



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Janette Rinne

**DC-järjestelmien yleistymisen rakennuksissa:  
Mahdollisuudet ja haasteet**

Tekniikan ja  
innovaatiojohtamisen yksikkö  
Kandidaatin tutkielma  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Janette Rinne		
<b>Tutkielman nimi:</b>	DC-järjestelmien yleistymisen rakennuksissa: Mahdollisuudet ja haasteet		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Oppiaine:</b>	Sähkö- ja energiatekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Kimmo Kauhaniemi		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2025	<b>Sivumäärä:</b>	35

---

**TIIVISTELMÄ:**

Viime vuosina teknologinen kehitys on nostanut esiin DC-järjestelmien tuoman potentiaalisen rakennusten sähköistyksessä. DC-järjestelmät mahdollistavat esimerkiksi aurinkopaneelien ja akustojen liittämisen rakennusten kuormiin ilman useita tehonmuunnosvaiheita. Tehomuunnosten väheneminen voi pienentää energiahäviöitä ja parantaa järjestelmien kokonaishyötysuhdetta. Lisäksi monet rakennuksissa käytettävät laitteet, kuten LED-valaistus, tietotekniikka ja kodin elektroniikka, toimivat jo valmiiksi tasavirralla.

Tutkielmassa käsitellään DC-mikroverkkojen rakennetta, muuntimia, aurinkosähkö- ja LED-järjestelmiä sekä energian varastointiratkaisuja. Esille tuodaan DC-järjestelmien keskeisiä etuja, joita ovat parempi energiatehokkuus, vähäisemmät muunnosvaiheet, yksinkertaisemmat järjestelmät sekä parempi yhteensopivuus uusiutuvan energian ja sähkövarastojen kanssa. Lisäksi DC-järjestelmien mahdollisuus toimia saarekekäytössä parantaa sähkönjakelun varmuutta esimerkiksi sähkökatkojen aikana.

Toisaalta tutkimuksessa nousee esiin useita haasteita, jotka estävät laajamittaisen käyttöönoton. Näitä ovat muun muassa standardien ja suojalaitteiden puutteellisuus, epäyhtenäiset jännitetasot, vaikeus muuttaa vanhojen rakennusten järjestelmiä sekä markkinoiden ja käyttäjien vähäinen tietoisuus DC-teknologioista. Erityisesti suojauksen ja sähkönlaadun hallintaan liittyy ratkaisemattomia teknisiä ongelmia, jotka edellyttävät uusien teknologioiden ja käytäntöjen kehittämistä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että DC-järjestelmät tarjoavat mahdollisuuden rakennusten energiatehokkuuden ja sähköjärjestelmien joustavuuden parantamiseen, erityisesti hajautetun aurinkoenergian ja energian varastoinnin yhteydessä. Niiden laajamittainen käyttöönotto edellyttää kuitenkin teknisten, säätelyyn ja standardointiin liittyvien sekä markkinalähtöisten esteiden ratkaisemista.

---

**AVAINSANAT:** DC-mikroverkko, energiatehokkuus, energian varastointi, tasavirta, uusiutuva energia

## Sisällys

1	Johdanto	6
2	Tasavirta sekä mikroverkot	8
2.1	Muuntimet	8
2.1.1	DC/DC-muuntimet	8
2.1.2	Tasasuuntaajat ja vaihtosuuntaajat	9
2.2	Mikroverkot	10
3	DC-mikroverkkoihin liittyviä järjestelmiä	13
3.1	LVDCBDUS-järjestelmät	13
3.2	LED-järjestelmät	14
3.3	Aurinkosähköjärjestelmät	16
3.4	Energian varastointijärjestelmät	17
4	Tekniset edut ja haasteet	20
4.1	Edut	20
4.1.1	Tehokkuus	20
4.1.2	Luotettavuus	21
4.1.3	Muita etuja	22
4.2	Haasteet	23
4.2.1	Jännitetason valinta	23
4.2.2	Käyttäjä- ja markkinalähtöiset haasteet	24
4.2.3	Virrankatkaisun haasteet	25
4.2.4	Muut haasteet	28
4.2.5	Standardoinnin puute	30
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	31
	Lähteet	33

## Kuvat

Kuva 1 Tasasuuntaajalla tuotettu jännite ajan funktiona .....	10
Kuva 2 Perinteinen rakennuksen AC-mikroverkko (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). .....	11
Kuva 3 Tyypillinen rakennuksen DC-mikroverkko (Arnold & Pennell, 2020, s. 3).....	12
Kuva 4 DC-mikroverkon rakenne kodin valaistusjärjestelmässä (Whaite ja muut, 2015, s. 4384).....	16
Kuva 5 Akun lataus- ja purkupiirin kytkentäkaavio (Chang ja muut, 2018, s. 2). .....	18
Kuva 6 AC-mikroverkon hyötysuhde (Doroudchi ja muut, 2016) .....	19
Kuva 7 DC-mikroverkon hyötysuhde (Doroudchi ja muut, 2016) .....	19
Kuva 8 Energiansäästö potentiaalit eri laitteille (Wan & Zhang, 2024, s. 9) .....	21
Kuva 9 DC-katkaisija virraninjeksiolla (Qi ja muut, 2017, s. 42).....	26
Kuva 10 Perinteinen AC-katkaisijapaneeli ( <i>AC breaker panel</i> ) sekä yhden tulon ja usean lähdön kaksisuuntainen DC/DC-muunnin (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). .....	28
Kuva 11 Teknologiastandardien nykytila ja niiden puutteet DC-mikroverkoissa (Wang ja muut, 2025, s. 17).....	30

## Lyhenteet

DC	Tasavirta ( <i>Direct Current</i> )
LED	Valoa emittoiva diodi ( <i>Light Emitting Diode</i> )
LVDCBDUS	Matalajännitteinen tasavirtapohjainen rakennusten jakelu- ja käyttöjärjestelmä ( <i>The low-voltage DC Building distribution and utilization system</i> )
PV	Aurinkosähkö ( <i>photovoltaic</i> )
AC	Vaihtosähkö ( <i>alternative current</i> )
PVDCM	Aurinkosähkön perustuva tasasähköinen mikroverkko ( <i>the photovoltaic-based DC microgrid</i> )
BESS	Akkuenergian varastointijärjestelmä ( <i>The Battery Energy Storage System</i> )

SSCB	Puolijohteisiin perustuvat tasasähkön katkaisijat ( <i>Solid State DC Circuit Breaker</i> )
IGBT	Eristetyn hilaportin bipolaaritransistori ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )
IGCT	Integroitu hilalla ohjattu tyristori ( <i>Integrated Gate-Commutated Thyristor</i> )
SiC	Piikarbidi ( <i>Silicon Carbide</i> )
EMI	Sähkömagneettinen häiriö ( <i>Electromagnetic Interference</i> )
Hz	Hertsi
PoE	Sähkönsyöttö Ethernetin kautta ( <i>Power over Ethernet</i> )
kW	Kilowatti

# 1 Johdanto

Maailman ensimmäinen sähköverkko rakennettiin käyttämällä tasavirtaa. Vaihtovirta kuitenkin syrjäytti sen melko nopeasti ja vakiintui yleisesti käytetyksi järjestelmäksi sähköjakeluverkoissa (Wang ja muut, 2025, s. 2). Tämän seurauksena tasavirtaa käytettiin pitkään lähinnä erityissovelluksissa, eikä sitä hyödynnetty merkittävässä määrin sähkön jakelussa yli sataan vuoteen (Wang ja muut, 2025, s. 2).

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus tarkastella, miten tasavirta toimii, millaisia tasavirta eli DC-järjestelmiä rakennuksissa voidaan käyttää sekä tarkastellaan DC-järjestelmien tuomia mahdollisuuksia ja haasteita verrattuna vaihtosähköjärjestelmiin. Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Vaihtosähköjärjestelmät ovat saatavilla olevan tekniikan takia olleet tasasähköjärjestelmiä tehokkaampia sekä edullisempia (Rodriguez-Diaz ja muut, 2016, s. 318). Nykypäivänä käydään kuitenkin avointa keskustelua siitä, kannattaisiko meidän käyttää tasa- vai vaihtosähköjärjestelmiä (Rodriguez-Diaz ja muut, 2016, s. 318). Syy tasasähköjärjestelmien yleistymiseen on teknologian kehittyminen, minkä myötä tasasähköjärjestelmät voivat tarjota mielenkiintoisia etuja vaihtosähköön nähden. Tasasähköjärjestelmät voivat olla yksinkertaisempia sekä edullisempia kuin vaihtosähköjärjestelmät (Rodriguez-Diaz ja muut, 2016, s. 318). Tasasähköllä on myös potentiaalia parantaa rakennusjärjestelmien joustavuutta, luotettavuutta sekä energiatehokkuutta (Arnold & Pennell, 2020, s. 2).

Jotkin rakennusten pyörivät kuormat, kuten tuulettimet, saattavat tarvita vaihtovirtaa toimiakseen, kun taas esimerkiksi tietokoneet, elektroniikka sekä LED-valaisimet tarvitsevat tasasähköä toimiakseen (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Sähkön kulutuksen puolelle kytketään lisäksi suuri määrä muita tasavirralla toimivia laitteita, kuten datakeskuksia, sähköajoneuvoja, 5G-asemia sekä energian varastointijärjestelmiä (Guo ja muut, 2024, s. 558). Kulutuspuolella tasasähköä hyödyntävien laitteiden

lisääntyminen sekä uusiutuvien energialähteiden integrointi verkkoihin vauhdittavat DC-järjestelmien kehitystä (Guo ja muut, 2024, s. 558). Tasavirralla toimivien laitteiden kasvava suosio ohjaakin sähkön jakelun ja käytön toimintamallin muutosta (Guo ja muut, 2024, s. 558).

Rakennuksissa voidaan käyttää matalajännitteistä tasavirtapohjaista rakennusten jakelu- ja käyttöjärjestelmää (*The low-voltage DC building distribution and utilization system, LVDCBDUS*). Tällaisen järjestelmän avulla voidaan merkittävästi parantaa energiantuotannon, varastoinnin sekä kulutuksen muodostaman kokonaisuuden suorituskykyä (Guo ja muut, 2024, s. 558). Tasasähköjärjestelmän käyttäminen helpottaa uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinkosähkön (PV), ja energian varastointiakkujen suoraa ja vaivatonta liittämistä rakennusten DC-kuormiin (Arnold & Pennell, 2020, s. 2).

Huolimatta tasavirran lukuisista eduista ja mahdollisuuksista, sen yleistymistä markkinoilla ovat hidastaneet sekä laitteistojen että standardien puutteet sekä haasteet, jotka liittyvät nykyisten rakennusten sähköistämismallin muuttamiseen (Arnold & Pennell, 2020, s. 2). Myös ihmisten asenteiden muutosta voidaan pitää yhtenä esteenä yleistymiselle, sillä sekä kuluttajia että sijoittajia voi olla vaikea vakuuttaa muutoksen kannattavuudesta. Tulevaisuudessa suurimmat energiansäästöt saavutetaan käyttämällä suoraa tasasähköä perinteisen vaihtosähkön sijaan, erityisesti tilojen jäähdytyksessä, sähköajoneuvojen latauksessa sekä aurinkosähköjärjestelmissä, joihin on integroitu akkuja, ja joita tarvitaan hajautetun aurinkosähkön laajamittaiseen käyttöönottoon (Garbesi ja muut, 2011, s. 55). Jos kehityssuunnat jatkuvat ennakoidusti, mukaan lukien tarve vähentää hiilidioksidipäästöjä, suoran DC-järjestelmän tarjoamat edut energiatehokkuudessa ja -säästöissä tulevat kasvamaan entisestään (Garbesi ja muut, 2011, s. 55).

## 2 Tasavirta sekä mikroverkot

Tasavirta on sähköä, joka virtaa vain yhteen suuntaan, toisin kuin vaihtovirta, joka vaihtaa jaksollisesti suuntansa (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Tasavirtapiireissä virrat ja jännitteet eivät muutu ajan funktiona (Valtonen & Lehtovuori, 2011, s.4). Tasasähköä tuottavat esimerkiksi aurinkopaneelit sekä akut (Arnold & Pennell, 2020, s. 3).

### 2.1 Muuntimet

Sähköä voidaan muuttaa erilaisten muuntimien avulla sähkön lajista toiseen tai jännitetasosta toiseen. Erilaisia muuntimia, kuten DC/DC-muuntimia, vaihto- sekä tasasuuntaajia, tarvitaan muuttamaan sähköä laitteille tai verkkoon sopivaan muotoon. Vuonna 2015 Whaiten ja muiden mukaan (2015, s. 4383) noin 30 % kaikesta tuotetusta sähköstä kulki jossain kohtaa tehomuuntimien läpi ennen loppukäyttöön päätymistä. Vuoteen 2030 mennessä osuuden ennustetaan nousevan jopa 80 prosenttiin. Tästä syystä onkin tärkeää ymmärtää, miten tehoelektroniikka käyttäytyy ja reagoi vaihteleviin kuormituksiin sekä toiminnantilan muutoksiin.

DC-pohjaiset energialähteet, kuten aurinkosähkö- ja varastointijärjestelmät, tarvitsevat tehoelektroniikkaan perustuvia liitäntälaitteita, jotta ne voidaan yhdistää vaihtosähköjärjestelmiin. Suurimmat kuormat teollisuudessa ja kotitalouksissa ovat luonnostaa tasasähköllä toimivia ja vaativat perustaajuudesta 50 Hz eroavan taajuuden (Sarangi ja muut, 2021, s. 5007). Myös lähteet, jotka tuottavat vaihtelevaa taajuutta, kuten mikroturbiinit ja tuuliturbiinit, tarvitsevat vaihtosähköverkoissa muuntimen (Sarangi ja muut, 2021, s. 5007).

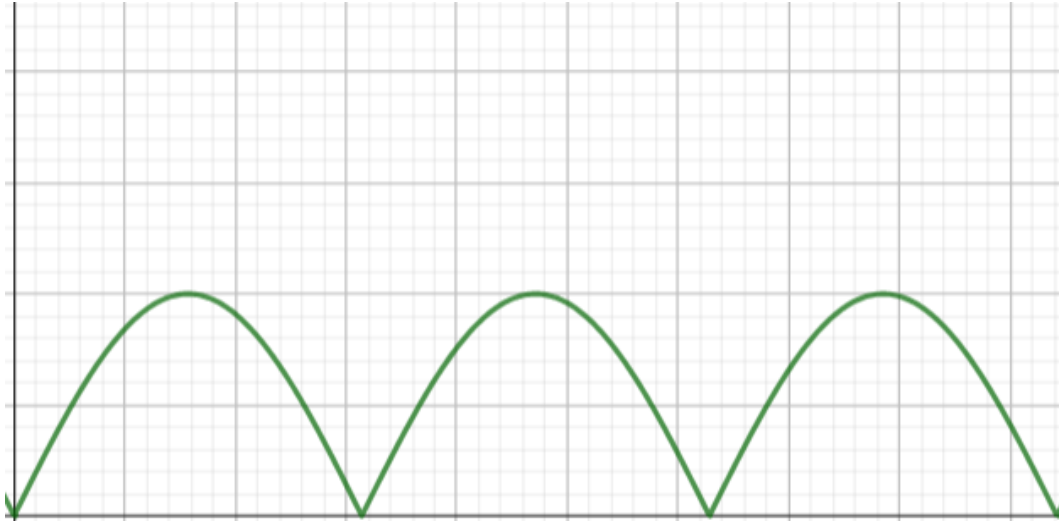
#### 2.1.1 DC/DC-muuntimet

DC/DC-muunnin on elektroninen laite, joka käyttää korkeita taajuuksia nostaakseen ja laskeakseen lähtöjännitettä (Wang ja muut, 2025, s. 10). Perinteisiä DC-muuntimia ovat buck-, boost-, buck-boost-, SEPIC sekä Cuk-muuntimet (Whaite ja muut, 2015, s. 4384).

Kirjallisuudessa löytyy useita ohjeita, joiden tavoitteena on kehittää tehokkaita monituloisia muuntimia mahdollisimman pienellä komponenttimäärällä kuitenkin säilyttäen halutut toiminnalliset ominaisuudet (Whaite ja muut, 2015, s. 4384). Edistyksellisen verkkosähköhallinnan saavuttamiseksi keskeisiä muunninpiirteitä ovat kaksisuuntainen toiminta (*bidirectional operation*), dynaaminen suojaus sekä kyky toimia yhden tulon ja usean lähdön laitteena (Whaite ja muut, 2015, s. 4384). Kaksisuuntainen toiminta mahdollistaa perinteisen virransyötön verkosta kotiin sekä uusiutuvasta energiantuotannosta ja energian varastoinnista saadun virran syötön takaisin verkkoon. Dynaamista suojausta tarvitaan verkon ja kodin välillä esimerkiksi ukkosimpulssien tai laitehäiriöiden varalta (Whaite ja muut, 2015, s. 4384). Yhden tulon ja usean lähdön laitteessa mikroverkon DC-väylään liitetään rakennuksen puolelle esimerkiksi 24 V sekä 48 V jännitetasot. Tällaisiin muunnoksiin on esitetty uusia muunnintopologioita, jotka hyödyntävät korkeataajuisia kytkentää muuntajien koon pienentämiseksi (Whaite ja muut, 2015, s. 4385).

### **2.1.2 Tasasuuntaajat ja vaihtosuuntaajat**

Tasasähköä voidaan saada myös tasasuuntaajista (Ahoranta, 2015, s. 30). Tasasuuntaaja on laite, joka muuttaa vaihtovirran tasavirraksi (Ahoranta, 2015, s. 30). Vaihtosuuntaaja, eli invertteri, taas toimii vastakkaiseen suuntaan muuttaen tasavirran vaihtovirraksi. Näiden suuntaajien käyttö on yleensä välttämätöntä AC-järjestelmissä johtuen DC-lähteiden luonteesta, varastoinnista sekä nykypäivänä käytettävistä kuormista (Wang ja muut, 2025, s. 11). Tasasuuntaajilla tuotettu jännite ei ole täysin vakaata. Sen navoissa esiintyy vaihteleva tasajännite, jonka suuruus muuttuu, mutta napaisuus pysyy samana (Ahoranta, 2015, s. 30). Kuvassa 1 on esitetty tasasuuntaajan liittimissä vaikuttava jännite ajan funktiona.

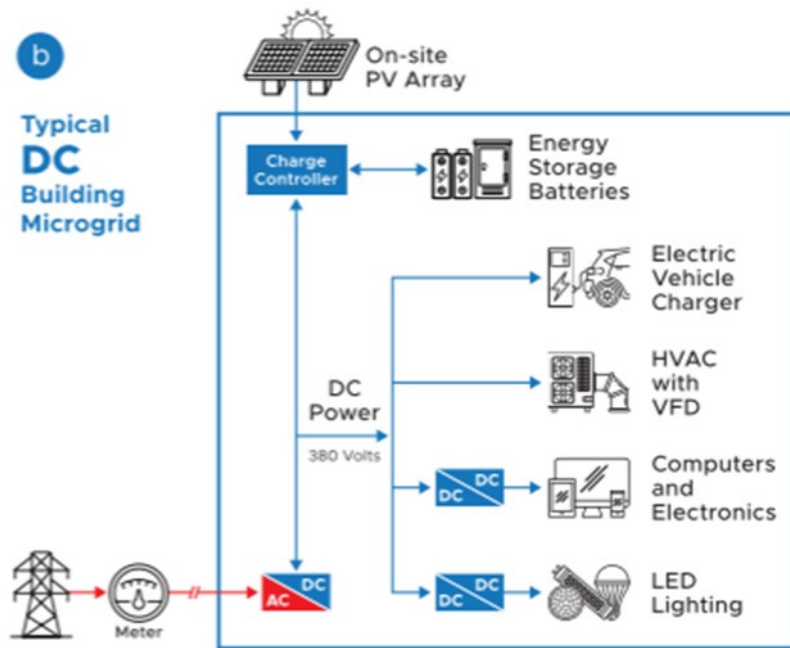


**Kuva 1 Tasasuuntaajalla tuotettu jännite ajan funktiona**

## **2.2 Mikroverkot**

Rakennusten mikroverkot ovat paikallisia verkkoja, jotka voidaan kytkeä irti perinteisestä sähköverkosta. Ne voivat jatkaa toimintaansa virran ollessa pois päältä. Tavallisesti sähkö tuotetaan paikallisista aurinkosähkö- ja energianvarastointijärjestelmistä, kuten akuista (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Mikroverkot voivat näin parantaa kotien ja yritysten verkkojen toimintavarmuutta häiriöiden, kuten myrskyjen, aikana (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Lisäksi ne voivat yhdistää sekä tehokkaasti että taloudellisesti aurinkopaneelit, varastointijärjestelmät sekä ohjattavat kuormat toisiinsa (Xiong & Yang, 2020, s. 2). Kuvassa 2 on esitetty perinteinen rakennuksen AC-mikroverkko. Siinä sähköverkko toimittaa vaihtovirtaa, joka jaetaan rakennuksen laitteisiin ja pistokkeisiin (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Tällöin aurinkopaneelien ja akkujen täytyy muuttaa tuottamansa tasavirta vaihtosähköksi yhdistyäkseen järjestelmään (Arnold & Pennell, 2020, s. 3). Näissä järjestelmissä siis vaihtosähkö kulkee rakennuksen läpi, jossa se sitten muutetaan takaisin tasasähköksi, jotta sitä voidaan hyödyntää DC-pohjaisissa kuormissa (Arnold & Pennell, 2020, s. 3).





Kuva 3 Tyypillinen rakennuksen DC-mikroverkko (Arnold & Pennell, 2020, s. 3).

### 3 DC-mikroverkkoihin liittyviä järjestelmiä

DC-mikroverkkoihin yleisesti liittyviä järjestelmiä ovat aurinkosähkö-, LED- sekä energianvarastointijärjestelmät. Nämä järjestelmät luovat yhdessä kokonaisuuden, joka tekee DC-järjestelmien käyttämisestä kannattavaa.

#### 3.1 LVDCBDUS-järjestelmät

Guo ja muut mainitsevat tutkimuksessaan (2024, s. 558) matalajännitteiset tasavirtapohjaiset rakennusten jakelu- ja käyttöjärjestelmät (LVDCBDUS). Ne voivat parantaa merkittävästi energiantuotannon, varastoinnin ja kulutuksen muodostaman infrastruktuuriketjun kokonaisvaltaista suorituskykyä. Niiden tehtävänä on globaalin energiankäytön optimointi sekä toiminnan ohjauksen järjestelyt. Näihin sisältyvät muun muassa uusiutuvien energialähteiden, energian varastoinnin, kulutuspuolen kuormien sekä ohjattavien DC-laitteiden säätely ja yhteensovittaminen (Guo ja muut, 2024, s. 559). LVDCBDUS-järjestelmän DC-verkon rakenne on säteittäinen ja helppo rakentaa. Sähkönsyötön kattavuus rajoittuu yhteen tai muutamaankin rakennukseen. Verkon nimellisteho on pääosin megawattitasolla (Guo ja muut, 2024, s. 561). Jänniteluokkia on vähän ja ne ovat matalia, eivätkä DC-jännitteen stabiiliusvaatimukset ole merkittäviä. Sähköjakelun kohteet keskittyvät kulutuspuoleen kuormiin, joissa käytetään vaihtelevaa ja monipuolista laitteistoa ja joiden toiminta on itsenäistä (Guo ja muut, 2024, s. 561).

LVDCBDUS-järjestelmien toimintatilat jaetaan neljään kategoriaan, jotka ovat normaalitila, yksinapainen käyttötila, saarekekäyttötila sekä huoltotila (Guo ja muut, 2024, s. 565). Normaalitilassa järjestelmä toimii stabiileissa olosuhteissa, ja energianhallintajärjestelmä ylläpitää tehotasapainoa verkossa (Guo ja muut, 2024, s. 565). AC/DC-muuntimet vaihtavat toimintavuoroaan automaattisesti. Yksinapaisessa toimintatilassa jompikumpi AC-DC-muuntimista on vikaantunut. Tällöin tavoitteena on turvata kuormien toiminta, vaikka järjestelmä ei toimi täysipainoisesti (Guo ja muut, 2024, s. 565). Tehonjakoa ja jännitettä säädetään uuden tasapainotilan saavuttamiseksi. Jos energiantuotanto ei riitä, osa vähemmän kriittisistä kuormista kytketään pois päältä.

Saarekekäyttötilassa ulkoinen sähköverkko on kokonaan pois käytöstä. Tällöin aurinkopaneelit ja akut ylläpitävät DC-jännitettä. Järjestelmä mukautuu kuormitustilanteisiin säätämällä energiavarojen toimintaa reaaliaikaisesti. Kuormia voidaan katkaista tarpeen mukaan. Huoltotilan aikana turvallisuus on etusijalla (Guo ja muut, 2024, s. 566). Kaikki mahdolliset vaaralliset sähkölähteet erotetaan järjestelmästä ja alijärjestelmien välisten kytkentöjen tilaa valvotaan tarkasti. Tämä takaa kunnossapidon turvallisen suorittamisen ja estää tahattoman jännitteen kytkeytymisen huoltotyön aikana.

### **3.2 LED-järjestelmät**

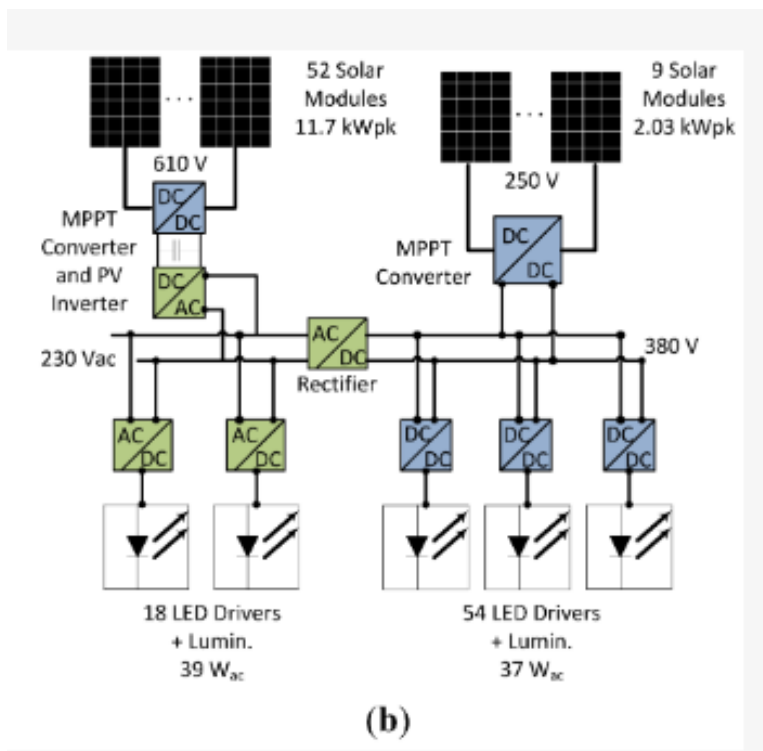
DC-valaistusjärjestelmien avulla voidaan parantaa valaistuksen tehokkuutta sekä suoraa yhteensopivuutta uusiutuvien energialähteiden kanssa (Wan & Zhang, 2024, s. 7). Ne voivat vahvistaa rakennusten häiriönsietokykyä sähkökatkosten aikana (Wan & Zhang, 2024, s. 7). Synergia uusiutuvien energialähteiden kanssa tekee tasavirtavalauksesta kestävä ja luotettavan vaihtoehdon perinteisille vaihtovirtajärjestelmille. DC-valaistuksen integrointi ulottuu kuitenkin muuhunkin kuin pelkkään energian säästöön (Wan & Zhang, 2024, s. 8).

Power over Ethernet (PoE) -teknologia mahdollistaa matalajännitteisen tasavirran ja datayhteyden toimittamisen tavallista Ethernet-kaapelia pitkin (Tuenge ja muut, 2018, s. 1). LED-teknologian ansiosta valaistussovellusten tehontarve on vähentynyt ja PoE-standardien ja -teknologian kehitys on lisännyt yhden kaapelin kautta toimitetun sähkötehoa (Tuenge ja muut, 2018, s. 1). PoE -valaistusjärjestelmien käyttöönotto edustaakin merkittävää edistysaskelta energiatehokkuuden ja järjestelmien yhteen toimivuuden saralla nykyaikaisessa infrastruktuurisuunnittelussa (Wan & Zhang, 2024, s. 8). Parempi tehokkuus verrattuna AC-järjestelmiin johtuu siitä, että AC-DC-muuntohäviöt voidaan PoE-järjestelmissä keskittää yhteen tai useampaan PoE-kytkimeen sen sijaan, että pienempiä LED-ohjaimia olisi hajautettuna useisiin paikkoihin (Tuenge ja muut, 2018, s. 1). Toisaalta huonosti suunniteltuna järjestelmä voi kärsiä merkittävistä tehohäviöistä. Tämä johtuu matalajännitteisen Ethernet-kaapelin aiheuttamista jännitehäviöistä

(Tuenge ja muut, 2018, s. 1). ANSI C137.3 -standardin noudattaminen on keskeisessä roolissa kaapeleiden tehohäviöiden vähentämisessä ja siten DC-valaistusverkkojen suorituskyvyn optimoinnissa (Tuenge ja muut, 2018, s. 1).

Kuvassa 4 esitetään eräänlainen DC-valaistusjärjestelmä (Whaite ja muut, 2015, s. 4383). Siinä kuvataan vertailun vuoksi kaksi erillistä järjestelmää. DC-puolta tukee 380 V tasasähköväylä ja AC-puoli saa virtansa 230 V vaihtovirrasta. DC-puoli saa koko syöttövirtansa 2 kW:n aurinkosähkötuotannosta, ja sen pääkuormana toimii 54 LED-valoa, joiden nimellisteho on 37 W. Valaistuskorma on siis yhteensä 2 kW. AC-verkosta tuleva sähkö taas muunnetaan tasasähköksi keskitetyn tasasuuntaajaan kautta, jolla syötetään valaistuskormaa. AC-järjestelmä on suunniteltu vastaamaan DC-järjestelmää sekä tuotannon, että valaistuskormaan osalta (Whaite ja muut, 2015, s. 4383). Yksi Whaiten ja muiden tutkimuksen havainnoista on, että molempien järjestelmien tehoelektroniikan hyötysuhteet ovat keskenään vertailukelpoisia. Yhtenä DC-järjestelmän etuna havaittiin pienempi jännitemuuntosuhde (*conversion ratio*), mikä tekee järjestelmästä energiatehokkaamman (Whaite ja muut, 2015, s. 4383).

Taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltuna DC-valaistusjärjestelmät, joita ei ole yhdistetty aurinkosähkötuotantoon tai energian varastointijärjestelmään, ovat hieman kalliimpia kuin vastaavat AC-järjestelmät (Whaite ja muut, 2015, s. 4384). Taloudelliset näkymät ovat kuitenkin sovelluskohtaisia. Yhteenvetona voidaan todeta, että yksityiskohtainen vertailu eri järjestelmien kustannuksista ja hyödyistä on tarpeen, jotta voidaan arvioida, kumpi ratkaisu on taloudellisesti optimaalisempi tiettyä käyttökohdetta varten (Whaite ja muut, 2015, s. 4384).



Kuva 4 DC-mikroverkon rakenne kodin valaistusjärjestelmässä (Whaite ja muut, 2015, s. 4384).

### 3.3 Aurinkosähköjärjestelmät

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkopaneeleista, lataussäätimestä, akustosta sekä vaihtosuuntaajasta (Ahoranta, 2015, s. 301). Aurinkopaneelit toimivat aurinkosähköjärjestelmän virtalähteenä ja ne koostuvat sarjaan kytketyistä aurinkokennoista (Ahoranta, 2015, s. 294). Kun rakennuksissa hyödynnetään aurinkosähköjärjestelmiä, niiden mikroverkot tulisi optimoida sähkönkulutusprofiilin mukaisesti, esimerkiksi sähkönkulutuksen määrän ja kulutuskategorioiden suhteen. Näin järjestelmä voi saavuttaa täyden potentiaalinsa. Nykyään tehoelektronikan kehityksen sekä laitteiden uudistumisen myötä tasasähkölaitteiden käyttö kasvaa vuosi vuodelta, mikä asettaa uusia haasteita perinteiselle aurinkosähkön verkkoliitännälle (Pan ja muut, 2023, s. 2). Tämän vuoksi aurinkosähkötuotanto kytketään mahdollisuuksien mukaan suoraan tasasähkölaitteisiin muodostaen DC-DC-mikroverkon. Tämä järjestelmä voi tehostaa aurinkoenergian hyödyntämistä verrattuna perinteiseen DC-AC-DC-mikroverkkoon (Pan ja muut, 2023, s. 2). Tällöin energianmuunnosketju yksinkertaistuu,

jolloin sekä energian muunnostehokkuus että tasasähkölaitteiden toiminta niiden optimaalisella käyttöjännitteellä paranee (Pan ja muut, 2023, s. 2).

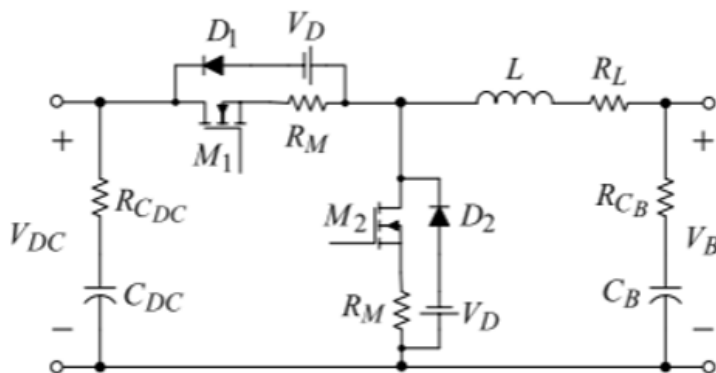
Aurinkosähköön perustuva tasasähköinen mikroverkko (PVDCM) koostuu aurinkosähköjärjestelmästä sekä akustosta (Xiong & Yang, 2020, s. 2). Tässä systeemissä aurinkoenergia toimii päälähteenä ja akusto varalähteenä, joka voi varastoida aurinkopaneelien tuottaman ylimääräisen energian sekä syöttää kuormalle tehoa. Koska akuston hyötysuhde on rajallinen, järjestelmässä on tärkeää toteuttaa energianhallintastrategia, jossa hyödynnetään ensisijaisesti aurinkoenergiaa (Xiong & Yang, 2020, s. 2). Myös akun lataus- ja purkuprosessien hallinta on keskeistä järjestelmän toimivuuden kannalta.

Xiongin ja Yangin (2020, s. 2) mukaan aurinkopaneelit voivat toimia kahdessa tilassa: maksimitehopisteen seuranta (MPPT) -tilassa sekä MPPT:n ulkopuolisessa tilassa. Oikein ohjattuna PV-muunnin voi vaihtaa näiden tilojen välillä sen mukaan, optimoidaanko aurinkoenergian tuotanto vai säädelläkö tasasähkövöylän (DC-bus) jännitettä. Samalla akkuun kytketty muunnin voi joko säilyttää DC-vöylän jännitteen vakaana tai ohjata akun lataus- ja purkutoimintoja. Näiden toimintojen yhteensovittaminen edellyttää ohjausjärjestelmältä kykyä toimia vakaasti useissa eri käyttötiloissa, mikä tekee järjestelmän suunnittelusta ja toteutuksesta teknisesti vaativaa (Xiong & Yang, 2020, s. 2).

### **3.4 Energian varastointijärjestelmät**

Rakennusten mikroverkoissa ylimääräinen sähkö voidaan varastoida energian varastointijärjestelmiin (Chang ja muut, 2018, s. 1). Akkuenergian varastointijärjestelmä (BESS) on olennainen osa DC-mikroverkkoa, koska uusiutuvan energian tuotanto on luonteeltaan vaihtelevaa (Chang ja muut, 2018, s. 1). Jos uusiutuvat energialähteet ovat poissa käytöstä, mikroverkko voi toimia stabiilisti energianvarastointijärjestelmän avulla (Chang ja muut, 2018, s. 1).

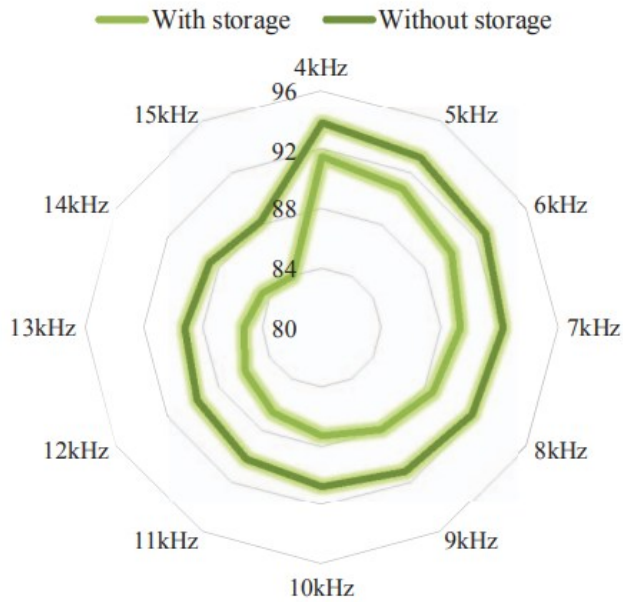
Kuvassa 5 on esitetty akun lataus- ja purkupiirin kytkentärakenne. Kytkennän ohjauksen perusteena käytetään kuristimen virtaa  $i_l$ , DC-väylän jännitettä  $V_{DC}$  sekä akun jännitettä  $V_B$ . Näiden arvojen avulla voidaan määrittellä tehotransistorien käyttöaste (*duty ratio*) (Chang ja muut, 2018, s. 2). Lataustilassa tehokytkin (*power switch*)  $M_2$  pidetään pois päältä. Tehokytkimen  $M_1$  käyttöastetta säädetään kuristimen virran hallitsemiseksi. Kun  $M_1$  kytketään päälle, kuristin magnetoituu ja virta kuristimessa kasvaa. Kun  $M_1$  katkaistaan, diodi  $D_2$  kytkeytyy automaattisesti päälle, jolloin kuristin purkautuu ja kuristimen virta laskee (Chang ja muut, 2018, s. 3). Purkutilassa tehokytkin  $M_1$  pidetään pois päältä. Tehokytkimen  $M_2$  käyttöastetta säädetään lähtöjännitteen hallitsemiseksi. Kun  $M_2$  kytketään päälle, kuristimen virta kasvaa. Kun  $M_2$  katkaistaan, diodi  $D_1$  kytkeytyy automaattisesti päälle, jolloin kuristimen virta laskee (Chang ja muut, 2018, s. 3).



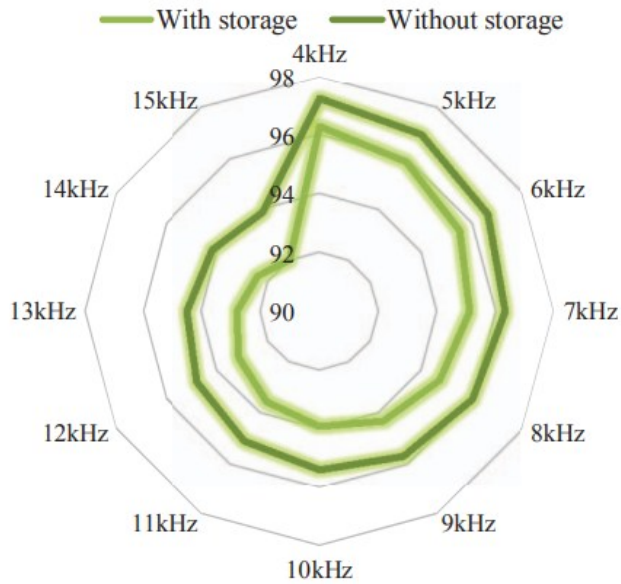
**Kuva 5 Akun lataus- ja purkupiirin kytkentäkaavio (Chang ja muut, 2018, s. 2).**

Aalto yliopistossa tehdyn tutkimuksen mukaan (Doroudchi ja muut, 2016) DC-mikroverkon energiatehokkuus oli yleisesti korkeampi kuin vastaavan AC-verkon. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty AC- ja DC-mikroverkkojen hyötysuhteet ilman varastoa sekä varaston kanssa. Tutkimuksessa havaittiin, että kiinteän akkuvaraston lisäämisellä oli suurempi negatiivinen vaikutus mikroverkon hyötysuhteeseen AC-järjestelmissä kuin vastaavissa DC-järjestelmissä. Hyötysuhteen lasku molemmissa järjestelmissä johtuu lataus- ja purkuprosesseissa syntyvistä häviöistä. Hyötysuhteen pienempi lasku DC-järjestelmissä johtuu siitä, että muunnostarpeet ovat vähäisempiä. Varastointijärjestelmien käyttö

vähentää tarvetta ottaa energiaa vaihtosähköverkosta, koska silloin aurinkopaneeleita pystytään käyttämään tehokkaammin.



**Kuva 6 AC-mikroverkon hyötysuhde (Doroudchi ja muut, 2016)**



**Kuva 7 DC-mikroverkon hyötysuhde (Doroudchi ja muut, 2016)**

## 4 Tekniset edut ja haasteet

AC-järjestelmät ovat alkaneet viime aikoina menettää asemaansa DC-järjestelmille (Rodriguez-Diaz ja muut, 2016, s. 318). Kuitenkin erityisesti asuinrakennusten sovelluksissa tasasähkön käyttöön liittyy vielä useita haasteita, kuten sääntelyn ja standardoinnin puute sekä suojalaitteiden kehitystarpeet (Rodriguez-Diaz ja muut, 2016, s. 318). Syitä DC-järjestelmien yleistymiseen ovat esimerkiksi loistehon puute, pienemmät siirtohäviöt sekä alhaisemmat kustannukset, jotka johtuvat tehonmuunnosvaiheiden tarpeettomuudesta (Sarangi ja muut, 2021, s. 5007).

### 4.1 Edut

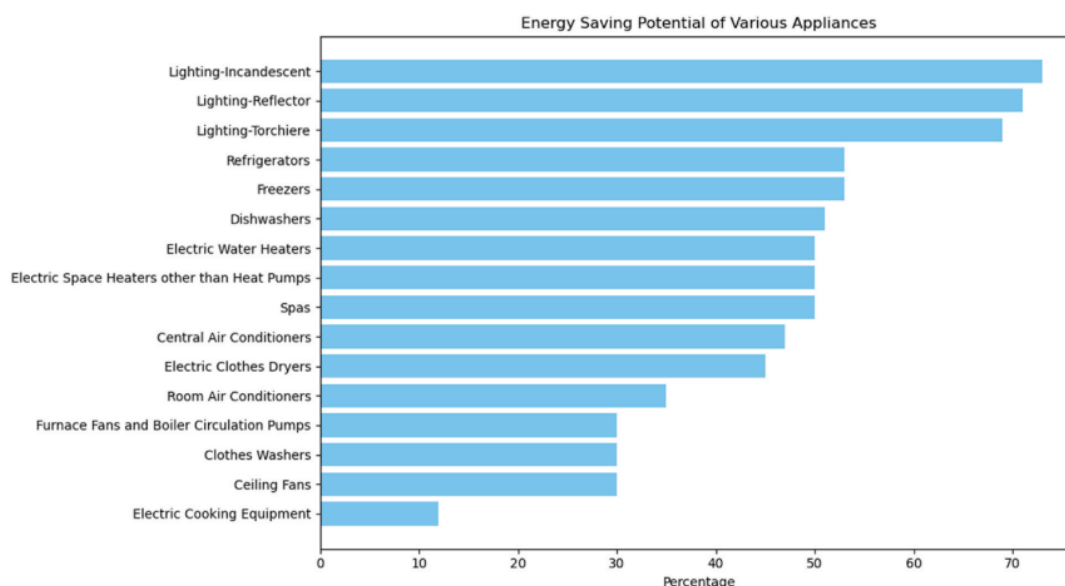
Useiden tutkimusten mukaan DC-järjestelmien käyttö rakennuksissa tarjoaa merkittäviä etuja verrattuna AC-järjestelmiin, kuten sähkön laatu, luotettavuus sekä joustavuus sähkökatkojen aikana (Vossos ja muut, 2017, s. 12). Sannino ja muut (2003, s. 1506) mainitsevat yhdeksi eduksi myös turvallisuuden, koska tasavirta ei ole yhtä vaarallista kuin vaihtovirta ihmiskehölle, sillä se ei johda tahattomiin lihasten supistuksiin. Toisaalta tasavirran katkaiseminen on haastavampaa kuin vaihtovirran, mikä voikin tehdä sen käytöstä vaarallisempaa verrattuna vaihtovirtaan. Erityisesti hajautuneen uusiutuvan energiantuotannon ja sähkönvarastoinnin myötä DC-järjestelmät tarjoavat tehokkuutta sekä joustavuutta (Pires ja muut, 2023, s. 7).

#### 4.1.1 Tehokkuus

Tasajänniteverkoilla on kyky suoraan syöttää suurinta osaa elektronisista kuormista. Yleensä elektroniset kuormat vaativat tasajännitelähteen, minkä vuoksi tarvitaan tasasuuntaajia, jotta ne voidaan liittää AC-verkkoon (Pires ja muut, 2023, s. 7). Tällaisia kuormia ovat esimerkiksi suurin osa kotitalouslaitteista (Wan & Zhang, 2024, s. 9). Näiden tasasuuntaajien lisääminen verkkoon laskee kuorman tehokkuutta ja kasvattaa niiden kustannuksia (Pires ja muut, 2023, s. 7). Tästä syystä tasasähköjärjestelmien käyttäminen voi parantaa järjestelmän tehokkuutta jopa 12-18 % (Pires ja muut, 2023, s.

7). Anandin ja Fernandesin mukaan (2010, s. 3034) tasavirran käyttäminen voisi vähentää tehohäviöitä jopa 22 %. Tasavirran käytön avulla voidaan siis säästää energiaa.

Arnoldin ja Pennellin mukaan (2020, s. 3) joka kerta, kun tehdään muunnos sähkölajista toiseen, tapahtuu tyypillisesti 5–10 %:n tehohäviö. Tehokkuuden parantuminen johtuukin siitä, että verkossa ei tarvitse ottaa käyttöön vaihto- tai tasasuuntaajia (Pires s. 8). Myös energianvarastointijärjestelmät, kuten akut, sekä tuottavat että vastaanottavat vain DC-virtaa, jolloin tasasähköjärjestelmien käyttäminen parantaa myös niistä saatavan energian tehokkuutta (Pires ja muut, 2023, s. 8). Kuvassa 8 on esitetty prosentuaalisesti suurimmat energiansäästöpotentiaalit erilaisille kotitalouslaitteille.



**Kuva 8** Energiansäästöpotentiaalit eri laitteille (Wan & Zhang, 2024, s. 9)

#### 4.1.2 Luotettavuus

Tasasähköjärjestelmät voivat olla myös luotettavampia kuin vaihtosähköjärjestelmät (Pires ja muut, 2023, s. 7). Esimerkiksi bipolaarista rakennetta käytettäessä sähköverkon toimintaa on mahdollista jatkaa ainakin osittain, vaikka toisessa navassa esiintyisikin jokin vika (Pires ja muut, 2023, s. 7). Luotettavuutta lisää myös saarekekäyttökapasiteetti, joka mahdollistaa DC-verkon käyttämisen kokonaan sähköverkosta irrallaan (Sannino ja

muut, 2003, s. 1506). DC-pohjaisten kuormien ja lähteiden integroiminen DC-pohjaiseen järjestelmään voi vähentää tehonmuunnosvaiheita, mikä puolestaan parantaa kokonaisvaltaista tehokkuutta sekä luotettavuutta (Sarangi ja muut, 2021, s. 5007). Lisäksi jokainen verkkoon asennettu muunnin edustaa mahdollista vikakohtaa yhdistetyille laitteille ja järjestelmille (Arnold & Pennell, 2020, s. 3).

#### 4.1.3 Muita etuja

Kun tarkastellaan sähkönlaatua, AC- ja DC-järjestelmien välillä on merkittäviä eroja. Erot johtuvat siitä, että DC-järjestelmissä jännite on ihanteellisessa tilanteessa vakio, kun taas AC-järjestelmissä jännite vaihtelee sinimuotoisesti (Whaite ja muut, 2015, s. 4389). Sähkönlaadun vaikutuksia AC-järjestelmän toimintaan on tutkittu ja dokumentoitu laajasti. DC-järjestelmissä monet sähkönlaatuun liittyvät kysymykset ovat yhä ratkaisematta (Whaite ja muut, 2015, s. 4389). Tiedetään kuitenkin, että tasasähköjärjestelmissä esiintyy vähemmän sähkön laatuun liittyviä häiriöitä. Vaihtosähköverkoissa yleisesti vaikuttavia ongelmia, kuten jännitteen alenemista, välkkymistä ja epätasapainoa, esiintyy DC-verkoissa huomattavasti vähemmän tai ei ollenkaan (Pires ja muut, 2023, s. 8).

Usein väitetään myös, ettei tasasähköjärjestelmissä esiinny harmonisia virtoja tai jännitteitä. Väite pitää periaatteessa paikkansa, koska tasasähköjärjestelmän perustaajuus on 0 Hz, eikä 0 Hz:n kokonaislukukertotauluja, muuta kuin itse perustaajuus, ole olemassa (Whaite ja muut, 2015, s. 4389). Vossoksen ja muiden mukaan (2017, s. 12) DC-järjestelmissäkin voi kuitenkin esiintyä harmonisia häiriöitä. Nämä häiriöt johtuvat käytännössä siitä, että DC-järjestelmissä esiintyy virta- ja jännitevaihteluita, jotka ovat luonteeltaan samankaltaisia kuin AC-järjestelmien harmoniset yliaallot. Tämä tekee harmonisten ilmiöiden tarkastelusta relevanttia myös DC-ympäristöissä (Whaite ja muut, 2015, s. 4389). Whaiten ja muiden (2015, s. 4389) mukaan näitä häiriöitä voi syntyä esimerkiksi silloin, kun DC-väylä liitetään AC-verkkoon tehomuokkaimen (*power*

*converter*) avulla tai kun tasajännitettä muunnetaan ylös- tai alaspäin kaksisuuntaisilla DC/DC-muuntimilla.

AC-järjestelmissä kaikkien lähteiden tulee olla synkronoituja keskenään, mikä lisää sen ohjauksen monimutkaisuutta (Whaite ja muut, 2015, s. 4380). Tasasähköjärjestelmissä ei ole synkronointivaatimuksia koskien sähköverkkoa eikä sen kanssa esiinny loistehoa (Pires ja muut, 2023, s. 8). DC-järjestelmät voivat kuitenkin kohdata stabiilisuus ongelmia johtuen DC-jännitettä tuottavien tehoelektronikkamuuntimien epälineaarista dynamiikasta.

Tasavirralla ei tapahdu myöskään virranahtoilmiötä (*skin effect*), eli virrantiheyden keskittymistä johtimen pintaan (Pires ja muut, 2023, s. 8). Virranahdon puuttuminen mahdollistaa virran tasaisen jakautumisen jakelukaapelin poikkileikkaukseen. Tämä johtaa häviöiden pienenemiseen sekä siihen, että voidaan käyttää poikkipinnaltaan pienempiä kaapeleita (Pires ja muut, 2023, s. 8).

## **4.2 Haasteet**

Yleisimpiä esteitä DC-järjestelmien yleistymiselle ovat alan vallitsevan tilanteen muuttumattomuus, standardoinnin puutteet, DC-tuloa tukevien laitteiden heikko saatavuus sekä rakennusten omistajien ja suunnittelijoiden tietoisuuden puute tasasähköteknologioista sekä niiden hyödyistä (Arnold & Pennell, 2020, s. 8).

### **4.2.1 Jännitetason valinta**

DC-valaistuksen ja DC-rakennusten merkittävä ongelma on jännitteen yhteen sopivuus. DC-rakennusten mikroverkkojen ohjaimet on suunniteltu tuottamaan erityistä DC-jännitettä, jota DC-rakennusten kuormat pystyvät käyttämään (Arnold & Pennell, 2020, s. 6). Yleisin käytetty jännite on 380 volttia. Joskus jännitettä muutetaan matalammaksi, esimerkiksi 24 tai 48 volttiin, jotta sitä voidaan syöttää valaistukselle tai muille kuormille (Arnold & Pennell, 2020, s. 6). DC-mikroverkon jännitetason valinta onkin tärkeä tekijä,

sillä se määrää järjestelmän hyötysuhteen, kustannukset sekä turvallisuuden (Anand & Fernandes, 2010, s. 3036). Järjestelmän hyötysuhde riippuu tehomuunnosvaiheista lähteiden ja kuormien välillä. Koska tehomuunnosvaihe ja sen hyötysuhde riippuvat jännitetasoista, myös järjestelmän kokonaishyötysuhde riippuu tasasähköväylän jännitetasosta (Anand & Fernandes, 2010, s. 3035). Tasasähköjärjestelmissä muuntimien ja kaapeloinnin kustannukset muodostavat merkittävän osan kokonaiskuluista (Anand & Fernandes, 2010, s. 3036). Nämä kustannukset kasvavat jännitteen laskiessa, sillä pienemmät jännitteet vaativat suurempia virtoja ja siten paksumpaa kaapelointia (Anand & Fernandes, 2010, s. 3036).

#### **4.2.2 Käyttäjä- ja markkinalähtöiset haasteet**

Yksi suurimmista esteistä laajojen DC-laitemarkkinoiden syntymiselle on vakiintuneiden jännite- ja liitäntänormien puute, erityisesti laitteille, jotka toimivat yli 48 voltin tasavirralla. Toisin kuin vaihtovirtalaitteilla, joilla on yleisesti käytössä oleva 230 V standardijännite, tasavirtalaitteet kärsivät yhteensopimattomuudesta ja epäyhtenäisyydestä, mikä vaikeuttaa niiden käyttöönottoa (Wan & Zhang, 2024, s. 10). Esimerkiksi monet nykyiset DC-jääkaapit on varustettu muuntimilla tai akuilla, jotka tukevat monenlaisia DC-jännitteitä tai jopa AC-jännitteitä (Wan & Zhang, 2024, s. 10). Tämä standardoinnin puute ei kuitenkaan ole tehokas ratkaisu, vaan se ylläpitää tilannetta, jossa vähäinen kuluttajakysyntä estää valmistajia panostamasta DC-yhteensopivien laitteiden kehittämiseen (Wan & Zhang, 2024, s. 10).

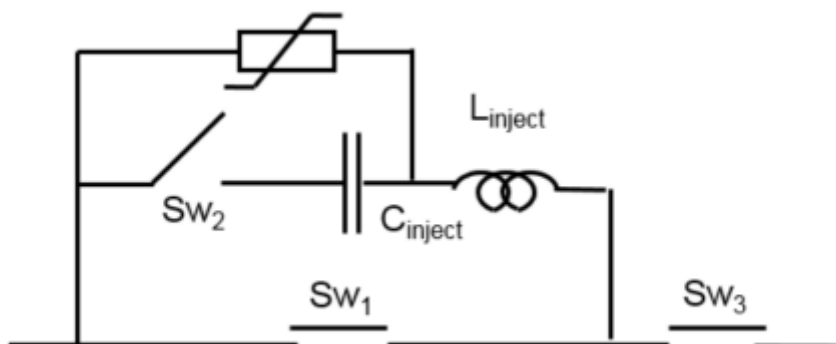
Yksi käyttöönottoa rajoittava tekijä on ihmisten asenteiden muutos, sillä yleensä kuluttajia ja sijoittajia ei ole helppo vakuuttaa muutoksen toimivuudesta (Pires ja muut, 2023, s. 8). DC-laitteiden heikko saatavuus jarruttaa markkinakehitystä. Markkina ei kehity ilman riittävää laitetarjontaa ja kilpailua (Arnold & Pennell, 2020, s. 8). Monet valmistajat eivät halua ohjata resursseja DC-laitteiden kehitykseen ilman merkittävää kysyntää. Asiakkaat, joilla ei ole usein riittävästi tietoa kustannuksista ja hyödyistä, eivät ole halukkaita siirtymään tuntemattomaan järjestelmään, vaikka se tarjoaisi merkittäviä etuja (Arnold & Pennell, 2020, s. 8). DC-järjestelmien käyttöönottoa voisivat lisätä

näkyvyyden lisääminen, tasasähkölaitteiden saatavuuden parantaminen, hyötyjen selkeämpi esittäminen sekä markkinointi (Arnold & Pennell, 2020, s. 9).

### 4.2.3 Virrankatkaisun haasteet

Tasavirtajärjestelmissä sähköviat käyttäytyvät eri tavoin verrattuna vaihtovirtajärjestelmiin, erityisesti järjestelmäparametrien ja DC-väylien oikosulkuvirtojen osalta (Sarangi ja muut, 2021, s. 5008). Oikosulkuvirta yleensä kasvaa tasavirtaverkoissa huomattavasti nopeammin ja saavuttaa korkeampia arvoja kuin vaihtovirtaverkoissa. Nämä poikkeavat ominaisuudet sekä järjestelmän erilaiset rakenteet aiheuttavat useita haasteita, joiden vuoksi perinteiset suojausratkaisut eivät toimi luotettavasti (Sarangi ja muut, 2021, s. 5008). Tilanne edellyttääkin uusien ratkaisujen kehittämistä, jotta DC-mikroverkkojen suojaus voidaan toteuttaa tehokkaasti ja turvallisesti (Sarangi ja muut, 2021, s. 5008).

DC-järjestelmien suojaamiseen voidaan käyttää DC-katkaisijoita (Qi ja muut, 2017, s. 42). Yksi tasavirtakatkaisun toimintaperiaate perustuu virraninjektiomenetelmään, joka on esitetty kuvassa 9. Siinä tasavirran katkaisu toteutetaan syöttämällä vastakkaisuuntainen virta, joka luo katkaisijaan paikallisen nollavirran hetken (Qi ja muut, 2017, s. 42). Tämä toteutetaan valmiiksi ladatulla injektiokondensaattorilla  $C_{inject}$ , joka puretaan sulkemalla kytkin  $S_{W2}$ . Virta kulkee katkaisukytkimen  $S_{W1}$  kautta, ja tässä kohdassa tapahtuva virran nollakohta mahdollistaa  $S_{W1}$ :n avaamisen ja virran katkaisun (Qi ja muut, 2017, s. 42). Ylijännitteen syntymisen estämiseksi kondensaattorin napoihin sekä järjestelmän induktiivisen energian hallitsemiseksi kondensaattorin rinnalle asetetaan ylijännitesuoja (Qi ja muut, 2017, s. 42). Kun kondensaattorin jännite ylittää ylijännitesuojan suojaustason, suoja alkaa johtaa ja virta siirtyy kulkemaan sen kautta (Qi ja muut, 2017, s. 42).



**Kuva 9 DC-katkaisija virraninjeksiolla (Qi ja muut, 2017, s. 42).**

Toinen mahdollinen tasavirtakatkaisija perustuu puolijohteisiin. Nämä puolijohteisiin perustuvat tasasähkön katkaisijat (SSCB) tarjoavat erittäin nopean ja tehokkaan suojauksen DC-järjestelmissä (Qi ja muut, 2017, s. 43). Ne voivat katkaista vikavirran alle millisekunnissa, mikä on huomattavasti nopeammin kuin perinteisillä mekaanisilla tai hybridikatkaisijoilla. Ne hyödyntävät kaksisuuntaisia puolijohteita, kuten IGBT- tai IGCT-komponentteja, sekä uudempia SiC-teknologioita, joiden avulla saavutetaan pienemmät johtohäviöt ja nopeampi vasteaika (Qi ja muut, 2017, s. 43). Niiden käyttö on kuitenkin vielä rajallista suuritehoisissa järjestelmissä alhaisen virrankeston vuoksi. Suunnittelussa on huomioitava muun muassa korkeat virranmuutosnopeudet, ylijännitesuojauksen varistoreilla sekä galvaaninen erotus (Qi ja muut, 2017, s. 43). Katkaisijoiden ohjaus perustuu mikro-ohjaimiin, jotka toteuttavat suojauksen tunnistuksen, laukaisun ja diagnostiikan eri vikatilanteissa (Qi ja muut, 2017, s. 43). Tehokas suojaus edellyttää myös viestintää katkaisijoiden välillä, jotta vikojen laukaisujärjestystä voidaan hallita. Tätä varten katkaisijat liitetään toisiinsa esimerkiksi valokuidulla (Qi ja muut, 2017, s. 44).

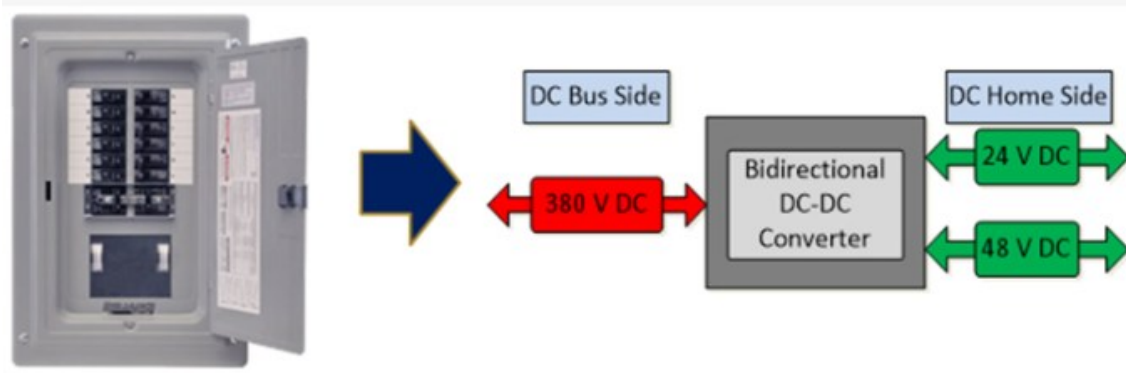
Vikavirtojen nopea nousu tasasähköjärjestelmissä asettaa korkeat vaatimukset suojauksen vasteajalle, sillä kondensaattorit ja tasasähkölähteet voivat aiheuttaa virran nousuja mikro- tai millisekunnin tasolla (Qi ja muut, 2017, s. 44). DC-suojaus perustuu usein katkaisijapohjaisiin menetelmiin, joissa kokonaisreaktioaikaan vaikuttavat vian tunnistus, suojauksen koordinointi, viestintä sekä itse katkaisun toteutus (Qi ja muut,

2017, s. 44). Erityisesti SSCB-katkaisijoiden käyttö edellyttää tarkkaa suojausvalintaa, jotta vikavirta saadaan katkaistua ennen katkaisijan ylivirta- tai lämpörajojen ylittymistä (Qi ja muut, 2017, s. 44). Nopea ja luotettava suojaus edellyttää myös viiveiden minimoimista viestintäyhteyksissä.

AC-järjestelmiä käyttäneet kotitaloudet ovat tottuneet käyttämään kytkintauluja, joissa syöttöjä voi helposti kytkeä päälle ja pois (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). AC-katkaisijoiden selkeä etu DC-katkaisijoihin nähden on se, että vaihtovirta ylittää nollatason 120 kertaa sekunnissa, mikä hajottaa sähkökaaren katkaisijan kontaktien erotessa (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). DC-kodeissa sen sijaan syötöt pysyvät jatkuvasti virrallisina, koska tasasähkö ei ylitä nollaa luonnollisesti. Tämän vuoksi tulevaisuuden DC-kodin omistaja ei voi yksinkertaisesti avata ja sulkea virtapiirejä mekaanisesti (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). Jotta tasasähkö voitaisiin katkaista turvallisesti, katkaisija on joko toimittava nopeammin ja kontaktien liikuttava enemmän, tai sen on sisällettävä mekanismi, joka pakottaa virran kohti nollaa (Whaite ja muut, 2015, s. 4385).

Tässä kontekstissa kaksisuuntaisen piiritopologian merkittävä etu on sen kyky rajoittaa tehon virtausta syötöstä lähtöön tarpeen mukaan oikeilla ohjausasetuksilla tasasähköympäristöissä (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). Kuvassa 10 on esitetty tyypillinen kotitalouksissa ja teollisuudessa käytetty jakelupaneeli, sekä sen vastineeksi yhden tulon ja usean lähdön kaksisuuntaisen DC-DC-muuntimen rakenne. Tällainen DC-DC-muunnin voisi toimia rakennuspalikkana tulevaisuuden DC-sähkökeskuksissa virran katkaisua varten (Whaite ja muut, 2015, s. 4385). Ihanteellisessa tilanteessa paneelin ulkopuolelle olisi asennettu kosketusnäyttöliittymä. Tällöin käyttäjä voisi käynnistää muuntimessa asetuksen, joka pienentäisi virran ohjausta ja virran heikennyttyä käynnistäisi mekaaniset kontaktit, jotka katkaisevat virran syötön ilman, että käyttäjän tarvitsee avata DC-paneelia (Whaite ja muut, 2015, s. 4385).

On olemassa myös toisenlaisia näkemyksiä, joiden mukaan DC-järjestelmissä ei tarvittaisi erityisiä DC-katkaisijoita. Sanninon ja muiden mukaan (2003, s. 1506) alhaisen jännitteen DC-järjestelmissä virran katkaiseminen ei ole ongelma ja AC-katkaisijoita voidaan käyttää, kunhan niiden arvot säädetään valmistajien tarjoamien korjauskertoimien mukaisesti. Esimerkiksi oikosulkuvirran laukaisuun tarvitaan usein 1,1–1,4-kertainen laukaisuvirta AC-käyttöön verrattuna. DC-suojaukseen voidaan myös kytkeä katkaisijan navat sarjaan, jolloin sen valokaaren katkaisukyky paranee (Sannino ja muut, 2003, s. 1506).



**Kuva 10** Perinteinen AC-katkaisijapaneeli (*AC breaker panel*) sekä yhden tulon ja usean lähdön kaksisuuntainen DC/DC-muunnin (Whaite ja muut, 2015, s. 4385).

#### 4.2.4 Muut haasteet

Neljä keskeistä sähkönlaatuun liittyvää huolenaihetta DC-järjestelmissä ovat harmoniset virrat, käynnistysvirta (*inrush current*), oikosulkuvirta (*fault current*) sekä maadoitus (Whaite ja muut, 2015, s. 4389). Erityisesti useiden DC/DC- tai AC/DC-muuntimien samanaikainen toiminta voi synnyttää epälineaarisuuksista johtuvia harmonisia virtoja, jotka heikentävät järjestelmän suorituskykyä (Whaite ja muut, 2015, s. 4389).

Käynnistysvirtoja voivat DC-järjestelmissä aiheuttaa DC-väylään asennettujen EMI-suodattimien kapasitanssit. Kun jännitteetön kuorma ja sen muunnin kytketään virralliseen piiriin, kapasitanssin lataaminen aiheuttaa käynnistysvirran riippumatta siitä,

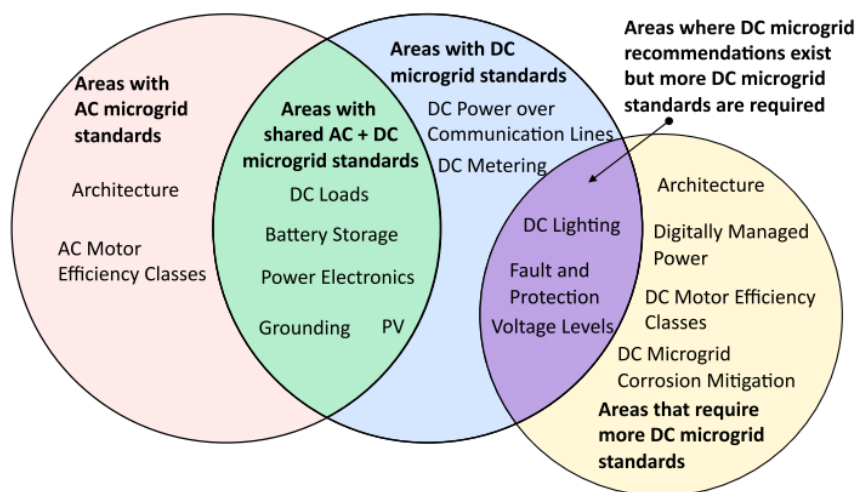
onko varsinainen kuorma kytketty päälle vai ei. DC-järjestelmissä tämä virta voi olla niin suuri, että liittimien kontaktipinnat voivat hitsautua yhteen, jos ne eivät ole tarpeeksi kestävä. Syntyvä valokaari voi aiheuttaa fyysistä vahinkoa jakelujärjestelmälle (Whaite ja muut, 2015, s. 4391). Vaikka järjestelmä olisi rakenteeltaan riittävän kestävä, suuret käynnistysvirrat voivat aiheuttaa jännitteenalennuksia, jotka vaikuttavat muiden laitteiden toimintaan. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi voitaisiin käyttää esilatauspiirejä (*pre-charge circuits*) tai muita pehmeän käynnistuksen ratkaisuja (*soft-start methods*) (Whaite ja muut, 2015, s. 4391).

Tasasähköjärjestelmissä vikavirrat käyttäytyvät eri tavoin kuin vaihtosähköverkoissa. Vikavirta voi kulkea ainoastaan muuntimien, energiavarastojen tai DC-väylän kapasitanssin kautta (Whaite ja muut, 2015, s. 439). Tämä rajoittaa virran määrää, mutta samalla kasvattaa vian aiheuttamia jännitehäiriöitä järjestelmässä. Rajoitettu vikavirta voi myös vaikeuttaa ylivirtasuojauksen toimintaa, sillä vikatilanne voi muistuttaa raskaasti kuormitettua tilannetta. Lisäksi DC-järjestelmissä ei esiinny virran luonnollisia nollakohdan ylityksiä, mikä tekee valokaarten sammutuksesta haastavaa, erityisesti sarjavoissa (Whaite ja muut, 2015, s. 4391).

Tasasähköjärjestelmissä voidaan käyttää joko TN-S tai IT-maadoitusta. Maadoituksella on merkittävä vaikutus järjestelmän turvallisuuteen ja vikavirtojen hallintaan (Whaite ja muut, 2015, s. 4392). TN-S-maadoituksessa toinen napa on suoraan kytketty suojamaahan. Se on yleinen erityisesti rakennusten AC-järjestelmissä (Whaite ja muut, 2015, s. 4392). Korkeammilla jännitetasoilla IT-maadoitus takaa paremman turvallisuuden, koska resistiivinen keskikytkentä rajoittaa maasulkuvirtaa ja alentaa maapotentiaalin jännitettä (Whaite ja muut, 2015, s. 4392). Maadoituksen valinta vaikuttaa paitsi vikavirtojen suuruuteen myös siihen, kuinka suuri sähköisku voi kohdistua henkilöön vikatilanteessa. Maadoitusratkaisun valintaa ohjaavat myös sovelluskohde sekä saatavilla olevat komponentit, kuten kaapelit ja liittimet (Whaite ja muut, 2015, s. 4392).

#### 4.2.5 Standardoinnin puute

Historiallisten syiden takia nykyiset tasavirtajärjestelmiä koskevat standardit ovat varsin hajanaisia ja vähemmän systemaattisia kuin vaihtovirtajärjestelmissä (Wang ja muut, 2025, s.2). Standardoinnin puute on yksi keskeisistä esteistä DC-mikrosähköverkkojen laajalle hyväksymiselle sekä käyttöönotolle (Wang ja muut, 2025, s.2). Koska sähköverkoja voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla, on tarpeen analysoida kunkin verkon kokoonpano, maadoitusratkaisut sekä käytettävissä olevat katkaisijatekniikat eri vikatilanteissa. Tämä analyysi on edellytys yhtenäisten ja luotettavien standardien luomiselle (Javed ja muut, 2019, s. 2). Standardointi on puutteellista erityisesti DC-mikroverkon ohjainten ja niiden syöttämien kuormien välillä (Arnold & Pennell, 2020, s. 8). Kuvassa 11 on esitetty DC-mikroverkojen teknologiastandardien nykytila ja puutteet niiden kehityksessä. Eniten huomiota standardien kehityksessä vaativat tasavirtamikroverkojen arkkitehtuuri, tasavirtamoottorien hyötysuhdeluokitus sekä korroosiontorjuntavaatimukset. DC-valaistuksen, vikasuojauksen ja jännitetason osalta on olemassa joitakin suosituksia ja standardeja, mutta standardointityötä tulee vielä jatkaa (Wang ja muut, 2025, s.16).



Kuva 11 Teknologiastandardien nykytila ja niiden puutteet DC-mikroverkoissa (Wang ja muut, 2025, s. 17)

## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkasteltiin tasasähköjärjestelmien käyttöä rakennuksissa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, millaisia teknisiä ja toiminnallisia etuja DC-järjestelmät tarjoavat verrattuna perinteisiin vaihtosähköjärjestelmiin sekä millaisia haasteita niiden laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy.

Tutkielman havaintojen perusteella DC-järjestelmien käytöllä voidaan saavuttaa useita merkittäviä etuja AC-järjestelmiin nähden. Ne voivat parantaa rakennusten energiatehokkuutta. Siirto- ja muunnoshäviöitä syntyy vähemmän, kun aurinkopaneelit ja akustot voidaan liittää suoraan kuormiin ilman useita tehomuuntimia, kuten vaihto- ja tasasuuntaajia. DC-mikroverkkojen avulla järjestelmän rakenne yksinkertaistuu, mikä helpottaa laitteiden liittämistä ja voi pienentää kustannuksia. Lisäksi tasavirtajärjestelmät soveltuvat hyvin käytettäväksi hajautetun energiantuotannon ja energian varastoinnin kanssa. Erityisesti akkujen lisäämisellä on todettu olevan pienempi negatiivinen vaikutus hyötysuhteeseen DC-järjestelmissä kuin AC-järjestelmissä. DC-järjestelmät voivat myös toimia saarekekäytössä sähkökatkosten aikana, mikä parantaa sähkönjakelun varmuutta.

Vaikka DC-järjestelmien hyödyt ovat selkeitä, tutkielmassa tunnistettiin myös useita haasteita, jotka rajoittavat DC-järjestelmien laajamittaista käyttöönottoa. Haasteita ovat standardien ja suojauslaitteiden puutteellisuus, jännitetasojen epäyhtenäisyys, olemassa olevien rakennusten sähköjärjestelmien muuttamisen vaikeus sekä markkinoiden ja käyttäjien vähäinen tietoisuus DC-tekniikan hyödyistä. Teknisten ratkaisujen, kuten nopeiden puolijohdekatkaisijoiden, kehittäminen on välttämätöntä, sillä vikavirtojen nopea nousu tasasähköverkoissa asettaa korkeita vaatimuksia suojausten vasteajalle ja luotettavuudelle.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että DC-järjestelmillä voitaisiin merkittävästi parantaa rakennusten energiatehokkuutta, joustavuutta ja yhteensopivuutta erityisesti uusiutuvan energian ja energian varastoinnin kanssa. Laajamittainen käyttöönotto

edellyttää kuitenkin standardoinnin ja suojausteknologian kehittämistä sekä markkinoiden ja käyttäjien tietoisuuden lisäämistä.

Tulevaisuudessa tasasähköjärjestelmät tulevat todennäköisesti lisääntymään rakennuksissa. Erityisesti uusiutuvan energian, etenkin aurinkoenergian, lisääntyvä käyttö rakennuksissa vauhdittaa tasasähköjärjestelmien yleistymistä. Yleistyminen vaatii kuitenkin laitteiden valmistajilta halua panostaa ja sijoittaa pääomaa DC-järjestelmien kehittämiseen. Myös kuluttajille tulee tarjota riittävästi tietoa DC-järjestelmien hyödyistä. Standardeja tulee kehittää ja yhtenäistää. DC-järjestelmät voivat edistää siirtymistä kohti energiatehokkaampaan ja kestävämpää sähkönjakelua.

## Lähteet

- Ahoranta Jukka. (2015). *Sähkötekniikka* (14. p.). Sanoma Pro Oy.
- Anand, S. & Fernandes, B. G. (2010). *Optimal Voltage Level for DC Microgrids*.  
<https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5674947>
- Arnold, G. & Pennell, G. (2020). *DC Lighting and Building Microgrids OPPORTUNITIES AND RECOMMENDATIONS*.  
[https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/DC Lighting and Microgrids White Paper 09-09-2020.pdf](https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/DC_Lighting_and_Microgrids_White_Paper_09-09-2020.pdf)
- Chang, Y. C., Chang, H. C. & Huang, C. Y. (2018). Design and implementation of the battery energy storage system in DC micro-grid systems. *Energies*, 11(6).  
<https://doi.org/10.3390/en11061566>
- Doroudchi, E., Kyyrä, J. & Lehtonen, M. (2016). *Battery Energy Storage Effect on AC/DC Microgrids Efficiency*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695659>
- Garbesi, K., Vossos, V., Shen, H., Taylor, J. & Burch, G. (2011). *Catalog of DC Appliances and Power Systems*. <https://escholarship.org/uc/item/8076s5c3>
- Guo, P., Zhang, X. Y., Yuan, Z., Zhao, Y., Wang, Y., Liu, G., Man, J., Wang, Y., Jiang, Z., Xiang, M. & Kuenzel, S. (2024). Low-voltage DC building distribution and utilization system and its implementation in China southern grid. *IET Renewable Power Generation*, 18(3), 558–569. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12780>
- Javed, W., Chen, D., Farrag, M. E. & Xu, Y. (2019). System configuration, fault detection, location, isolation and restoration: A review on LVDC microgrid protections. *Teoksessa Energies* (Vsk. 12, Numero 6). MDPI AG.  
<https://doi.org/10.3390/en12061001>
- Pan, W., Zhang, Y., Jin, W., Liang, Z., Wang, M. & Li, Q. (2023). Photovoltaic-Based Residential Direct-Current Microgrid and Its Comprehensive Performance Evaluation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23).  
<https://doi.org/10.3390/app132312890>
- Pires, V. F., Pires, A. & Cordeiro, A. (2023). DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031217>

- Qi, L., Pan, J., Liljestrand, L., Backman, M., Antoniazzi, A., Raciti, L. & Riva, M. (2017). *DC Power Distribution: New Opportunities and Challenges*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001020>
- Rodriguez-Diaz, E., Savaghebi, M., Vasquez, J. C. & Guerrero, J. M. (2016). An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications. *5th IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin, ICCE-Berlin 2015*, 318–322. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391268>
- Sannino, A., Postiglione, G. & Bollen, M. H. J. (2003). Feasibility of a DC network for commercial facilities. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(5), 1499–1507. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.816517>
- Sarangi, S., Sahu, B. K. & Rout, P. K. (2021). A comprehensive review of distribution generation integrated DC microgrid protection: issues, strategies, and future direction. *Teoksessa International Journal of Energy Research* (Vsk. 45, Numero 4, ss. 5006–5031). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/er.6245>
- Tuenge, J. R., Kelly, K. C., Chen, Y., Waghale, A. S. & Poplawski, M. E. (2018). *Connected Lighting Systems Efficiency Study: PoE Cable Energy Losses, Part 2*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2172/1984499>
- Valtonen Martti & Lehtovuori Anu. (2011). *Piirianalyysi Osa 1. Tasa- ja vaihtovirtapiirien analyysi*.
- Vossos, V., Karl, J., Margarita, K., Mukesh, K., Daniel L, G. & Richard E, B. (2017). *Title Review of DC Power Distribution in Buildings: A Technology and Market Assessment*. <https://doi.org/10.7941/S9159Z>
- Wan, H. & Zhang, J. (2024). Navigating the use of direct current in residential settings: Merits and obstacles. *Teoksessa Journal of Building Engineering* (Vsk. 97). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110828>
- Wang, R., Feng, W., Nordman, B., Gerber, D., Li, Y., Kang, J., Hao, B. & Brown, R. (2025). Technology standards for direct current microgrids in buildings: A review. *Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vsk. 211). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115278>

- Whaite, S., Grainger, B. & Kwasinski, A. (2015). Power quality in DC power distribution systems and microgrids. Teoksessa *Energies* (Vsk. 8, Numero 5, ss. 4378–4399). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en8054378>
- Xiong, X. & Yang, Y. (2020). A photovoltaic-based DC microgrid system: Analysis, design and experimental results. *Electronics (Switzerland)*, 9(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/electronics9060941>