

SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉS

OTKA által támogatott, 100275 azonosító számú " **Bifurkációk kutatása a teljesítményelektronikában és a mozgásszabályozásban**" című kutatás

Időszak: 2012-01-01-től 2015-12-31-ig

A beszámolót a publikációs tevékenység összefoglalójával kezdjük, ezt követi a kutatott témakörök bemutatása. Ezekben röviden beszámolunk a témáról, az eredményekről és a publikációs jegyzékre hivatkozva a kapcsolódó publikációkról. A részletek minden esetben a publikációkban találhatóak. A következőkben azokra a cikkekre hivatkozunk, amelyek bibliográfiai adatai az OTKA honlapon a Közlemények rovatban találhatóak.

A publikációk száma: 37. Ebből 5 angol nyelvű impakt faktoros folyóirat cikk, amelyek összegzett impakt faktora 20.773. Ezen kívül megjelent egy angol és egy magyar nyelvű cikk impakt faktoralal nem rendelkező folyóiratokban. Emellett 30 konferencia közleményünk jelent meg. Három kivételével a konferenciák mindegyike IEEE vagy IEEE támogatott külföldi (Európában, Amerikában, vagy Ázsiában megtartott) konferencia volt.

A kutatási eredményeink értékét mutatja, hogy a 37 cikkre a pályázat lezárulásáig már 38 független hivatkozást találtunk. Ezek túlnyomó többsége nemzetközi folyóiratcikkek vagy konferenciaközlemények voltak. Várható, hogy a kutatási pályázat lezárása után a hivatkozások száma tovább növekszik.

Impulzusszélesség modulációs technikák vizsgálata nyílt és zárt hurkú működés esetén

A kutatásaink fő alkalmazásában, a pályázatban is kiemelt teljesítményelektronikában és a mozgásszabályozásban, a nemlinearitás egyik fő forrása az impulzusszélesség modulációs (ISZM, angol rövidítéssel PWM) technikák, amelyek a bifurkációs és kaotikus jelenségek fellépésének is egyik gyakori okai. Ezt a kutatási témát egy nagyfordulatszámú indukciós gép meghibásodásai indították el, ahol a problémák egyik fő forrása az ISZM vezérelt háromfázisú, kétszintű feszültséginverter és az indukciós gép kölcsönhatása volt.

Az ISZM vezérlésű feszültség inverterek egyik fő jellemzője nagyfordulatszámú hajtások esetén a kis értékű frekvencia arány $m_f = f_c/f_r$ ($m_f < 15$), amelynek oka a nagy f_l alapharmonikus vagy f_r referencia frekvencia és a korlátos vivő f_c frekvencia. Emiatt az állórész feszültségek és áramok harmonikus tartalma sokkal kedvezőtlenebb, mint az alacsonyabb f_l frekvenciával működő hajtásokban. A kis értékű m_f okozta problémák nem csak nagyfordulatszámú hajtásokban, hanem nagy pólusszámú indukciós géppel megvalósított hajtások esetén is felléphetnek, amelyeket egyre gyakrabban használnak hibrid vagy elektromos autókban.

Többnyire a szakirodalomban azt állítják, hogy természetes mintavételezésű vivő frekvenciás ISZM technikák esetén nem lép fel egyenkomponens az inverter kimenő feszültségében szinkronizált esetben, amikor a frekvencia arány m_f egész szám. Ugyanezt az eredményt sugallja a szakirodalomban az ISZM technikák harmonikus tartalmának meghatározására leggyakrabban alkalmazott dupla Fourier sorfejtés módszere. A kutatásaink során

megmutattuk: amikor az m_f alacsony és egész szám, jelentős egyenkomponens léphet fel természetes mintavételezésű ISZM technikák esetén, ha m_f páros és nem osztható 3-mal (és $m_f < 21$). Bebizonyítottuk, hogy az egyenkomponenst el lehet kerülni páros m_f esetén, ha legfeljebb kétszer mintavételezzük a referencia jelet egy vivőjel periódus alatt.

Annak ellenére, hogy a szakirodalomban gyakran javasolják a szinkronizált ISZM technikák alkalmazását, ha $m_f < 12-15$ még ha a referencia frekvencia változik is, a kereskedelemben kapható háromfázisú feszültség inverterek esetében a leg többször a vivőfrekvenciát csak diszkrét lépésekben (például 3-6-12-16 kHz) lehet változtatni. Ennek következtében a frekvencia arány jellemzően nem egész szám (aszinkron ISZM). Ez adja a gyakorlati jelentőségét az ISZM technikák által generált szubharmonikus feszültség komponensek hatásvizsgálatának. A kutatásaink során bebizonyítottuk, hogy annak ellenére, hogy a szubharmonikus feszültségkomponensek amplitúdója kis érték, jelentős többletvesztést okozhatnak, ha $m_f < 15$. Az eredményt annak a figyelembevételével kell értékelni, hogy számos publikáció azt állítja, hogy a szubharmonikusok hatása elhanyagolható.

Természetes mintavételezésű, vivőfrekvenciás ISZM technika az egyik legkedvezőbb kis értékű m_f esetén mivel nem okoz torzítást vagy késleltetést a referencia jelhez képest. Jelenleg is több kutatás foglalkozik a jellemzően analóg módon implementált természetes mintavételezésű ISZM technika digitális megvalósításával. Többnyire az FPGA párhuzamos számítási tulajdonságait használják ki, hogy a mintavételek számának növelésével közelítsék a természetes mintavételezésű ISZM viselkedését. Publikáltunk egy olyan módszert, amellyel természetes mintavételezésű ISZM technikát lehet implementálni még kisteljesítményű mikrovezérlőben is, ahol az ISZM periféria regisztereit csak kétszer lehet frissíteni egy vivő periódus alatt. A többi, a szakirodalomban fellelhető digitális természetes mintavételezésű módszerrel ellentétben a módszer előnyei: az algoritmust elegendő kétszer meghívni, továbbá nem lép fel - a többi módszerre jellemző - többletél generálás problémája.

A kutatáshoz kapcsolódóan megvizsgáltuk az ISZM technikák hatását szabályozott nagyfordulatszámú hajtások esetére is. Mezőorientált szabályozás az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a háromfázisú váltakozóáramú hajtások fordulatszám és fluxus szabályozásának, köszönhetően az elérhető kiváló dinamikai tulajdonságoknak és a félvezető technológia látványos fejlődésének, mind a teljesítményelektronikában, mind a digitális technikában. A számos előnynek köszönhetően a mezőorientált szabályozott indukciós motorokat széles körben alkalmazzák az alacsony költségű lakókörnyezetben használt berendezésektől kezdve, mint például mosógépek, a korszerű, drága és kiváló minőségi követelményeket támasztó rendszerekig, mint a közlekedési eszközök vagy a gyártásautomatizálás.

Annak ellenére, hogy a legmodernebb digitális eszközök órajelei már a több száz MHz-es tartományban vannak, a mintavételezési frekvenciát a sönt ellenállással történő árammérési módszer korlátozza. Ez azt eredményezi, hogy nagyfordulatszámú vagy nagy pólusszámú hajtások maximális fordulatszáma környékén nem csak a vivőfrekvencia és az alapharmonikus frekvencia aránya m_f , de a mintavételi frekvencia és a referencia frekvencia F aránya is kis értékű lesz. Az F frekvencia arány alacsony értéke csökkenti a zárt hurkú mezőorientált szabályozás megbízhatóságát, teljesítményét. A kutatásaink során szimulációval és mérési eredményekkel is megmutattuk, hogy alacsony F érték esetén a szabályozás megbízhatóságát jelentősen növelni lehet a sönt ellenállással történő árammérés esetén alkalmazott Reguláris Mintavételezés helyett a Dupla Mintavételezésű térvektoros moduláció használatával. A módszerrel a hajtás robusztusságát növelni lehet továbbá a stabilis tartomány kibővíthető. A szükséges többletszámítás igény csekély, ami a mikrovezérlő vagy a DSP értékes processzor idejéből csak egy kis szeletet vesz el.

Kapcsolódó publikációk: J1, J3, P1, P4, P6, P13, P18, P21

Stabilitás vizsgálat a segéd állapotvektor segítségével

Kapcsolóüzemű teljesítményelektronikai konverterek széles körben alkalmazott berendezések, megtalálhatóak az egyszerűbb háztartási eszközöktől kezdve a különböző, korszerű hajtásokban is. A megbízhatóbb, hatékonyabb és olcsóbb rendszerek előállítása iránti, folyamatosan növekvő igény miatt elengedhetetlen az ilyen típusú változó struktúrájú konverterekről alkotott minél pontosabb matematikai leképezés és vizsgálat. Gyakori hogy az ilyen változó struktúrájú szakaszonként lineáris nemlineáris rendszerek stabilitásvizsgálata során egy átlagolt modellt használnak a struktúrák közötti kapcsolások hatását figyelmen kívül hagyva. Amíg ezt a közelítő, jellemzően lineáris modellt könnyen lehet vizsgálni a szabályozás elmélet és az irányítástechnika különböző módszereivel, addig a legtöbbször alkalmazott módszerekkel nem lehet a kapcsolások hatásaként fellépő instabilitásokat figyelembe venni.

A kutatásainknak két fő célja volt. Az egyik az, hogy kapcsolóüzemű konverterek stabilitásvizsgálatához az úgynevezett segéd állapotvektort használjuk a különböző szubharmonikus vagy kaotikus állapot kimutatásához. A másik cél volt, hogy szintén a segéd állapotvektort használva a labilis viselkedést kompenzálni tudjuk, és a stabil tartományt kibővítsük. A vizsgálatokat két rendszeren végeztük el. Az egyik egy csúcsáram vezérelt állandó mágneses egyenáramú hajtás, a másik pedig egy digitálisan implementált, átlagáramra szabályozott Teljesítménytényező javító (PFC) konverter volt. Utóbbi esetben a mintavétel miatti holtidő, a zérusrendű tartás, valamint a nem ideális áramkörü elemek hatását is vizsgáltuk a stabilitásra és a bifurkáció fellépésére.

Megmutattuk, hogy a segéd állapotvektor módszere alkalmas arra, hogy közvetlenül meghatározzuk a Jacobi mátrixot a Poincaré Térképfüggvény (PTF) meghatározása nélkül. A Jacobi mátrix sajátértékei alapján a bifurkációval kezdődő stabilitási határ egyértelműen meghatározható. A számított stabilitási határt szimulációval és laboratóriumi mérésekkel igazoltuk mind a két rendszer esetében.

Ezen kívül megmutattuk, hogy a vizsgálati módszer eredendően alkalmazható a stabilitási határ kibővítéséhez a vezérlőjelekhez kevert periodikus jelek segítségével. A periodikus jel paramétereit szintén a segéd állapot vektorral határoztuk meg. A PFC konverter esetében a stabilizáló háromszöglelet a bemenő szinuszos feszültséggel kell modulálni.

Kapcsolódó publikációk: J2, P7, P15

Szabályozott DC-DC konverterek

Az elektronikában a kaotikus folyamatokat és a különböző bifurkációkat a múlt század végétől kezdve először a DC-DC konverterekben mutatták ki rendkívül nagyszámú közleményben. Az ehhez a témához kapcsolódó kutatások egyik része párhuzamosan dolgozó DC-DC konverterek optimális hatásfokának a meghatározásával foglalkozott. A párhuzamos DC-DC konverterek optimális hatásfokának teljesülése gyakorlati szempontból fontos. A feladat összetettségét az alkalmazott általános megközelítés során elméleti oldalról a nagyszámú topológia és terhelés elosztási stratégia mutatja. Arra kérdésre kerestük a választ, hogy melyik az az optimális terhelő áram elosztási stratégia, amelyik a maximális együttes hatásfokot eredményezi, feltételezve, hogy a konverterek egyenként intelligenciával rendelkeznek. Külön vizsgáltuk a homogén és a heterogén agens populációk eseteit. Az elméleti megfontolásainkat szimulációval és laboratóriumi kísérletekkel támasztottuk alá. Optimális terhelési elosztási stratégiát találtunk a maximális, együttes hatásfok elérésére mind a homogén, mind a heterogén agens populációk eseteire.

A kutatásaink másik része újfajta DC-DC konverter topológiák optimális irányításával foglalkozott. A vizsgálatunk egy kvadratikusan DC-DC konverterre terjedt ki, mely egy vezérelt

félvezető kapcsoló segítségével ugyanakkora erősítést képes megvalósítani, mint két, párhuzamosan kötött feszültségnövelő (Boost) konverter. A konverter vezérlése LQR állapot szabályozással történt. A szabályozó algoritmus kiegészült egy Kálmán szűrő alkalmazásán alapuló állapotbecslővel (LQG szabályozás), amely lehetőséget nyújt, csak a kimenő és bemenő feszültség mérése alapján, az állapotváltozók meghatározására és felhasználására az visszacsatolásban. A P28-as jelzésű cikkben bemutatásra került a konverterben található induktivitások és kapacitások által tárolt energia alapján alkalmazható számítási módszer a szabályozó paraméterek meghatározására. A cikkben leírtak alapján más típusú konverter topológiák esetén is könnyen elvégezhető a számítás.

Kapcsolódó publikációk: J4, P2, P5, P28

Két oldalról táplált szélerőműben használt indukciós generátorok vizsgálata

Az első kutatási téma a megújuló energiák közül a szélenergiát hasznosító villamos erőművek nemlineáris tulajdonságainak vizsgálatához kapcsolódik. Az egyik leggyakrabban alkalmazott megoldásban két oldalról táplált indukciós generátort használnak, éppen ezért vizsgálatukat erre a változatra végeztük. Ebben a rendszerben háromféle szabályozási kört építenek be. Az egyik a turbina oldalon, a másik a hálózat oldali konverterben, a harmadik a rotor oldali konverterben található. Kutatásainkat erre a harmadik szabályozási körre koncentráltuk. Kimutattuk, hogy a d és q irányú rotor áram komponensekkel nem csak statikusan, de tranziens állapotban is egymástól függetlenül szabályozni lehet az állórész hatásos és meddő teljesítményét. Az erősen nemlineáris statikus szlip-nyomaték jelleggörbét a szlip tengely mentén csak a rotor feszültség q irányú komponensével lehet eltolni a szinkron fordulatszám alatti és feletti tartományban. Ezzel szemben a rotor feszültség d irányú komponense megváltoztathatja a szlip-nyomaték jelleggörbe meredekségének előjelét is nemcsak a nagyságát. Új tudományos eredményként levezettünk egy általános összefüggést, amely a d illetve q irányú feszültség komponensek függvényében megadja a szlip és a nyomaték közötti összefüggést. Javasoltunk egy újfajta szabályozási stratégiát, melyben a forgórész kör áramok mérése nélkül, csak az állórész feszültség és áram mérésével megvalósítható a meddő és hatásos teljesítményszabályozás. A szabályozási kört szimulációk segítségével dinamikus és statikus állapotokra is megvizsgáltuk, összehasonlítva egy másik, gyakran alkalmazott szabályozási elrendezéssel.

Kapcsolódó publikációk: J5, J7, P8, P12, P17, P19, P22, P27

Nagyfordulatszámú indukciós generátorok öngerjesztése

Az elmúlt évtizedben a hajtásszabályozásokban a nagyfordulatszámú villamos motorok előtérbe kerültek, számos új kihívást jelentve. E kutatási téma keretein belül nagyfordulatszámú indukciós gépes hajtások öngerjesztésével, és így a motorok sziget üzemmódban generátorként való alkalmazhatóságának vizsgálatával foglalkoztunk. Az indukciós gép mágnesező áramának biztosítása korábbi rendszerek esetében a gép állórészéhez kapcsolt ISZM DC/AC konverterekkel történt. Kutatásaink eredményeként újszerű, gazdaságos megoldások születtek, amelyekkel lehetővé vált a költséges konverterek kiváltása egy mágnesező áramot szolgáltató egység (Magnetizing Current Control - MCC) segítségével. Az MCC félvezetős kapcsolók, passzív elemek, kapacitások és induktivitások segítségével valósítja meg az indukciós gép öngerjesztését, azaz a mechanikai energia villamos energiává történő átalakítását. Ehhez a témához kapcsolódóan közlésre elfogadták a J6-os jelzéssel jelölt folyóiratcikket. A cikkben öt irodalomból ismert módszert bemutatása mellett, három újszerű, általunk kidolgozott öngerjesztési folyamatot szabályozó MCC egységet mutatunk be. Az elméleti megfontolásokat szimulációs és laboratóriumi mérésekkel támasztottuk alá. A különböző módszereket összehasonlítottuk működési, műszaki,

megbízhatósági, gazdasági szempontokból is. Az eredmények alapján a térvektor felhasználásán alapuló szabályozás segítségével kapcsolt kapacitások és/vagy induktivitásokból felépülő újfajta MCC topológiák alkalmazása komoly lehetőségeket jelenthetnek a megújuló energiaforrások felhasználása területén.

Kapcsolódó publikációk: J6, P11, P20

Mikrogridok szabályozási kérdései

A villamos energia termelésben két globális trend van: az elosztott villamos energia termelés és a megújuló energiák hasznosítása. A trendek megvalósításának egyik formáját képezik a mikrogridok, amelyek területén intenzív kutatás-fejlesztés folyik világszerte, alkalmazásuk gyors ütemben terjed. A mikrogrid szabályozásban a „voltage droop” és a „frequency droop” elvek alkalmazása mellett a közös buszhoz csatlakozó AC-AC és DC-AC konverterek hatásos és meddő teljesítményének független szabályozásra alkalmas új módszert írtunk le. Ehhez be kell vezetni egy virtuális feszültség térvektort és végre kell hajtani két koordináta rendszer transzformációt, amelynek során a konverterek váltakozó áramát és a busz feszültséget át kell transzformálni forgó koordináta rendszerbe, majd a hatásos és a meddő teljesítményeket külön-külön szabályozó csatornák kimenő jeleit vissza kell transzformálni álló koordináta rendszerbe. A témához kapcsolódóan a multi-ágens és holonikus rendszereket vizsgáltuk a mikrohálózatok szabályozásában.

A napjainkban oly jelentős megújuló energiák hálózatba integrálása kapcsán megjelenő DC mikrogridok feszültség szabályozásában is előkerülnek a nemlineáris folyamatok, így például a szuperkapacitások alkalmazása miatt. A témához kapcsolódóan kétféle szuperkapacitás modell hatását vizsgáltuk átmeneti folyamatokra szimulációk segítségével.

Kapcsolódó publikációk: P3, P23, P29, P30

Teljesítményelektronikai konverterek HIL alapú szimulációja

A szakaszonként lineáris nemlineáris kapcsolóüzemű konverterek kutatásához ad módszertani segítséget a teljesítményelektronikai konverterek FPGA alapú HIL (Hardware-In-the-Loop) szimulációja. Ennek kapcsán a nagyteljesítményű konverterek főáramkörét leíró, FPGA-ba tölthető VHDL vagy Verilog kódját közvetlenül Matlab/Simulink modellből generálhatjuk. A főáramköri modell fizikai interfészen (analóg és digitális csatornákon) keresztül könnyen összekapcsolható a vezérlőegységgel, ami így a szimulátort tényleges fizikai rendszernek érzékeli, és az irányító szoftver fejlesztése, tesztelése biztonságosan és gyorsan elvégezhető.

Kapcsolódó publikációk: P24, P25, P26

Multimédiás tananyag fejlesztése

„ Teaching Energy for Sustainable World” (SustEner) című európai uniós projekt keretében számos Európai Unió ország egyetemével kooperálva internet útján távolról működtetett laboratóriumi kísérletek és interaktív animációs multimédiás e-learning anyagok kifejlesztésében vettünk részt. Ez összesen 9 modul kifejlesztését jelentette. A projekt keretében két, az OTKA kutatáshoz kapcsolódó modult dolgoztunk ki. Ezek: Solar Powered Electric Vehicles” és „Luminous Efficacy of Modern Light Sources”.

Kapcsolódó publikációk: P9,P10, P14, P16