

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan osasto

Henri Aalto

**TEHOLÄHTEET LED-VALAISTUKSESSA JA SOPIVAN VALINTA
KOTITALOUSKÄYTTÖÖN**

Lappeenranta 16.11.2011

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Henri Aalto

Teholähteet led-valaistuksessa ja sopivan valinta kotitalouskäyttöön

Kandidaatintyö

2011

28 sivua, 10 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Professori Pertti Silventoinen

Hakusanat: LED, teholähde, tehokerroin, hyötysuhde

Led-valaisun kehitys on mahdollistanut sen käytön kodin yleisvalaistuksessa. Työssä tutkitaan eri led-valaisuun soveltuvia teholähteitä, joista valitaan teknisiltä ominaisuuksiltaan sopivin kodin yleiskäyttöön. Tutkittavia teholähteitä ovat lineaariset ja hakkuriteholähteet. Teholähteiden ominaisuuksista tarkastellaan hyötysuhteita ja tehokertoimia, joista molempien perusteella sopivin teholähdetyyppi valitaan.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Electrical engineering

Henri Aalto

Power supplies for led-lighting and selecting proper supply for domestic use

Bachelor's thesis

2011

28 pages, 10 images and 1 table

Examiner: Professor Pertti Silventoinen

Keywords: LED, power supply, power factor, efficiency

Development of led lighting has made it a valuable lighting replacement in domestic use. In this paper, different power supplies are studied, from which the most suitable by its properties is chosen for generic domestic use. Studied power supplies are linear and switching power supplies. Energy efficiencies and power factors are studied from power supplies and power supply with solid value in both efficiency and power factor is chosen.

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	3
KÄYTETYT MERKINNÄT	4
1. JOHDANTO	5
2. LED.....	6
3. TEHOLÄHTEET	7
3.1. Lineaariset teholähteet.....	7
3.2. Buck-hakkuri	10
3.3. Boost-hakkuri	12
3.4. Boost-Buck hakkuri.....	14
3.4.1. Cuk-hakkuri	15
3.4.2. SEPIC-hakkuri	17
3.5. Flyback-hakkuri	19
3.5.1. Kahden käämityksen flyback	20
3.6. Tehokerroin led-ohjaimissa.....	21
3.6.1. Tehokerroimen vaikutus led-ohjaimissa	22
3.6.2. Bi-Bred.....	23
4. YHTEENVETO	25
5. LÄHTEET.....	26

KÄYTETYT MERKINNÄT

C	Kondensaattori [F]
D	Pulssisuhde
E	Sähköenergia [Wh]
I	Virta [A]
l	Pituus [m]
L	Kela [H]
P	Teho [W]
PF	Tehokerroin
Φ	Valovirta [lm]
η	Hyötysuhde
R	Vastus [Ω]
U	Jännite [V]

1. JOHDANTO

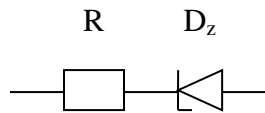
Energiankulutus kasvaa jatkuvasti. Tämä lisää hiilidioksidipäästöjä, jotka aiheuttavat ilmaston lämpenemistä. Energiankulutusta voidaan vähentää suunnittelemalla energiankäyttöä paremmin. Valaistuksen osuus on esimerkiksi taloussähköstä noin 22 %. EU:n alueella tämä tarkoittaa 312 TWh sähköenergiankulutusta. [12] Perinteiset valaistuslaitteet eli hehkulampun kaltaiset hyödyntävät tehostaan valaistukseen vain hyvin pienen osan, joten suurin osa kuluu hukkaan lämpötehoon. Yksi potentiaalinen energiansäästökohde on siis valaistus, jossa korvaamalla perinteisiä valaistuslaitteita uudemmilla laitteilla, kuten energiansäästölamput ja led-valaisimet.

Ledin valotehokkuus on selkeästi parempi kuin esimerkiksi perinteisen hehkulampun. Valotehokkuus, Φ , ilmoitetaan lumeni/watti, eli valoteho tehoyksikköä kohti. Ledillä tämä arvo on yleisesti noin 75 - 90 lm/W riippuen valon väristä, kun se hehkulampulla on 15 lm/W. [3] Led-valaistuksella tarvitaan siis noin viisi kertaa vähemmän energiaa.

Tässä työssä tutustutaan led-valaisuun, erityisesti led-valaistuksessa käytettyihin teholähteratkaisuihin. Työssä tutkitaan parhaiten kotitalouskäyttöön soveltuvaa led-ohjainta, joka riittää korvaamaan valoteholla perinteiset valaistuslaitteet. Eri teholliset lähteet soveltuvat eri käyttökohteisiin ja niitä voidaan valikoida erilaisiin tarkoituksiin. Työssä käsitellään yleisimpiä tehollähteitä eli lineaariset tehollähteet ja kytkevät tehollähteet kuten buck-, boost-, buck-boost- ja flyback-hakkurit. Tehollähteistä mainitaan perusasiat kuten yleiset kytkennät ja käyttökohteet. Lisäksi tutustutaan eri tehollähteiden hyötysuhteisiin ja tehokertoimiin, sekä ratkaisuihin joilla eri tehollähdetyypeillä voidaan parantaa kyseisiä ominaisuuksia. Myös led-ohjaimista aiheutuvien huonosta tehokertoimesta johtuvien haittojen vaikutusta tarkastellaan.

2. LED

Led eli valoa emittoiva diodi (light emitting diode) on toiminnaltaan tavallisen diodin kaltainen. Led alkaa emittoida valoa, kun siihen syötetään riittävästi energiaa, eli vähintään kynnysjännitteen suuruisella jännitteellä virtaa. Kun saavutetaan riittävä energiataso, virittyvät ledin puolijohteet uuteen tilaan, joka aiheuttaa fotonien liikkeen. Eri puolijohdemateriaaleista valmistetut ledit emittoivat eriväristä valoa. GaAs-materiaalista valmistetut ledit voivat kestää jopa 100 000 tuntia. Ledeistä syntyvällä valolla on hyvin pieni kaista, joten valo on puhdasta. Ledien virran tarve on kirkkaudesta riippuen muutamista milliampeereista muutamaa ampeereihin. Teholedien virranohjaus on erittäin tärkeä osa teholähdesuunnittelua, sillä väärin käytettynä teholedin elinikä voi pudota merkittävästi. [1, 10]



Kuva 1. Ledin sijaiskytkentä. [1]

Led voidaan kuvata sijaiskomponenttien avulla jossa on vastus R, ja zener-diodi (ks. kuva 1). Vastuksella kuvataan ledissä tapahtuvaa jännitteenalenemaa. Tällaista kytkentää on hyvä käyttää kokeiluvaiheessa, koska tällöin liian suurilla virran arvolla led ei aiheuta näkövaurioita testaajille, ja rikkoutuessaan zener-diodin kustannukset ovat pienemmät. [1]

Ledit ovat myös nopeampia kuin hehkulankalamput. Led syttyy kynnysjännitteen ylittyessä nanosekunneissa, kun esimerkiksi perinteinen hehkulankapolttimon vasteaika voi olla kymmeniä millisekunteja. [1]

3. TEHOLÄHTEET

Teholähteillä ohjataan LEDien virtaa. Jossain tapauksissa on yksinkertaisinta käyttää helppoa lineaarista rajoitinta, mutta suuressa osassa tarvitaan virranohjaukseen kytkimellä ohjattua tehölähdettä. Lineaarinen ohjaus on energiatehokkuudeltaan huono, tuottaa liikaa lämpöä ja käyttöjännitteen on oltava kuorman jännitettä suurempi. Kytkimellisillä teholähteillä ongelmaksi muodostuvat sähkömagneettinen häiriö (EMI), energiatehokkuuden optimoiminen ja korkeammat kustannukset. Tässä kappaleessa esitetään useimmat ledien ohjaukseen suunnitellut teholähteet sekä niiden yleisimpiä käyttökohteita. [1]

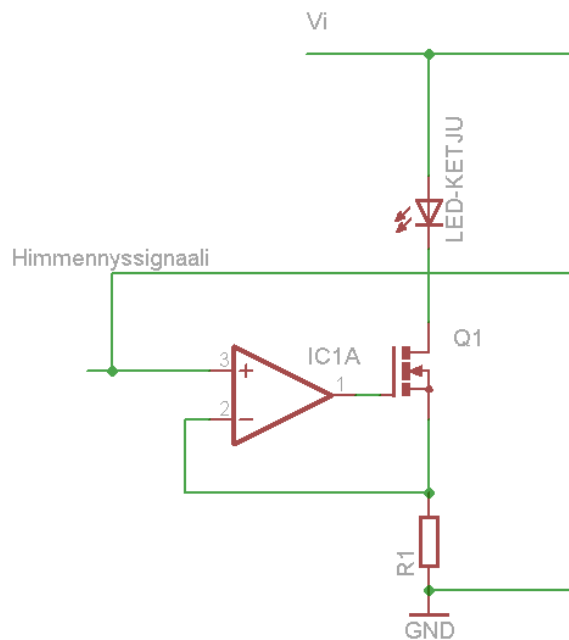
LEDit toimivat vakiojännitteisenä kuormana, jolloin teholähteenä tulisi käyttää vakiovirtalähdettä. Tämä onkin usein ongelmana, koska suurin osa sähköpiireistä toimii vakiojännitelähteinä. Vakiojännitelähdettä käytettäessä tulee suunnitella piiri, joka pitää virran arvoa lähes vakiona. [1]

Suunnitellessa usean ledin järjestelmiä, ledejä suunnitellaan käytettäväksi rinnakkain usean ledin ketjuina. Led-ketjujen välillä voi tällöin olla eroja jännitteen alenemassa, mikä voi johtua ketjujen lämpötilaeroista. Tasaisen valon saamiseksi tulee suunnitella jokaiselle led-ketjulle yhtä suuri virta. [1]

”Käytettäessä vakiovirtalähdettä, ledin tai led-sarjan ylitse oleva jännite määräytyy ledien mukaan. Siinä tapauksessa, että virtalähteestä saadaan enemmän virtaa mitä ledeille vaaditaan, voidaan käyttää virranjakopiirejä. Virranjaon voi toteuttaa yksinkertaisimmillaan virtapeilillä.” [1]

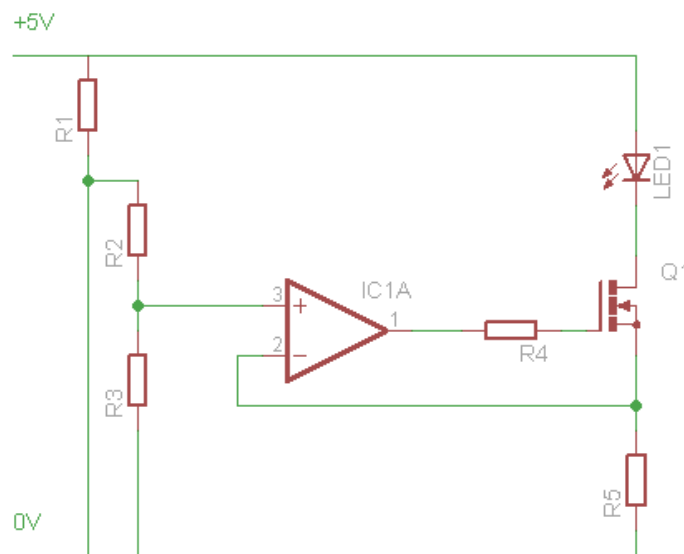
3.1. Lineaariset teholähteet

Lineaarista ohjausta käytetään usein esimerkiksi autojen valosuunnittelussa, sillä autojen häiriöstandardit ovat tarkempia kuin perusvalaistuskohteilla, ja autoissa hukkatehoa on helpompi jäähdyttää esimerkiksi ohjaamalla sitä auton runkoon. Lineaarisen ohjauksen voi toteuttaa jänniteregulaattorilla tai käyttäen vakiovirtalähdettä. [1]



Kuva 2. Jänniteregulaattorin periaatekytkentä. [11]

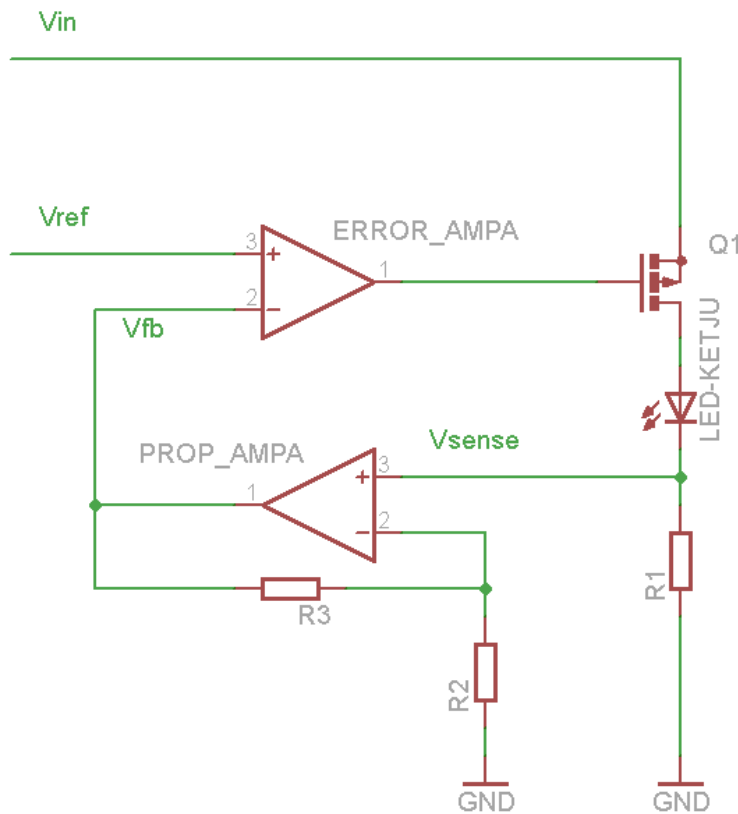
Jänniteregulaattorikytkennässä (kuva 2) käytetään operaatiovahvistinta. Operaatiovahvistin pyrkii pitämään lähtöjännitteen seuranta- ja referenssijännitteen erotuksen suuruisena. Jänniteregulaattorin toimiessa vakiovirtalähteenä mitataan virtaa vastuksen R, joka sijaitsee lähdön ja takaisinkytkentähaaran välissä, yli. [1]



Kuva 3. Vakiovirtapiirin periaatekytkentä. [1]

Vakiovirtapiirin (kuva 3) voi toteuttaa monella tapaa. ”Yksi tapa on käyttää integroituja piirejä, yksi tapa taas on käyttää diskreettejä komponentteja, ja yksi tapa edellisten yhdistelmiä. Yksinkertaisessa vakiovirtalähteessä käytetään operaatiovahvistinta laajalla tulojännitealueella. Virtatason asettamiseksi tarvitaan referenssjännite. Kun tähän verrataan jännitettä vastuksen R yli, operaatiovahvistimen lähtöjännite nousee tai laskee virran ohjaamiseksi.” [1]

Lineaarisen teholähteen toimintaa voi parantaa vähentämällä mittavastuksessa tapahtuvaa jännitehäviötä. Tämä tapahtuu lisäämällä operaatiovahvistin mittavastuksen ja erovahvistimen väliin. Vastuksessa tapahtuva tehohäviö on kääntäen verrannollinen operaatiovahvistimen vahvistukseen, kun tehohäviötä verrataan tyypilliseen lineaariseen teholähteeseen. Näin ollen hyötysuhde paranee. [2]



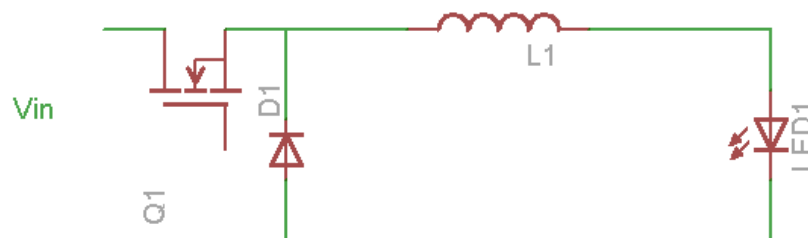
Kuva 4. Lineaarisen teholähteen hyötysuhteen parantamiseksi ehdotetun piirin rakenne. [2]

Hyötysuhteen parantamista on tutkittu kahdella kytkennällä joista toisessa on lisäoperaatiovahvistin takaisinkytkentähaarassa (kuva 4), ja toisessa ei ole

lisäoperaatiovahvistinta. Kuormana on käytetty kolmea teholedyä. Käyttöjännite on välillä 6.3-32V. Haluttu lähtövirta, 350 mA, saavutetaan, kun käyttöjännite on 12.78V, ilman operaatiovahvistinta ja 11.76V, operaatiovahvistimella. Paras hyötysuhde, η , halutulla lähtövirralla, 350 mA, jolloin ledistä saadaan paras valoteho, on ohjaimelle ilman lisäoperaatiovahvistinta 83.84 %, kun taas lisäoperaatiovahvistimellisen ohjaimen hyötysuhde on 91.04 %. Kummassakin tapauksessa parhaimmat hyötysuhteet saavutetaan pienemmillä tulojännitteillä, jolloin vastuksessa ei synny hukkathehoa, mutta tällöin ledien lähtövirta on pienempi, eikä valoteho ole haluttu. Kummassakin tapauksessa hyötysuhde putoaa käyttöjännitteen kasvaessa, mikä on odotettavaa lineaariselle tehölähteelle. [2]

Lineaaristen tehölähteiden suurin etu on se, etteivät ne tuota ollenkaan sähkömagneettisia häiriöitä. Lisäksi lineaariset tehölähteet ovat usein halvempia, pienempiä kokoisia ja helpompia käyttää kuin kytkevät tehölähteet. Näin ollen ei tarvita lisäkustannuksia aiheuttavia häiriösuodattimia. Haittoja lineaarisilla tehölähteillä ovat huono hyötysuhde ja lähes aina tarve jännitemuuntajalle. Mikäli käyttöjännite on merkittävästi suurempi kuin led-ketjun vaatima jännite, syntyy virtaa mittaavassa vastuksessa paljon lämpöä, mitä tarvitsee jäähdyttää. Jäähdytysratkaisu lisää kokoa ja kustannuksia. Jos käyttöjännite on hieman ledien jännitettä suurempi, lineaarinen tehölähde voi olla hyötysuhteeltaan parempi kuin kytkimellinen tehölähde. Jännitemuuntaja lisää tehölähteen kokoa ja voi heikentää hyötysuhdetta, koska hyötysuhde vaihtelee, kun jännite-ero vaihtelee muunnetun jännitteen ja ledien jännitteen välillä. Lineaarista tehölähdettä ei voida käyttää kohteissa, joissa käyttöjännite on ledien jännitettä pienempi. [1,2]

3.2. Buck-hakkuri



Kuva 5. Buck-hakkurin periaatteellinen kytkentä. [4]

”Buck-hakkuri (kuva 5) on yksinkertaisin kytkevistä ohjaimista. Sitä käytetään sovelluksissa, joissa kuormajännite on korkeintaan 85 % käyttöjännitteestä. 85 % raja johtuu ohjaimessa tapahtuvissa kytkentäviiveistä. Buck-hakkuri toimii siten, että kytkimen johtaessa, virta kulkee ledin ja kelan läpi. Kun kytkin ei johda, kelaan varastoitunut virta purkautuu diodin kautta muodostaen virtapiirin ledin kanssa.” [1]

”Tasajännitteisessä ympäristössä toimivassa buck-hakkurissa haluttava kytkentätaajuus määrittää kelan koon. Kelan koon määrittää myös haluttava rippeli ledien virrassa, esimerkiksi +/- 15 %. Buck-hakkurissa kytkimen pulssisuhde, D, on lähtöjännitteen suhde tulojännitteeseen. Tulojännitteen suodatuskondensaattorilla voidaan ehkäistä sähkömagneettisten häiriöiden syntyä.” [1]

”Virheitä suunniteltaessa buck-hakkuria ovat liian suuri kela sekä väärän tyyppinen diodi. Myös liian suuri kela aiheuttaa ongelmia.” [1]

Mikäli tarvittava lähtöjännite on pieni, esimerkiksi ohjattaessa yhtä lediä verkkojännitteellä, voidaan käyttää kahta buck-hakkuria kaskadina. Tässä tapauksessa yhden buck-hakkurin toimiminen on hankalaa, sillä hakkurin pulssisuhde tulee varsin pieneksi suurilla kytkentätaajuuksilla. [1]

”Hystereesisäätöä voidaan käyttää buck-hakkurissa huippuvirtasäädön vaihtoehtona. Hystereesisessä säädössä käytetään nopeaa komparaattoria ohjaamaan mosfettiä. Komparaattorin tulo seuraa ledille syötettyä jännitettä. Mosfet kytketään päälle, kun jännite on alle referenssijännitteen, ja pois päältä, kun referenssijännite ylitetään. Tällä tavoin led-virta pystyy vakiona, riippumatta jännitelähteen muutoksista.” [1]

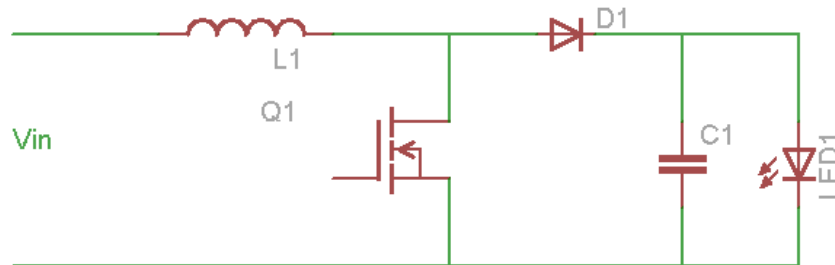
Mikäli jatkuvan johtavuuden tilassa toimivan hakkurin tehokerroin halutaan hyväksi, nousee kustannukset korkeaksi. Lisäksi tällaisiin virtaohjattuihin tehomuuntimiin on hankala lisätä himmennintä, mikä heikentää sen käyttöä korvaavana valaisemina. Jatkuvasti johtavassa tilassa toimiva hakkuri voi lisätä myös tehohäviöitä johtuen korkeista diodin (esim. flywheel) estoviivevirroista. Sitä vastoin ei-jatkuvasti johtavassa

tilassa toimiva hakkuri on tuloresistiivinen yksinkertaisella pulssisäädöllä taaten luonnollisen tehokertoimen korjauksen. Ei-jatkuvan haittapuolena on tarve suurelle varauskondensaattorille. [4]

Kahden eri toimintatyyppin yhdistämistä kaskadiksi on kokeiltu tutkimuksissa. Ensimmäisessä pääteasteessa on ei-jatkuvasti johtava hakkuri. Tämä takaa yksinkertaisen säädön ja himmentimien käytön. Toinen pääteaste on jatkuvasti johtava, ja tällä pyritään luomaan jatkuva vakio LED-virta, mikä pienentää varauskondensaattorin tarvetta. Kahden pääteasteen ohjain on hyötysuhteeltaan huonompi. Hyötysuhde on parempi, kun käytössä ovat pienet kondensaattorit, ja käyttöjännitteen ollessa pienempi. Tehokertoimeksi on mitattu 0,996 (U_{in} 100V) ja 0,988 (U_{in} 240). [4]

Buck-hakkurin toiminta voidaan myös suunnitella lomittaiseksi. Lomittaisella toiminnalla tarkoitetaan sitä, että LED-ketjun ympärillä on kaksi energiaa varastoivaa kelaa, joiden toiminta on toisiinsa nähden 180° vaihesiirroksessa. Kun toisen kelan energia purkautuu LED-ketjuun, ladataan toista kelaa, ja toisinpäin. Tämän tyyppisellä ohjaimella saavutetaan hyötyjä nopeammassa PWM-himmennyksessä, sekä nopeammassa kytkentäajoissa, joka johtaa parempaan hyötysuhteeseen. Voidaan käyttää myös pienempiä induktanssiarvoja, mikä auttaa magneettisten komponenttien optimointia. Haittapuolena voidaan mainita suurempi määrä komponentteja, ja tuloasteessa käytettävän tasajännitteen rajoitukset riippuen asetetuista toimintarajoista. Tällaiselle teholliselle ratkaisulle hyötysuhteeksi saadaan pienellä himmennysasteella jopa 97 %, kun se normaalia buck-hakkuria käyttäen on parhaimmillaan noin 95 %. [3]

3.3. Boost-hakkuri



Kuva 6. Boost-hakkurin periaatekytkentä.[5]

”Boost-hakkureita (kuva 6) käytetään kohteissa, joissa lähtöjännite on suurempi kuin tulojännite. Normaalisti boost-hakkuria käytetään kohteista, joissa lähtöjännite on vähintään 1,5-kertainen tulojännitteeseen nähden. Boost-hakkuri voidaan suunnitella hyötysuhteeltaan varsin hyväksi, jopa 90 %:iin. Sekä mosfet että led-ketjut ovat kytketty samaan maahan. Tämä yksinkertaistaa led-virran havainnointia. Tulovirta voi olla jatkuvaa, jolloin virran rippelin suodattaminen on helpompaa ja tällöin EMI-standardien mukaiset rajat saavutetaan helpommin.” Boost-hakkurin pulssisuhde on yksi vähennettynä tulo- ja lähtöjännitteen suhteella. [1]

”Boost-hakkurilla on haittapuolensa ohjattaessa led-ketjuja niiden matalan impedanssin takia. Boost-hakkurin lähtövirta on pulssimuotoinen, joten tarvitaan iso lähtökondensaattori suodattamaan rippeliä. Suuri kondensaattori vaikeuttaa PWM-himmentimen käyttöä. Muuntimen kytkeminen päälle ja pois pwm-himmentimen toimimiseksi lisää kondensaattorin purkautumisen ja latautumisen takia virran nousu- ja laskuaikoja. Buck-hakkurin tapainen takaisinkytkemätön säätö ei ole mahdollinen boost-hakkurilla, vaan takaisinkytkentää tarvitaan hakkurin toiminnan stabiloimiseksi. Tämä myös vaikeuttaa pwm-himmentimen käyttöä, sillä säätimellä täytyy olla korkea taajuuskaista saavuttaakseen riittävät vasteajat. Lähtövirtaa ei säädetä oikosulun aikana. Tulosta lähtöön on reitti diodin ja kelan kautta, joten kytkintransistorin poiskytkentä ei vaikuta lähdön oikosulkuvirtaan. Led-ketjuun voi tulla kytkentävirtasysäys, mikäli tulojännitteen transientti nostaa jännitteen yli led-ketjun jännitteen. Korkea virtasysäys voi tuhota ledit.” [1]

”Boost-hakkuri voi toimia sekä jatkuvan että ei-jatkuvan johtavuuden toiminnalla. Boost-hakkurin toiminta määräytyy kelan virran aaltomuodon mukaan. Jatkuvasti johtavaa boost-hakkuria käytetään, mikäli lähdön ja tulojännitteiden suhde on korkeintaan 6. Mikäli suhde on suurempi, tulee käyttää ei-jatkuvasti johtavaa boost-hakkuria. Ei-jatkuvassa muuntimessa on korkeita kelavirtoja, mitkä lisäävät kelan rautahäviöitä. Ei-jatkuvan johtavuuden muuntimet ovat tyypillisesti epätehokkaita jatkuviin verrattuna,

luovat enemmän sähkömagneettista häiriötä ja yleensä niitä käytetään, kun on kyseessä pienemmät tehotasot.” [1]

”Suunniteltaessa jatkuvan johtavuuden hakkuria tulee ottaa huomioon riittävä ylijännitesuojaus. Jos ledien ja piirin väliltä katkeaa yhteys piirin ollessa toiminnassa, lähtöjännite kasvaa kunnes komponentteja alkaa hajota. Lähtöjännite tulisi rajoittaa pienimmän hajoamisjännitteen suuruiseksi.” [1]

”Ohjaimen testaamista pienellä led-ketjulla tulee myös välttää, sillä jännitteen alenema voi olla käyttöjännitettä pienempi, mikä johtaa suureen virtaan, joka voi rikkoa ledejä.” [1]

Boost-hakkurin tapauksessa led-ketjussa olevien ledien määrää rajoittaa jännitevahvistus, joka on erittäin vaikea saada suureksi johtuen korkeista virranmuutosarvoista, mikä johtaa sähkömagneettisten häiriöiden kasvuun. Myös kytkinhäviöiden määrä kasvaa jännitevahvistuksen noustessa, jolloin hyötysuhde putoaa. [5]

Boost-hakkurin hyötysuhde on hyvä, kun jännitevahvistus on välillä 2-8. Voidaan havaita, että Winderin mainitsema tulo- ja lähtöjännitteen raja-arvo (kuusi) jatkuvasti johtavalle hakkurille pitää paikkansa. Käyttäessä jatkuvasti johtavaa hakkuria voidaan sen hyötysuhdetta suurella lähtöjännitteellä parantaa käyttämällä latauspumppuja boost-hakkurin perässä. Jännitevahvistuksen ollessa enemmän kuin 8, saadaan hyötysuhde paremmaksi käyttämällä useita latauspumppuja. [1,5]

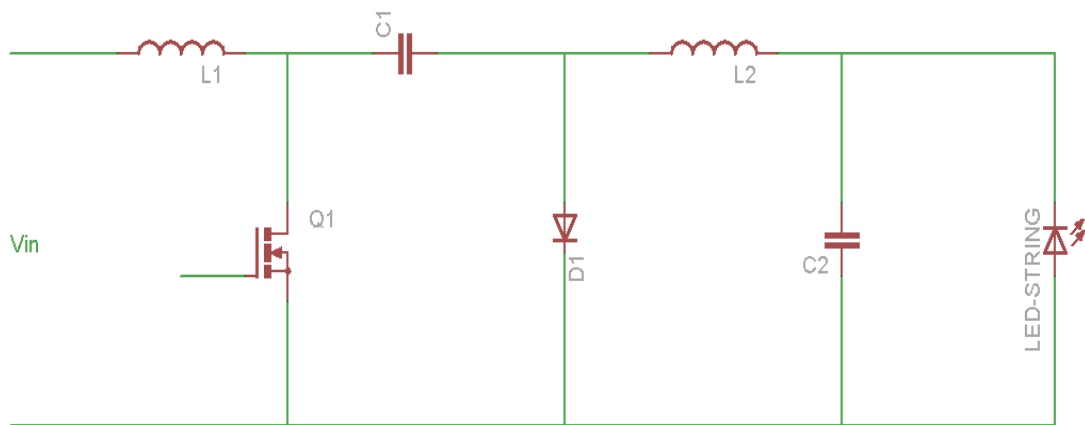
3.4. Boost-Buck hakkuri

”Boost-buck hakkuri on yksikytkimellinen muunnin, joka koostuu boost- ja buck-hakkureiden kaskadikytkennästä. Hakkurilla on monia hyviä etuja. Lähtöjännite voi olla suurempi tai pienempi kuin tulojännite. Tällainen hakkuri on ideaalinen tapauksissa, joissa tulojännite vaihtelee led-ketjun jännitteen ympärillä toimintajakson aikana. Tällaiset olosuhteet vallitsevat yleensä autoliikennesovelluksissa, tai jos halutaan led-

ohjain, joka pystyy toimimaan laajalla käyttöjännitealueella tai kuormalla. Hakkurissa on keloja sekä tulossa että lähdössä. Molempien toimiessa jatkuvan johtavuuden tilassa keloissa on jatkuvan virran ja pienen virtarippelin takia vähemmän tarvetta suodatuskondensaattoreille. Jatkuva tulovirta helpottaa myös johtuvien sähkömagneettisten häiriöiden standardien täyttämistä. Sopivalla piirilevyllä ja suunnittelulla sähkömagneettisen säteilyn standardirajat saadaan helposti täytetyksi. Kapasitiivinen eristys on myös yksi eduista, sillä kytkimen rikkoutuessa tulo menee oikosulkuun, eikä täten vaurioita lähtöä joten ledit ovat suojattu kytkimen rikkoutumiselta.” [1]

Käytetyimmät boost-buck-topologiat ovat Cuk-hakkuri ja SEPIC-hakkuri. Näiden käyttö on yleistynyt kondensaattorien kehityksen myötä tapahtuneen sarjaresistanssin pientymisen takia. Pienempi sarjaresistanssi vähentää lämpöhäviöitä ja tämän kautta tapahtuvaa kondensaattorien tuhoutumista. [1]

3.4.1. Cuk-hakkuri



Kuva 7. Cuk-hakkurin periaatekytkentä. [6]

Cuk-hakkuria (kuva 7) pidetään optimaalisena topologiana, mikäli käytettävissä on ei-pulssimainen tulo- ja lähtövirta, vähäinen määrä kytkimiä tai varastoivia komponentteja, ja halutaan korvata kela energiavarastona käyttäen kondensaattoria. Cuk-hakkuri voi toimia sekä jännitettä nostavana, että laskevana teholähteenä. [6]

”Monista hyvistä puolistaan huolimatta Cuk-hakkurilla on myös huonompia puolia, jotka estävät sen laajemman käytön. Hakkurin toiminnan stabiloiminen on vaikeaa. Kunnollisen toiminnan edellyttämiseksi tarvitaan usein kompleksisia kompensointipiirejä. Kompensointi hidastaa hakkurin aikavastetta, mikä rajoittaa PWM-himmentimen käyttöä. Lähtövirtasäädetyssä boost-buck-hakkurissa esiintyy säätämätöntä ja vaimentamatonta resonanssia johtuen kela-kondensaattori-parista. Kelan (L1) ja kondensaattorin (C1) resonanssi johtaa ylisuuriin jännitteisiin kelan yli, mikä voi vaurioittaa piiriä. Kelan ja kondensaattorin kompensointi voidaan toteuttaa suunnittelemalla RC-kompensointipiiri kondensaattorin C1 yli. Kompensointipiirin stabiloiminen taas lisää ongelmia.” Kompensointi ja pwm-himmentimen vasteongelma voidaan korvata käyttämällä ulkoista piiriä, kuten esimerkiksi Winderin esittämää Supertexin HV9930-piiriä. [1]

”Kyseisessä piirissä on kaksi hystereesiohjainta, yksi tuloasteessa, ja toinen lähtöasteessa. Piiri toimii siten, että käynnistyksessä tulon hystereesiohjain hallitsee toimintaa, ja hakkurin toiminta on tulovirtarajoitettu. Kytkin kytetään päälle, jolloin tulovirta nousee virtarajaan asti, minkä jälkeen virta putoaa alarajaan. Tämä jatkuu siihen saakka, kunnes lähtövirta on riittävästi, jolloin lähtöasteen hystereesiohjain alkaa toimia. Lähtövirta pidetään asetetuiden arvojen välissä. Toisin kuin huippuvirran mukaan toimivissa ohjaimissa, hystereesiohjaus takaa lähtövirralle vakiokeskiarvon riippumatta tulo- ja lähtöjännitteiden vaihteluista.” [1]

Tasapainotilassa jännite molempien kelojen L1 ja L2 yli on nolla. Kuitenkin jännite kondensaattorissa C1 on tulo- ja lähtöjännitteiden summa. Kun kytkin kytetään päälle, alkaa virrat keloissa nousta. Kytkimen ollessa pois päältä, kelojen virta laskee. Tulo- ja lähtöjännitteen suhde voidaan määrittää cuk-hakkurissa, kun tiedetään pulssisuhde D, seuraavasti [1]

$$U_{in}D = U_o(1 - D), \quad (1)$$

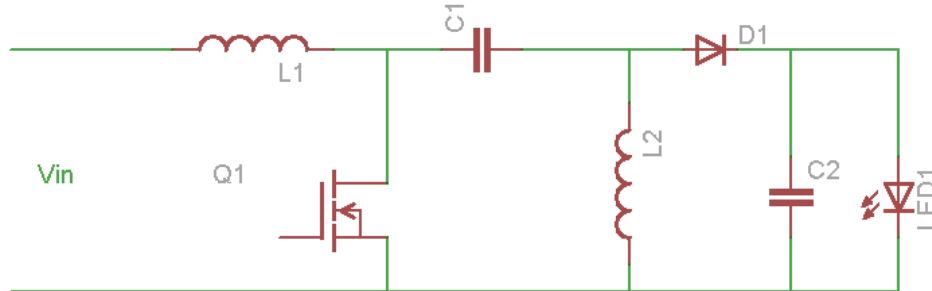
joka voidaan sieventää muotoon

$$U_{in}/U_o = D/(1 - D). \quad (2)$$

Yhtälöä 2 tutkimalla havaitaan, että pulssisuhteen ollessa pienempi kuin 0.5, toimii hakkuri jännitettä laskevasti, ja ollessa suurempi kuin 0.5, hakkuri nostaa jännitettä. [1]

Cuk-hakkuri hyödyntää kapasitiivista energiansiirtoa tulo- ja lähtöasteen välillä toisin kuin muut teholähdetyypit. Tämän takia tarvitaan vähemmän komponentteja ja yksinkertainen ohjauspiiri riittää. de Britto on tutkinut Cuk-hakkuria vaihtelevilla käyttöjännitteillä jännitteiden ollessa 12Vdc aina 240Vac. Ledien tarvitsema jännite on 31V. Hakkurin hyötysuhde on parhaimmillaan 65V tulojännitteellä, jolloin hyötysuhde on noin 95 %. Hyötysuhde on 90Vrms käyttöjännitteellä noin 93 %, 240Vrms jännitteellä noin 88 % ja 12Vrms jännitteellä noin 78 %. [6]

3.4.2. SEPIC-hakkuri



Kuva 8. SEPIC-hakkurin periaatekytkentä. [7]

”SEPIC (kuva 8) on lyhenne sanoista ‘Single Ended Primary Inductance Converter’. SEPIC on kuin Cuk-hakkuri, joten sen tulojännite voi vaihdella lähtöjännitteeseen verrattuna. SEPIC voidaan suunnitella sekä vakiovirta- että vakiojännitelähteeksi. SEPIC-topologia on tunnettu jo jonkin aikaa ja sillä voidaan tehdä AC-teholähde tehokertoimen korjauksella, minkä avulla saavutetaan emi-standardien määräykset. Autoliikenne- ja kannettavien laitteiden sovelluksissa käytetään paristoja luomaan teholähde dc/dc-hakkureille. 12 voltin jännitelähteessä, jota autoliikennesovelluksissa yleensä käytetään,

voi olla laaja jännitealue, tyypillisesti 9 voltista 16 volttiin normaalin toiminnan aikana lyijyakkua käytettäessä.” [1]

”Kannettavissa laitteissa käytetään yleensä litium-paristoa, koska siinä on hyvä energiatiheys. Yksi litium-ionisolu voi tuottaa 4,2 voltin jännitteen täydellä latauksella, joten sillä voidaan korvata jopa 3 vastaavaa NiCd- tai NiHM-solua. Purkuvaiheessakin solusta saadaan jännitteeksi 2,7 voltia. Tämä jännitealue on sekä suurempi että pienempi kuin monen dc/dc-hakkurin lähtö, joten ei voida käyttää pelkkää buck- tai boost-hakkuria”. [1]

”Kansainväliset standardit vaativat yli 75 watin hakkureille tehokertoimen korjauksen (PFC). Hyvä tehokerroin tarkoittaa sitä, että virran aaltomuoto on sini-aaltoa, ja että virta on jännitteen kanssa samassa vaiheessa. Monet PFC-piirit hyödyntävät askelmaista hakkuria tuloasteessa, niin että tuloasteen lähtö ylittää tuloaallon huippuarvon. Euroopassa vaihtojännitteen tehollisarvo vaihtelee 190 - 265 voltin välillä, jolloin lähtöjännite piirissä nousee vähintään 375 volttiin, minkä takia hakkurit joutuvat toimimaan korotetuilla tulojännitteillä. Tyypillisen PFC-tuloasteen lähtöjännite on noin 400 voltin luokkaa. Käyttämällä SEPIC-topologiaa, joka toimii boost-buck periaatteella, boost-osiossa on PFC ja buck-osio tarjoaa matalamman lähtöjännitteen. Tämä mahdollistaa pienen koon ja tehokkaan suunnittelun.” [1]

SEPIC-hakkurissa on paras vaihtoehto, mikäli halutaan hyvä tehokerroin, mutta sen hyötysuhde ei ole vastaavasti yhtä hyvä muiden topologioiden kanssa. Tuloasteen kelan virta seuraa tulojännitettä pienemmällä virtarippelillä kuin esimerkiksi boost- tai flyback-hakkurit. Mikäli SEPIC-hakkuri halutaan toimimaan ei-jatkuvasti johtavaksi, tulee pulssisuhteen olla [7]

$$D < U_o / (U_o + U_i) \cdot \quad (3)$$

Ye et al. ovat tutkineet SEPIC-hakkuria 80-260 V jännitteellä syöttäen 21 ledin ketjua kytkentätaajuuden ollessa 250 kHz. SEPIC-hakkurin tyypillinen hyötysuhde on yli 75 %. Tehokertoimeksi on mitattu yli 0,9. Paras tehokerroin saavutetaan pienellä käyttöjännitteellä, ja suurella kuormavirralla. 80 V käyttöjännitteellä tehokerroin on yli 0,99 riippumatta kuormavirrasta. 230 V käyttöjännitteellä ja 400 mA kuormavirralla tehokerroin on noin 0,99 ja 100 mA kuormavirralla noin 0,90. [7]

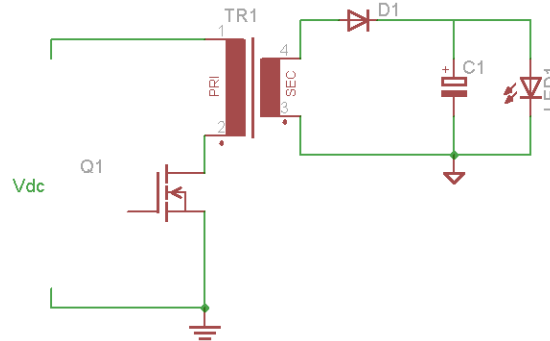
3.5. Flyback-hakkuri

”Perinteinen flyback-hakkuri tarvitsee vähintään muuntajan, jossa on kaksi käämitystä. Kahdessa käämityksessä, joista ensiö on teholähteen puolella ja toisiö on kytketty kuormaan, energia latautuu kytkimen ollessa johtavassa tilassa, kun ensiön virta kasvaa. Kytkimen ollessa ei johtavassa tilassa, virta purkautuu toisiosta.” Flyback-hakkurin hyötysuhde voi olla jopa 90 %. [1]

”Flyback-hakkurit ovat yksinkertaisia suunnitella, mutta niitä voidaan käyttää vain vakiojännitelähteissä. Tämä johtuu energian latauksesta purkauksissa isoihin *reservoir* kondensaattoreihin ja siitä, että kondensaattorin yli olevan jännitteen säädön voi toteuttaa yksinkertaisella takaisinkytkennällä. Erillisen LED-kuorman ajaminen onnistuu, mikäli ensiö- ja toisiökäämitys ovat eristettyjä toisistaan. Yleiskäyttöisissä sovelluksissa käytetään yksinkertaisia virranrajoitusmenetelmiä toisiovirran säätämiseksi. Mikäli tarvitaan tarkkaa lähtövirran säätöä, tulee käyttää optisia johtimia käämitysten välillä.” [1]

Flyback-hakkuri voidaan toteuttaa myös yhdellä käämityksellä. Tällöin hakkuri toimii boost-buck hakkurien tavoin, ja tätä voidaan pitää vaihtoehtona tavalliselle boost-buck hakkurille. [1]

3.5.1. Kahden käämityksen flyback



Kuva 9. Flyback-hakkurin periaatekytkentä. [8]

Tyypillisessä kahden käämityksen flyback-hakkurissa (kuva 9) muuntajan käämitys aloitetaan mosfetin nielusta, joka vaihtelee maapisteen ja avoimen piirin välillä. Muuntajan ilmaväli toimii piirissä energiavarastona. Nielujännite, ja samoin käämityksen alun, vaihtelee kytkemisen aikana. Ulommat kerrokset on korkealla jännitealueella ja niillä on taipumus suojata sisempiä kerroksia, mikä näin vähentää säteilevää häiriötä. [1]

”Toisiokäämityksen alku on kytketty lähtödiodiin, joka estää johtamisen, kun mosfet on johtavassa tilassa. Käämityksen loppu on kytketty maihin, joka vähentää sähkömagneettista säteilyä. Energiaa varastoidaan muuntajan ilmaväliin mosfetin ollessa johtavassa tilassa ja energia puretaan, kun mosfet ei johda jolloin virta kulkee diodin läpi kuormaan.” [1]

Kahden käämityksen flyback-hakkuri voi toimia keskiasteisissa, eli 20–40 watin tehosovelluksissa ei-jatkuvasti johtavassa tilassa. Tässä tilassa flyback-hakkurin lähtöjännitettä on helpompi säätää yksinkertaisella säätösilmukalla. Jatkuvasti johtavaan toimintaan verrattuna ei-jatkuvassa on heikompi tehokerroin, ja virtapiikki on kaksinkertainen keskiarvovirtaan nähden, nostaen näin kytkentähäviöitä. Matalantehon eli alle 20 watin sovelluksissa voidaan käyttää toimintaa, joka on jatkuvasti ja ei-jatkuvasti johtavan tilan välillä (BCM). Kytkintä ohjataan nolla-virta käynnistyksellä, välttämällä näin kytkentähäviöitä ja EMI-ongelmia. BCM-tilassa ei ole

palautumisvirtaongelmia diodissa ja lisäksi voidaan käyttää pienempiä kelan pienentäen järjestelmän kokoa ja hintaa. [8]

BCM-tila toimii niin, että ensiökäämin virran laskiessa nolnaan, alkaa käämitykseen latautua energiaa jännitelähteestä. Tällöin ei synny viiveaikoja. Kun käämityksen virta laskee nolnaan, avataan kytkin, että käämityksen virtaa voidaan ladata käyttöjännitteen mukaan. Näin käämin virta seuraa käyttöjännitettä, jolloin vaihesiirto pienenee, mikä parantaa tehokerrointa. [8]

BCM-toimintaa on kokeiltu 110 voltin käyttöjännitteisessä ympäristössä. Kuormana toimii maksimissaan 24 yhden watin lediä (3,5 V/ 350 mA). Ledien virta pidetään 350 mA:ssa riippumatta kuorman koosta. BCM-tilaa (0.965 24w) käyttäen saavutetaan DCM-tilaa (0.960 24w) parempi tehokerroin, erityisesti pienillä tehoilla, kuten 12w (BCM: 0.919 ja DCM: 0.893). Lähtövirran rippeli on selkeästi pienempi verrattaessa DCM-tilaan. Lähtövirran rippeli heikentää valotehokkuutta ja voi lyhentää ledin käyttöikä. [8]

Taulukko 1. Eri topologioiden ominaisuuksien vertailua. [1,2,3,4,5,6,7,8]

	Buck	Boost	Cuk/Sepic	Flyback	Lineaarinen
Hyötysuhde [%]	~85-95	~72-88	~80-95/~80	~90	parhaimmillaan ~90
Tehokerroin	0.99	-	0.90-0.99	0.90-0.99	1
Vout/Vin	<1	>1	sekä että	sekä että	<1

3.6. Tehokerroin led-ohjaimissa

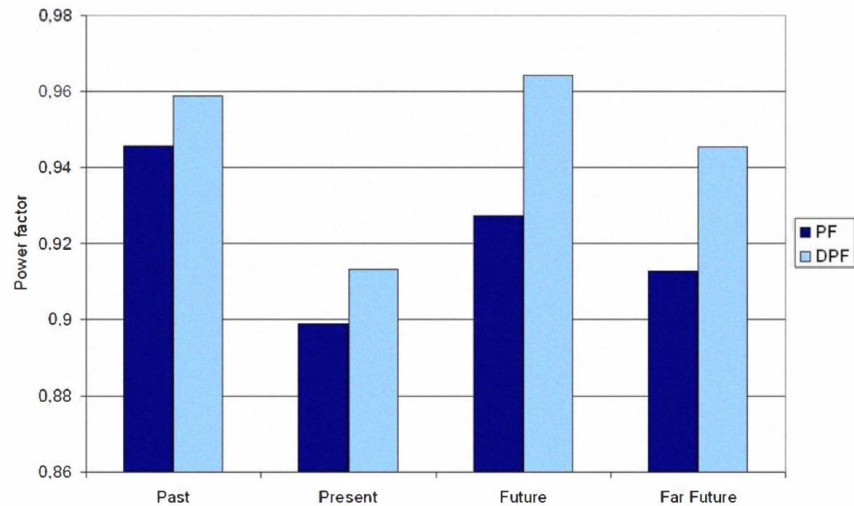
Tehokerroin kertoo sinimuotoisen aaltomuodon tapauksessa millaisessa vaihe-erossa vaihtovirta on suhteessa vaihtojännitteeseen. Tehokerroin voidaan myös määrittää pätötehon suhteesta näennäistehoon. Täysin resistiivisellä kuormalla tehokertoimeksi tulee yksi, jolloin virran ja jännitteen välillä ei ole vaihe-eroa. ”Aktiivisilla kuormilla, eli induktiivisilla ja kapasitiivisilla kuormilla, tehokerroin putoaa. Tehokerrointa voidaan parantaa suunnittelemalla tehokertoimen korjausta. Yleisin tehokertoimen korjauspiiri on boost-hakkuri. Vaihtojännite korotetaan noin 400 volttiin ja varastointikondensaattorin virtapulssien amplitudit yritetään saada siniaallon muotoiseksi. Tämä onnistuu

kytkemällä virta päälle lyhyeksi, mutta vakiopituiseksi ajaksi. Kun käyttöjännite nousee ja laskee, niin tekee myös virran amplitudi.” [1]

3.6.1. Tehokertoimen vaikutus led-ohjaimissa

”Yksinkertainen vaihtoehto on käyttää flyback-hakkuria. Yleisesti ensiövirta kytketään pois päältä, kun saavutetaan riittävä virtataso, mutta tämä johtaa vakiovirtaan. Saadakseen hyvän tehokertoimen, pitäisi ensiövirtaa kytkeä vakioajalla, jolloin virran amplitudi nousee ja laskee samassa vaiheessa jännitteen kanssa. Toisiovirralla on kaksinkertainen taajuus verkkotaajuuteen nähden, jolloin tarvitaan suuri kondensaattori estämään rippeliä lähtöjännitteessä.” [1]

Led-valaisun vaikutusta sähköhäiriöiden kasvuun kotitalouskäytössä on tutkittu. Häiriöiden määrää on mitattu eri vuorokauden aikoina erilaisella kuormituksella siten, että perinteinen valaistus korvataan portaittain kohti pelkkää led-valaistusta. Huonosta tehokertoimesta huolimatta led-valaisun vaikutus sähköverkkoa kohtaan jää varsin vähäiseksi. Led-valoissa tarvittava teho on pientä verrattaessa suuritehoisiin laitteisiin kuten kodinkoneet niin kuin esimerkiksi pesukoneet ja ilmalämpöpumppu. Valaistuslaitteista käytettäessä yhdistelmää, jossa hehkulamppujen lisäksi on käytössä energiansäästölamppuja, on esimerkiksi huonompi tehokerroin kuin pelkillä led-valoilla. Lisäksi täytyy ottaa huomioon led-valaisun tapauksessa pienempi tehonkulutus. (kuva 10) [9]



Kuva 10. Tehokertoimet eri valaistuslaitteita käytettäessä. ”Past”-osiossa käytetään vain hehkulamppuja, ”Present”-osiossa yhdistelmä hehku- ja energiansäästölamppuja, ”Future”-osiossa yhdistelmä energiansäästölamppuja ja led-valaisimia ja ”Far Future”-osiossa vain led-valaisimia. [9]

Ohjattaessa ledejä tehokerroinkorjatusta lähteestä käytetään yleensä buck-hakkuria, koska tulojännite on tällöin tyypillisesti suuri, noin 400 voltia. (Winder) Yhtenä esimerkkinä muista tehokerrointa korjaavista hakkureista on Bi-Bred-hakkuri

3.6.2. Bi-Bred

”Bi-Bred-hakkuri on samankaltainen Cuk-hakkurin (kappale 3.4.1, kuva 7) kanssa. Suurin ero Cuk-hakkuriin on se, että Bi-Bred-hakkurissa tuloasteen kela on epäjatkuvässä toiminnassa, ja lähtöaste taas jatkuvässä toiminnassa. Keloihin varastoitunut energia on suhteessa induktanssiarvoon. Tämä tarkoittaa, että tuloasteen kelan tulee olla riittävän pieni, että johtaminen loppuu ennen jokaisen jakson loppua. Lähtöasteen kelan tulee olla riittävän suuri, että lähtövirta pienenee vain 85 %:iin nimellisestä arvosta.” [1]

”Kun teho kytketään ensimmäistä kertaa, on mosfet (Q1) pois päältä ja odottaa kellosignaalia hilalle. Samalla hetkellä kondensaattori (C1), jota käytetään energiavarastona, latautuu diodin (D1) ja kelan (L1) yliolevästä jännitteestä, mutta jännite ei nouse hyvin korkeaksi, koska mosfetin alkaessa johtamaan, ohjataan latausvirta nolajohtimeen. Mosfetin johtaessa virta nousee kelassa (L1), kunnes jännitehäviö vastuksessa (R2) on riittävän suuri, että mosfet kytketään pois päältä. Nyt tulopiiriin

toiminta on kuin boost-hakkurissa, koska virta kelan (L1) yli ei voi muuttua äkillisesti, ja se lataa kondensaattorin (C1) jännitteen korkeaksi.” [1]

Kondensaattorin C1 energialla ohjataan led-kuormaa seuraavalla kerralla, kun mosfet on päällä. Kelassa (L2) nousee virta ja se latautuu, kunnes mosfet kytketään pois päältä. Virta kulkee diodin D2 yli led-kuormaan. Tässä välissä ei ole virtaa mittaavaa vastusta, koska sitä ei tarvita ennen kuin mosfet kytketään taas päälle. Tämä ratkaisu parantaa energiatehokkuutta. [1]

Bi-Bred-hakkurin lähtöaste on buck-tyyppinen. Energialähteenä toimivan kondensaattorin, C1, tulee olla riittävän suuri, että se voi toimia vakiojännitelähteenä verkkojännitteen jakson ajan. Tällainen teholähde buck-asteelle tarkoittaa vakiollista pulssisuhdetta, kun sillä ohjataan led-kuormaa. Bi-bred-hakkurin ottaa verkosta paljolti sinimuotoista jännitettä, kun sitä ohjataan kytkinohjatulla vakiopulssisuhteella, joten suuri kondensaattori C1 auttaa tuottamaan hyvän tehokertoimen. [1]

4. YHTEENVETO

Sähköenergian kulutuksen vähentämisen, ja täten muun muassa hiilidioksidipäästöjen pienentäminen, on nykyään yksi merkittävä näkökulma, kun suunnitellaan uusia laitteita. Yksi mahdollisuus vähentää energiankulutusta on valaistus, jossa esimerkiksi ledeillä voidaan saavuttaa optimaalisessa tapauksessa 80 %:n energiansäästö verrattaessa perinteisiin valaistulaitteisiin. Led-valaistuksessa on myös etuja verrattaessa energiansäästölamppuihin. Led-valojen valmistuksessa ei käytetä elohopeaa.

Tässä työssä on tutustuttu led-valaisussa käytettäviin teholähteisiin. Eri teholähteet sopivat eri kohteisiin. Esimerkiksi buck-hakkurilliset led-valaistukset sopivat kotitalouskäyttöön ja boost-hakkurilliset kannettaviin laitteisiin. Eri teholähdetyypeistä on katsottu niiden ominaisuuksia, ja esitelty niiden periaatteellinen toiminta. Teholähdetyypeistä on tutkittu hyötysuhde ja mahdolliset sähkömagneettiset häiriöt. Myös teholähdetyyppeihin tehtyjä muunnelmia on tutkittu ja niillä saavutettavat parannukset havaittu.

Hakkureista parhaiten kotikäyttöön lähteistä saatujen tietojen perusteella soveltuu flyback-hakkuri, etenkin BCM-toimintatilassa. Siinä on sekä hyötysuhde että tehokerroin hyvä ja se soveltuu tehoalueeltaan korvaamaan 40–60 watin hehkulamput. Toinen hyvä vaihtoehto kotikäyttöön on buck-hakkuri. Hyötysuhde on kummassakin tapauksessa hyvä, mutta flyback-hakkureilla saavutetaan pienempi lähtövirrän rippeli, mikä pidentää laitteen ikää ja parantaa valotehokkuutta. Mikäli käyttöympäristö ei siedä sähkömagneettisia häiriöitä, voidaan valita esimerkiksi Bi-Bred-hakkuri.

5. LÄHTEET

Kirjallisuuslähteet:

- [1] Winder S., Power Supplies for LED Driving, Elsevier Inc., 2008.
- [2] Lin Y., Zhang J., Zou X., Li W., An Efficiency-enhanced Low Dropout Linear HB LED Driver for Automotive Application, IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, 2008.
- [3] Garcia J., Calleja A.J., Corominas E.L., Gacio D. and Campa L., Interleaved Buck Converter for Fast PWM Dimming of High-Brightness LEDs, IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 26 Issue 9, 2011
- [4] Qu X., Wong S., Tse C. K., Resonant Assisted Buck Converter for Offline Driving of High Brightness LED replacement lamps, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010.
- [5] Guo R., Liang Z., Huang A. Q., A High Efficiency Transformerless Step-up DC-DC Converter with High Voltage Gain for LED Backlighting Applications, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011
- [6] De Britto J.R., Demian Jr. A.E., de Freitas L.C., Farias V.J., Coelho E. A. A., Vieira Jr. J. B., A Proposal of Led Lamp Driver for Universal Input Using Cuk Converter, Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008), IEEE, 2008.
- [7] Ye Z., Greenfeld F., Liang Z., Design Considerations of a High Power Factor SEPIC Converter for High Brightness White LED Lighting Applications, Power Electronics Specialists Conference, (PESC 2008), IEEE, 2008.
- [8] Chern T., Liu L., Huang C., Chern Y., Kuang J., High Power Factor Flyback Converter for LED Driver with Boundary Conduction Mode Control, 2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010.
- [9] Rönnerberg S. K., Bollen M.H.J., Wahlberg M., Harmonic emission before and after changing to LED and CFL - Part I: laboratory measurements for a domestic customer, 2010 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), IEEE, 2010.
- [10] Udd E., Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons, Inc., 1991

- [11] Chiu H., Lo Y., Chen J., Cheng S., Lin C., Mou S., A High-Efficiency Dimmable LED Driver for Low-Power Lighting Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 57 No. 2, 2010

Web-lähteet:

- [12] http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/ostajan_opas/valaistus [viitattu 12.10.2011]