



Improving the efficiencies of power supplies

Losses are having even more emphasized role in power supply design in the future. Switched mode power supplies exhibit high efficiencies and low power losses. However, the trend to have ever smaller packaging sizes makes even low losses noteworthy. Therefore, the pursuit to push the efficiencies of power supplies as high as possible is important in order to reduce the packaging sizes further.

On the other hand, the trend is that operation voltages of, for example, telecommunication equipment are becoming lower. Lower voltages mean higher currents and the challenge of maintaining a high efficiency, or even to improve the efficiency, with the high load currents is a tough challenge for the power supply engineers.

The research is done in ETX-project: Efficiency and power density improvement in power electronic and systems.

Project leader: Professor Jorma Kyyrä, jorma.kyyra@hut.fi

Hyötysuhde vaikuttaa jäähdytystarpeeseen ja kokoon

Häviöt kuriin teholahteessa

Teholähteet ovat oleellinen osa nykypäivän elektroniikkaa. Käyttäjännitteiden aletessa teholahteita sijoitetaan piirikorteille käyttökohteen välittömään läheisyyteen. Teholahteessa tapahtuvat häviöt aiheuttavat jäähdytystarvetta, mikä vaikuttaa oleellisesti myös lopputuotteen kokoon. Tämän vuoksi teholahteiden hyötysuhde, häviöiden kartoitus ja minimointi ovat intensiivisen tutkimuksen kohteena maailmalla.



Kuva: International Rectifier

Hakkuriperiaatteella toimivien teholahteiden etuina ovat muun muassa suuri tehoiheys, nopea dynaaminen vaste, korkea hyötysuhde, pieni koko ja tarkka jännitteen säätö. Nämä ominaisuudet tekevät hakkuriperiaatteella toimivista teholahteista ylivoimaisia verrattuna esimerkiksi lineaariteholahteisiin.

Hyvästä hyötysuhteesta huolimatta hakkuriteholahteet eivät kuitenkaan pysty suorittamaan energianmuokkausta täysin häviöttömästi. Nykyisessä tutkimuksessa yhä pienempiin laite-

kokoihin pienetkin häviöt alkavat muodostua merkittäviksi.

Häviöt teholahteessa voidaan periaatteessa määrittellä hyvin yksinkertaisesti: teholähde ottaa verkosta, akusta tai muusta lähteestä tietyn antotehon P_{otto} ja vastaavasti antaa kuormaan tietyn antotehon P_{anto} . Näiden kahden tehon erotus kertoo kuinka paljon sähköenergian muokkauksessa häviää energiaa per aikayksikkö. Asiaa voidaan myös ajatella siten, että teholähde lämpenee kyseisellä hukkatavalla sen ollessa toiminnassa. Anto- ja ottotehon suhde kertoo

teholahteen hyötysuhteen η , kaava (1).

Hyötysuhde ilmoitetaan yleensä prosentteina ja ideaalitapauksessa se on 100 prosenttia, eli otto- ja antoteho vastavat tällöin toisiaan. Vaikka tällaiseen hyötysuhteeseen pyritään, siihen tuskin koskaan päästään reaali maailman rajoitusten vuoksi. Mutta se, kuinka lähelle tätä maalia päästään on monen tutkimusryhmän mielenkiinnon kohteena maailmalla.

Hyötysuhde on monella tapaa yksi teholahtesuunnittelun avainparametreja. Tässä artik-

kelissa pyrimme selvittämään miksi ja miten hyötysuhde vaikuttaa ympäröivään maailmaan ja miksi se on tärkeä.

Hyötysuhde ja koko

Elektroniikkalaitteen osana olevan teholahteen on oltava pieni ja huomaamaton. Teholahteen suunnittelun oleellisena osana on tehokomponenteissa syntyvien häviöiden huomioon ottaminen. Laitteen häviöiksi muuttama energia, siis lämpö, on johdettava pois ulkoilmaan, ja laitteen yksittäisten komponenttien lämpötila on kyettävä pitä-

mään sallituissa rajoissa. Tämä on tärkeää sen takia, että muun muassa eristysten sekä puolijohdeiden elinikä laskee ja luotettavuus karsii, jos ne joutuvat toimimaan liian kuumissa olosuhteissa. Voidaankin sanoa, että komponenttien elinikä ja luotettavuus ovat kääntäen verrannollisia toimintaolosuhteiden lämpötilaan.

Jäähdytystä tapahtuu luonnollisesti kolmella tavalla: konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. Konvektiota voi olla vapaata tai pakotettua. Tässä pakotettu tai kiihdytetty konvektio tarkoittaa tuulettimen asentamista laitteeseen jäähdytystä varten. Tällainen järjestely kuitenkin yleensä lisää laitteen kokoa ja kustannuksia. Lisäksi mekaanisesti kuluvan komponentin, tuulettimen, lisääminen laskee koko laitteen luotettavuutta.

Konvektio riippuu jäähtyvän pinta-alan suuruudesta ja ympäröivän ilman, tai muun väliaineen, kiertonopeudesta ja ominaisuuksista, sekä jäähdyttävän aineen ja jäähtyvän pinnan lämpötilaerosta. Säteilemällä tapahtuva jäähdytys riippuu voimakkaasti jäähdytettävän komponentin ja ympäröivien pintojen lämpötilaerosta sekä pintojen heijastusominaisuuksista ja väristä. Suljettuun tilaan koteloidun teholahteen jäähdyttämisen pelkästään säteilyn kautta tapahtuvalla lämpöenergian siirrolla saattaa olla hankalaa.

Suosittu tapa jäähdyttää teholahteen kuumenevat osat on siirtää lämpöenergia pois komponenteista johtamalla. Lämpö voidaan johtaa erilliseen jäähdytyslementtiin, tai jopa piirikortille, josta energia vapautuu ympäröivään ulkoilmaan tai aineeseen konvektion ja säteilyn avulla. Tällä menetelmällä itse asiassa kasvatetaan jäähdytettävän komponentin pinta-alaa, jolloin konvektiolla tapahtuva lämmön siirto pois teholahteesta onnistuu helpommin.

Tärkeätä tällaisessa jäähdytystavassa on minimoida terminen resistanssi R_{th} komponentin ja jäähdytyslementin välillä, ja maksimoida jäähtyvää pinta-alaa eli käyttää rivoitettua jäähdytyslementtiä. Tällaisen erillisen jäähdytyslementin, johon teholahteen kuumina käyvissä osissa generoitava lämpöenergia johdetaan, koko riippuu voimakkaasti häviöiden määrästä. Jos ajatellaan esimerkinomaisesti teholahtetta, jonka hyötysuhdetta kyettäisiin parantamaan 95 prosentista 97 prosenttiin, olisi häviöiden määrän ja jäähdytystarpeen pienentymisen peräti 40 prosenttia.

Missä häviöt syntyvät

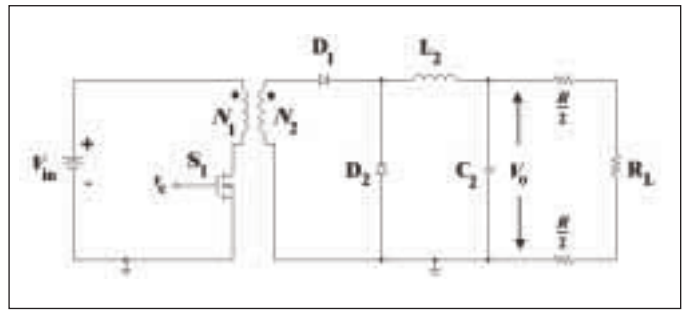
Teholahteissa käytettävät puolijohdet, kuristimet, muuntajat ja kondensaattorit eivät ole ideaalisia komponentteja. Hyvänkin tehodiodin anodin ja katodin välillä on aina pieni päästöjännite komponentin ollessa johtavassa tilassa. MOSFETeilla on pieni kanavaresistanssi $R_{DS,on}$ johtavassa tilassa, muuntajissa ja kuristimissa käytetyllä kuparilla on äärellinen johtavuus. Magneettisten komponenttien sydänmateriaalissa tapahtuu magneettivuon vaihtelusta aiheutuvia häviöitä ja kondensaattoreissakin häviöitä aiheuttaa parasitiivinen ESR eli kapasitanssin kanssa sarjassa oleva ekvivalenttinen sarjaresistanssi.

Epäideaalisuudet merkitsevät sitä, että virran kulkiessa komponentin läpi osa kuormaan tarkoitettu hyötöenergiasta jää komponenttiin kaavojen (2) ja (3) mukaan ja muuttuu lämpöenergiaksi. Ja kuten yllä jo todettiin, aiheuttaa lämmön syntyminen komponenteissa tarvetta jäähdytykselle.

Teholahteen yksi hyvä ja tavoiteltu ominaisuus on pieni koko. Pienen kokoon pyritään muun muassa nostamalla kytkentätaajuutta. Ideaalisesti ajatellen kytkentätaajuuden nosto mahdollistaa pienempien induktanssi- ja kapasitanssiarvojen käytön esimerkiksi lähtöjännitteen suodattamiseksi, koska hakuritoiminnasta aiheutuvat yliaallot sijaitsevat tällöin korkeammilla taajuuksilla. Korkeiden taajuuksien suodattamiseen riittävät siis pienemmät kondensaattorit ja kuristimet, jolloin teholahteen koko pienenee.

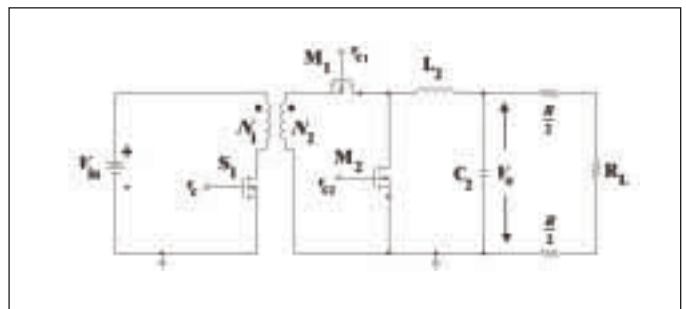
Kytkentätaajuuden nosto ei kuitenkaan ole aivan ongelmattonta. Puolijohdekomponenteissa esiintyy aina jonkin verran häviöitä, jotka liittyvät kytkimen päälle ja pois päältä kytkemiseen. Näiden niin sanottujen kytkentähäviöiden suhteellinen osuus kasvaa kytkentätaajuuden kasvaessa. Jossain vaiheessa, kytkentätaajuutta nostettaessa, tullaan pisteeseen jossa pienevien kondensaattorien ja kuristimien tuoma laiteeseen piennys häviää kasvavien kytkentähäviöiden vaatiman lisääjäähdytyksen viemään tilaan.

Suurilla hakuritaajuuksilla, etenkin synkronista tasanuuntasta käytettäessä myös teho-kytkimien ohjaushäviöt saattavat kasvaa huomattavaksi. Tämä johtuu MOSFETin hilakapasitanssista, johon joudutaan lataamaan jokaista päällekytkentää varten tietty varaus, joka



Forward-tyyppinen hakkuriteholahte. Topologia sisältää yhden aktiivisen kytkimen. Kytkimen suhteellista johtoaikaa D säätämällä voidaan teholahteen lähtöjännitettä reguloida.

Forward-type switched mode power supply.



Forward-tyyppinen hakkuriteholahte, jossa toisiopuolen tasanuuntausdiodit on korvattu MOSFETeillä. Tällä ratkaisulla saavutetaan parempi hyötysuhde, mutta toisaalta monimutkaisempi rakenne, koska kytkimille on järjestettävä ohjaus.

Forward-type switched mode power supply. The secondary side rectifier diodes have been replaced by MOSFETs.

menetetään häviöiksi ilman erityisjärjestelyjä kytkintä pois päältä kytkettäessä. Kytkentätaajuuden noustessa joudutaan tätä varausta tuomaan yhä useammin hilalle per aikayksikkö, jolloin teholahteen häviöt kasvavat.

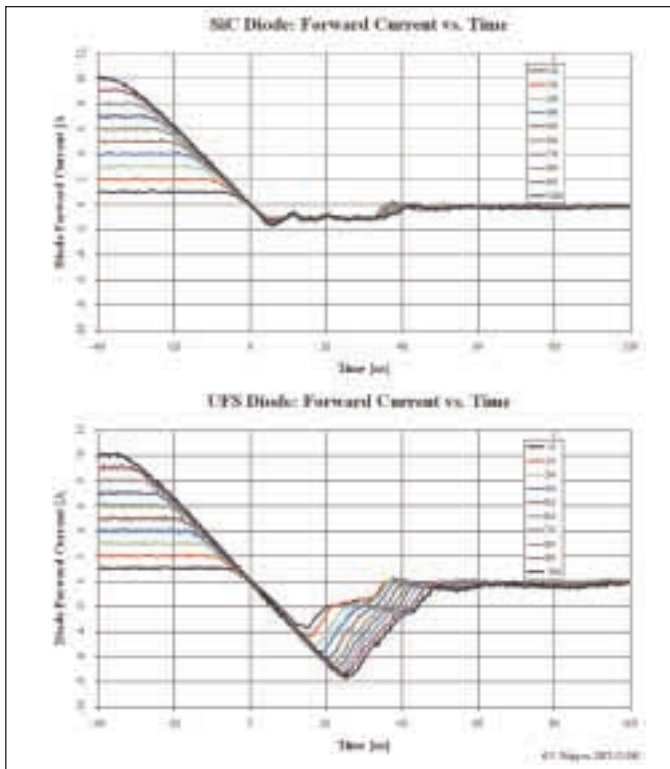
Mataliin lähtöjännitteisiin pyrittäessä käytetään yleensä niin sanottua laskevaa katkojaa eli Buck-tyyppistä hakkuriteholahtetta. Laskevan katkojan käyttö voi olla kuitenkin ongelmallista, jos tulojännite on suhteellisen suuri verrattuna lähtöjännitteeseen. Tällöin joudutaan ottamaan käyttöön muuntajalla varustettu hakkuriteholahte jännitteen laskemiseksi.

Esimerkiksi 48 V tulojännitteestä muodostettaessa parin voltin lähtöjännitettä käytännön syyt vaativat muuntajaa laskemaan jännitetasoa. Tämä sen takia, että hakkurin aktiivisen kytkimen suhteellinen johtoaika ja suhteellinen estoaika saataisiin pidettyä suurin piirtein samassa suuruusluokassa. Forward-tyyppinen hakkuriteholahte, eli suoraan tehonsiirtoon perustuva tasanuuntaja, on esitetty Forward on muuntajalla varustettu versio laskevasta katkojas-

ta. Laskevan katkojan ja Forward-hakkurin tulo- ja lähtöjännitteen riippuvuus on esitetty kaavoissa (4) ja (5) kytkimen suhteellisen johtoajan D avulla.

Muuntajalla varustetun hakkuriteholahteen ensiöpuolella energiaa siirtyy suhteellisen suuren tulojännitteen ansiosta pienellä virralla. Johtohäviöt ensiöpuolella eivät ole tämän takia korostetussa roolissa. Merkittäviä häviöitä ensiöpuolella saattaa sen sijaan tulla ensiöpuolen kytkimen S_1 parasitiivisesta Drain-Source-kapasitanssista. Tämä kapasitanssi, muuntajan magneettitoiminnan purkamistavasta riippuen, saattaa latautua korkeahkoon jännitteeseen ennen seuraavan kytkentäjakson alkua jolloin siihen varastoitunut energia kuluu häviöiksi MOSFETin kanavaresistanssissa seuraavan kytkentäjakson alussa.

Ongelmaa voidaan lievittää ottamalla käyttöön erilaisia Soft-Switching-tekniikoita. Tämä tarkoittaa sitä, että kytkimen parasitiivinen kapasitanssi pyritään tyhjentämään varauksesta ennen kytkentäjakson alkua, jolloin kytkin voidaan kytkeä päälle jännitteettömänä. Tällainen pehmeä kytkentä voidaan ai-



Piikarbididiodin (SiC: Silicon Carbide Diode) ja erittäin nopean tavallisen diodin (UFS: Ultra Fast Diode) virran käyrämuotoja diodin siirtyessä johtotilasta estotilaan. Parametrinä on myötäsuauntaan kulkevan virran suuruus. Lähde: F.Philippen "A New High Voltage Schottky Diode based on Silicon Carbide (SiC)", Conference proceedings of EPE2001.

Anode - Cathode current of Ultra Fast Diode in the upper figure and Anode - Cathode current of Silicon Carbide Diode in the lower figure. Parameter in both figures is forward current. Source: F.Philippen "A New High Voltage Schottky Diode based on Silicon Carbide (SiC)", Conference proceedings of EPE2001.

kaansaada muun muassa käyttämällä hyväksi muuntajan hajainduktanssia ja magnetointivirtaa.

Vaikka kytkimen yli ei saavutettaisikaan aivan nolajännitettä kytkemishetkellä, saattaa edes osittaisella jännitteenalennuksella kytkimen yli, eli parasitiivisen kapasitanssin varauksen osittaisella purkamisella, olla merkitystä, sillä kapasitanssiin varastoitua energiaa on verrannollinen jännitteen neliöön, kaava (6). Teholähteen toisiopuolella suuri virta aiheuttaa pääasiassa merkittävimmät häviöt. Tätä ongelmaa on käsitelty seuraavassa kappaleessa.

Synkroninen tasasuuntaus

Tele- ja tietoliikennealalla tarvittavien käyttöjännitteiden trendi on menossa yhä matalampiin jännitteisiin. Toisaalta tehonkulutus ei välttämättä vähenne vaan asia saattaa olla jopa toisin päin; tehonkulutus kasvaa. Tämä merkitsee sitä, että matalajännitteisen teholähteen on kyettävä syöttämään yhä suurempia virtoja, jotta vaadittu teho saadaan siirrettyä kuormaan.

Matalilla lähtöjännitteillä teholähteen toisiopuolella on suuri merkitys teholähteen hyötysuhteen kannalta. Kuvassa 1 esitetyllä Forward-hakkuriteholähteen ensiöpuolen kytkimellä S_1 hakataan muuntajan ensiökäämin yli kantiaaltoa, jonka korkeus on tulojännitteen V_{in} suuruinen.

Muuntajan toisiokäämissä näkyvä kantiaalosta muodostuva AC-jännite tasasuunnataan diodeilla D_1 ja D_2 ja tasasuunnattu jännite alipäästösuodatetaan kuristimella L_2 ja kondensaattorilla C_2 . Ideaalitapauksessa kuorman yli jää tällöin pelkästään tasasuunnatussa AC-jännitteessä ollut DC-komponentti. Tämä toteutuukin yleensä varsin hyvin silloin kun kytkentätaajuus f_c on riittävän suuri, jolloin hakkuritoiminnasta aiheutuneet yliaallot sijaitsevat korkeilla taajuuksilla ja ne ovat helppoja suodattaa pois.

Kuvan Forward-topologiasta voi helposti nähdä, että toisiopuolen diodit D_1 ja D_2 johtavat kuristimeen L_2 virtaa, eli käytännössä kuormavirtaa, vuoroitellen. Toisin sanoen kuormavirta kulkee jommankumman diodin läpi koko ajan.

Parhaillakin teholiodeilla jännitehäviö diodin yli johtotilassa on noin puolen voltin luokkaa.

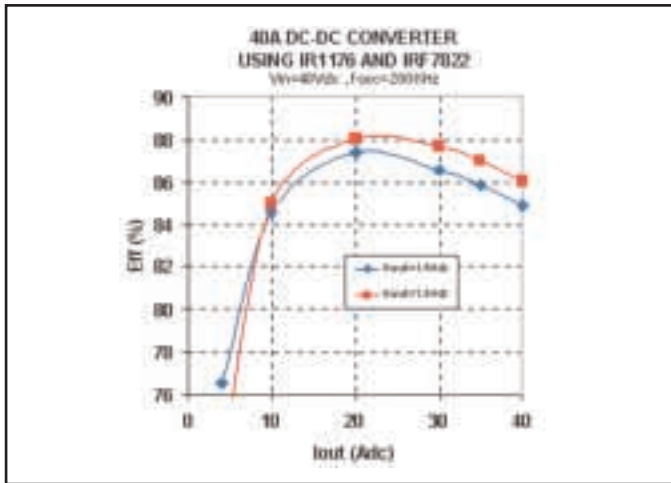
Jos teholähteen lähtöjännite on hyvin matala, vaikkapa 1–2 voltia, jää diodeihin merkittävä osa kuormaan tarkoitettuun energiasta, eli tässä tapauksessa pelkästään toison tasasuuntaus laskee hyötysuhteen 67–80 prosentin tasolle. Tällainen ei tietenkään ole taloudellista ja tästä syystä diodeja ei voida järkevästi käyttää matalia jännitteitä tuottavissa teholähteissä.

Yksi tapa parantaa toisiopuolen tasasuuntauksen taloudellisuutta matalajännitteisissä teholähteissä on korvata tasasuuntausdiodit MOSFETEillä, kuten kuvassa 3 on esitetty. MOSFETin yli oleva jännitehäviö johtotilassa ei ole vakio, vaan määräytyy kuormavirran suuruuden mukaan. Tällä hetkellä on saatavilla muun muassa 30 voltin teho-MOSFETeitä joiden kanavaresistanssi johtotilassa on 3,5–4,5 milliohmia luokkaa. Tällöin jännitehäviö komponentin yli, esimerkiksi 50 ampeerin virralla, jää alle 230 millivoltin ja johtohäviöt ovat puol-

ta pienemmät kuin diodia käytettäessä.

Häviöllä on suurta merkitystä arvioitaessa tarvittavaa jäähdityskapasiteetin määrää, ja sitä myöten koko teholähteen kokoa. Diodien korvaaminen MOSFETEillä tekee kuitenkin teholähteestä hieman monimutkaisemman, sillä tasasuuntauskytkimien hiloille on järjestettävä ohjaussignaaleita v_{c1} ja v_{c2} , joiden tulee olla synkronissa ensiöpuolen kytkimen ohjaussignaalin v_c kanssa.

Toinen ongelma, jonka teholähteen matala lähtöjännite ja suuri kuormavirta tuovat tullessaan ovat siirtohäviöt. Kuvassa 1 ja 3 teholähteen lähtönapojen ja kuorman välinen resistanssi on merkitty R_l :llä, joka on jakaantunut tasan meno- ja paluujohtimeen. Aikaisemmin on voitu siirtää vaikkapa 5 voltin käyttöjännitettä vaativalle prosessorille 10 ampeerin kuormavirralla 50 wattia. Jos siirtojohtojen ja liittösten resistanssi arvioitaisiin 10 milliohmiksi, jää kaavan (2) mukaan siirtojohtoihin ja liittosiin energiaa 1 watin teholla, mikä merkitsee 2 prosentin alennusta kokonaishyötysuhtee-



International Rectifierin IR1176-ohjauspiirillä varustettujen 1,5 ja 1,8 voltin lähtöjännitettä tekevien teholahteiden hyötysuhteet kuormavirran funktiona.

In-circuit 1.5 and 1.8V output DC-DC converter performance of the International Rectifiers 1176 running at 200kHz.

<http://www.irf.com/whats-new/nr001122c.html>

seen. Tämä ehkä voidaan vielä hyväksyä.

Tulevaisuudessa saattaa vastaavanlainen prosessori haluta mainitut 50 wattia tehoa 1 voltin jännitteellä ja 50 ampeerin virralla. Tällöin saadaan tehoviiviksi samoissa johtimissa ja liittimissä saman kaavan mukaan 25 wattia, jolloin kokonaishyötysuhde laskee 67 prosenttiin pelkästään johtimien takia. Tämä ei voi enää olla hyväksyttävää. Suurenevat kuormavirrat johtavat toisin sanoen siihen, että matalaa jännitettä tuottava teholähde pitää viedä kuorman välittömään läheisyyteen eli samalle piirikortille.

Yleensä kuorma koostuu herkästä elektronikasta, kuten yllä mainittu prosessori, ja vaikka teholahteen ulkopuoliset siirtohäviöt on minimoitu tuomalla kuorma ja teholähde vierekkäin, ei itse teholahteessa tapahtuviin häviöihin ole tällä ratkaisulla puuttuttu.

Luonnollisesti teholahteeseen kohdistuu niin sanottujen hajautettujen ratkaisujen myötä yhä suurempia vaatimuksia koon, häiriöttömyyden (EMC) ja hyötysuhteen osalta. Teholähde ei saa viedä paljon tilaa piirikortilla, se ei saa sähkömagneettisella vuorovaikutuksella häiritä varsinaista elektronikkaa, eikä se saa myöskään lämmittää turhan päiten edellä mainittua elektronikkaa. Nämä vaatimukset korostuvat yhä enemmän nykypäivän ja ennen kaikkea tulevaisuuden teholähdesuunnittelussa.

Yllä olevassa kuvassa on esitetty International Rectifierin näkemys tämän hetken tilanteesta 1,5 ja 1,8 voltin lähtöjännitettä tekevien teholahteiden

hyötysuhteista kuormavirran funktiona. Kuvasta käy ilmi, että kuormavirrasta riippumatta reilusti yli 10 prosenttia energiasta hukataan jännitteen muokkauksessa 48 voltista mainituiksi lähtöjännitteiksi nyky-päivän teknologialla.

Piikarbididi-diodit

Myös komponenttitekniologia on tulossa vastaan uusilla tuotteilla parantamaan teholahteiden hyötysuhdetta. Yksi mielenkiintoinen komponentti, joka on tekemässä tuloaan markkinoille, on piikarbididiiodi. Piikarbididiiodin toiminta perustuu enemmistövarauksenkuljettajiin ja tämän takia sillä ei esiinny kiusallista takavirtaa; ilmiötä joka tavallisia diodeja käytettäessä aiheuttaa esimerkiksi nostavassa katkojassa merkittäviäkin häviöitä.

Vastikään pidetyssä EPE 2001 konferenssissa (European Conference on Power Electronics and Applications) esitettiin tutkimustuloksia markkinoilta saatavan erittäin nopean perinteisen diodin (Ultra Fast Diode) ja piikarbididiiodin virran käyttäytymistä johtotilan vaihtuessa estotilaksi. Perinteisellä diodilla takavirta on huomattavan suuri kun taas piikarbididiiodilla varsinaista takavirtaa ei ole ollenkaan, eikä diodin käytös riipu myötäsäunntaisen virran suuruudesta. Pieni negatiivinen virta piikarbididiiodilla estotilaan siirtymisen myötä kyllä ilmenee, mutta se johtuu diodin anodin ja katodin välisen liittokapasitanssin lataamiseen tarvittavasta virrasta.

Piikarbididiiodi tuo teholahtesuunnittelijoiden ulottuville mielenkiintoisen uutuustuotteen: diodin jolla on perinteisen Schottky-diodin ominaisuuksia takavirran suhteen, mutta samalla oleellisesti parempi jännitekestoisuus kuin tavallisella Schottky-diodilla.

Energian säästö tuo rahaa

Hyötysuhteen parantamisella on taloudellista merkitystä. Sähkönkulutus kasvaa elintason myötä. Samalla kasvavat myös vaatimukset sähkönlaadun suhteen, sillä nykyaikainen elektronikka edellyttää käyttösähköksen häiriötöntä ja siistiä jännitettä. Tämä johtaa siihen, että pistorasiasta saatavaa sähköenergiaa joudutaan muokkaa-

maan ennen varsinaista käyttökohdetta. Muokkaus tehdään yhä enenevässä määrin juuri tehoelektronikan keinoin muun muassa juuri hyvän hyötysuhteen ja pienen laitekoon takia.

Sähköenergian muokkaaminen, jännitetason vaihto, taajuuden vaihto tai vain tasasuuntaus, kuitenkin syövät aina pienen siivun kuormalle tarkoitettusta energiasta. Tässä mielessä yksittäisenkin teholahteen hyötysuhde alkaa olla tärkeä, vaikka lämmöksi häviävä energia per teholähde ei välttämättä olekaan suuri, sillä teholahteiden määrä ja sähkön muokkauksen tarve kasvaa jatkuvasti. Toisin sanoen teholahteissa häviävän energian kokonaismäärä kasvaa koko ajan ja sen takia teholahteiden hyötysuhteen parantaminen kokonaisuudessaan merkitsee energiansäästöä paljon.

Aiheesta enemmän

R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, New York: Chapman and Hall, May 1997. Hardback ISBN 0-7923-7270-0, TK7881.15.E75 1997 7"x10", 791 pages, 929 line illustrations
Lee F.C., Barbosa P., Peng Xu, Jindong Zhang, Bo Yang and Canales, F., Topologies and design considerations for distributed power system applications, Proceedings of the IE-EE, Jun 2001, Vol.89, Issue 6, Page(s): 939-950.
Vicor: www.vicr.com
International Rectifier: www.irf.com
Helsinki University of Technology Power Electronics Laboratory: www.hut.fi/Units/Power Electronics

Kaavat

(1) Hyötysuhde määritellään teholahteen anto- ja ottotehon suhteen:

$$\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$$

(2) Resistanssin läpi kulkeva virta aiheuttaa virran neliöön verrannollisen häviön:

$$P_{\text{häviö}} = RI^2$$

(3) Diodin läpi kulkevan virran aiheuttama tehohäviö riippuu jännitehäviöstä V_D

$$P_{\text{häviö}} = V_D I$$

(4) Laskevan katkojan eli Buck hakkuriteholahteen tulo- ja lähtöjännitteen välinen suhde, jossa D on kytkimen suhteellinen johtoaika kytkentäajaksosta T_s

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D$$

(5) Forward hakkuriteholahteen tulo- ja lähtöjännitteen riippuvuus. N_1 ja N_2 ovat muuntajan ensiön ja toision kierrosten lukumäärät

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_2}{N_1} D$$

(6) Kapasitanssiin varastoitunut energia riippuu kapasitanssista ja kapasitanssin yli olevan jännitteen neliöstä:

$$E = \frac{1}{2} CU^2$$

Taustat

Kirjoittajat: Vesa Tuomainen, tutkija, Tehoelektronikan laboratorio, TKK
 Jorma Kyyrä, professori, Tehoelektronikan laboratorio, TKK

Yhteyshenkilö: vesa.tuomainen@hut.fi, jorma.kyyra@hut.fi

Tutkimus: Efficiency and power density improvement in power electronic systems

Yhteistyössä: Efore Oyj, ABB

Teknologiaohjelma: ETX