



Designing high volume power supplies

Switched-mode power supplies are complicated dynamical processes. Despite the variable-structure nature the linear time invariant (LTI) models based on the use of averaging and linearizing are turned out to describe surprisingly well their dynamical behavior.

Among the practicing power supply design engineers the knowledge on control engineering methods and dynamical analysis seems to be at quite low level. This is easily reflected as poor product quality, which can stay dormant until changes in load level or environment take place or the aging of components changes the situation.

During the projects a proper design methodology has been established, and several new small-signal modeling methods have been developed especially for different current-mode control applications. Research has been conducted also on the multi-variable control of parallel operating converters with automatic load share control. Advanced control design methods such as H_∞ have been applied. The projects 'Optimal Use and Monitoring of VRLA Batteries' and 'Developing and Optimizing Methods for Designing High-Volume Power Supplies' are funded by National Technology Agency of Finland Tekes and some Finnish companies having activities in power supply business area. The projects are carried out in the co-operation between University of Oulu, Helsinki University of Technology, and Lappeenranta University of Technology. The author Teuvo Suntio (teuvo.suntio@ee.oulu.fi) is a Professor at the University of Oulu Electronics Laboratory.

Volyymiteholähteiden suunnittelumenetelmien optimointi

Teholähteitä massoille



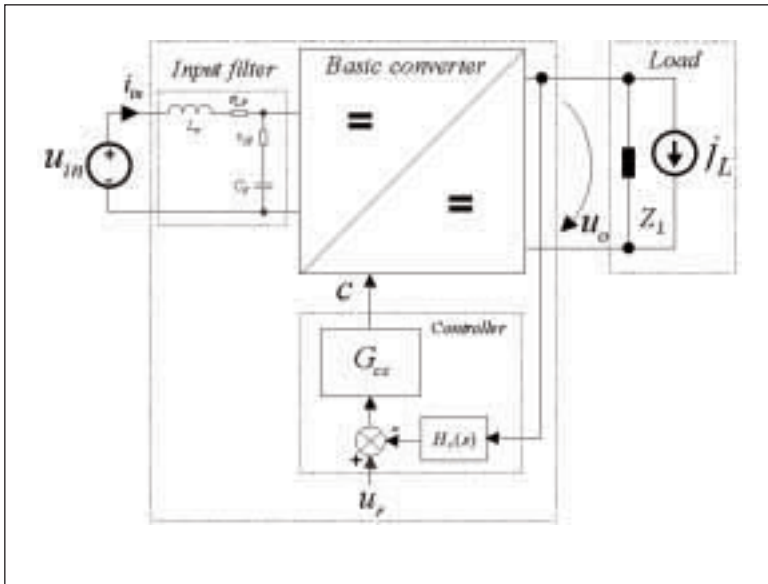
Dynaamisena ja epälinearisena prosessina teholaähde on hankala. Kaikki mahdolliset anomaliat eivät ole nähtävissä suoraan topologisia elementtejä tutkimalla, vaan pysyvät piilevinä. Huoltoraporttien valossa tuotteen laatu näyttää yleensä uskomattoman hyvältä. Vuosien kuluttua vikatilastot saattavat yllättäen kasvaa. Kysymyksessä on tyypillisesti teholahteen kuormituksen kasvusta johtuvat mitoitusongelmat tai dynaamisten rajoitusten saavuttaminen eri tekijöiden vaikutuksesta.

Säädön suunnittelu perustuu useimmiten kohdetta kuvaavien piensignaalmallien eli siirtofunktioiden käyttöön, jotka teholahteen tapauksessa on johdettavissa sen rakenteen perusteella. Säädön olennainen elementti on suljetun silmukan

vahvistus, jossa ohjausmuuttujan ja lähtöjännitteen välinen siirtofunktio määrittelee lähtökohdan säädön suunnittelussa. Sen mahdollisesti sisältämät anomaliat nollien ja napojen muodossa määrittelevät säädön rajat.

Muokkaamalla suljetun silmukan vahvistuksen käyttäytymistä, kohteen dynaamiset ominaisuudet voidaan asettaa likipitään halutunlaisiksi mutta vain jossakin toimintapisteessä. Käytännön tilanteessa toimintapiste saattaa vaihdella laajalla alueella ja käytetyillä komponenteilla on reaalin vaihteluväli. Tämän johdosta laboratoriomittauksilla on mahdoton varmistaa stabiiliuden ja suoritusarvojen riittävyttä. Säädetekniikassa on tarjolla lukuisia menetelmiä, joiden avulla on mahdollista ottaa huomioon edellä mainitut vaihtelut, ja näin varmistaa tuotteen laatu entistä paremmin.

Systeemin asteluku muodostuu siinä olevien riippumattomien tilamuuttujien määrän mukaan. Tyypilliset teholahteet ovat aina vähintään kaksiasteisia, mutta useimmiten asteluku

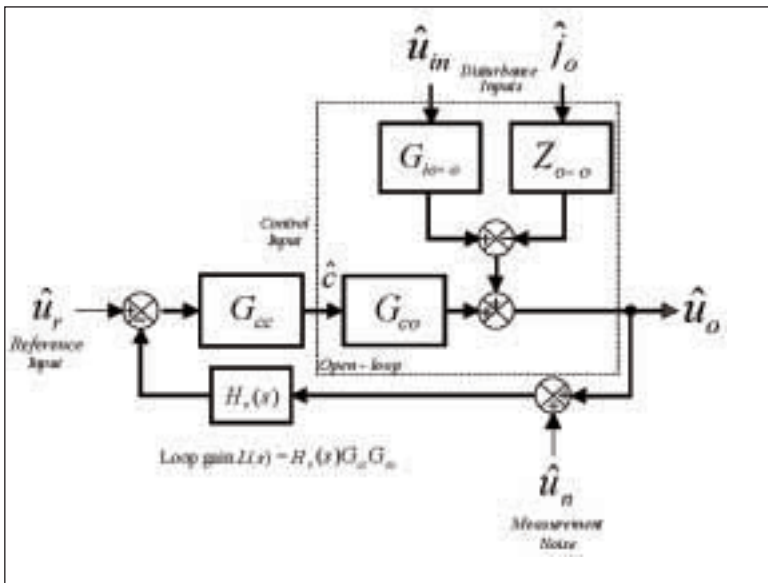


Teholähteen dynaaminen toimintaympäristö muodostuu kuormana olevista muista vastaavista teholähteistä. Niiden vaikutus voidaan kuvata impedanssin Z_L ja vakiovirtakuorman j_L avulla.

Dynamical operating environment of a converter consists of other similar converters as a load, which can be modeled using impedance Z_L and a constant-current type source j_L .

tulomuuttujina piirin tulojännite ja lähtöön kytketty vakiovirtakuorma. Tila- ja lähtöyhtälöistä muodostetaan painotettu keskiarvo kertomalla johtavan tilan yhtälöt pulssisuhteella ja johtamattoman tilan yhtälöt sen komplementilla sekä laskemalla näin saadut yhtälöt yhteen. Tämä epälineaariset yhtälöt linearisoidaan esimerkiksi osittaisderivointia hyväksi käyttäen.

Säädön suunnittelussa meitä kiinnostaa taajuusvasteet, jotka voidaan ratkaista edellä mainituista linearisoiduista yhtälöistä. Menetelmän luonteesta johtuen sillä voidaan saavuttaa riittävä tarkkuus ainoastaan taajuuksilla, jotka ovat enintään puolet käytetyn kytkentä taajuuden arvosta. Varhaisessa vaiheessa havaittiin, että alkuperäisen menetelmän avulla määritetty kuvaus on riittävä ainoastaan jatkuvan kelavirran tapauksessa. Epäjatkuvan kelavirran tarkka mallinnus onnistuttiin luomaan vasta 90-luvun lopussa (Jian Sun, et al.).



Teholähteen stabiiliuden ja suoritusarvojen suunnittelussa käytetään kuvan mukaista säätötekniistä lohkokaaviota, josta suljetun silmukan ominaisuuksiin vaikuttavat elementit ovat selvästi esillä.

A control block diagram used typically for designing the stability and dynamical performance of a converter with the loop gain clearly defined.

Virtamuotoiset säädöt (Current-mode control)

Suoran pulssisuhdeohjauksen lisäksi käytetään muita ohjaustapoja kuten kiinteätaajuista huippu- ja keskiarvovirtaohjausta (peak-current-mode, average-current-mode) sekä vaihtelevataajuista huippu-virtaohjausta (s.o. itsevärähtelevät kytkennät, self-oscillating converters).

Virtaohjauksella on merkittävä vaikutus teholähteen dynamiikkaan. Tämä johtuu induktanssin virran käyttäytymisen rajoittamisesta, jolloin systeemin navat ovat selvästi erillään toisistaan tuloksena ensimmäisen asteen käyttäytyminen. Suurtaajuisten napojen vaikutus tulee esiin haluttaessa nopeaa vastetta tai toimittaessa muuten tiettyjen rajatilojen lähellä.

Huippuvirtaohjaus kehitettiin 70-luvun puolessa välissä. Havaittiin, että kytkentä ei toimi normaalisti kuin 50 prosentin pulssisuhteeseen asti jatkuvan kelavirran tapauksessa. Kompensoinnin avulla kyseistä pistettä voidaan siirtää. Huippuvirtaohjauksen mallinnusta on yritetty lukuksilla keinoilla. Jo 80-luvun alkupuolella johdettiin yhtälöitä, joissa esiintyy äärettömän suurivahvistus mainituissa rajapisteissä. Tällaiset tulokset on kategorisesti leimattu ehdottoman virheellisiksi, koska ilmiötä ei ole pystytty mittausten todentamaan. Todisteet löytyvät kuitenkin jopa teholähteen jatkuvan tilan toiminnasta.

Syynä ilmiöön on induktanssin keskiarvovirran ja ohjausvir-

on suurempi muun muassa suodattimien johdosta. Systeemin dynaamiset ominaisuudet määräytyvät pitkälti niin sanotun ominaispolynomin (characteristic polynomial) mukaan.

Teholähteen perusohjaustapa on niin sanottu suora pulssisuhdeohjaus (direct duty-ratio control), joka tunnetaan myös jännitemuotoisen ohjauksen nimellä (voltage-mode control). Se on dynaamisen mallinnuksen perusta, josta muiden ohjausmuotojen käyttäytymisen malli johdetaan. Jatkuvalla kelavirralla jännitemuotoisen ohjauksen avoimen silmukan ominaispolynomin juuret ovat imaginaariset ja vaimennus suhteellisen vähäinen eli systeemissä esiintyy resonanssikäyttäytymistä. Tämä johtuu siitä, että induktanssin virta voi suhteellisen vapaasti muuttua, mikä myös tarkoittaa, että systeemin navat ovat lähellä origoa.

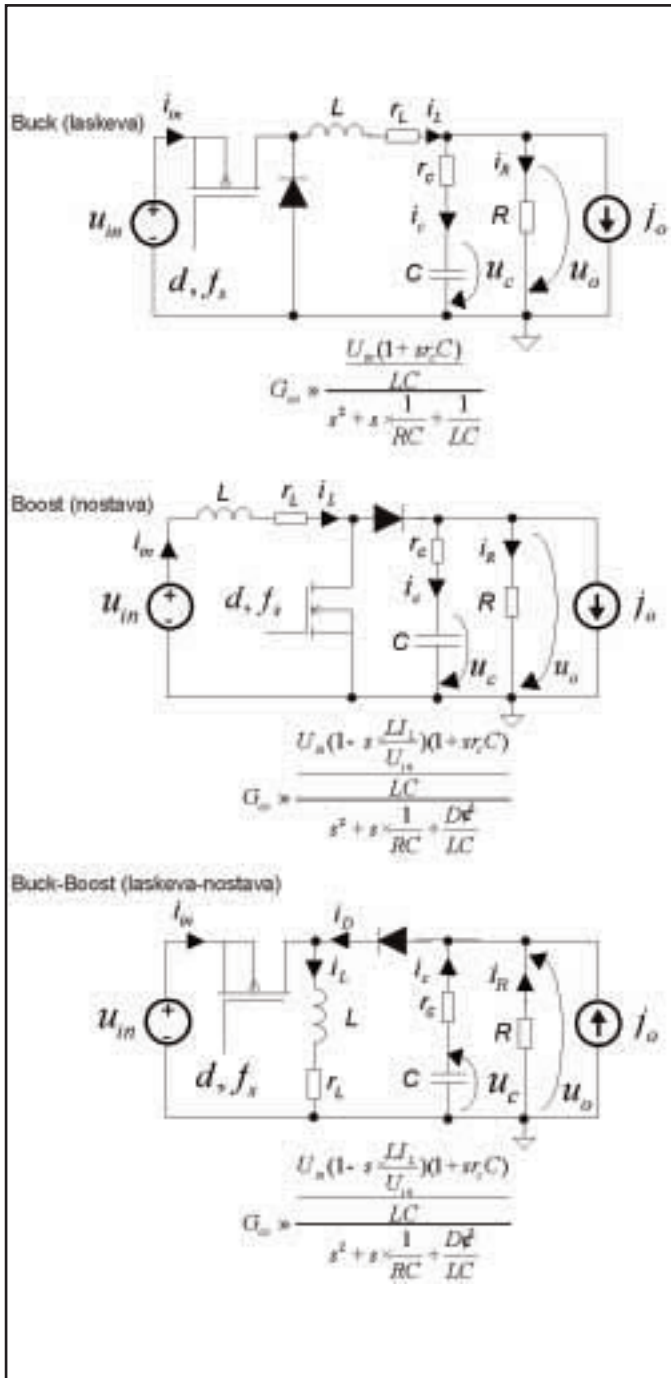
Epäjatkuvassa tilassa ja virtamuotoisilla ohjauksilla induktanssin virran muutos on enemmän kahlittua, jolloin siitä johtuva napa siirtyy kauemmaksi origosta jopa äärettömyyteen. Tästä on usein se seuraus, että dynamiikka muistuttaa ensimmäisen asteen käyttäytymistä, koska lähimpänä origoa olevat niin sanotut hallitsevat navat/nollat (dominating poles/zeros) määrittävät systeemin käyttäytymisen.

Vaikka matalataajuinen käyttäytyminen näyttää olevan ensimmäisen asteen kaltainen, niin suuremmalla taajuudella olevat navat ja nollat joudutaan ottamaan huomioon robustin stabiiliuden ja suoritusarvojen varmistamiseksi. Maailman tehölähdekirjallisuudessa näihin asioihin ei aina kiinnitetä riittävä huomiota, ja jopa suoranaisia virheellisyksiä on havaittavissa.

Suora pulssisuhdeohjaus

Teholähteen piensignaalin mallinnusmenetelmiä on kehitelty 70-luvulta lähtien. Middlebrook ja 'Cuk kehittivät kuuluisan tilayhtälöiden keskiarvoistamismenetelmän (state space averaging) 70-luvun puolivälissä kiinteällä taajuudella toimiville teholähteille, joissa kytkimien päälläolon kestoajaa ohjataan PWM-modulaattorin (Pulse Width Modulation) lineaarisen rampin avulla. Siinä kytkentä tarkastellaan pääkytkinten ollessa johtavana ja johtamattomana.

Kullekin tilalle muodostetaan tilamuuttujien derivaatalle ja lähtömuuttujille yhtälöt teoreettisen sähkötekniikan menetelmien. Tilamuuttujiksi valitaan piirin muistielementtien (s.o. kelat ja kondensaattorit) virrat ja jännitteet. Lähtömuuttujina ovat useasti piirin tulovirta ja lähtöjännite sekä riippumattomina



Kuvassa on esitetty laskevan (buck), nostavan (boost) ja laskevan-nostavan (buck-boost) hakkureiden periaatteelliset kytkennät sekä piensignaalmallinnuksella saatavat ohjauksesta lähtöön olevat siirtofunktiot. Ekvivalenttiresistanssien (ESR) vaikutuksesta on otettu huomioon ainoastaan lähtökondensaattorin ESR:n aiheuttama nolla.

Buck, boost and buck-boost converter topologies are shown with the corresponding control-to-output transfer functions. The effect of equivalent series resistances (ESR) is included only as a zero caused by the output capacitor and its ESR.

ran välisen etäisyyden käyttäytyminen: etäisyys lyhenee pulssisuhteen kasvaessa, mutta huippuvirtaohjaus olettaa, että se alkaisi jälleen kasvamaan rajatilanteen (mode limit) jälkeen. Yhden kytkentäjaksos aikana tämä ei ole mahdollista mutta kahden tai useamman jaksos aikana kyllä. Äärettömän silmukavahvistuksen avulla takaisin kytket-

ty säätö pakottaa tehollähteen toiminnan niin sanottuun harmoniseen muotoon, jolloin virran huippuarvon ja keskiarvon välinen etäisyys kasvaa. Äärettömästä vahvistuksesta johtuen normaali ohjaus ei ole enää mahdollista. Induktanssin virran keskiarvo-ohjaus, joka kehitettiin 1990-luvun alussa (Dixon), si-

sältää pitkälti samoja elementtejä kuin huippuvirtaohjaus. Mitään pulssisuhderajoitusta ei esiinny, koska ohjauksen luonteesta johtuen, siinä on 100 prosentin pulssisuhteen mahdollistava kompensointi. Virtasilmuksessa käytettävän säätäjän toteutus eli napojen ja nollien sijoittelu ratkaisee tehollähteen dynaamiset ominaisuudet. Pieni suurtaajuinen vahvistus tai kytkentätaajuutta ennen sijoitettu suurtaajuinen napa poistavat induktanssin virran suurtaajuudesta komponentista johtuvat dynaamiset vaikutukset.

Virtaohjauksen tapauksessa ohjausmuuttuja on ohjausvirta pulssisuhteen sijasta. Dynamiikan mallintamiseksi kyseisten ohjausmuuttujien keskinäinen ja muista muuttujista sekä piirielementeistä johtuva dynaaminen riippuvuus (duty-ratio constraints) täytyy ensin kehittää. Kun riippuvuus on tiedossa, sillä voidaan korvata jännitemuotoisessa ohjauksessa esiintyvä dynaaminen pulssisuhde. Matemaattisen manipuloinnin avulla virtamuotoisen ohjauksen dynamiikkaa kuvaavat siirtofunktiot voidaan helposti ratkaista.

Vaihtuvirtaajujen kytkentöjen mallinnusta ei maailmalla ole aiemmin syystä tai toisesta tehty, vaan on käytetty joko kiinteätaajuisen jatkuvan tai epäjatkuvan kelavirran vastavia malleja. Dynaaminen käyttäytyminen poikkeaa kuitenkin huomattavasti toisistaan kiinteän ja vaihtelevan taajuuden tapauksessa. Mallinnuksessa joudutaan kehittämään ensin kytkentäjaksos ja ohjattavan kytkimen päälläoloajan välinen dynaaminen riippuvuus (cycle-time constraints) ja lopuksi myös päälläoloajan ja ohjausvirran välinen riippuvuus (on-time constraints), joiden avulla dynamiikka voidaan ratkaista.

Lähtökohtana on jälleen jännitemuotoinen ohjaus, jossa myös taajuus on muuttuja, jonka vaikutus korvataan edellä mainittujen riippuvuuksien avulla. Tuloksena saatavat mallit ovat yllättävän yksinkertaisia, mutta kuvaavat tarkasti tehollähteen dynaamisen käyttäytymisen.

Dynamiikka rajoittavat ilmiöt

Useimmat tehollähteet muodostuvat perustopologioiden – laskeva (buck), nostava (boost) tai laskeva-nostava (buck-boost, flyback) – johdannaisina. Tehollähteen dynamiikkaan vaikuttaa olennaisesti se, miten induktanssin keskiarvovirta johdetaan lähtöpuolelle tai mikä osa siitä muodostaa tulovirran.

Jos energiavirta on jatkuvaa eli energiaa syötetään tai otetaan koko kytkentäjaksosella, niin portin dynaamisissa ominaisuuksissa ei ole yllätyksiä. Tästä syystä buck-tyyppisen hakkurin säädössä ei ole normaalista poikkeavia rajoituksia. Boost- ja buck-boost tyyppisissä tehollähteissä energiaa syötetään vain pääkytkinten ollessa johtamattomina. Tämä heijastuu säätöön ikään kuin viiveenä (s.o. oikean puolitasos nolla, right half plane zero), joka riippuu kelan suuruudesta, kuormasta ja tulojännitteen arvosta. Säätöä ei voida tehdä viivettä nopeamaksi, ja useimmiten sen on oltava tätä huomattavasti hitaampi stabiiliuden ylläpitämiseksi. Tästä johtuu, että boost- ja buck-boost tyyppisiä tehollähteitä ei voida käyttää jatkuvalla kelavirralla nopeata vastetta vaativissa sovelluksissa.

Epäjatkuvalle kelavirralla viive muodostuu samalla tavalla, mutta kelan arvo on huomattavasti jatkuvan tilan kelan arvoa pienempi, jolloin viive on vastaavasti pienempi sallien nopeamman dynaamisen vasteen. Raja on kuitenkin olemassa ja sen ylittäminen johtaa epästabiiliuteen tai suoritusarvojen heikkenemiseen. Viiveen aiheuttama säätötekniikan rajoitusta ei voida poistaa millään keinolla, vaikka jopa maailman luokan guru Daniel Mitchell niin väittää.

Tehollähteen lähdössä on tyyppisesti kondensaattori, jossa on fyysisestä rakenteesta johtuen vastusta. Tätä vastusta kutsutaan ekvivalenttiseksi sarjavastukseksi (equivalent series resistance, ESR), joka rajoittaa lähdön dynaamisia ominaisuuksia, mutta parantaa joissakin tapauksissa myös stabiiliutta. Jos säädön kaistaleveys halutaan suureksi, niin vastuksen aiheuttama nolla joudutaan kompensoidaan säätäjässä stabiiliuden säilyttämiseksi.

Tehollähdejärjestelmien kuormana on monesti hakkureita. Näiden hakkureiden vakiojännitesäätö aiheuttaa sen, että dynaamisessa mielessä niiden tuloimpedanssi kuvautuu ikään kuin negatiivisena vastuksena. Tämä negatiivinen vastus muuttaa syöttävän tehollähteen dynaamisia ominaisuuksia olennaisesti, ja saattaa jopa johtaa aivoimen silmuksessa tapauksessa epästabiiliin tilaan (s.o. oikean puolitasos napa, right half plane pole). Tällainen tilanne tarkoittaa, että säädöllä vaaditaan tietty vähimmäisnopeus stabiiliuden ylläpitämiseksi. Taajuustasossa tämä tarkoittaa, että säädön

kaistaleveyden tulee olla vähintään mainitun navan luokkaa.

Käytännössä edellä kuvatut ilmiöt ovat voimassa samanlaisesti, jolloin niiden yhteisvaikutus tekee säädön suunnittelun hankalaksi. Teholähteen käyttölämpötila ja erilaiset vanhenemisilmiöt muuttavat tilannetta, jolloin normaalisti stabiili tai hyvillä suoritusarvoilla varustettu laite muuttuu epästabiiliksi tai sen dynamiikka ei enää täytä asetettuja vaatimuksia. Näin ei tietenkään tarvitse käydä, jos stabiiliuteen ja dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ja niiden herkkyyden tunnetaan ja säätösuunnittelu tehdään oikein. Näiden asioiden osaaminen käytännön teholähdesuunnittelussa on kuitenkin erittäin puutteellista, mikä heijastuu yllättävinä laatuongelmina.

Mitä tutkittu ja saavutettu

Säätösuunnittelun ja sen perustana olevan teholähteen dynamiikan mallintamisen osaamisen tason on todettu olevan suhteellisen heikkoa. Tämän johdosta teholähteiden laatu ei useimmiten ole edes tyydyttävä. Harva kuitenkaan tietää tai tunnistaa, että tilanne on tämä.

Huoltoraportit antavat usein ymmärtää, että huippulaatua on onnistuttu kehittämään. Myöhemmin tilanne muuttuu kuorimituksen kasvaessa, komponenttien vanhetessa tai ympäristöolosuhteiden muuttuessa. Tämä on selvästi kansainvälinen ongelma. Yllättävää on myös ollut, että kansainvälinen tieteellinen taso ei ole ollut tavoittamattoman korkealla, vaan puutteita ja jopa virheellisyksiä on havaittu, joita on pystytty selvittämään ja korjaamaan.

Alla mainituissa ETX-tavoitetutkimusprojekteissa on kehitetty ensin menetelmiä yksittäisen teholähteen mallintamiseksi sekä lähtö- että tulodynamiikan suhteen. Tarkastelu ympäristö on ollut tietoliikennejärjestelmien virransyöttö, joskin kehitetyt menetelmät ovat yleispäteviä. Tällä sovellutusalueella käytetään tyypillisesti tietynlaisia ratkaisuja kuten esimerkiksi virtaperustaista ohjausta.

Hallitseva käsitys huippuvirtaohjauksen mallintamiseksi on osoitettu vääräksi. Kehitetty menetelmä paljasti ja todisti, että muutamat aiemmin esitetyt eri menetelmiin perustuvat tulokset ovat oikeat, vaikka ne oli todistettu niin sanotuin tieteellisin menetelmin vääräksi. Ilmiöl-

le pystyttiin löytämään myös fyysinen selitys. Kehitettyä menetelmää on tuloksellisesti sovellettu myös keksiarvoperusteiseen ja vaihtelevataajuiseen ohjaukseen.

On myös havaittu, että yksinkertaisessa kustannustehokkaassa toteutuksessa törmätään helposti ongelmiin, jotka johtuvat teholähteen dynamisesta käyttäytymisestä kytkentätaajuuden lähellä olevilla taajuuksilla. Keksiarvoistukseen perustuvat menetelmät eivät näitä ilmiöitä pysty ennustamaan, vaan tarvitaan tarkempia mallinnus- ja mittausmetodeja. Jatko-tutkimuksissa on tarkoitus kehittää suurtaajuisten mallinnuksen menetelmiä.

Projekteissa on myös tutkittu ja kehitetty menetelmiä rinnankäyviin teholähteiden säädön suunnitteluun. Kysymyksessä on monimuuttujasäätöongelma, jossa perinteelliset menetelmät eivät välttämättä johda enää tyydyttävään tulokseen. Tarvitavat menetelmät ovat mutkikkaita, mutta hallittavissa saatavilla olevien matematiikkaohjelmistojen kuten Matlabin avulla. ●

Taustat

Kirjoittaja: Professori Teuvo Suntio työskentelee Oulun yliopiston elektroniikan laboratoriossa tutkimusalueena sovellettuelektronikka ja teholähdetekniikka. Hän on myös systeemitekniikan dosentti Teknillisen korkeakoulun systeemitekniikan laboratoriossa tutkimusalueena systeemitekniikan sovellukset tehoelektronikassa.

Yhteyshenkilö:
teuvo.suntio@ee.oulu.fi

Tutkimus: Akuston optimaalinen valvonta ja käyttö, Voilymitteholähteen suunnittelu- ja menetelmien kehitys ja optimointi

Yhteistyössä: Ascom Energy Systems Oy, Efore Oyj, Fincitec Oy, Salcomp Oy, Oulun yliopisto, Teknillinen korkeakoulu ja Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Teknologiaohjelma: ETX

Aiheesta enemmän:

R. D. Middlebrook, S. Ćuk, A general unified approach to modeling switching-converter power stages, *International Journal of Electronics*, vol. 42, no. 6, 1977, pp. 521-550.

J. Sun, D. M. Mitchell, M. F. Greuel, P. T. Krein, R. M. Bass, Averaged modeling of PWM converters operating in discontinuous conduction mode, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 16, no. 4, 2001, pp. 482-492.

J. Sun, R. M. Bass, A new approach to average modeling of PWM converters with current-mode control, *IEEE Industrial Electronics Annual Conference (IECON)*, 1997, pp. 599-604.

T. Suntio, 'Analysis and modeling of peak-current-mode controlled buck converter in CICM,' *IEEE Trans. on Power Electronics*, submitted for publication.

L. H. Dixon, Average current mode control of switching power supplies, *Unitrode Power Supply Design Seminar, SEM 700*, 1990, pp. 5.1.-5.14.

T. Suntio, Analysis and modeling of peak-current-mode controlled buck converter in DICM, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 1, 2001, pp. 127-135.

T. Suntio, M. Rahkala, I. Gadoura, K. Zenger, Dynamic effects of inductor current ripple in peak-current and average-current mode control, *IEEE IECON*, 2001, in press.

J. Lempinen, T. Suntio, Modeling and analysis of self-oscillating peak-current controlled flyback converter, *IEEE IECON*, 2001, in press.

D. M. Mitchell, Tricks of the Trade: Understanding the Right-Half-Plane Zero in Small-Signal DC-DC Converter Models, *IEEE Power Electronics Society NEWSLETTER*, January, 2001, pp. 5-6.