

**LED-VALAISTUKSEN OPTIMOINTI  
KASVIEN VALAISTUKSEEN**

**OPTIMIZATION OF LED-LIGHTNING  
FOR GROWING PLANTS**

Rauno Savukorpi

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT  
School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Rauno Savukorpi  
**Led-valaistuksen optimointi kasvien kasvatukseen**

2020

Kandidaatintyö.

17 s.

Tarkastaja: TkT Heikki Järvisalo

Kasvivalaisimien käyttö kasvien kasvatuksessa on yleistynyt viime aikoina ammattikäytössä sekä etenkin kotikasvattajien piireissä. Markkinoilla on paljon erilaisia valaisinjärjestelmiä, jotka usein etenkin kotikasvattajan saa miettimään, mikä on hyvän tuotteen vaatimukset virtalähteeltä ja etenkin valonlähteeltä. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia LED-valaistuksen soveltuvuutta kasvien kasvatukseen kotona tai ammatillisikäytössä. Tutkittavina kohteina on valaisimen spektrin optimointi fotosynteesin tehostamiseksi, valaisimen virtalähteeltä vaatimat tekniset vaatimukset sekä valaisimen hinnan optimointi eri käyttökohteisiin. Työn tarkoituksena on rajata millaisella virtalähdetopologialla virtalähde olisi järkevä toteuttaa.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT  
School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Rauno Savukorpi

### **Optimization of Led-lightning for growing plants**

2020

Bachelor's Thesis.

17 s.

Examiner: D.Sc.Heikki Järvisalo

LED-lightning has become common in horticulture and indoorgrowing. This bachelor's thesis examines the usage and suitability of LED-lightning in growlighting at home and in professional applications. Thesis examines optimization of spectrum for maximum photosynthesis, demands for power supply and the cost-efficient optimization for different applications. Thesis examines what is the best power supply topology to choose for the ballast.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
1.1	Fotosynteesi.....	6
1.2	Valovoima.....	7
1.3	Työnrajaus ja käytetyt menetelmät.....	8
2.	Valonlähteen optimointi.....	8
2.1	Spektrin muodostaminen usealla LED-diodilla.....	8
2.2	COB-Led.....	9
3.	Virtalähde.....	9
3.1	LED-diodien vaatimukset virtalähteeltä.....	10
3.2	Virtalähde topologia.....	11
3.3	Sähkömagneettisten häiriöiden suodatus.....	14
3.4	Virtalähteen ja valonlähteen kustannustehokkuus.....	16
4.	Johtopäätökset.....	16
	Lähteet.....	17

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Lyhenteet

COB	Chips On Board, sirua levyllä
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettiset häiriöt
IR	Infrared, infrapuna
IGBT	Insulated Gate Bipolar transistor, eristetty hila bipolaari transistori
LED	Light-Emitting Diode, valoa emittoiva diodi
MOSFET	Metal-Oxide-semiconductor field-effect transistor, metallioksidi kana- vatransistori
PAR	Photosynthetically Active Radiation, fotosynteesi aktiivinen säteily
PFC	Power Factor Correction, tehokertoimen korjaus

### Merkinnät

$I$	virta
$P$	teho
$S$	näennäisteho
$t$	aika
$U$	jännite

### Alaindeksit

1	ensiö
2	toisio
c	rajataajuus
ch	kanava eli yksi LED:ien sarjaankytkentä
fw	kynnysjännite
L	kuorma
rip	toisiojännitteen väre
s	kytkentätaajuus
tot	kokonais

## 1. JOHDANTO

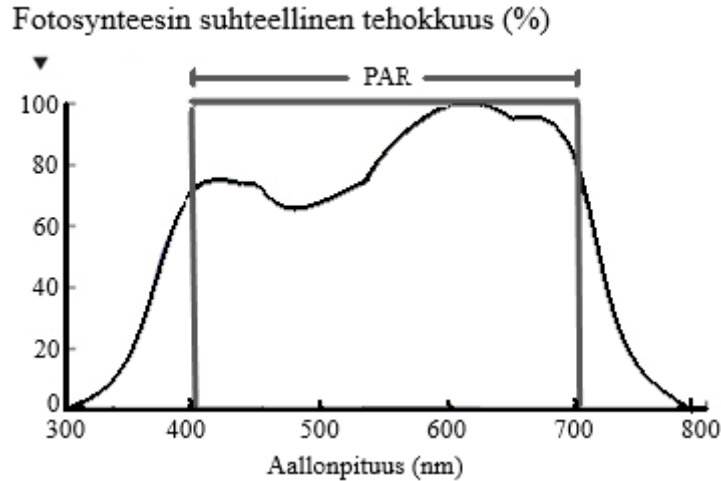
Ihmisten tietoisuus hyvistä elämäntavoista ja ravitsemuksesta on viime vuosina lisännyt etenkin vihannesten ja erilaisten yrttien käyttöä jokapäiväisessä elämässä. Tämä luo paineita tuotantokapasiteetin nousulle, joka tarkoittaa uusien tuotantotilojen eli kasvihuoneiden perustamista. Kasvihuoneiden suurin menoerä on lisävalaistus, noin neljäsosa (Karhu 2007). Tämän takia kasvihuonevalaistukseen on kehitteillä uusia tekniikoita korvaamaan perinteinen suurpainenatriumvalaistus. Varteenotettavin tulevaisuuden valaistustekniikka on LED-valaistus (Light-Emitting Diode). Keraamiset monimetallivalaisimet ovat jo osaltaan korvanneet kotitalouksissa suurpainenatriumvalaisimet, mutta niiden kallis hinta on esteenä niiden siirtymiselle ammattilaiskäytössä.

LED-tekniikan nopea kehitys on tuonut niiden hintaa alas ja tämän takia niiden käyttö erilaisissa käyttökohteissa on yleistynyt huomattavasti (kotitalousvalaistus, ajoneuvot, katuvalaistus jne.). LED-valaisimen polttoaika on noin 100 000 tuntia, joka on suurpainenatriumin 16 000 tuntiin verrattuna moninkertainen (Weise et al. 2009). LED-tekniikalla toteutettu valaisin olisi siis huomattavasti pitkäikäisempi, mutta valaisimen hajottua LED-valaisimen vaihto olisi huomattavasti kalliimpi verrattuna suurpainenatriumiin. Ammattilaiskäytössä suurpainenatriumpolttimot vaihdetaan kahden vuoden välein. LED-polttimoiden vaihto olisi huomattavasti työläämpää, koska polttimot ovat nykytekniikalla suoraan kiinni jäähdytysprofiilissa. Tämän takia LED-valaisimen huolto olisi kalliimpaa verrattuna suurpainenatriumvalaisimeen. Suurpainenatriumin polttimon pintalämpötila on noin 450 °C (Philips 2009), kun taas LED-polttimo käyttölämpötila on maksimissaan 100 °C.

### 1.1 Fotosynteesi

Kaikkien kasvien kasvaminen on riippuvainen fotosynteesin tehokkuudesta. PAR-luku (Photosynthetically Active Radiation) kuvaa sitä kuinka suuri osa valon aallonpituuksista edistää fotosynteesiä, eli mitä suurempi luku sitä enemmän valo saa aikaan soluissa yhteyttämistä. Jos valaistus ei ole tarpeeksi laadukasta tietyillä spektrin alueilla, niin kasvi ei yhteytä tehokkaasti ja kasvi ei kasva ja voi jopa pahimmassa tapauksessa kuolla kokonaan. Aurinko on valonlähteistä kaikki tehokkain mitä fotosynteesiin tulee, mutta etenkin näin Suomessa auringonvaloa ei tule varsinkaan talviaikaan kasvun vaatimaa määrää vuorokaudessa. Tämän takia lisävalaistus on kasvien kasvun perusta etenkin ammattilaiskasvihuoneissa. Ei ole ollenkaan järkevää kasvattaa suuria määriä esim. salaattia, jos kasvu on kustannuksiin verrattuna riittämätöntä. Kaikessa liiketoiminnassa kannattavuus on kumminkin toiminnan tae ja ehto.

Kasveissa yhteytyksen eli fotosynteesin tekee lehtivihreä. Valon sisältämät eri aallonpituudet edistävät fotosynteesin tehokkuutta eri tavoin eli millaista valoa kasveille tuotetaan pitää olla kasvien käyttämässä muodossa. Kasvit näkyvät vihreinä, koska vihreät aallonpituudet heijastuvat kasvin pinnalta ja saavat aikaa silmissä näköhavainnon. Tästä syystä vihreän aallonpituuden tuottaminen valaisimella ei ole tarpeellista. Kasvin yhteyttämiseen hyödylliset aallonpituudet ovat havainnollistettuna kuvassa 1.



Kuva 1. Fotosynteesin suhteellinen tehokkuus eri aallonpituuksilla (Whitehead, 2019)

Kuvasta 1 huomataan fotosynteesin tehokkuuden keskittyvän sinisen (425–475 nm) ja punaisen (625–675 nm) valon alueelle. Juuri tästä syystä olemassa olevien LED-kasvivalojen valmistuksessa on käytetty pääasiassa sinisiä ja punaisia LED:ejä. Kuitenkin huomataan pääasiallisen tehokkuuden olevan aallonpituuksilla välillä 400–700 nm. Tutkimuksissa sinisen valon on todettu saavan kasveista tuuheita ja tukevia, kun taas punaisen valon saavan kasvin kasvamaan pituutta valoa kohti. Myös useampi aallonpituus saman värin alueelta vaaditaan, koska kasvi käyttää eri kasvuvaiheissa erilaista valoa. (LI & Kubota 2009).

Valaisimen pitäisi siis kuvan 1 perusteella sisältää sinisen ja punaisen valon aallonpituuksia ja hiukan ultravioletti- ja infrapuna-aallonpituuksia, jotta yhteyttäminen olisi mahdollisimman tehokasta. Tämä osaltaan tarkoittaa sitä, että valaisimen tulee sisältää useita eri aallonpituuksia juuri noilta valon alueilta. Se missä suhteessa punaista (625–675 nm) ja sinistä (425–475 nm) valoa valaisimen pitäisi tuottaa, vaihtelee eri kasvilajien välillä sekä kasvin kasvuvaihekin vaikuttaa tähän suhteeseen.

## 1.2 Valovoima

Kasvihuonekasvatuksessa nyrkkisääntönä voidaan pitää, että lehvästön yläosiin tulee tuottaa 10 000 luksin valovoimakkuus. Valaisimien valovoiman yksikkönä on yleensä ilmoitettu lumen. Lumen on valonlähteen valovirran yksikkö, joka ilmoittaa valonlähteen tuottaman valon määrän koko säteilyalueelle, yleensä lähes 360° joka suuntaan. Tämän takia heijastimen käyttö on oleellista, jotta valovirtaa saadaan kohdistettua tietylle alueelle. Heijastimen ollessa laadukas koko valovirta heijastuu heijastimen määrämälle alueelle, jolloin säteilyalue pienenee ja valaistusvoimakkuus kasvaa. Valon lähteen tehokkuus ei siis piile suoraan lumeneissa vaan lumeneissa suhteutettuna valokeilan leveyteen. LED-valaisimen tuottama valo on jo osittain kohdistettu tietylle alueelle, kuitenkin jo olemassa olevissa LED-kasvivaloissa on integroitu heijastin tehostamaan valokeilan kohdistusta. Tämä osaltaan luo haasteen sille, että LED-valaisimen tuottama valokeila ei ole kovin leveä, eli valaistujen kasvien määrä on varsin rajallinen. Valonlähteen tuottama valovirta pitää siis olla kohdistettu oikein ja riittävä tuottaakseen 10 000 luksin valaistusvoimakkuuden kasvin yläosiin. Myös valonlähteen etäisyys kasvista vaikuttaa valaistusvoimakkuuden määrään, koska yksi lux on yksi lumen neliometriä kohti.

Kasvivalaistuksessa pitää siis ottaa huomioon valaisimen valovirta (lumen), valokeilan leveys ja etäisyys kasvista. Näiden ominaisuuksien optimointi on avain tehokkaaseen kasvuun yhdistettynä valonlähteen spektrin optimointiin.

### 1.3 Työnrajaus ja käytetyt menetelmät

Tässä työssä tutkitaan mitä vaatimuksia fotosynteesillä on valonlähteeltä ja mitä vaatimuksia halutun fotosynteesin vaatiman spektrin toteuttaminen LED-polttimoilla asettaa virtalähteelle. Tutkitaan millainen kasvivalaisin käyttöön oleva LED-valaisin voisi pääpiirteissään olla. Kerrotaan mitä toiminnallisia osia virtalähteen tulisi sisältää, kuitenkin jättäen tarkat kytkentäkaaviot tiettyine komponentteineen pois työn alueesta. Tässä työssä siis ei kerrota tarkkaa komponenttilistaa eikä kytkentäkaaviota miten valaisin tulisi rakentaa. Lopuksi tutkitaan onko käyttökohteella vaikutusta siihen mikä järjestely olisi kustannustehokkain tapa toteuttaa kasvihuoneen tai kotikasvattajan kasvivalaistus.

## 2. VALONLÄHTEEN OPTIMOINTI

Kappaleessa 1.1 kerrottiin fotosynteesin ja valonvoimakkuuden vaatimuksista tehokkaaseen kasvuun. Tässä kappaleessa tutkitaan mikä on mahdollista saavuttaa, kun valonlähteenä on LED-diodit. Tähän asti on puhuttu LED-polttimoista, mutta todellisuudessa LED-polttimo on LED-diodi, jossa n- ja p-tyyppiset puolijohdemateriaalit muodostavat puolijohderajapinnan. Rajapinnan johtaessa sähköä liitokseen aiheutuu aukkojen ja elektronien rekombinointumista, jonka johdosta elektroni putoaa alemmalle energiatasolle ja emittoi fotonin eli valoa. Eri saostusmateriaaleilla voidaan vaikuttaa emittoituvan fotonin aallonpituuteen eli väriin, mutta ”värikirjo” on erittäin rajallinen. Eri pinnoitusmateriaaleilla voidaan vaikuttaa jossain määrin LED-diodin emittoiman valon väriin, mutta silti väriskaala on varsin rajallinen.

Valkoinen valo sisältää kaikki spektrin värit. Koska valkoinen ledi on valmistettu sinisestä LED-diodista pinnoittamalla se fosforipitoisella päällysteellä, sisältää sen spektri vain muutaman aallonpituuden sinisen ja punaisen alueella sekä pienen piikin vihreää. Valkoiset ledit eivät juuri tästä syystä sovellu kasvatukseen yksinään, mutta sinisten ja punaisten ledien kanssa kylläkin. Tämä osaltaan tuo haastetta, koska valkoisen ledin virrankulutus on vaadittavilla tehoalueilla korkeampi, kuin sinisen ja punaisen. Tästä syystä LED-kasvivalaisin yleisesti ottaen sisältää vain sinisiä ja punaisia led-diodeja.

### 2.1 Spektrin muodostaminen usealla LED-diodilla

Kuten kappaleessa 2 kerrottiin, kasvin vaatima spektri on järkevää tuottaa eri aallonpituuksia emittoivilla LED-diodeilla. Tarvitaan sinistä tekemään kasveista tuuheita ja punaista saamaan kasvi kasvamaan pituutta. Kasvin kasvuvaiheen mukaan kasvi vaatii vielä valolta eri aallonpituuksia eri kasvuvaiheissa. Värialueet voidaan jakaa eri alueisiin: syvän sininen (455 nm), hyper punainen (650 nm) ja kaukainen punainen (730nm) (I-HLED, 2020). Taulukossa 1 on esitetty kasvin eri kasvuvaiheissa valolta vaatima eri aallonpituuksien suhteet.



Taulukko 1. Kasvin eri kasvuvaiheissa valolta vaatimat eri aallonpituuksien suhteet (I-HLED, 2020)

Väri	Kasvu	Itäminen	Kukinta	Satokausi
sininen 455 nm	10 %	75 %	20 %	20 %
punainen 650 nm	90 %	25 %	60 %	70 %
punainen 730 nm	0 %	0 %	20 %	10 %

Pienitehoisille (alle 1W) LED-diodeille on olemassa laaja kirjo eri aallonpituuksia emittoivia komponentteja. Tätä suuremmilla tehoilla toimivassa kasvivalaisimessa käytettyjen LED-diodien valittavana olevien aallonpituuksien kirjo vaihtelee huomattavasti valmistajan mukaan ja on varsin rajallinen. Valmistajan valinta vaikuttaa myös siihen millaiset virtalähteen jännite- ja tehoalueet pitää olla. Esimerkki valonlähteiden valinnasta esitetään kappaleessa 3.

## 2.2 COB-Led

Vaihtoehtona useille yksittäisille diodeille on olemassa COB-LED. Lyhenne COB (Chips on board) jo kertoo itsessään, että kyseessä on yksi piirilevy, johon on upotettu useita yksittäisiä LED:ejä. Markkinoilla on olemassa yksistään kasvivalaistukseen soveltuvia COB-LED:ejä sekä etenkin autoteollisuuden käytössä olevia valkoisia LED:ejä. Kasvivalaistukseen soveltuvan COB-LED:in sisältämät eri diodit eri aallonpituuksille on kaikki yhtä aikaa joko päällä tai pois päältä. Eli COB-LED:illä ei pystytä vaikuttamaan siihen millaisen spektrin valaisin tuottaa vaan valo on aina sama riippumatta kasvin kasvuvaiheesta. Tämän takia kasvihuonevalaistuksessa yleisesti käytetään valaisimia, jotka on toteutettu useilla yksittäisillä LED:illä. Kotikasvatuksessa COB-LED:it ovat varsin suosittuja niiden helppouden ja varsin edullisen hinnan takia. Kotikasvattaja kumminkin suurella todennäköisyydellä käyttää lisävaloa vain esikasvatukseen ja loppu kasvukaudesta valaistuksen hoitaa aurinko.

## 3. VIRTALÄHDE

Tässä kappaleessa tutkitaan miten virtalähde olisi mahdollista toteuttaa. Samalla esitetään chilien esikasvatukseen soveltuvan kasvivalaisimen periaatteellinen toteutus, jossa LED:it valitaan Osram OSOLON® -tuoteryhmästä. Osram OSOLON® Square -valikoimassa ei ole kuin kahta eri aallonpituutta (439-461 nm ja 635-666 nm), joten täytyy valita vielä Osram OSOLON® SSL -valikoimasta muutama eri aallonpituus. Taulukossa 2 on esitetty valittu LED-konfiguraatio kasvivalaisimelle.

Taulukko 2. Kasvivalaisimeen valittujen LED:ien tuotetiedot.

Valmis-taja	Tuote-vali-koima	Tuote-koodi	aallon-pituus (nm)	Teho (W)	Valo-voima (lm)	sätei-lyalue (°)	virta-alue (mA)	Kynnys-jännite (V)	Väri-sävy
Osram	OSLON Square	GD CSSRM2.14	439-461	2,030	45,4	120	200-1200	2,8-3,2	Deep blue
Osram	Oslon SSL 80	GB CS8PM1.13	450-480	0,998	40	80	100-1000	2,7-3,2	Blue
Osram	Oslon SSL 80	GA CS8PM1.23	609-624	0,735	87	80	100-1000	1,8-2,6	Amber
Osram	Oslon SSL 80	GR CS8PM1.23	612-630	0,735	68	80	100-1000	2,1	Red
Osram	OSLON Square	GD CSSRM4.24	635-666	1,400	62,9	120	100-1000	1,8-2,2	Hyper red

Taulukon 2 perusteella huomataan kynnysjännitteen olevan välillä 1,8-3,2 V, joten valitaan yhteisesti kynnysjännitteeksi 3,3 V. Kynnysjännite on jännite, joka vaaditaan LED:in syttymiseen. Taulukosta 2 huomataan myös virta-alueen olevan välillä 100-1200 mA. Virraksi voidaanakin täten valita 800mA, joka on valittujen LED:ien virta-alueen rajoissa, eikä ole lähellä maksimi-arvoa. Tämä mahdollistaa LED:ien käytön turvallisella alueella, jolloin komponentti ei lämpene aivan liikaa, jolloin tuotteen käyttöikä pitenee.

Taulukon 1 perusteella valitaan valittujen komponenttien suhteellinen määrä toisiinsa nähden, jotta vaadittava taulukon 1 mukainen konfiguraatio kasvin kasvuvaiheelle saavutetaan. Koska valaisin on tarkoitettu esikasvatukseen, punaisen valon aluetta on hiukan levennetty. Tämä siksi, että kasvi saadaan kasvamaan enemmän pituutta rajallisen esikasvatusalueen takia. Valittujen komponenttien suhde on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Valittujen LED:ien prosentuaalinen osuus koko valaisimen LED:eistä

Värisävy	aallon-pituus (nm)	%-osuus
Deep blue	439-461	10
Blue	450-480	5
Amber	609-624	5
Red	612-630	10
Hyper red	635-666	70

Taulukosta 3 huomataan, että sinisen osuus kokonaisuudessa on 15 % ja punaisen osuus oranssi mukaan lukien 85 %. Tämä siksi, että saadaan spektriä leveämmäksi, jolloin sama valo soveltuu useammalle chililajille.

### 3.1 LED-diodien vaatimukset virtalähteeltä

Teholedejä ajetaan virran avulla eikä niinkään jännitteellä niin kuin pienteholedejä. Tämän takia virtalähteen tuottama virta pitää olla suhteellisen häiriötön. Toisaalta jännitteen pitää olla koko ajan kynnysjännitettä suurempi. Koska LED:ejä kasvivalaisimeen tulee paljon, jotta saavutetaan tarvittava valon määrä lehvästölle, valaisimen ”polttimo-osa” toteutetaan

sarja- ja rinnakkaiskytkennöillä. Valaisimen koko käyttökohteessa tulee olemaan noin 2 metriä kertaa puoli metriä. Käyttökohteessa ennestään oleva 4000 lumenin loisteputkivalaisin on jokseenkin riittävä kasvien esikasvatukseen, mutta valitaan uuden LED-kasvivalon valovoimaksi 10000 lumenia. Tällöin alueelle vaadittavien LED:ien yhteislukumäärä on noin 200 kappaletta, laskettuna LED:in valovoiman keskiarvona 50 lumenia.

LED:it asetetaan 15 kappaleen sarjoihin, jolloin kynnysjännitteiden (kappaleessa 3 valittu 3,3 V) tuloksi tulee 49,5 V. Tämä voidaan pyöristää ylöspäin 50 voltiksi. Sarjoja tällöin tulee 13,33, joten pyöristetään 200 kappaletta ylöspäin lähimpää 15 jaolliseen lukuun, joka on 210. LED:ejä valaisimeen tulee siis silloin 14 kertaa 15-kappaleen sarja. Jokaiselle sarjalle pitää siis syöttää kappaleessa 3 valittu 800 mA virta ja 50 V jännite. Tällöin virtalähteen tehonkulutus voidaan laskea yhtälön 3.1 mukaisesti.

$$P_{ch} = U_{fw,tot} I_{ch} , \quad (3.1)$$

missä  $P_{ch}$  on yhden sarjaan kytketyn kanavan vaatima teho,  $U_{fw,tot}$  on yhden kanavan LED:ien kynnysjännitteiden tulo ja  $I_{ch}$  on yhden kanavan virta.

Tällöin voidaan laskea virtalähteeltä vaaditun tehon tarve laskemalla yhden kanavan teho kerrottuna kanavien eli sarjojen määrällä.

$$P_{tot} = 14 \times P_{ch} , \quad (3.2)$$

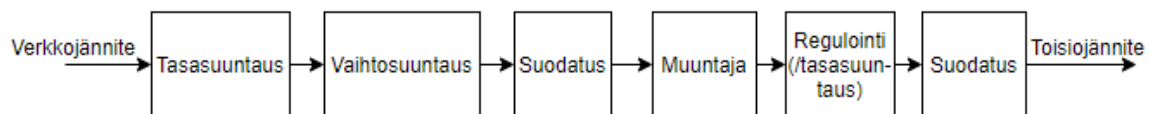
missä  $P_{tot}$  on virtalähteeltä vaadittu kokonaisteho.

Yhtälöstä 3.1 ja 3.2 laskien valaisimen LED:ien vaatimaksi kokonaistehoksi saadaan 560 W.

### 3.2 Virtalähde topologia

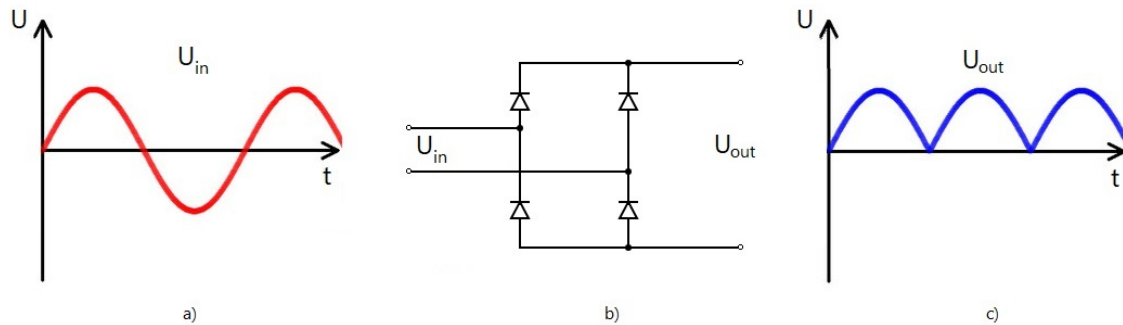
Virtalähteen topologiaa valittaessa on tärkeää valita käyttäjäturvallinen konfiguraatio, eli toisin sanoen ensiöjännite pitää olla galvaanisesti erotettu toisiojännitteestä. Galvaaninen erotus tarkoittaa kahden järjestelmän sähköisen osan välillä olevaa eristystä, joka estää varauksenkuljettajien siirtymisen osien välillä. Virtalähteessä erottimena toimii muuntaja ensiöjännitteen ja toisiojännitteen välillä. Tällöin ensiöpuolen vaihtojännite saa aikaan keskinäisinduktanssin vuoksi toisioon sähkövirran ja eri potentiaalissa olevat järjestelmän osat ovat toisistaan erotettuja.

Virtalähteen tyypiksi valitaan hakkuriteholähde, koska tällöin saadaan ensiöpuolen taajuuden muutoksella vaikutettua toisiojännitteen arvoon ja virtalähteen hyötysuhde saadaan pidettyä suurempana. Virtalähteen tehohäviöt koostuvat tällöin pääasiassa vaihtosuuntauksen kytkentähäviöistä, muuntajan häviöistä ja toisipuolen regulointihäviöistä. Virtalähteen toiminnallinen lohkoakaavio on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Virtalähteen toiminnallinen lohkoakaavio.

Verkkajännitteen tasasuuntaus toteutetaan kokoaaltosuuntaajalla. Kokoaaltosuuntaajan muuntaa sinimuotoisen verkkajännitteen kummatkin puolijaksot ”samansuuntaisiksi”. Tätä on havainnollistettu kuvassa sekä esitetty kytkentäkaavio kuvassa 3.

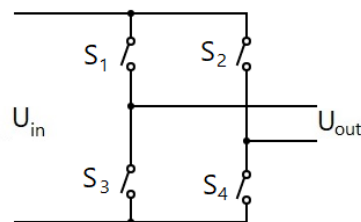


Kuva 3 A-kohdassa on esitetty tasasuuntaussiltan menevän verkkajännitteen sinimuotoinen aaltomuoto  $U_{in}$ , jossa koordinaatiston x-akselilla on jännite  $U$  ja y-akselilla aika  $t$ . Kohdassa b on esitetty tasasuuntaussiltan kytkentäkaavio. Kohdassa c on esitetty tasasuunnattu tasajännite  $U_{out}$ .

Ensiöpuolen tasasuunnattu jännite ensin suodatetaan kondensaattorien avulla tasaiseksi tasajännitteeksi. Tasajännite vaihtosuunnataan transistorien avulla suuritaajuiseksi (yli 20 kHz, mutta alle 100 kHz) kantiaalloksi. Tämä kantiaalto muunnetaan muuntajalla lähelle toisiojännitteen arvoa, joka vielä reguloidaan ja suodatetaan tarkasti haluttuun toisiojännitteeseen. Tämä jännite johdetaan LED:eille.

Vaihtosuuntauksessa tasajännite siis ”hakataan” transistorien avulla vaihtojännitteeksi. Milloista konfiguraatiota käyttää, perustuu suuresti tehoalueeseen, jolla laitetta käytetään. MOSFET:it ja IGBT:t ovat viime aikoina yleistyneet helpon ohjattavuutensa ansiosta, koska ohjauspiirin tehontarve on yleensä vain muutaman watin luokkaa. Toki IGBT etenkin vaatii erillisen piirin, jolla komponentti sammutetaan. Myös ylijännitesuojaus tulee tarpeen, kun muuntajaa ohjaava kytkin sammuu, pyrkii jännite nousemaan kelaan varastoituneen energian takia. Valittu komponentti vaikuttaa suoraan kytkentähäviöiden suuruuteen. Komponentin ollessa johtavassa tilassa sen ylitse vaikuttaa jännitehäviö ja resistanssi. Koska kytkin ei siirry johtavasta tilasta suljettuun tilaan välittömästi, vaan nousu- ja laskuajat vaihtelevat komponentteittain huomattavasti, lisää myös tämä kytkentähäviöitä.

Tässä työssä virtalähteen vaihtosuuntaus toteutetaan H-silta konfiguraatiolla ja kytkimenä toimii IGBT-transistori. H-silta koostuu neljästä transistorista, jossa kahta transistoria kerrallaan kytketään, jolloin sillan lähtö saadaan kytkettyä tulon maksimiin tai minimiin. H-sillan kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Vaihtosuuntaus toteutettuna H-sillalla, jossa  $U_{in}$  on tasavirtainen tulojännite ja  $U_{out}$  on vaihtovirtainen lähtöjännite. Kytkimenä toimivat transistorit on esitetty kuvassa kirjaimella  $S$ . Kytkentäsyklissä kytkimet  $S_1$  ja  $S_4$  ovat samanaikaisesti suljettuina ja kytkimet  $S_2$  ja  $S_3$  avoimena, kun lähtöjännite halutaan kytkeä tulojännitteen maksimiin. Kun lähtöjännite halutaan kytkeä tulojännitteen minimiin ovat kytkimet  $S_1$  ja  $S_4$  avoimena ja kytkimet  $S_2$  ja  $S_3$  suljettuina.

LED:ien käyttöikä on pitkä, mutta ei kumminkaan ikuinen. Tämän takia virtalähteen käyttöajan aikana tulee varmasti vastaan tilanne, jolloin LED:it tulee vaihtaa. Tällöin olisi hyvä, että virtalähteen toisiojännite olisi mahdollista vaihtaa, koska suurella todennäköisyydellä uudet LED:it poikkeavat käyttöjännitteeltään ja virralta nykypäivän LED:eistä. Energiays-tävällisin tapa olisi säätää vaihtosuuntaussillan kytkentätaajuutta sekä pulssisuhdetta (eli aikaa kuinka kauan kytkin on johtavassa tilassa yhden aallonjakson aikana). Tällöin vaikutetaan suoraan siihen kuinka suuri jännite toisioon tuotetaan. Muuntajan maksimiteho pysyy samana eli virtalähteellä pystyttäisiin edelleen tuottamaan sama teho kuin aikaisemmin.

Vaihtosuuntaajan ohjaus tarvitsee tiedon siitä mikä on lähtöjännitteen taso, toimiakseen tehokkaasti. Tämä tieto saadaan asettamalla toisiojännitteen ja ensiön väliin optoerotin. Optoerotin koostuu emittoivasta (yleensä IR eli infrared) diodista sekä photosensorista. Emittoivan ledin säteilyn voimakkuus riippuu jännitteestä, jonka photosensori muuttaa jälleen jännitteeksi. Tällöin toisiojännitteestä saadaan tieto vaihtosuuntausta ohjaavalle piirille, jolloin ohjauslogiikka pystyy tarvittaessa säätämään pulssisuhdetta ja kytkentätaajuutta. Tämä on tärkeää, koska toisiojännite vaihtelee toisiopiirin kuorman mukaisesti. Yleisin ohjaava piiri on nykyään mikroprosessori.

Virtalähteessä muuntajan sijoituksella on suuri merkitys muuntajan kokoon. Suomessa verkkojännite on 230 V vaihtojännitettä ja verkon taajuus on 50 Hz. Kuten kappaleessa 3.1 todettiin toisiojännitteen pitää olla koko ajan yli kanavan LED:ien kynnysjännitteiden tulo eli toisiojännitteen väre ei saa ylittää 500 mV. Tällöin toisiojännitteen väre suodatetaan kondensaattorilla ja kondensaattorin mitoitus määritetään yhtälön 3.3 avulla

$$C_{rip} = I_2 \frac{f_s}{\Delta U_{2,rip}}, \quad (3.3)$$

missä  $C_{rip}$  on suodinkondensaattorin kapasitanssi,  $I_2$  on toisiovirta,  $f_s$  on kytkentätaajuus ja  $\Delta U_{2,rip}$  on sallittu toisiojännitteen väre.

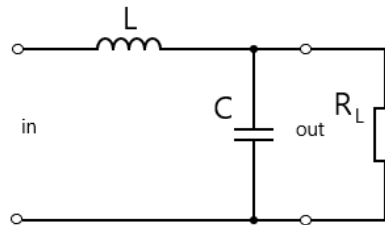
Yhtälöstä 3.3 huomataan, että kytkentätaajuuden kasvaessa, vaaditun suodinkondensaattorin arvo pienenee. Toisaalta myös muuntajan koko pienenee taajuuden kasvaessa, koska kelaan varastoivan energian määrä pienenee ja täten muuntajan sydämen poikkipinta-ala pienenee. Kytkentätaajuus ei kuitenkaan voi nousta rajattomasti, koska kytkentähäviöt kasvavat (Mohan & Undeland & Robbins, 2003). Muuntajan sydänmateriaalin ominaisuudet rajoittavat myös taajuuden nostoa. Ferriiteissä esiintyvien pyörrevirtahäviöiden osuus on melko merkityksellinen 100 kHz taajuuteen asti. Rengassydänmuuntajat ovat käyttökelpoisia vain pienillä taajuuksilla (50, 60 ja 300 Hz) pyörrevirtahäviöiden takia (Nerg, 2019). Kytkentätaajuus aiheuttaa myös laitteessa esiintyvää häiriötä, sekä häiriö kytkeytyy myös sähköverkkoon päin.

Koska virtalähteen pääasiallinen energiavarasto on muuntaja, asettaa muuntaja rajoituksia virtalähteen toiminnalle. Muuntajaan varastoitunut energia pitää kuluttaa ennen kuin uusi kytkentäjakso alkaa, koska muutoin sydänmateriaali kyllästyy ja muuntajan induktanssi romahtaa. Tällöin muuntaja menettää toiminnalleen oleellisen kyvyn varastoida energiaa ja muuntaja on toimintakyvytön. Muuntajan kyllästyminen estetään toisiopiirin suunnittelulla niin, että muuntajan varastoima energia, joko kulutetaan kuormassa tai vaihtosuuntaajan pulssisuhteen off-aikaa pidentämällä.

Joissakin virtalähteissä tässä kohtaa on myös tarpeellista suorittaa tasasuuntaus, riippuen siitä millainen on vaihtosuuntaajan jännitetasot. Tässä työssä muuntajan jälkeen tuleva toisiojännite pysyy positiivisena, joten tasasuuntausta ei ole tarpeellista tehdä. Toisiojännitteen regulointi voidaan toteuttaa esim. schottky-diodien avulla. Schottky-diodin jännitehäviö on pieni ja siirtyminen myötäsuuntaisesta estosuuntaiseksi on nopea (soveltuva jopa 1 MHz kytkentätaajuuksille). Reguloinnin jälkeen toisiojännitteestä suodatetaan kytkentätaajuuden aiheuttama suuritaajuuksinen jännitteen väre alipäästösuotimella. Alipäästösuotimen topologiaa voisi olla esim. RLC-alipäästösuodin, joka on esitetty kuvassa 3 ja sen rajataajuus (eli taajuus, jota isompia taajuuksia suodin alkaa vaimentamaan) yhtälössä 3.4.

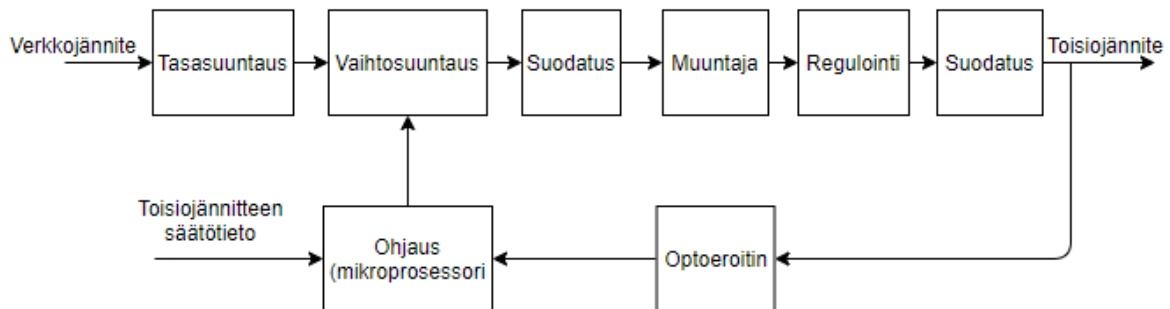
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.4)$$

missä  $f_c$  on rajataajuus,  $L$  on induktanssi ja  $C$  on kapasitanssi.



Kuva 5 RLC-alipäästösuodin, jossa  $L$  on kela,  $C$  on kondensaattori ja  $R_L$  on kuorman resistanssi

Edellä mainittujen asioiden pohjalta kuvan 2 mukainen virtalähteen toiminnallinen lohko-kaavio muokkautuu kuvan 6 mukaiseksi. Tällä konfiguraatiolla toteutettu virtalähde on turvallinen ja toisiojännite on vakaa, vaikka kuorman teho vaihtelisikin. Toisiojännitettä pystyy säätämään antamalla mikroprosessorille ohje toisiojännitteen säätöön muuttamalla vaihtosuuntauksen taajuutta ja pulssisuhdetta.

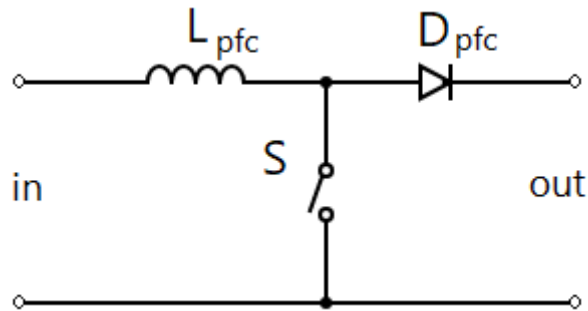


Kuva 6. Virtalähteen lohko-kaavio, johon lisätty vaihtosuuntauksen ohjaus.

### 3.3 Sähkömagneettisten häiriöiden suodatus

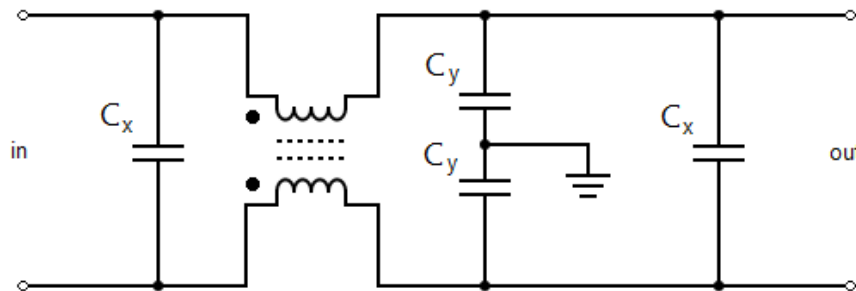
EN61000-3-2 standardin pääasiallinen tarkoitus on määrittää millaisia vaikutuksia virtalähteillä saa olla sähköverkkoon (Armstrong, 2002). Pääpiirteissään tämä meinaa sitä, että virtalähteessä pitää olla PFC-piiri (Power Factor Correction) sekä ensiöpuolen EMC-suodatus (Electromagnetic Compatibility). PFC-piirillä virtalähteen ensiojännite ja -virta saadaan mahdollisimman samaan vaiheeseen, jolloin tehokerroin kasvaa. Yleisimmin tämä on toteutettu aktiivisella-PFC:llä, jossa suurimman ”työn” tekee PFC-kela. Tällöin virtalähteen ka-

positiivista loistehoa kompensoidaan induktiivisella loisteholla, jolloin kokonaisloisteho pienenee eli tehokerroin kasvaa (Abdel-Rahman & Stückler & Siu, 2016). Aktiivisen PFC-tyypin pääpiirteinen kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 7.



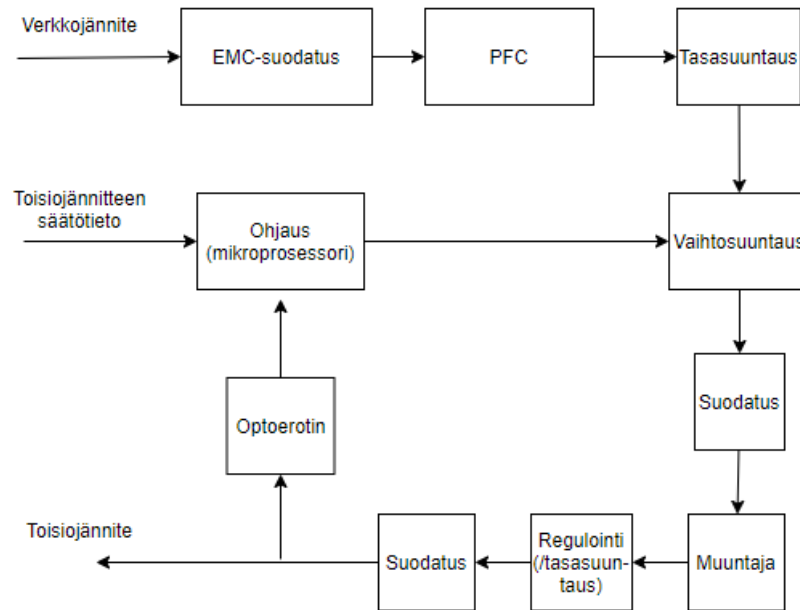
Kuva 7. Aktiivisen PFC-piirin kytkentäkaavio, jossa  $L_{pfc}$  on PFC-kela,  $D_{pfc}$  on PFC-piirin diodi ja  $S$  on kytkin.

EMC-häiriöt voidaan jakaa kahteen eri alueeseen erotus- ja yhteismuotoisiin häiriöihin. Erotusmuotoiset häiriöt voidaan mitata johtimien välisenä potentiaalierona, kun taas yhteismuotoiset häiriöt etenevät piirissä yhtä aikaa hyödyllisten signaalien kanssa. Yhteismuotoiset häiriöt voidaan suodattaa esimerkiksi yhteismuotoisen kuristimen avulla, sekä asettamalla Y-kondensaattori kummankin johtimen ja maan väliin. Erotusmuotoista häiriötä asettamalla X-kondensaattori johtimien väliin. Kuvassa 8 on esitetty yleisin hakkuriteholähteessä käytetty EMC-suodatus konfiguraatio (Murata, 1998).



Kuva 8. Hakkuriteholähteen EMC-suodatus konfiguraatio, jossa  $C_x$  on erotusmuotoisen häiriön suodatuksen soveltuva X-kondensaattori ja  $C_y$  on yhteismuotoisen häiriön suodatuksen soveltuva Y-kondensaattori. Keskeällä on yhteismuotoinen kuristin.

Lopullinen virtalähteen toiminnallinen lohkokaaavio muodostuu seuraavanlaiseksi, joka on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Lopullinen virtalähteen lohkokkaavio.

### 3.4 Virtalähteen ja valonlähteen kustannustehokkuus

Virtalähteen ja valonlähteen käyttökohde määrittää sen mitä ominaisuuksia kokonaisuudella pitää olla. Tarvitaanko mahdollisuutta valonlähteen muutoksille vai onko kokonaisuus ns. kertakäyttötavara. Jos kokonaisuus on käytössä vain laitteen käyttöajan ajan ja poistetaan käytöstä vikaantumisen jälkeen, ei ole järkevää panostaa virtalähteen toisiojännitteen säätömahdollisuuksiin. Tällainen käytäntö on ammattikäytössä varsin yleistä. Kotikäyttäjät ostaa valaisimen ns. yleiseen käyttöön, jolloin käyttäjä voi tuotteen elinkaaren aikana päättää vaihtavansa valonlähteen tehokkaampaan. Tällöin säätömahdollisuus on tärkeä ominaisuus.

Valaisinkokonaisuuden hinta koostuu pääasiassa LED:eistä, muuntajasta ja vaihtosuuntaajasta. LED:ien tuottaman valon määrä etenkin ammattilaiskasvihuoneissa, joissa valo on paljon, tulisi olla optimaalinen kasvien valontarpeen ja valaisimen kuluttaman tehon välillä. Toisin sanoen, jos valaisinkokonaisuuksia on useita, kaikki ns. turhat ominaisuudet kannattaisi karsia pois. Kotikäytössä kaikki lisäominaisuudet ja säätömahdollisuudet ovat ns. myyntivaltteja.

## 4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia millainen kasvivalaisimeen tarkoitettun virtalähteen ja valonlähteen tulisi pääpiirteissään olla ja millaisia toiminnallisia osia sen tulisi sisältää. Tutkimuksen aikana huomattiin virtalähteen toiminnan tarvitsevan lisäosia toimiakseen tehokkaasti ja tarkoituksen mukaisesti. Todettiin myös kuinka erilaiset säädökset vaikuttavat siihen, miten etenkin hakkuriteholähteiden tulisi toimia sekä hieman esitettiin millaisia vaihtoehtoja on olemassa tietyn toiminnallisen osion toteuttamiseen. Tämän työn perusteella lukijalla on periaatteellinen käsitys hakkuriteholähteen toiminnasta ja siitä millainen valonlähde vaaditaan tehokkaaseen kasvien yhteyttämiseen ja miten siihen päästään valonlähteen optimoinnin avulla.



## LÄHTEET

Sam Abdel-Rahman, Franz Stückler, Ken Siu. 2016. PFC boost converter design guide (verkkodokumentti) (viitattu 3.6.2020). Saatavissa [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_PFCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_PFCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05)

I-HLED. 2020. White light in horticulture - supplemental vs non-supplemental products (verkkodokumentti). (viitattu 18.5.2020). Saatavissa <https://www.rs-online.com/designspark/white-light-in-horticulture-supplemental-vs-non-supplemental-products>

Nerg, J. 2019. Sähkömagneettiset komponentit: opetusmoniste. Lappeenranta: LUT-yliopisto

Jillian Whitehead, 2019, Plant morphology and spectrum: How plants respond to light quality. (verkkodokumentti). (viitattu 17.05.2020). Saatavissa <https://pllight.com/plant-morphology-and-spectrum-how-plants-respond-to-light-quality/>

Karhu, S., 2007. *Sadonkorjuu Tutkittua puutarhatuotantoa 2003 - 2005*, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.

Keith Armstrong. 2002. A Practical Guide for EN 61000-3-2 - Limits for harmonic current emissions (verkkodokumentti). Viitattu 3.6.2020. Saatavissa [https://www.emcstandards.co.uk/files/61000-3-2\\_mains\\_harmonics.pdf](https://www.emcstandards.co.uk/files/61000-3-2_mains_harmonics.pdf)

Li, Q. & Kubota, C., 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, s 59-61. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847209001348>

Mohan, Undeland, Robbins. 2003. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Third Edition. New York: Hamilton Printing Company s.23

Murata. Noise Suppression by EMI Filtering: Basics of EMI Filters. No. TE04EA-1, 1998, s.26-30 (viitattu 3.6.2020). Saatavissa <https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/emc/emifil/knowhow/26to30.ashx>

Philips, 2009. Philips MASTER GreenPower CG T 400 W E40 ISL tuotetietodokumentti, (viitattu 17.5.2020). Saatavissa [https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/content/fp928158709227-pss-fi\\_fi/928158709227\\_EU.fi\\_FI.PROF.FP.pdf](https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/content/fp928158709227-pss-fi_fi/928158709227_EU.fi_FI.PROF.FP.pdf)