

Zárójelentés

Nemlineáris teljesítmény-elektronikai átalakítók dinamikus vizsgálata

(Ifjúsági OTKA: 49152)

Vezető kutató: Dr. Hamar János

A pályázat megvalósításának első évében az előzetesen beadott és elfogadott, évekre bontott munkaterv alapján jártunk el. Ez a tervvel összhangban, döntően az elkövetkező három éves munkához való előkészületi tevékenységeket valamint az irodalomkutatást foglalta magában. A jelenlegi záró jelentés alkalmával ezen tevékenységek ill. a szerzett új ismeretek mellőzésével csak azon szakmai előrelépéseket ismertetjük röviden, amelyek a 2006-ra tervezett publikációk előkészítésére irányultak.

Manapság a dc-dc konverzió területén a legfőbb célok egyike az átvitt teljesítmény/térfogat ill. teljesítmény/tömeg arány növelése, amellyel az ilyen átalakítókat tartalmazó berendezéseink méretei ill. előállítási költsége csökkenthető. Ezen cél elérésének legfőbb módja az alkalmazott kapcsolási frekvencia növelése. Ez bár egyszerűen megtehető, de sok új problémát felvet, amelyekre megoldást kell találni. Egy igen szignifikáns probléma a teljesítmény-vesztés, amelynek egy része a kapcsolási frekvenciával arányosan növekszik, azaz egy elfogadható szintű hatásfok eléréséhez ill. fenntartásához erőfeszítésekre van szükség. Egy másik probléma az elektromágneses interferenciából (EMI) adódó elektronikus környezet-szennyezés, amely a gyorsan változó és számottevő energiával rendelkező villamos jelekből származik. Ezen problémák orvosolására egy hatékony eljárás lehet az un. soft-switching technikák alkalmazása a konverterben levő félvezető elektronikus kapcsoló elemek esetében. Ez alapvetően azt jelenti, hogy a kapcsoló elem nagyteljesítményű kivezetései között vagy zérus feszültség van a kapcsolat pillanatában (Zero Voltage Switching – ZVS) vagy pedig a rajta keresztül folyó áram értéke zérus (Zero Current Switching – ZCS) a kapcsoláskor.

Egy korábban javasolt kétszatornás rezonáns átalakító családhoz kapcsolódóan folytak kutatások. A konverter család 12 dc-dc konvertert tartalmaz, amelyben feszültség-csökkentő (buck), feszültség-növelő (boost) és feszültség csökkentő/növelő (buck & boost) átalakítók kapnak helyt. Ezen konverterek előnyei alapvetően a nagyfrekvenciás üzem esetén mutatkoznak meg leginkább. A különböző konverterek közös tulajdonsága, hogy a bemenet és a kimenet között nem egy, hanem két, úgynevezett pozitív és negatív csatornán keresztül történik az energia-áramlás. Az alkalmazásuk ezért inkább a közepes illetve a nagyobb teljesítmények átvitele esetén ajánlott. Alapvetően kétféle üzemmódot különböztetünk meg; a szimmetrikus esetben nincs energia-csere a pozitív és negatív csatornák között, míg az aszimmetrikus működés során az egyes csatornák megfelelő változói már nem szimmetrikusak. A két csatorna közötti energiacsere egy un. kapcsolt kondenzátoron keresztül történik. Ezen konverterek mindegyike képes ZVS és/vagy ZCS üzemre.

Megvizsgáltuk a 12 dc-dc átalakítót tartalmazó konverter-család újabb egyedekkel való kibővítésének lehetőségeit, amelyek közül némelyek bár felépítésükben újak, de működésüket tekintve valamely már meglévő konverterhez hasonlóan viselkednek. Ezen konfigurációk kifejlesztésének elsődleges célja az lehet, hogy az eredeti konverterek valamely hátrányos tulajdonságát megszüntessék, vagy mérsékeljék azt. Az eredeti buck ill. buck & boost konfigurációk egy jelentős hátránya például az un. lebegő kimeneti földpotenciál, amely elsősorban biztonságtechnikai szempontból előnytelen.

A dc-dc konvertert tartalmazó un. elektronikus tápegységekben (switching mode power supplies) gyakran fontos követelmény, hogy a bemeneti és a kimeneti kör egymástól galvanikusan izolált legyen. Ez sok esetben életvédelmi célokat szolgál. Ezzel egyetértésben új konfigurációk fejlesztését tűztük ki célul, ahol speciális nagyfrekvenciás transzformátor alkalmazásával (két primer és két szekunder tekercs ill. egy primer és egy szekunder tekercs) oldjuk meg a hálózati izolációt.

A feszültség csökkentő-növelő konfiguráció esetében felismertük, hogy amennyiben az egyik csatorna kimenetét a másik csatorna bemenetére kapcsoljuk, akkor a konverter képessé tehető a kimeneten (terhelésen) valamilyen okból keletkező teljesítménynek a hálózat felé történő visszatáplálására is. Ezzel a szóban forgó energia nem veszteségi, hanem hasznos teljesítményként jelenhet meg.

Mivel a 2005-ös évben döntően előmunkálati és irodalomtanulmányozási tevékenységek történtek, ezért – szintén a korábban beadott munkatervvel összhangban – ebben az évben két konferencia publikáció elkészítéséhez és benyújtásához. Ezek véglegesítése és megjelentetése a 2006-os évben történt meg.

A 2006-os év folyamán a szerződésben szereplő munkatervvel összhangban tovább folytatódtak a pályázattal kapcsolatos kutatások. Mivel 2005-ben nagy hangsúlyt fektettünk az előkészületekre, így ezúttal kiváló lehetőségek adódtak a kutatások kiterjesztésére, amely számos – folyóiratokban ill. nemzetközi konferenciákon közölt – publikáció megjelenését is magával hozta.

A kutatásoknál a kétcsatornás rezonáns dc-dc konverter családdal kapcsolatban újabb eredmények születtek. Ezek elsősorban a konverter család dinamikus viselkedéséhez ill. irányításához kapcsolódtak. Kiváló eredményként értékelhető, hogy ebben a témában több folyóirat ill. konferencia cikk is született. A közleményekben az alapvető működés leírását követően megjelentek azok a legfontosabb összefüggések, amelyek a független vezérlő változóknak a szóban forgó teljesítmény-elektronikai rendszerek működésére vonatkozó hatását/befolyását mutatják meg.

A dc-dc konverterek tervezési folyamatában a legfontosabb célok a jó hatásfok, az elemek kis mértékű igénybevétele és a széles tartományban változtatható kimeneti feszültség. Ezeket a célokat általában nem lehet egyszerre teljesíteni. A vizsgált konverter család egyedeinél egy adott névleges R terhelés esetén a kívánt nagyságú kimeneti feszültség előállítható a különféle működési pontokban a kapcsolási frekvencia változtatásával ill. a kapcsolt kondenzátor vágási feszültség (clamping voltage) szintjének módosításával. A nagyobb kapcsolási frekvencia velejárója a nagyobb kapcsolási veszteség, így ez a módszer csökkenti a hatásfokot. Állandó kimenő feszültséget feltételezve a kapcsolási frekvencia csökkentése nagyobb csúcsfeszültséget eredményez a kondenzátoron. Ez maga után vonja ugyan a hatásfok javulását, de nagyobb lesz a kimeneti feszültség hullámossága, és nagyobb lesz a komponenseken fellépő feszültség igénybevétel.

A karakterisztikák kiértékelését a publikációkban 3 dimenziós ábrákkal segítettük. Ezek alapján számos hasznos következtetést tudunk levonni a vezérlésre/irányításra vonatkozóan. A működés kiértékelésére ill. az összefüggések igazolására laboratóriumi mérési eredményeket vetettünk össze részben számításokkal, részben pedig Matlab/Simulink környezetben készített szimulációs eredményekkel. A laboratóriumi teszt-konverter névleges teljesítménye 100 W volt. A következtetések levonása teret nyitott a konverterekre vonatkozó tervezési alapelvek kidolgozásához.

Ezen kívül további, a nemlineáris teljesítmény-elektronikai rendszerekre vonatkozó kutatásokat is végeztünk a manapság méltán népszerű megújuló energiaforrások területén. A Japánban egy szakkonferencián bemutatott publikációban (*“Environmental-friendly Electrical-Energy by Utilizing Renewable and Waste Energy Sources“*, *Renewable Energy Conference and Exhibition 2006, Makuhari Messe, Chiba, Japan*) egy általunk fejlesztett,

kombinált napenergia hasznosító berendezést ismertettünk. Ez egyidejűleg villamos energiát és hőt termel a napsugárzásból nyert energia hasznosításával. A javasolt kombinált rendszer legfőbb előnyei a gyártási és installációs költségek csökkentése valamint az hogy egységnyi felületen nagyobb energia mennyiség hasznosítható. A rendszer képes párhuzamos ill. önálló üzemben (szigetüzem) is működni, sőt bizonyos esetekben szünetmentes áramforrásként is alkalmazható. A hálózathoz csatlakoztatott és megfelelően szabályozott inverterrel lehetőség van napenergián alapuló meddőteljesítmény visszatáplálásra is.

A villamos ill. termikus részekből felépülő rendszer egyidejű vizsgálata és kiértékelése összetett, komplex feladat. Ehhez számítógépes szimulációk nyújtottak segítséget, amelyek alapvetően az energia egyenletekre épültek.

A szerződés munkatervében szintén szereplő Internet alapú irányítási rendszerrel kapcsolatban szintén előrelépések történtek. A kombinált napelemből és napkollektorból álló napenergia hasznosító rendszert kiegészítettük a mért paraméterek WEB alapú grafikus megjelenítésére alkalmas felhasználói felülettel is. Ezzel lehetőség adódik mind a villamos, mind pedig a termikus paraméterek folyamatos nyomon követésére a rendszer teljes üzeme alatt. Sőt ezen túlmenően a rendszer-architektúra kialakításakor fontos szempont volt, hogy lehetőség legyen a rendszerbe kívülről – akár nagy távolságokból is – különféle képpen beavatkozni. Ez a rendszer indításán ill. leállításán túlmenően megengedi bizonyos paraméterek megváltoztatását is. A rendszer mind a mért paraméter értékeket mind pedig a külső felhasználói beavatkozásokat naplózza, ezáltal a működés folyamata pontosan követhető ill. az üzemviszonyok kiértékelhetővé válnak.

2007-ben az OTKA szerződésben megfogalmazott célokat követve haladtak előre a kutatások, számos érdekes eredményt hozva, amelyekből újabb publikációk is születtek. A kutatások egyik iránya a 2006-os év folyamán megkezdett elméleti és szimulációs vizsgálatokat alátámasztó további laboratóriumi tesztek végrehajtása és értékelése volt. Mivel a várakozásoknak megfelelően, a kapott mérési és elméleti eredmények között nem volt szignifikáns eltérés, ezért az eredmények összegzése után tervezési eljárást dolgoztunk ki a szóban forgó dc-dc átalakítókra. Az eredményeket a nemzetközileg jelentős, brüsszeli központú European Power Electronics and Drives Journalban (*Dual Channel Resonant DC-DC Converter Family*”, European Power Electronics and Drives Journal (EPE Journal)) jelentettük meg. A publikáció magában foglalja az elméleti megfontolásokat, az összefüggéseket a be- kimeneti és kontrol változók között, a kapott szimulációs és mérési eredményeket, továbbá a javasolt tervezési folyamatot, például illusztrálva.

A kutatások másik, szintén releváns iránya az eddigiekben is vizsgált kétcsatornás rezonáns dc-dc konverter családkhoz tartozó új topológiák részletes kidolgozása volt. Ennek célja többértű. A kapott új konfigurációk egy része a meglévő konverterek valamelyikének hátrányos tulajdonságait hivatott kiküszöbölni, elsősorban azt, hogy a kétcsatornás konverterek kimeneti földpontja számos esetben „lebeg” a bemeneti földpotenciálhoz képest. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy nem lehet a bemeneti és kimeneti földpontokat összekötni, hiszen közöttük a működésből származó, speciális hullámformájú, nagy frekvenciával (~50kHz) változó feszültség alakul ki. Ez erőteljesen korlátozza a konverterek gyakorlati használatát, hiszen baleset és életvédelmi szempontból ez kritikus lehet. A fent említettekkel összhangban – a megoldási javaslatok között szerepelnek olyan konstrukciók, ahol a ki és bemenetek között nem alkalmazunk galvanikus leválasztást, hanem a kapcsoló félvezetők (elsősorban MOSFET és IGBT) számának és elhelyezésének változtatásával hidaljuk át a problémát. Ugyanakkor az alapvető működés szempontjából, azaz pl. a fontosabb feszültség- és áram- időfüggvényeket nézve, valamint a bemeneti, vezérlő és kimeneti változók közötti

kapcsolatot tekintve az eredeti topológiákhoz levezetett összefüggések nagy része kisebb módosításokkal de érvényben marad, azaz az új konfigurációkra is alkalmazható.

Az eredeti konfigurációk mindegyike 1/4-es üzemben képes működni. Az ennek kiterjesztésére irányuló erőfeszítések eredményeként kétirányú (bidirectional) rezonáns topológiát sikerült tervezni, amellyel lehetőség van a kimenetről a hálózatba való villamos energia visszatáplálásra is. Ez számos esetben nagyon hasznos lehet, hiszen az utóbbi időkben erőteljesen jelentkező igény az energia-veszteségek minimalizálására valamint az ún. hulladék energiák minél szélesebb körű hasznosítása erőteljes követelményeket támaszt a villamos energia átalakítókkal szemben is.

Szintén kidolgoztuk a nagyfrekvenciás transzformátorokat tartalmazó konverter topológiák részleteit is. Ezek előnye egyrészt a be és kimenetek közötti galvanikus leválasztás (az alkalmazások egy része ezt megköveteli), másrészt a nagy kapcsolási frekvencia lehetőséget teremt a tömeg ill. a fizikai méretek (ill. térfogat) számottevő csökkentésére is. Ezzel a konverterek kompaktságát mutató kW/l ill. kW/kg faktorokat jelentősen javítani lehet.

Szintén új eredményeket sikerült elérni a teljesítmény elektronikai átalakítók tervezését elősegítő interaktív szoftverek fejlesztésében. Ezek elsősorban a konverterek dinamikus modelljének megalkotásában nyújtanak segítséget, az állapot térben ill. a Laplace tartományban végzett analízis segítségével. Ezek eredményeként lehetőség nyílik bizonyos konvertereknél a paraméterek megadásával automatikusan generálni akár folytonos akár diszkrét idejű modelleket. A konverterek várható dinamikus viselkedése így előre jelezhető, nagy segítséget nyújtva a konverterek konstrukciós tervezéséhez, valamint az irányítási, szabályozási feladatok megoldásához. A kutatásokat japán és ausztrál egyetemeken dolgozó kollégákkal közösen folytatjuk, Budapestről koordinálva azokat.

Az eredményeket több fórumon is publikáltuk, melyek közül kiemelendő hogy 2007 áprilisában az IEEE-IEE Japan által közösen, Nagoyában, Japánban rendezett „International Power Conversion Conference” (PCC’2007) konferencián a legjobb publikáció díját (Best Paper Award) sikerült megszerezni. Ez komoly elismerést jelentett a munkában résztvevő kutatók számára.

A 2008-as évben az új topológiák területén az előző évben megkezdett kutatások tovább folytatódtak. Elsősorban az állandósult állapotbeli viselkedés vizsgálatára helyeztük a hangsúlyt. Ehhez eleinte analitikus módszereket használtunk, ahol a törekvések lényege az volt, hogy a működést leíró – a bemeneti, kimeneti és kontrol változók közötti kapcsolatot az eredeti kétcsatornás rezonáns buck, boost valamint buck & boost konfigurációkra felírt összefüggések általánosításával lehessen származtatni. Ezáltal olyan univerzális összefüggéseket kaptunk, melyek a konverter család széles tartományára érvényesek, állandósult állapotot feltételezve. Az analitikus vizsgálatok után számítógépes szimulációkra került sor Matlab Simulink ill. PSpice program csomagok használatával. A szimulációs eredmények megerősítették az analitikus vizsgálatok eredményeit; azokkal teljes összhangban voltak. Az eredményeket nemzetközi konferencián (*International Power Electronics and Motion Control Conference*) tártuk nyilvánosság elé, ahol sok érdeklődés mellett számos pozitív visszajelzést kaptunk.

A japán Nihon University-vel való együttműködés keretében 3 fázisú passzív PFC (Power Factor Corrector) egyenirányítón is végeztünk kutatásokat és publikáltuk (*IEE Japan, National Convention - I*) azok eredményeit. A három fázisú diódás egyenirányítónak több

előnye is van a PWM (Pulse Width Modulation) egyenirányítóhoz képest, mint a kompaktság, ár, hatásfok és robusztusság az áramokra stb. Viszont az egyenirányító torzított bemenő áramokat állít elő, mely komoly hátrányt jelent. A hátrány gazdaságos kiküszöbölése érdekében egy egyszerűsített 12-ütemű egyenirányítót javasoltunk, mely egy közösleges 6-ütemű diódás egyenirányítóból valamint egy egyszerű kiegészítő részből áll annak érdekében, hogy a működés során a ütem-számot megduplázzuk (a 6-ot 12-re). A publikációnkban bemutattuk ezen rendszer tulajdonságait valamint annak függését a vonali induktivitástól. Az új (12 ütemű) rendszert a közösleges 6-ütemű rendszerrel laboratóriumi vizsgálatok során hasonlítottuk össze (10kW-os egységek). Az eredmények azt mutatták, hogy a 12-ütemű egyenirányító nagyon hatékony és különösen a vonali áramok torzító hatásának csillapításában jelent komoly előnyt.

Szintén a háromfázisú konverterek témakörében a nemlineáris rendszerek elméletéhez kapcsolódó eredményeinket is a 2008-as évben publikáltuk (*IEE Japan, National Convention - 2*). Ezek a digitális áramszabályozású (DDC) térvektor modulált (SVM), háromfázisú VSC konverterekhez kötődtek, melynek lényege hogy a háromfázisú áramok jó közelítéssel követik a megfelelő szinuszos jelalakot. A nemlinearitások miatt a rendszerben bizonyos paraméterek hatására nemkívánatos állapotok alakulnak ki. A publikációban egyrészt a homoklinikus bifurkációk hatását vizsgáltuk meg állapot térben, másrészt pedig az azt előidéző külső körülményeket ill. paraméter-tartományokat. Az analitikus vizsgálatokon túl numerikus eredményeket is bemutattunk.

A K+F tevékenységek másik fő vonulata a projekt munkatervének megfelelően arra irányult, hogy az érdekesebb eredmények a BME hallgatói számára is elérhetővé váljanak egy virtuális laboratórium részeként. A korábban már kezdett munkát most újabb szoftver kódokkal egészítettük ki, melyek lehetővé teszik a paraméterek változásának későbbi nyomon követését is ill. statisztikák készítését is, az adatbázisban letárolt adatok alapján. A virtuális laboratóriumra vonatkozó eredményeket az Ausztráliában megjelenő, *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering* folyóiratban publikáltuk.