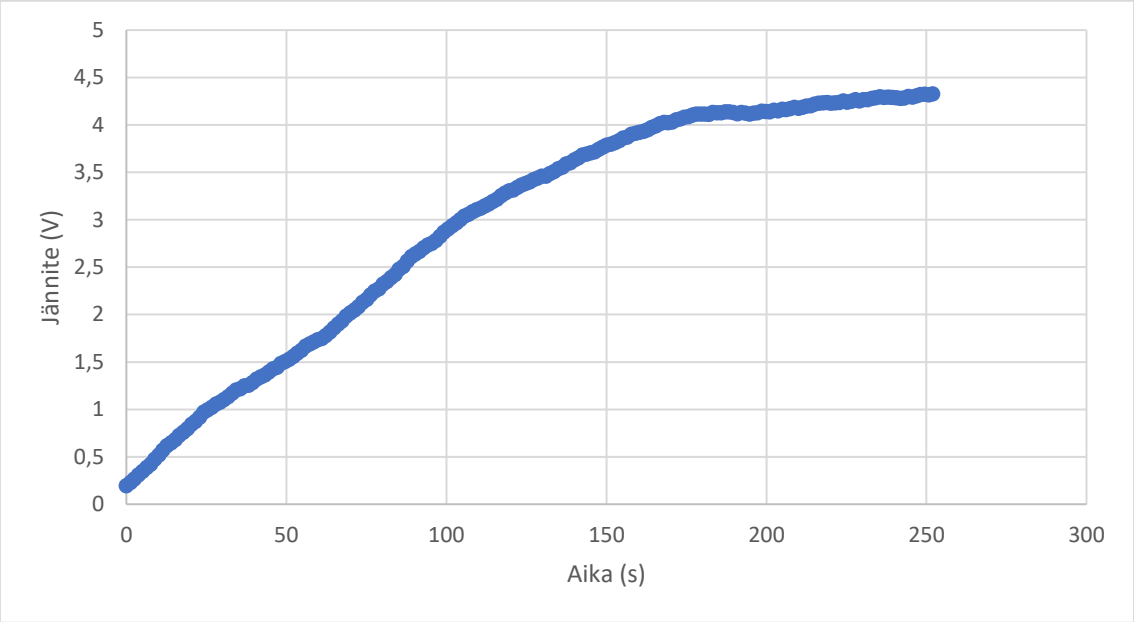
Kuva 39. Yhdistelmäenergiakeräimen toteutus testeissä. a) Yhdistelmäenergiakeräin kotelossa häiriösuojattuna ja kytkettynä RuuviTagiin. b) Alumiinikerros kannen sisäpinnalla.

5.3.2 Laboratoriotestit

Laboratoriotestit suoritettiin samalla tavalla kuten aiemmin. Keräin asetettiin sekä korkeaan potentiaaliin että matalaan potentiaaliin. Lisäksi tälle rakennettiin sähkönsiirtolinjaa jäljittelevä rakennelma, jonka tarkoituksena oli saada tietoa, keräimen toiminnasta oikeassa ympäristössään.

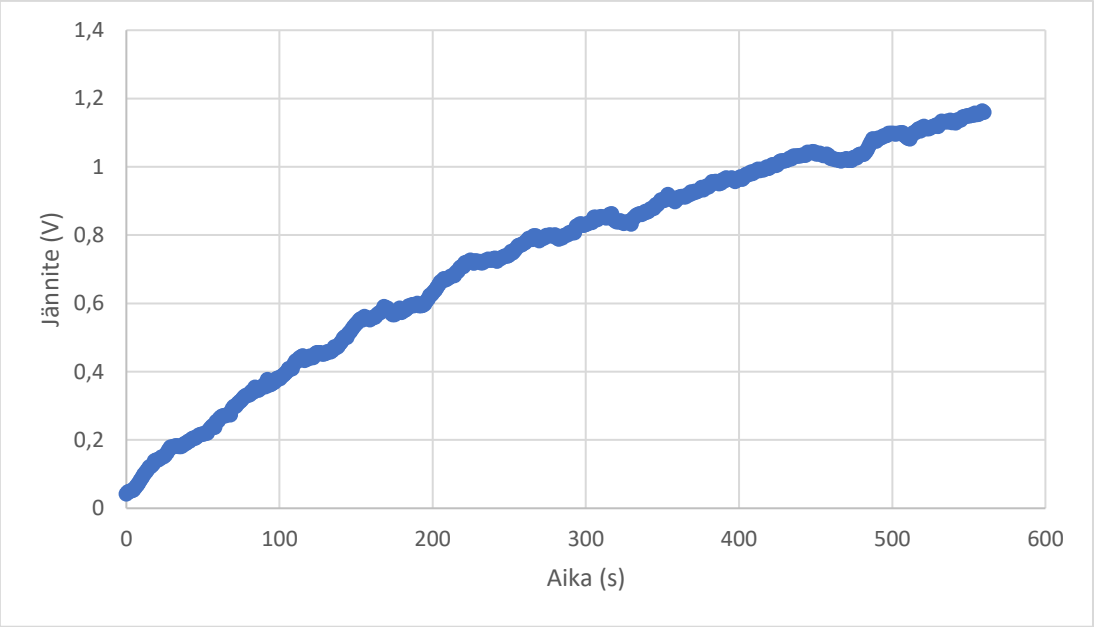
Kuvassa 40 esitetään 47 mF superkondensaattorin latautuminen korkeassa potentiaalissa. Kokeessa kaksi alumiiniputkea oli vierekkäin 110 cm päässä toisistaan. Toiseen putkeen johdettiin 20 kV ja toinen oli maadoitettu. Keräin oli kiinnitetty jännitteiseen

putkeen. Kondensaattorin jännite tasoittuu 4,4 V tasolle. Tällä ehkäistään kondensaattorin ylijännite. Superkondensaattorin keskimääräinen latautumisteho on noin 2,3 mW.



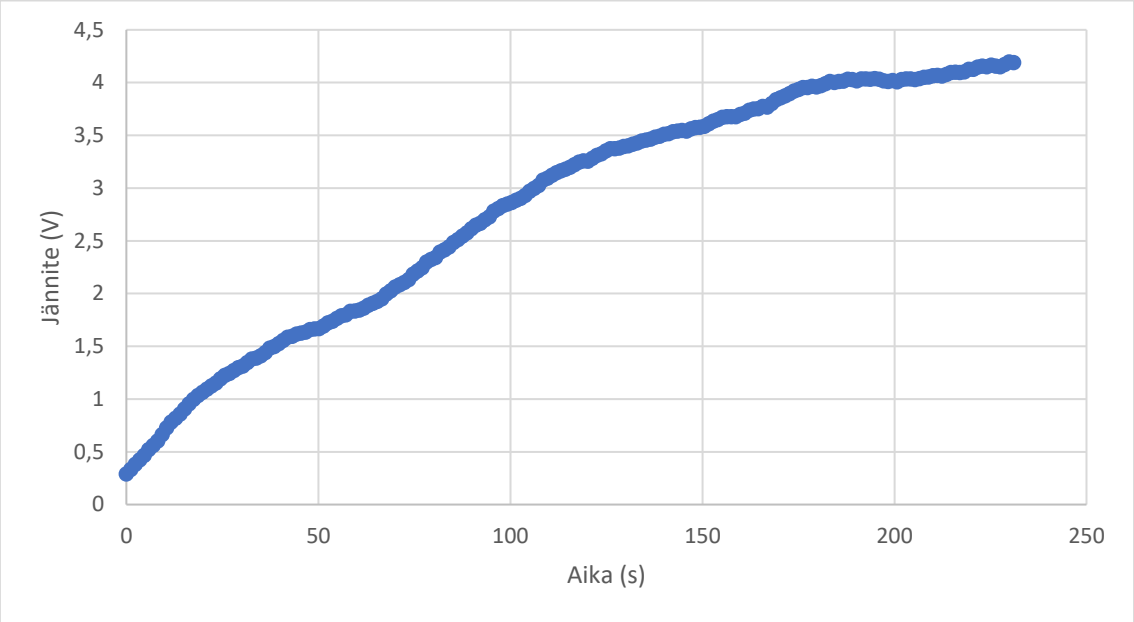
Kuva 40. Latautuminen korkeajännitepotentiaalissa 20 kV jännitelinjassa.

Kuvassa 41 esitetään kondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 20 kV linjan alla 120 cm etäisyydellä linjasta. Kuvassa jännite nousee todella hitaasti ja keskimääräinen latautumisteho on noin 0,7mW. Oikeassa korkeajännitelinjassa tämä ei haittaa, koska energiaa on koko ajan saatavilla. Tällöin ainoastaan kondensaattorin latautumisaika ja tiedonlähetysväli ovat pidempiä.



Kuva 41. Kondensaattorin latautumien matalassa potentiaalissa 20 kV linjan alla 120 cm etäisyydellä linjasta.

Kuvassa 42 esitetään kondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa, kun energiakeräin on 120 cm jännitelinjan alla, kun jännite on 63,5 kV. Kuvaajasta nähdään, kuinka nopeasti energiakeräin varaa energiaa kondensaattoriin. Kuvaajasta laskettu teho on noin 2,1 mW.



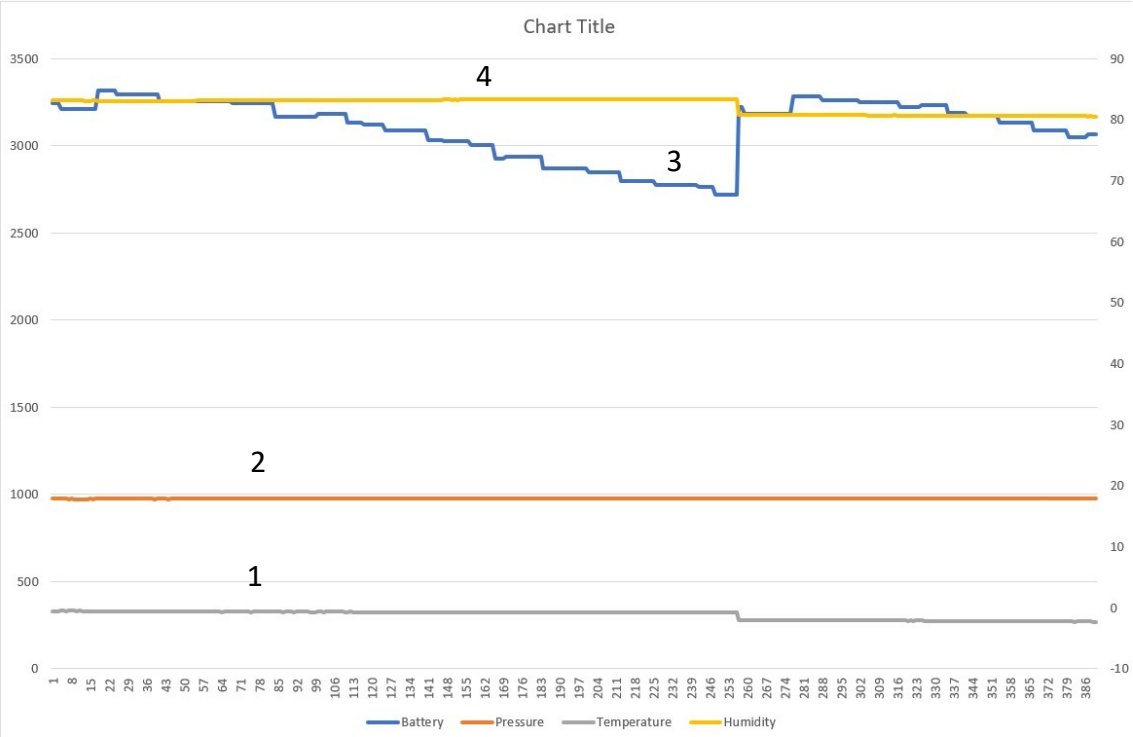
Kuva 42. Kondensaattorin latautuminen matalassa potentiaalissa 63,5 kV linjan alla 120 cm.

5.3.3 Kenttätesti Vaasan Sähköverkon sähköasemalla

Yhdistelmäkeräintä testattiin yhteistyössä Vaasan Sähköverkon kanssa Gerbyn sähköasemalla. Energiakeräin kiinnitettiin maadoitettuun tolppaan, jonka yläpuolella oli 110 kV linja. Keräimen ja linjan välinen etäisyys oli noin 2 m. Energiakeräin asetettiin n. 20° kulmaan, jotta keräimen elektrodilevy olisi samassa asennossa kuin laboratoriotesteissä. Heikkoutena oli se, että pylväs jatkui ylemmäs ja oli maadoitettu koko korkeudelta. Näin ollen sähkökentän voidaan olettaa olevan huomattavasti heikompi kuin laboratoriossa.

Koejärjestelyissä noin 10 m päähän asennettiin tietojen tallentamiseen Raspberry Pi pienoistietokone verkkovirtaan. Raspberry Pi tietokone vastaanotti IoT-laitteen lähettämät tiedot Bluetooth yhteyden kautta. Kuvassa 43 esitetään kerätyt tiedot mittauspisteen numeron mukaan. Koodissa oli virhe, jonka takia tuloksia ei saatu ajan funktiona. Raspberry Pi tietokone kärsi myös ajoittaisista sähkökatkoista, joiden takia ei voida olla varmoja, että kaikki Ruuvitagin data lähetykset saatiin tallennettua. Kuvassa 43 on kuitenkin nähtävillä, että ensimmäisessä mittauspisteessä Ruuvitagin käyttöjännite on noin 3,3 V.

Mittauspisteiden jatkuessa käyttöjännite laskee alimmillaan noin 2,7 V tienoille. Tällöin energiahallinta piiri on sulkenut ulostulon ja alkanut taas lataamaan kondensaattoria. Kohdassa, jossa jännite nousee takaisin 3,3 V paikkeille on kulunut jonkin verran aikaa mutta lähetys onnistuu taas toistaiseksi ennen kuin katkeaa.



Kuva 43. Raspberry Pi 3-pienoistietokoneen keräämä ja tallentama data RuuviTagin lähetyksistä. Harmaaviiva (1) on lämpötila (°C), ruskeaviiva (2) on ilmanpaine (hPa), sininen viiva (3) on Ruuvitagin käyttöjännite (mV), ja keltainen viiva (4) on ilmankosteus (%). X-akseli on mittauspisteen numero.

Tulos ei ole paras mahdollinen mutta se osoittaa, että tällä menetelmällä on mahdollista varata kondensaattoria kapasitiivisesti matalassa potentiaalissa sähköasemalta. Lisää tutkimuksia ja kehitystä kuitenkin vaaditaan. Lisäksi vastaanotin pitäisi olla varmatoimisempi kuin tässä tapauksessa oli.

6 Simulointi

Prototyyppien valmistamisen jälkeen suoritettiin tietokonesimulointi kapasitiivisen energiakeräimen toiminnasta. Simuloinnilla pyrittiin tarkastelemaan tarkemmin piirilevyn toimivuutta, ilman haastavia mittauksia. Tämän simuloinnin tarkoituksena oli myös optimoida keräimen toimintaa säätämällä komponentteja niin, että saataisiin keräysteho mahdollisimman isoksi. Simuloinnin aikana kuitenkin todettiin, että kokeellisesti saatiin parempia tuloksia ja yhdistelmäkeräimen säätövastuksilla oli helppo ohjelmoida piirin toimintaa.

6.1 Tietokonesimulointi

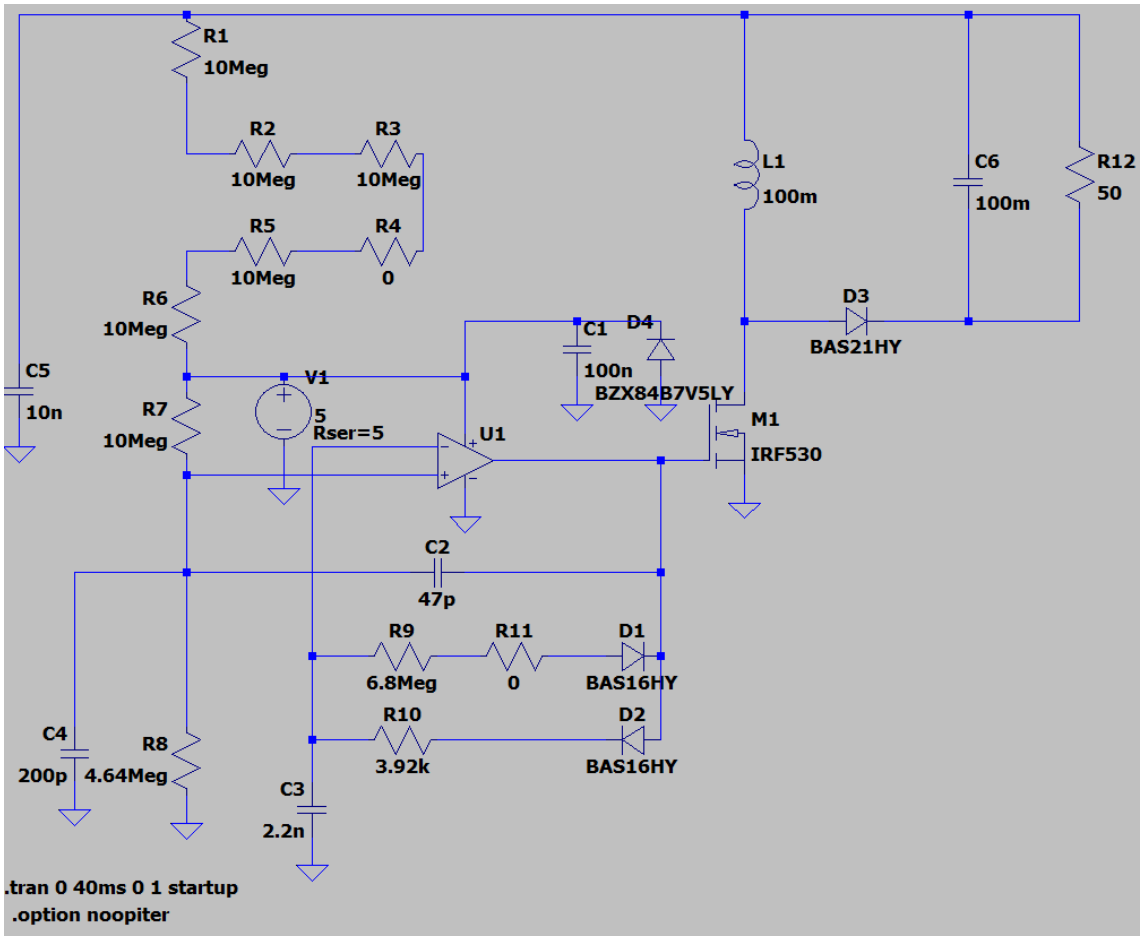
Tietokonesimulointiohjelmana käytetään LTspice-ohjelmistoa, joka on SPICE-pohjainen (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) piirien simulointityökalu. Simuloitava piiri tehtiin kuvassa 23 esitetyn piirikaavion pohjalta. Valitettavasti ohjelmiston kirjastosta ei löytynyt kaikkia komponentteja, joten osa jouduttiin korvaamaan vastaavilla. Tästä huolimatta simuloinnin pitäisi antaa lähes todellinen kuva keräimen toiminnasta ja sen keräämän energian määrästä.

Simuloinnissa testataan ensin komparaattorin toiminta. Tällä saadaan käsitys, millä aika välillä MOSFET aukeaa ja keräimen kondensaattori latautuu. Simuloinnilla testattiin myös keräimen tehoa jännitelinjassa. Simuloinnissa käytetään 20 kV, 100 kV, 110 kV ja 400 kV jännitteitä, jotka ovat yleisimpiä keski- ja suurjännitteitä Suomessa. Laboratoriotesteissä testeissä käytettiin pääosin 20 kV ja 110 kV jännitteitä.

Simulointi oli hyvin epävakaata ja ohjelman laskentateho loppui useita kertoja kesken kaiken. Ensisijaisesti tämä johtui komparaattorin tarkkuudesta ja sen ulostulossa olevan MOSFET:n epätarkkuudesta. Näiden kahden välinen laskukaava kaatuili ja välillä ilman muutoksia simuloi todella pitkälle. Tulokset on kerätty onnistuneista simuloinneista.

6.1.1 Komparaattorin toiminnan mallintaminen

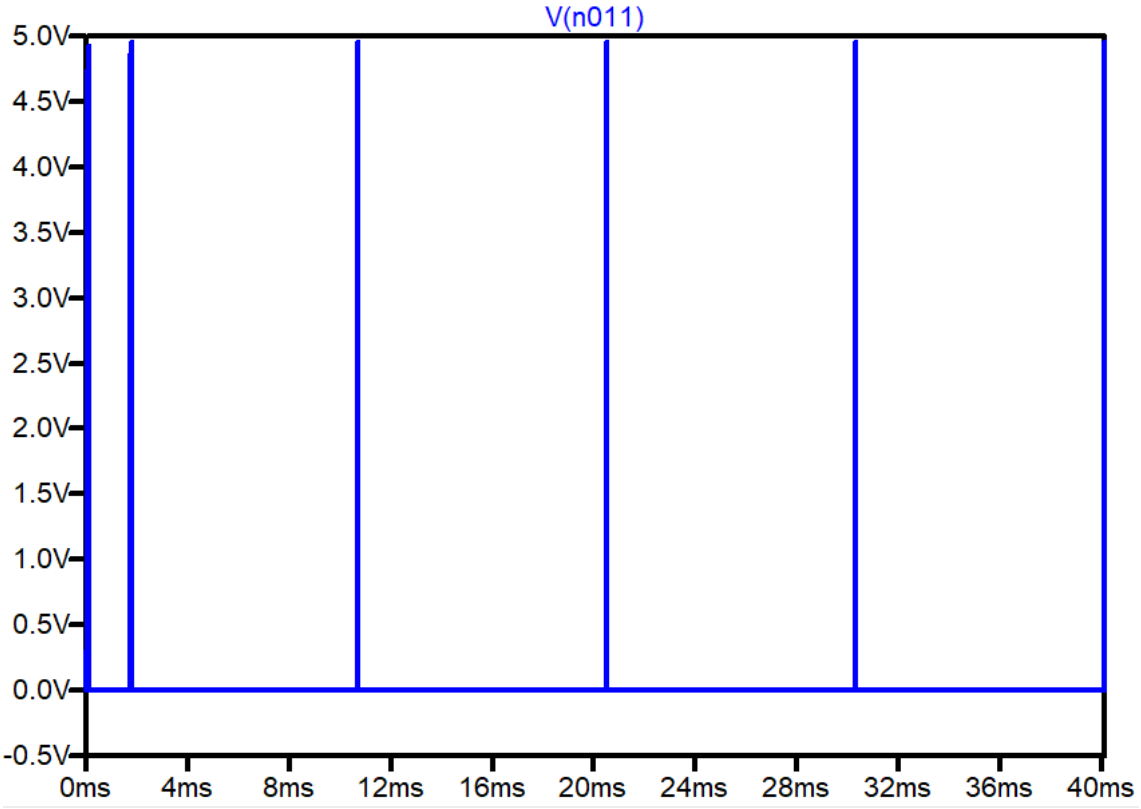
Kuvassa 44 esitetään komparaattorin testauspiirikaavio. Piirissä jännitelähde V1 syöttää komparaattorille 5 V jännitettä. Tulos otetaan komparaattorin ulostulo signaalista, joka ohjaa MOSFET:n toimintaa. Tämän avulla voidaan päätellä energiakeräimen varastoiman energian määrää ulostulonkondensaattoriin. Tulokset on esitetty kuvassa 45.



Kuva 44. Komparaattorin toiminnan simulointipiirikaavio. Jännitelähde on kytketty komparaattorin käyttöjännitteeseen, jännite on 5 V.

Komparaattorin toiminnan simuloinnissa käytettiin transient-analyysia, jolla analysoidaan jännitteen ja virran muutoksia ajan funktiona. Transient-analyysi on tässä piirissä erittäin hyödyllinen, koska piiri sisältää epälineaarisia komponentteja, kuten diodeja (Mikkelsen, 2005).

Kuvassa 45 esitetään komparaattorin ulostulon signaali, jolla ohjataan MOSFET:n toimintaa. Kuten kuvasta 45 nähdään, simulointi toimii ja ohjaussignaali on säännöllistä ja suuruudeltaan syötteen verran eli 5 V. Todellisuudessa nämä ajat saattavat olla erilaisia riippuen komponenttien arvojen tarkkuudesta. Näillä tuloksilla voidaan kuitenkin tehdä oletuksia komparaattorin ja piirin toiminnasta.

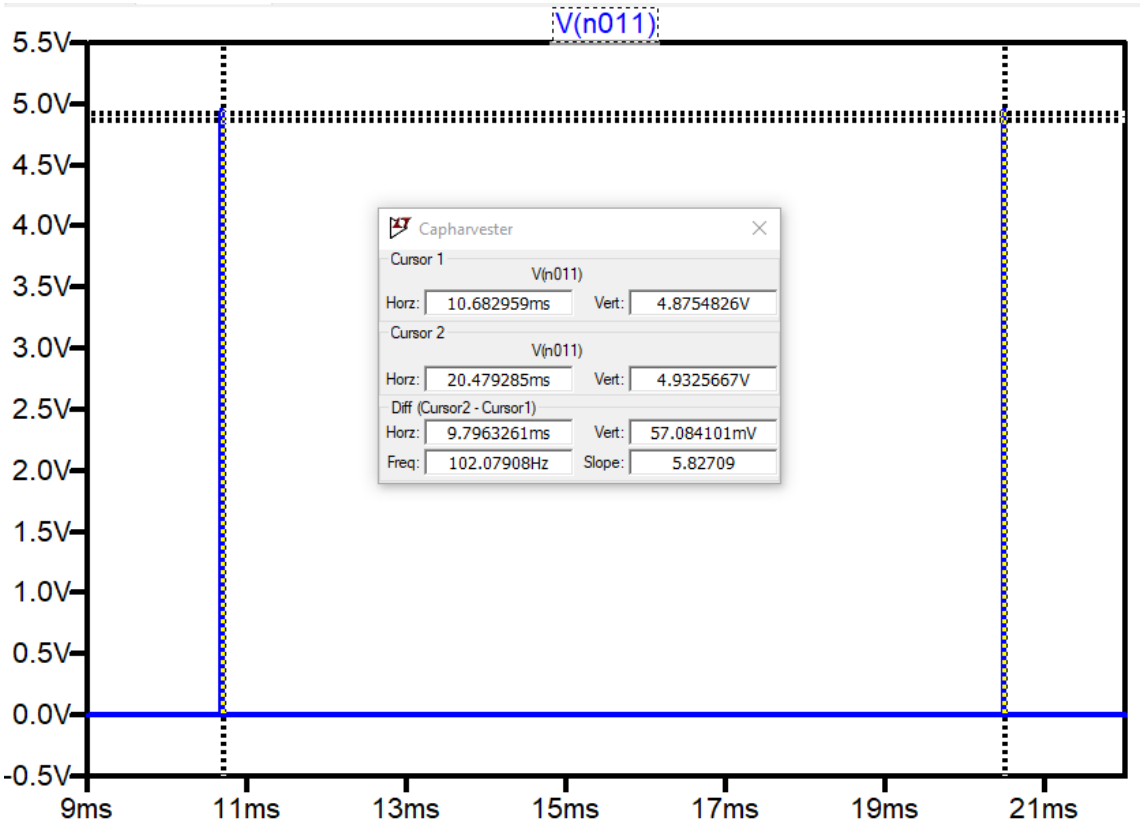


Kuva 45. Komparaattorin ulostulosignaali.

Kuvassa 46 esitetään tarkemmin kahden peräkkäisen ulostulosignaalin välinen aika. LTspice-ohjelmalla pystyy analysoimaan tuloksia kursoreiden avulla. Kuten kuvasta 46 nähdään, on kahden ulostulosignaalin välinen aika noin 9,8 ms. LTspice-ohjelmiston analysointi työkalu laskee myös ulostulosignaalien taajuuden, joka on noin 102 Hz.

Signaali katkaisee virran kulun ja kondensaattorin latautuminen perustuu kelan kuljettamaan virtaan. On tärkeää, että MOSFET johtaa virtaa tarpeeksi kauan, jotta kela pyrkii

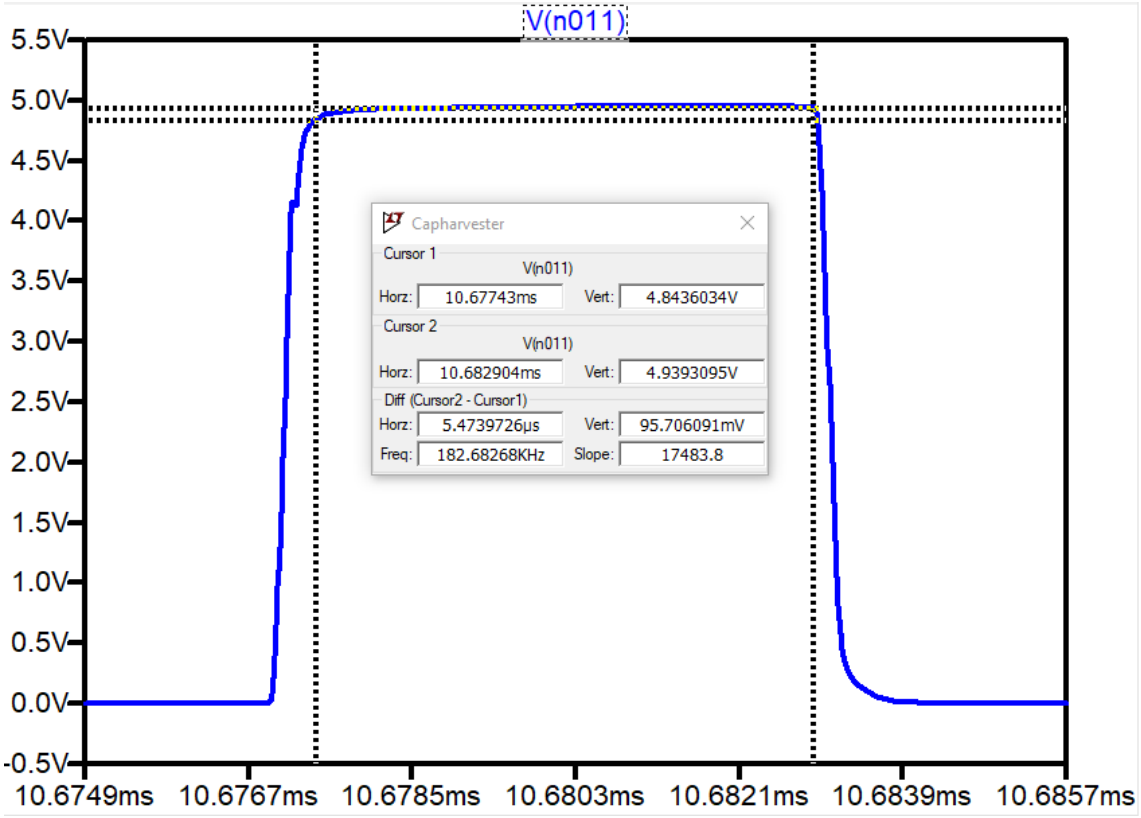
jatkamaan virran kulkua. Kun MOSFET reitti on poikki, virta kulkee diodin läpi keräimen kondensaattoriin.



Kuva 46. Komparaattorien ulostulo signaalien väli on 9,8 ms.

Kuvassa 47 esitetään komparaattorin yhden ulostulosignaalin kesto ja jännite. Ulostulosignaalin pituus on noin 5,5 µs ja jännite on noin 4,9 V. Jännite riittää sulkemaan MOSFET:n johtavuuden. Signaalin ajan virta ohjautuu kelan ja diodin kautta kondensaattoriin.

Seuraavaksi poistetaan komparaattorin käyttöjännitteen jännitelähde ja kytketään koko piirin sisääntuloksi jännitelinjan kapasitanssi. Simuloinnit suoritetaan 20 kV, 33 kV, 100 kV, 110 kV ja 400 kV jännitteillä.



Kuva 47. Komparaattorin signaalin pituus ja korkeus. pituus 5,47 µs ja korkeus on 4,9 V.

6.1.2 Energiakeräimen ulostulojännite 20 kV siirtolinjassa

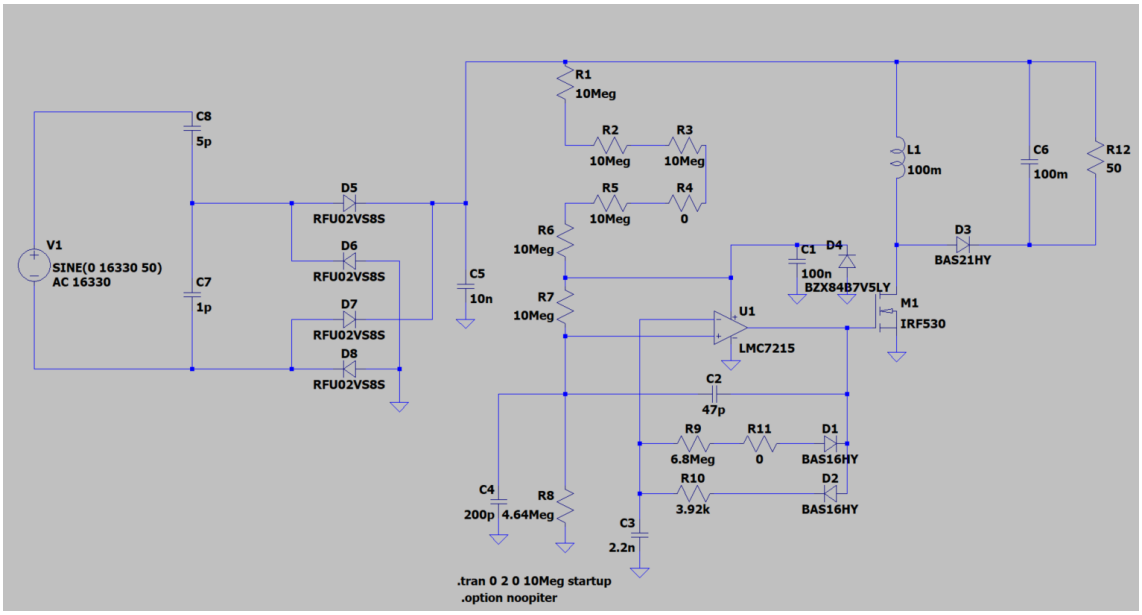
Testeissä jännitelähteenä toimii jännitelinjan toimintaa kuvaava jännitelähde, josta on säädetty sinimuotoinen jännite. Kuvassa 48 esitetään simuloinneissa käytetty piiri, joka vastaa piirikaaviota. Erona kuvan 44 piirikaavioon komparaattorin jännitelähde on siirretty kuvaamaan jännitelinjaa ja keräin on matalassa potentiaalissa kuvitteellisen 5 pF kondensaattorin perässä. Koska kapasitiivinen energiakeräin kiinnitetään testeissä yhden johtimen linjaan tai sen alle, käytetään yhtä vaihejännitettä, joka lasketaan kaavalla

$$\hat{u} = \frac{U}{\sqrt{3}}, \tag{12}$$

jossa û on vaihejännite ja U on pääjännite. 20 kV tapauksessa vaihejännite on noin 11,5 kV. Huippuarvo tästä saadaan laskemalla rms arvo, joka lasketaan kaavalla

$$U_{rms} = \hat{u} * \sqrt{2}. \tag{13}$$

Huippuarvo on noin 16,33 kV.

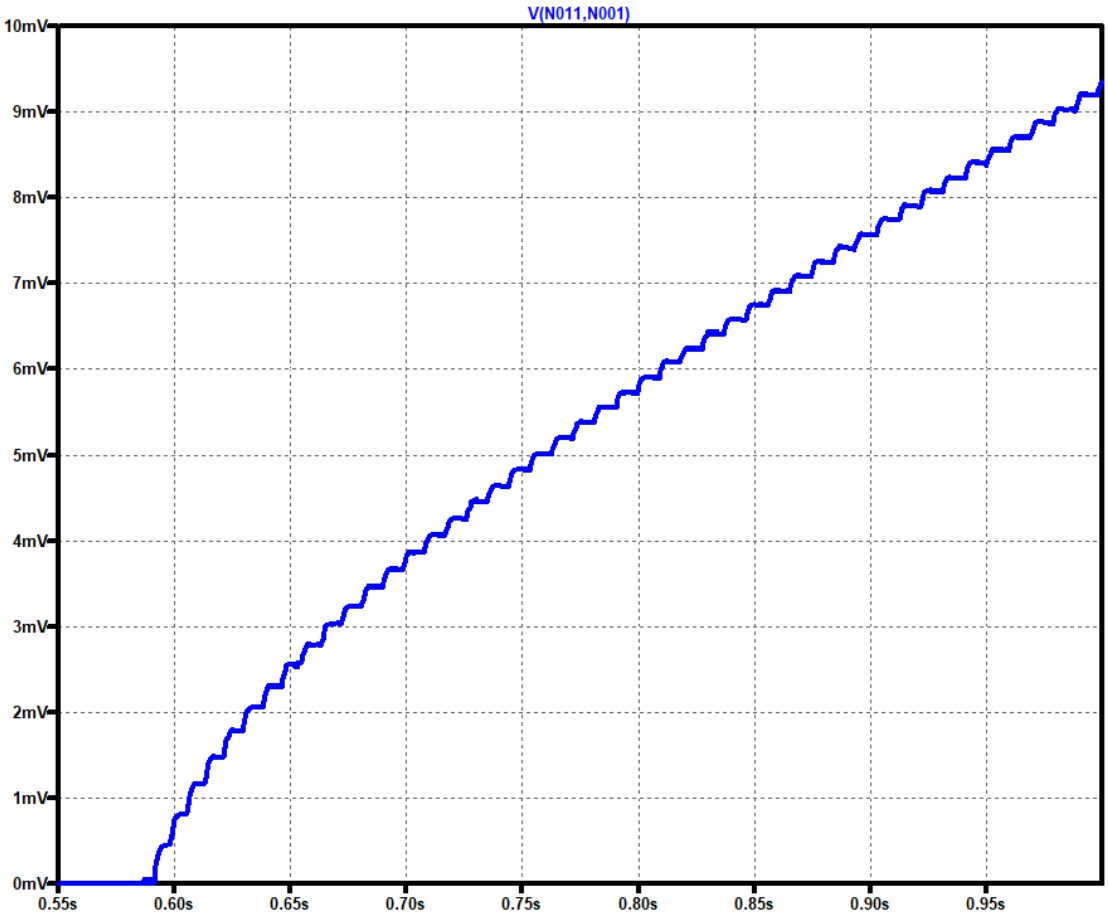


Kuva 48. Kapasitiivinen energiakeräimen simuloinnissa käytetty piiri ja arvot 20 kV:n linjassa.

20 kV jännitteellä ei testissä saatu kerättyä simuloinnilla kondensaattoriin yhtään energiaa. Syynä tähän oli komparaattorin käynnistymisjännite, joka ei ylittynyt simuloidun kahden sekunnin aikana. Seuraavaksi nostetaan jännitettä 33 kV:iin, jotta saadaan tuloksia.

6.1.3 Energiakeräimen ulostulojännite 33 kV siirtolinjassa

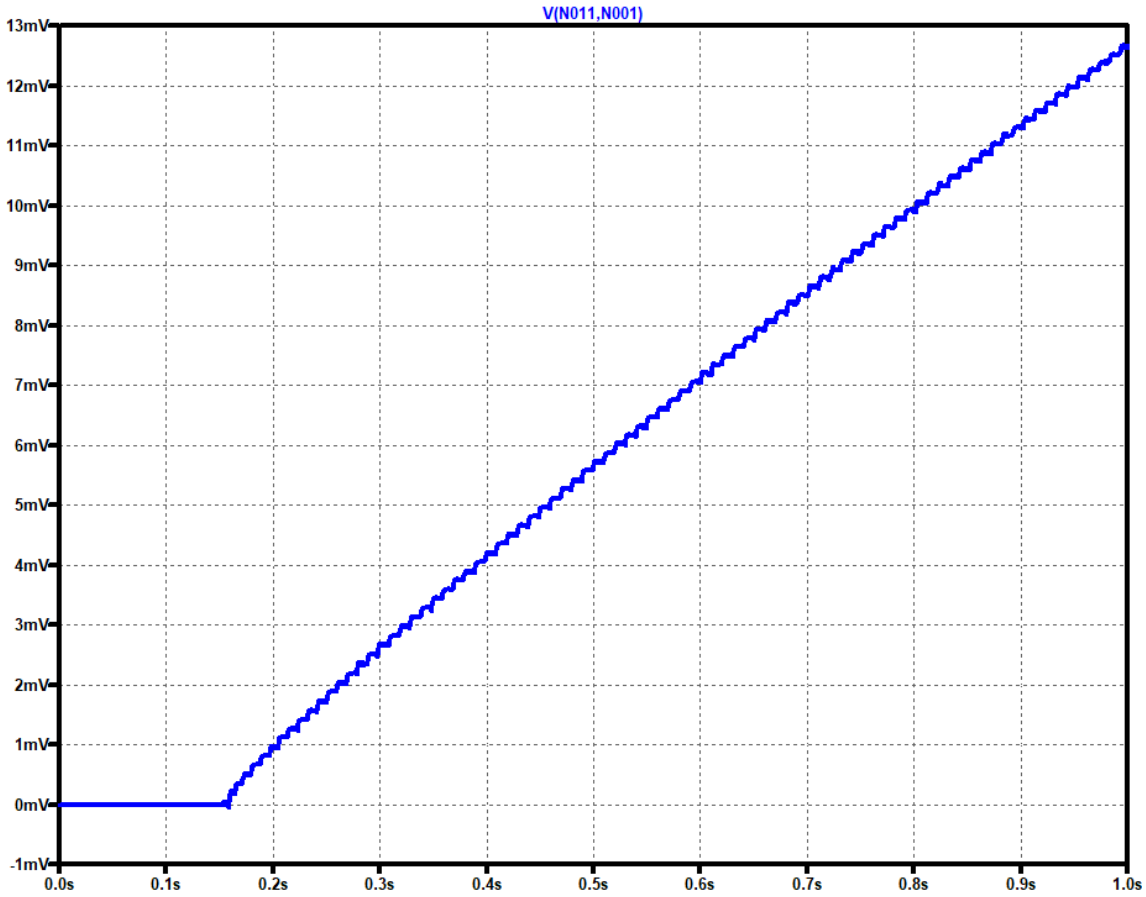
Koska 20 kV jännitteellä ei saatu mitattua tuloksia nostetaan jännitettä hiukan, jotta voidaan varmistua, ettei piirissä ole itsessään vikaa. 33 kV:n vaihejännite on noin 19 kV ja vaihejännitteen huippuarvo on noin 26,9 kV. Kuvassa 49 esitetään kondensaattorin latautuminen ajan funktiona. Teho latautumisen aikana on noin 10,2 µW.



Kuva 49. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 33 kV jännitteellä. Teho on noin 10,2 µW.

6.1.4 Energiakeräimen ulostulojännite 100 kV siirtolinjassa

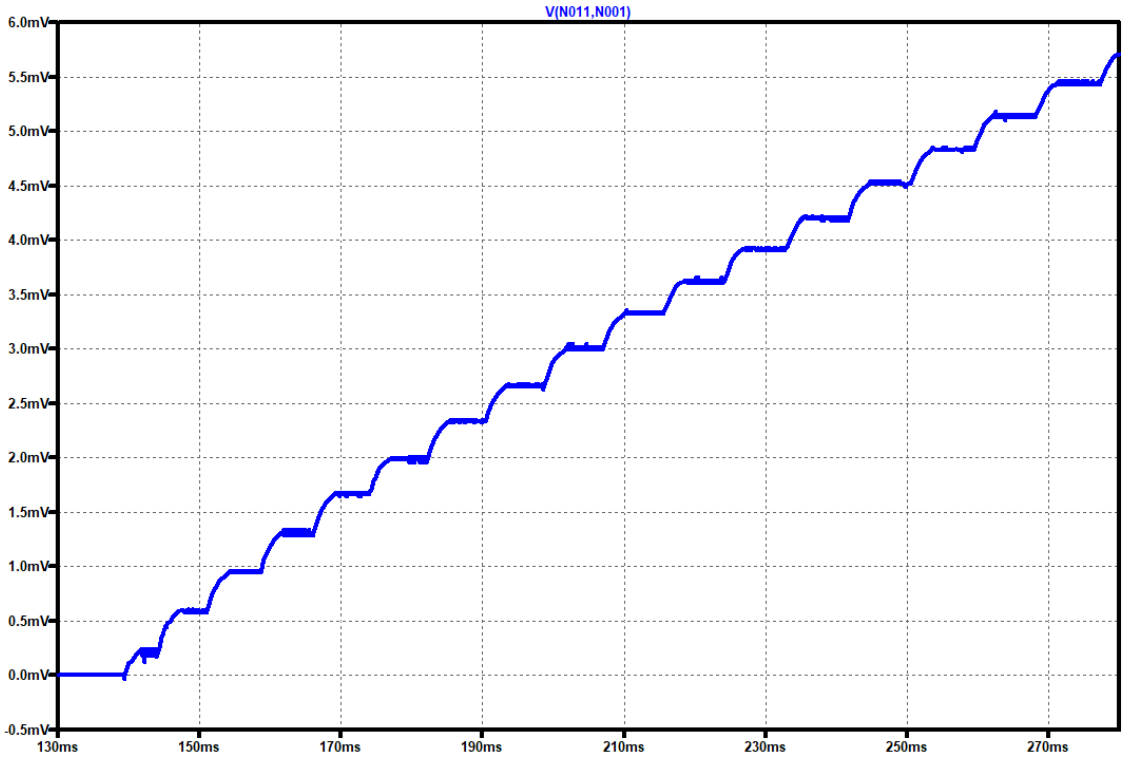
100 kV jännitteellä kapasitiivisen energiakeräimen kondensaattorin latautuminen on esitetty kuvassa 50 ajan funktiona. Simulaatio kesti yhden sekunnin. 100 kV vaihejännite on noin 57,7 kV, jonka huippuarvo taas on noin 81,7 kV. Simulointituloksen perusteella kondensaattorin latautumisteho on noin 8 µW.



Kuva 50. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 100 kV jännitteellä. Teho on noin 8 µW.

6.1.5 Energiakeräimen ulostulojännite 110 kV siirtolinjassa

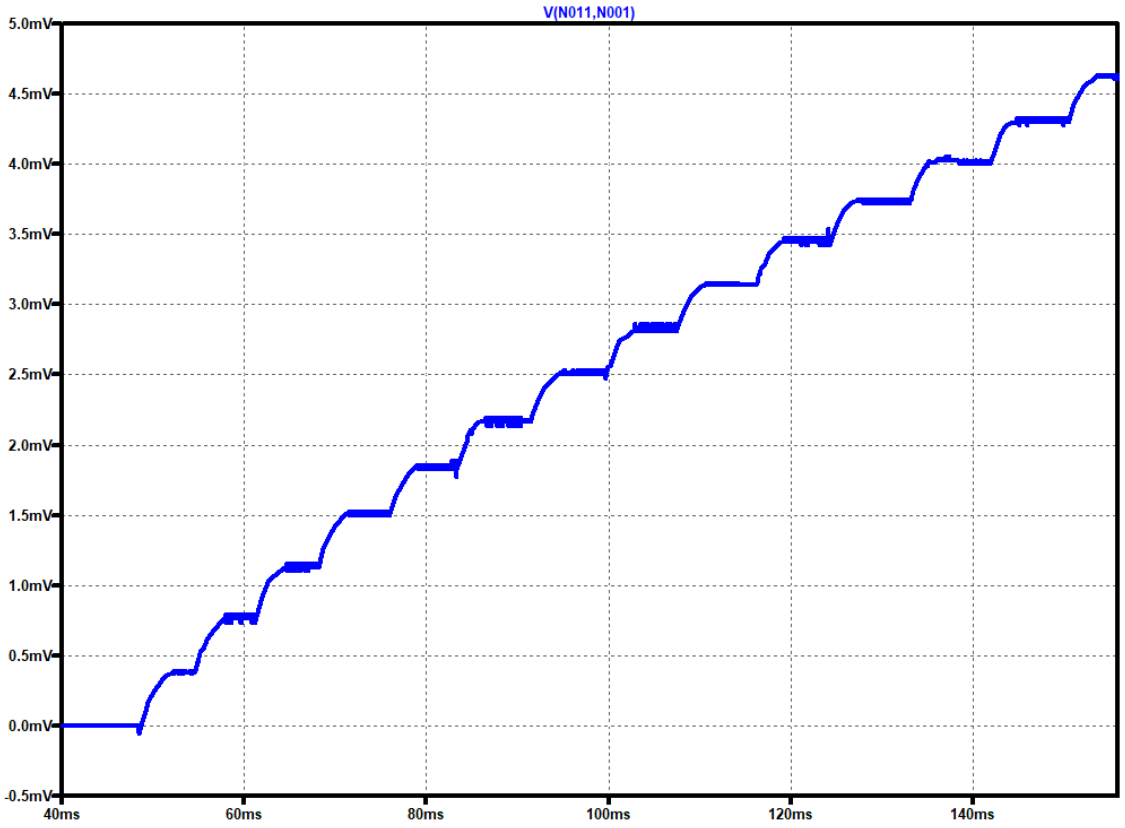
110 kV vaihejännite on noin 63,5 kV, jonka huippuarvo on noin 89,8 kV. Kuvassa 51 on esitetty kondensaattorin varautuminen ajan funktiona. Simulaatio kesti vain 315 ms. Jostain syystä simulaatio ei pystynyt laskemaan enempää arvoja, mutta tälläkin tuloksella saatiin todistettua, että energiaa saadaan kerättyä. Teho on noin 13,2 µW.



Kuva 51. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 110 kV jännitteellä. Simulointi kesti vain 280 ms. Teho on noin 13,2 µW.

6.1.6 Energiakeräimen ulostulojännite 400 kV siirtolinjassa

Suurimpien siirtoverkkojen jännite on Suomessa 400 kV. Viimeinen simulointi tehtiin kokeilumielessä 400 kV jännitteelle. Vaihejännite on noin 231 kV ja sen huippuarvo noin 327 kV. Kuvassa 52 esitetään kondensaattorin latautuminen ajan funktiona. Simuloinnilla oli taas vaikeuksia saada laskettua tarpeeksi pitkälle, joten mittaus jäi vain 150 ms. Teho kondensaattorin latautuessa on noin 11,0 µW.



Kuva 52. Kapasitiivisen energiakeräimen ulostulo kondensaattorin varautuminen ajan funktiona 400 kV jännitteellä. Simulointi kesti vain 150 ms. Teho on noin 11,0 µW.

6.1.7 Yhteenveto simuloinneista

Simuloinnissa oli paljon ongelmia piirin monimutkaisuuden takia. Vaikka LTspice on yleisesti käytetty simulointiohjelmisto piirilevyille, on sillä selkeästi haasteita valmistajien mallintamien komponenttien kanssa. Tässä simulaatiossa komparaattorin ja MOSFET:n sopimattomuus toisiinsa aiheutti monia kaatumisia. Lopulta saatiin kuitenkin tuloksia ja niiden mukaan energian kerääminen on mahdollista. Tulokset simuloinneista esitetään taulukossa 4. Simulointi ei täysin vastaa odotuksia, mutta se johtunee simulaatioiden kestojen vaihtelusta. Simulointi kuitenkin osoittaa, että energian kerääminen sähkökentästä on mahdollista.

Taulukko 4. Simuloinneista saadut tulokset ja simuloinnin kesto.

	20 kV	33 kV	100 kV	110 kV	400 kV
Teho (µW)	0	10,2	8	13,2	11,0
Simulaation kesto (s)	2	1	1	0,280	0,150

6.2 Kokeelliset tutkimukset

Kokeellisessa tutkimuksessa lähdettiin tekemään prototyyppiä piirikaavion pohjalta. Komponenttien arvoja päätettiin vaihdella, jotta voidaan kokeilla niiden vaikutusta kapasitiivisen energiakeräimen kondensaattorin lataustehoon. Komparaattoria ei lähdetty vaihtamaan eikä kondensaattoreita tai kelaa, vaikka tehokkaampia tai parempia olisi mahdollisesti ollut saatavilla.

Uusien komponentti arvojen muutokset määrittivät suurimmilta osin käytettävissä olevat komponentit. Vaikka keräintä varten tilattiin monia lähes identtisiä komponentteja, oli joidenkin valmistus jo lopetettu, joten ne oli korvattava lähes vastaavilla. Komponenttien kokoon kiinnitettiin huomiota, jotta ne olisivat vaihdettavissa itse myöhemmin.

Kokeellisia tutkimuksia tehtiin kaikilla prototyypeillä ja niiden kehitystä jatkettiin mittausten salliessa. Simuloinnista ei todettu olevan hyötyä lataustehon optimoinnissa. Prototyyppien mittauksista kerrottiin luvussa 5.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin Vaasan yliopistossa valmistettua kapasitiivista energiakeräintä, joka on tarkoitus viedä voimakkaaseen sähkökenttään, josta se kerää energian IoT-laitteelle. Ensimmäiseksi valmistettiin kolme prototyyppiä energiakeräimistä. Ensimmäisellä prototyypillä todettiin vain keräimen toiminta. Toista prototyyppiä käytettiin mittausten tekemiseen ja sillä selvitettiin piirilevyn toimintaa tarkemmin. Se oli myös ensimmäinen keräin johon liitettiin energianhallintaa. Energianhallinnalla varmistettiin IoT-laitteen vaatiman jännitteen ja virran saanti. Kolmannessa ja viimeisessä prototyypissä yhdistettiin energiankeräin ja energianhallinta samalle piirilevylle. Myös monet kiinteät vastukset korvattiin säätövastuksilla, jotta eri vastusarvojen testaus helpottui. Prototyyppien jälkeen kapasitiivinen energiakeräin simuloitiin LTspice-ohjelmistoa käyttäen. Simuloinnilla saatiin parempi kuva piirin toiminnasta ilman haastavia mittauksia. Energiakeräimen optimointi toteutettiin kuitenkin kokeellisesti.

Kapasitiivisen energiakeräimen komparaattorista löytyi valmistajan tekemä mallinnus LTspiceen. Komparaattorin toiminnasta saatiin näin simuloimalla todella tarkka ja hyvä toimintaperiaate. Sama mittaus oli tehty itse valmistetuilla piirilevyillä samalla menetelmällä. Alun perin tarkoitus oli simulaatiolla vain todeta piirin toiminta. Kokeiden onnistuminen mahdollisti komparaattoreiden vertailun. Tuloksen perusteella oikeat piirilevyt ovat erittäin toimivia simuloituun verrattuna. Simuloidun komparaattorin ulostulosignaali on hyvin lyhyt verrattuna prototyyppeihin. Näin ollen ulostulon kondensaattori latautuu hieman hitaammin, koska sinne ei ohjaudu niin paljon energiaa. Toisaalta taas signaalien väli on lyhyempi, jolloin latautumista tapahtuu useammin.

Varsinaisten kokeiden vertailu osoittaa, että korkeassa potentiaalissa on mahdollista kerätä huomattavasti enemmän tehoa kuin matalassa potentiaalissa. Testeissä matalassa potentiaalissa tehot olivat noin 0,5 ja 1,0 mW luokkaa, kun taas korkeassa potentiaalissa päästiin jopa 2,3 mW. Jännitteen suuruus vaikuttaa huomattavasti energiakeräimen tehoon.

Kun työn tuloksia verrataan muiden tekemiin tutkimuksiin, voidaan havaita, että ne olivat saman suuntaisia muiden saamine tulosten kanssa. Tässä työssä tutkitut kapasitiiviset energiakeräimet keräsivät noin 1-2 mW teholla energiaa. Osa muiden energiakeräimistä saavutti suurempia tehoja korkeamman jännitteen ja suuremman elektrodilevyn ansiosta. Muiden kapasitiivisten energiakeräinten tuloksia tarkasteltiin luvussa 3.

Kapasitiivisia energiakeräimiä on tutkittu aika vähän, vaikka niillä on paljon potentiaalia sähköverkkojen automaattisessa valvonnassa. Tällä hetkellä monet valvonta laitteet vaativat joko paristoja tai kytkemistä sähköverkkoon. Tällä menetelmällä varsinkin pienikulutukselliset laitteet voisivat luopua kokonaan paristoista. Tämä antaisi uusia mahdollisuuksia esimerkiksi siirtolinjojen kunnonvalvontaan, kun mittalaitetta ei tarvitsisi ikinä huoltaa pariston vaihtamiseksi. Tulokset osoittavat, että riittävän harvalla lähetysvälillä olisi jo mahdollista toteuttaa joitain mittauksia. Lisää tutkimista kuitenkin vaaditaan, jotta toiminta saadaan varmemmaksi ja teho suuremmiksi.

Vaasan yliopistossa on jatkettu tutkimusta kapasitiivisesta enrgiakeräimestä Interreg Aurora -rahoitteisessa HE4T-hankkeessa. Tutkimuksen kohteena on ollut jännitteen ja elektrodilevyn koon vaikutusta energiakeräimen tehoon. Keräimen kokoa on pyritty pienentämään. Työstä ovat olleet kiinnostuneita monet sähköverkkoyhtiöt. Tässä menetelmässä on vielä paljon potentiaalia.

Lähteet

Energiavirasto. (2025). *Verkkotoiminnan luvanvaraisuus*. Noudettu 6.6.2025 osoitteesta https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus

Faizan, A. (2018, 18. maaliskuuta). *Magnetism and Electromagnetic Devices*. Noudettu 5.6.2025 osoitteesta https://electricala2z.com/renewable-energy/magnetism-electromagnetic-devices/

Fingrid. *Fingridin sähkönsiirtoverkko*. (2024). Noudettu 9.6.2024 osoitteesta https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/fingridin-sahkonsiirtoverkko/

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Finlex. Noudettu 23.5.2023 osoitteesta https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2013/588

Gupta, V., Kandhalu, A., & Rajkumar, R. (2010 28. kesäkuuta). *Energy Harvesting from Electromagnetic Energy Radiating from AC Power Lines*. HotEmNets '10: Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors Article No.: 17, Pages 1 – 6 https://doi.org/10.1145/1978642.1978664

Kang, S., Kim, J., Yang, S., Yun, T., & Kim, H. (2017). *Electric field energy harvesting under actual three-phase 765 kV power transmission lines for wireless sensor node*. Electronics Letters, 53(16), 1135-1136. https://doi.org/10.1049/el.2017.1794

Kang, S., Yang, S., & Kim, H. (2017). Non-intrusive voltage measurement of ac power lines for smart grid system based on electric field energy harvesting. *Electronics Letters*, *53*(3), 181–183. https://doi.org/10.1049/EL.2016.3935

Kazeem, O. O., Akintade, O. O., & Kehinde, L. O. (2017). Comparative Study of Communication Interfaces for Sensors and Actuators in the Cloud of Internet of Things. *International Journal of Internet of Things*, *6*(1), 9–13. https://doi.org/10.5923/J.IJIT.20170601.02

Li, Z., Mei, H., & Wang, L. (2019). A Power Supply Technology for a Low-Power Online Monitoring Sensor Based on Electric Field Induction. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *19*(9). https://doi.org/10.3390/S19092169

Mahmoud, M. S., & Mohamad, A. A. H. (2016). A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT)

Applications. *Advances in Internet of Things*, *6*, 19–29. https://doi.org/10.4236/ait.2016.62002

Mikkelsen, J. H. E. E. (2005, 12. lokakuuta). *LTspice-An Introduction*. Noudettu 3.4.2025 osoitteesta http://kom.aau.dk/~hmi/Teaching/LTspice/

Moghe, R., Iyer, A., Lambert, F. C., & Divan, D. (2015). A Low-Cost Electric Field Energy Harvester for an MV/HV Asset-Monitoring Smart Sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *51*(2), 1828–1836. https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2354741

Najafi S, Ali A, Sozer Y, & De Abreu-Garcia A. (2018). Energy Harvesting from Overhead Transmission Line Magnetic fields. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558356

Puranen, L. (2017). *Voimajohtojen sähkökentät*. Säteilyturvakeskus. Noudettu 7.2.2025 osoitteesta https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-309-375-1

Puranen, L. (2023, 12.tammikuuta). *Väestön altistus sähkön jakeluverkon sähkö-ja magneettikentille*. Säteilyturvakeskus. Noudettu 7.2.2025 osoitteesta https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-309-555-7

R. Nave, H. (2025, 5. kesäkuuta). *Physical Connections to Electric Permittivity and Magnetic Permeability*. Noudettu 7.2.2025 osoitteesta http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/elefie.html

Ruuvi Innovations Oy. (2023). *RuuviTag Technical Specifications*. Noudettu 18.6.2025 osoitteesta https://ruuvi.com/i/u/ruuvitag-tech-spec-2023-04.pdf

Sähkönsiirto ja -jakelu. Säteilyturvakeskus. Noudettu 23.52023 osoitteesta https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu

ScienceFacts.net. (2023, 17. helmikuuta). *Electric Field*. Noudettu 5.6.2025 osoitteesta https://www.sciencefacts.net/electric-field.html

Suojanen, M., Vehmaskoski, J., Korpinen, L., & Teknillinen Korkeakoulu, T. (2000, 28. helmikuuta). *Sähkökenttien vaimentaminen kasvillisuuden avulla 400 kV:n voimansiirtojohtojen alla*. Noudettu 7.2.2025 osoitteesta http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/sahkokenttien_vaimentaminen_1.pdf

Texas Instruments. (2019). *bq25570 nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications*. Noudettu 18.6.2025 osoitteesta https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf

Vähämäki, O., Talvitie, T., Rautiainen, K., & Toivonen, L. (2003, 11. marraskuuta). *Power supply arrangement* (US6646859B2·2003-11-11). Espacenet. https://world-wide.espacenet.com/patent/search/family/008558072/publica-tion/US6646859B2?q=pn%3DUS6646859B2

Yang, F., Du, L., Yu, H., & Huang, P. (2020, 9. maaliskuuta). Magnetic and Electric Energy Harvesting Technologies in Power Grids: A Review. *Sensors 2020, Vol. 20, Page 1496*, *20*(5), 1496. https://doi.org/10.3390/S20051496

Ylinen, J. (2025, 5. kesäkuuta). *Sähkökenttä*. Peda.Net. Noudettu 5.6.2025 osoitteesta https://peda.net/p/janne.ylinen/opetus/fysiikka/fys-3-s%C3%A4hk%C3%B6/s%C3%A4hk%C3%B6statiikka/10-s%C3%A4hk%C3%B6kentt%C3%A4

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2020). *University Physics with Modern Physics in SI Units*. Pearson Education Canada. Noudettu 3.10.2023 osoitteesta https://bookshelf.vital-source.com/reader/books/9781292314815/pageid/14

Zhao, X., Keutel, T., Baldauf, M., & Kanoun, O. (2012, 10. toukokuuta). Energy harvesting for overhead power line monitoring. *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2012 - Summary Proceedings*. https://doi.org/10.1109/SSD.2012.6198106