



PH.D. ÉRTEKEZÉS
(TÉZISFÜZET)

SZABÁLYOZOTT HÁROMFÁZISÚ KONVERTEREK NEMLINEÁRIS JELENSÉGEI

Sütő Zoltán

Témavezető: Prof. Em. Dr. Nagy István

Budapest, 2007

I. ELŐZMÉNYEK, MOTIVÁCIÓ

Az 1980-as évek végétől, 90-es évek elejétől a teljesítményelektronika előtérbe került a nemlineáris dinamikai jelenségek kutatásában. Napjainkban a teljesítményelektronikai konverterek valamilyen formában szinte mindenütt jelen vannak az életünkben. Ipari és lakókörnyezetben, az egyedi tervezésűtől a nagy sorozatban gyártottig, a gigawattos energetikai rendszerektől a hordozható rendszerek milliwattos akkumulátorkezelő áramköreiig egyaránt találhatunk alkalmazásokat. A teljesítményelektronika nemlineáris dinamika összefüggéseiben való vizsgálatát elsősorban ezen rendszerek nemlinearitásainak széles spektruma táplálja, mely új jelenségek, reguláris és kaotikus állapotok közötti bifurkációs átmenetek felfedezésével kecsegtet.

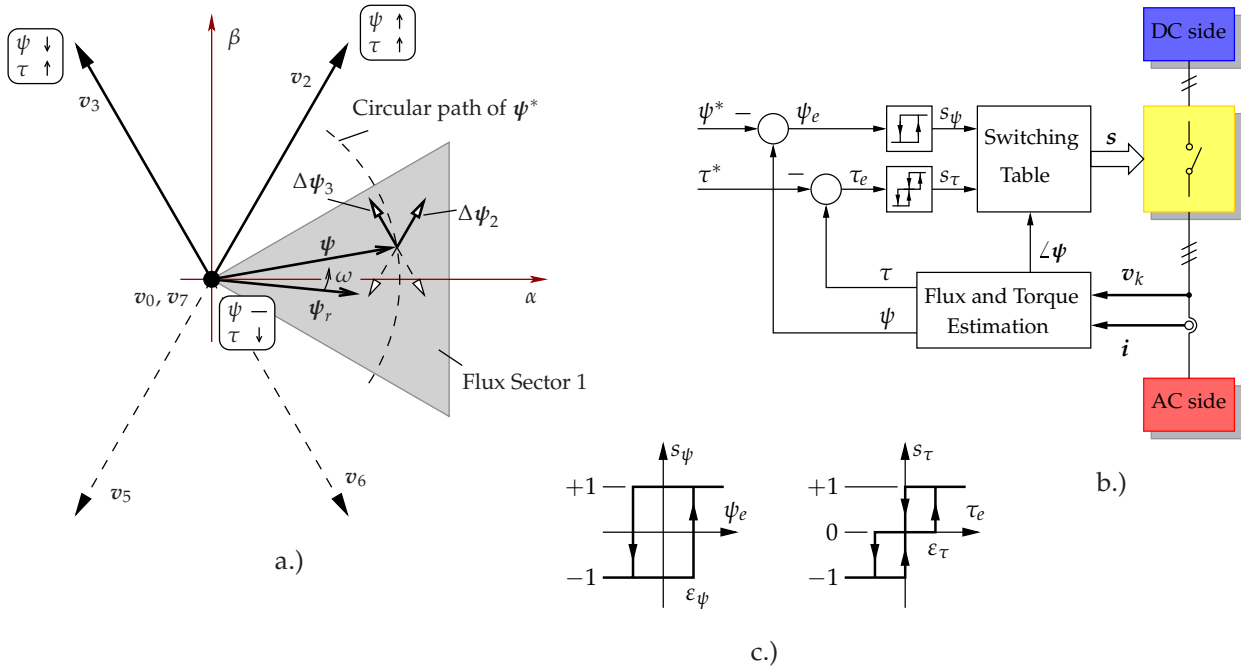
Korábban a tudományos közösség túlnyomórészt a különböző típusú DC–DC konverterek vizsgálatára összpontosított. Ezeknél a rendszereknél a szabályozástól és az áramköri sémáktól függően a *sima* rendszereknél már jól ismert és a konverterek *szakaszonként sima* jellegéből fakadó bifurkációk egyaránt kimutathatók. A DC–DC átalakítás vizsgálatának legfontosabb kutatási eredménye a *nem-sima* Poincaré leképezések analizálására valamint azok bifurkációs folyamatainak, a különféle határ-ütközési bifurkációknak a rendszerezésére vonatkozik.

A DC–DC konverterek nemlineáris vizsgálatának kezdetével szinte párhuzamosan, egy háromfázisú, kétszintű, teljes-híd feszültségforrás konverterről (VSC) táplált aszinkron motor újszerű adaptív hiszterézises áramszabályozásánál tapasztalt *különös* viselkedés keltette fel a fejlesztők érdeklődését, és egy új kutatási vonalat nyitott. Elég korai fázisban csatlakozhattam ehhez a munkához. A DC–DC konverterek ipari alkalmazása széleskörű, ez a tény továbbá az analitikus leírásuk viszonylagos egyszerűsége a fő okai a DC–DC konverterek kitüntetett szerepének a nemlineáris dinamika területén. Azonban az energiaátalakításnak egy másik, meglehetősen fontos, a háromfázisú konverterek által elvégzett szelete sokkal kisebb mértékben került terítékre ebből a szemszögből. Topológiai egyszerűségük ellenére a matematikai leírásukban rejlő komplexitás a kutatók figyelmét az egyszerűbb DC–DC valamint egyfázisú AC–DC ill. DC–AC átalakítás irányába terelte.

II. A VIZSGÁLT RENDSZEREK

A disszertáció a VSC három, térvektor alapú AC oldali szabályozási módszerének nemlineáris jellemzőit vizsgálja. A szabályozási stratégiától függően a VSC kétirányú energiaáramlást tesz lehetővé, akár AC–DC akár DC–AC konverterként működtethető. Az alkalmazások köre széles, számos példát lehet felhozni a változtatható fordulatszámú AC hajtásoktól az aktív szűrésig vagy a energiaminőség kondicionálásáig. A kutatás fő célkitűzése, hogy

- ráirányítsa a mérnökök figyelmét ezeknek a széleskörűen használt rendszereknek a lehetséges nem kívánt állapotaira,



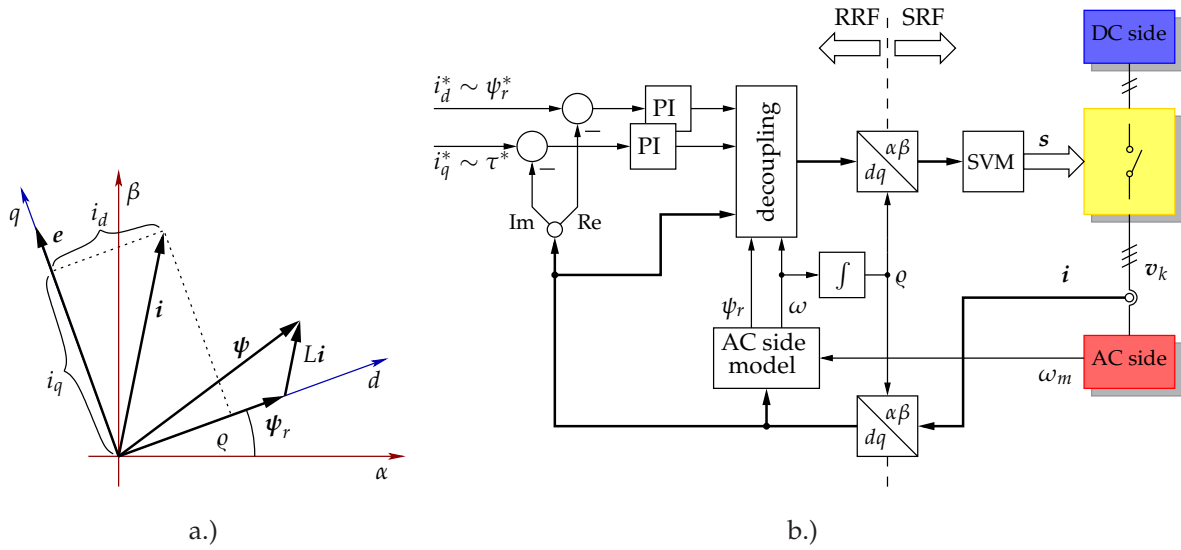
1. ábra. Közvetlen nyomatékszabályozás (DTC). (a) A feszültségvektorok kiválasztása a szabályozott változók növelésére/csökkentésére. (b) A DTC alapsémája. (c) A fluxus és a nyomatékhiba két és háromszintű hiszterézises komparátorai.

- kifejlessze az eszközöket a nemlineáris jelenségek leírására, a szabályozók tervezésére, valamint
- alátámassza a megfontolásokat numerikus és szimulációs eredményekkel.

A VSC főáramkörét egy DC feszültségforráshoz és soros $R-L$ áramkörökön keresztül egy AC szimmetrikus háromfázisú szinuszos feszültségforráshoz csatlakoztatott ideális kapcsoló mátrix modellezi. Az egyszerű AC oldali áramkör akár háromfázisú villamos hálózatot vagy különböző AC gépeket is modellezhet, széles paramétertartományok vizsgálatára alkalmazható. Jelen munka során egységesen minden szabályozott VSC rendszerre ennek a főáramköri modellnek a térvektoros alakját használtuk.

A legtöbb teljesítményelektronikai rendszer több, egymásba ágyazott szabályozási hurokkal van ellátva. A szabályozási cél elérése érdekében a legbelső hurok az elektronikus kapcsolók segítségével a konverter konfigurációkat váltogatja. A kívánt jelalakokat a kitöltési tényezőket, a konverter állapotok aktív és inaktív időtartamait változtatva állítjuk elő, így a szabályozás valamiképpen magába foglal egy impulzusszélesség modulációs (PWM) algoritmust.

Gyakorlatilag két fő modulációs sémát különböztethetünk meg, zárt- és nyílthurkút. Zártthurkú moduláció esetén a szabályozás és a kapcsolási minta előállítás egy egységbe integrálódik. Általában hiszterézis alapú szabályozók, vagy más lényegében nemlineáris szabályozók tartoznak ebbe a kategóriába. *A nemlineáris jelenségek forrása ezen rendszerek szabadon futó jellegrére vezethetők vissza, ahol az áramköri konfigurációk periodikus alkalmazása nem garantált.*



2. ábra. Az aszinkron gép mezőorientált szabályozása (FOC). (a) Térvektorok a gép ψ_r forgórész fluxusához rögzített forgó d - q koordináta rendszerben. (b) Az FOC blokkdiagramja.

Tipikusan a kapcsolási állapotok és a kapcsolások időpontjainak sorozata sem periodikus. A kapcsolási frekvencia változó. Egy általánosan használt zárthurkú modulációval rendelkező VSC rendszer az aszinkron gép közvetlen nyomatékszabályozása (DTC) (1. ábra).

A második esetben a szabályozási feladat és a kapcsolási minta előállítása különválik. A kapcsolási mintát valamely nyílthurkú, általában rögzített kapcsolási frekvenciával és a kapcsolási állapotok rögzített sorrendjével működtetett PWM algoritmus adja, de a kapcsolási időpillanatok egy modulációs perióduson belül az állapotváltozóktól függően változnak. A szabályozási feladatot további lineáris (leggyakrabban PI) szabályozók végzik el. Elegendően nagy kapcsolási frekvenciát feltételezve, a nyílthurkú modulációval felépített rendszerek átlagolt modellekkel vizsgálhatók. Ebben az esetben a nemlineáris jelenségek nem a kapcsoló működéssel hozhatók összefüggésbe hanem számos, a szabályozási hurokba ágyazott nemlineáris taggal, mint pl. a PWM blokk *túlmodulációjának* elkerülésére használt telítésekkel. Az aszinkron gépek mezőorientált szabályozása (FOC) konvencionálisan nyílthurkú PWM modulátort alkalmaz, melyet általában térvektor modulációval (SVM) implementálnak (2. ábra).

A vizsgálat tárgyát képező szabályozási módszerek a következők:

ASP-HCC. Először egy adaptív kapcsolási mintával (ASP) működtetett hiszterézises áramszabályozási (HCC) algoritmust vizsgáltunk *nyers-erő technikákat* alkalmazva, azaz, különböző kezdeti feltételekből kiindulva számítottunk rendszer trajektóriákat az állandósult állapotok állapotterbeli behatárolásához szükséges ideig. Az ASP-HCC algoritmus két koncentrikus hiszterézis kört alkalmaz a referencia áram térvektorának csúcspontja körül. A kettős hiszterézis határ alkalmazásának célja az olyan nem kívánt kapcsolási

folyamatok, mint a *kettős kommutáció* és a *sorozatos gyors kapcsolások* csökkentése.

DCC-SVM. Másodjára, egy konvencionális térvektor modulációval (SVM) ellátott speciális, komplex, diszkrét-idejű áramszabályozást (DCC) tárgyaltunk. A rendszer közelítő modelljét az *átlagoló módszert* alkalmazva kapjuk. Az SVM vezérli a VSC kapcsolási szekvenciáját és az időzítését. A természeténél fogva digitális jellegű moduláció miatt diszkrét-idejű szabályozó került alkalmazásra, mely biztosítja, hogy a háromfázisú AC áramok kövessék a szimmetrikus szinuszos referencia jeleket. A DCC egy speciális komplex együttműködésű PI szabályozót használ, és egy komplex telítéssel akadályozza meg az SVM túlmodulációját.

DTC-IM. Végül ismét egy hiszterézis alapú szabályozási módszert, az aszinkron gép (IM) klasszikus közvetlen nyomatékszabályozását (DTC) vizsgáltuk egy *szakaszonként értelmezett iterált leképezés* modell konstruálásával. Mivel a DTC erősen nemlineáris a hiszterézises komparátorok miatt, számos nemlineáris jelenség várható. Megjegyezzük, hogy a DTC lényegében az áramszabályozás egy közvetett módja, míg a másik két áram szabályozási módszer (ASP-HCC és DCC-SVM) forgó d - q koordináta rendszerben működik, ezek FOC változatoknak tekinthetők.

A szabályozási módszerek mindegyikét egyszeres hurokban tárgyaljuk, a külső hurkokat állandósult állapotúnak tekintjük.

III. ÚJ KUTATÁSI EREDMÉNYEK

1. Tézis (ASP-HCC). *A vektoros szemlélet felhasználásával fejlesztettem az újszerű ASP-HCC rendszert, egy numerikus számítási modellt dolgoztam ki annak vizsgálatához. Megmutattam, hogy az állapotváltozók a bemeneti változóktól, a paramétereiktől és a kezdeti feltételektől függően periodikus, szubharmonikus és kaotikus pályán is mozoghatnak. Numerikus bifurkációs analízis segítségével kimutattam három, a periodikus és kaotikus állapot közötti átmenetet: a periódus-kettőződés, az intermittencia és egy speciális, a Poincaré leképezés függvényének diszkontinuitása miatt fellépő periódus-összegződés jelenségét (lásd 4. fejezet).*

A kutatás fő célja volt, hogy a nemlineáris jelenségek, jellemzők feltárásával az algoritmus alkalmazását, tervezését és optimalizálását elősegítsük. Egy numerikus, nagy paramétertartomány vizsgálatára alkalmas számítási modellt dolgoztam ki. Az állapotegyenletek analitikus megoldását használtam a konverter két ugrásszerű struktúraváltása között. A struktúraváltások időpontjainak numerikus meghatározása után trajektóriákat, stroboszkopikus Poincaré metszeteket és bifurkációs diagramokat számítottam a modellel. A bifurkációs jelenségek jobb megértése érdekében az átlagolt legnagyobb Ljapunov exponenst is kiszámítottam két trajektória euklideszi távolságának változását alapul véve.

Megmutattam, hogy a rendszer állapotváltozói periodikus, szubharmonikus és kaotikus mozgásra is képesek. A period-1 állapot periódusának az AC oldali bemeneti feszültség periódusának hatodát vettem. A kaotikus állapotok két típusát tapasztaltam: (i) a trajektóriák a periodikus nyomvonal közelében mozognak, a kapcsolási állapotok periodikus mintához kötöttek, de a kapcsolási időpontok sorozata kaotikus; (ii) mind a kapcsolási minta mind a kapcsolási időpontok sorozata aperiodikusan változik. Fő szabályozási illetve bifurkációs paraméternek a koncentrikus hiszterézis körök sugarainak arányát használtam. Számos nemlineáris jelenséget észleltünk: a rendszer rendkívül összetett működést mutat, gyakoriak a hirtelen, ugrásszerű változások gyakran több stabil határhalmaz létezik azonos paraméterértékek mellett.

A következő káoszhoz vezető bifurkációs átmeneteket vizsgáltam: (i) a számos más kutatási területről ismert sorozatos periódus-kettőződés, (ii) az intermittenciát, és (iii) egy speciális periódus-összegződés jelenséget. Ellenőriztem a sorozatos periódus-kettőződés néhány jellegzetes sajátosságának, mint pl. a Feigenbaum állandó, önhasonlósági tulajdonság, sáv szétválási törvény érvényességét. A sorozatos periódus-kettőződés lokálisan, meglehetősen keskeny paramétertartományokban jelenik meg. A bifurkációs paramétert változtatva a rendszer általában intermittens módon hagyja el a tartományt, amikor is két nemstabil állapot váltakozik, pl. egy periodikus állapotot ciklikusan gyors kaotikus tranziensek szakítanak meg. A harmadik vizsgált bifurkációs folyamat során a rendszer egymást követő periódus-összegzödésekkel válik kaotikussá. A bifurkációs átmenet mentén zajló háttér folyamatok megértése érdekében egy 1-dimenziós (1D) szakaszonként lineáris nemfolytonos iterált leképezést konstruáltam (lásd még ezt a fajta iterált leképezést a 3. Tézisben). Az 1D iterált leképezés jól közelíti a rendszer viselkedését a kérdéses paramétertartományban.

2. Tézis (DCC-SVM). *Kidolgoztam egy közelítő és egy pontos diszkrét-idejű modellt az újszerű, komplex PI paramétereket alkalmazó DCC-SVM rendszer analitikus és numerikus vizsgálatához. A fő nemlinearitást a komplex telítéssel függvény adja, mely két nem kívánt fixpontot eredményez. A fixpontok és azok stabilitásának meghatározása után tervezési kritériumokat adtam meg a szabályozó paramétereire, hogy a nem kívánt fixpontokat elkerüljük. Meghatároztam a fixpontok vonzási medencéit. Analitikus és numerikus módszereket is felhasználva bifurkációs analízist végeztem: fixpontok nyereg-csomó, nyereg-nyereg bifurkációit, határciklusok nyereg-csomó bifurkációját, kaotikus attraktort valamint kaotikus tranziens határ krízissel együtt, továbbá nyeregpont homoklinikus bifurkációját mutattam be az 5. fejezetben.*

A fő cél a rendszer egy diszkrét-idejű modelljének a kialakítása volt, hogy egyrészt a nemlineáris jelenségek analitikus leírására hatékonyabb eszközöket kapjunk, másrészt megtervezzük a diszkrét-idejű PI szabályozót. A moduláció okozta gyors kapcsoló működés átlagolásával közelítjük a rendszert. A közelítő modell csak egy komplex telítődéssel nemlinearitást tartalmaz. A nemlineáris jelenségek tanulmányozásához, értelmezéséhez analitikus és numerikus

módszereket egyaránt felhasználtam. Számítottam a modell fixpontjait és a Jacobi mátrix alapján azok sajátértékeit, hogy: (i) további stabilitásvizsgálatot végezhesünk, (ii) meghatározzuk a fixpontok dinamikáját és (iii) megtervezzük a szabályozót. Bifurkációs diagramokat, állapot-térbeli ábrákat és Poincaré metszeteket rajzoltattam. Numerikus eredményekkel szolgáltunk az elméleti megfontolások igazolására, hogy betekintést nyújtsunk a különféle nemlineáris jelenségbe, bifurkációba és hogy megmutassuk a kívánt fixpont vonzási medencéjét.

Bifurkációs analízist végeztem a kívánt fixpont sajátértékeit, azaz közvetett módon a PI szabályozó komplex együtthatóit változtatva a stabil és a nemstabil tartományban egyaránt. Megmutattam, hogy a szabályozó paraméterek bizonyos tartományaiban, még ha a „lineáris” rendszert, a telítéses függvény nélkül, stabilnak is tervezzük, a telítést bekapcsolva különböző állandósult állapotok, fixpontok vagy határciklusok (kvázi-periodikus állapotok az álló koordináta rendszerben) alakulhatnak ki. A rendszer azon alapkövetelménynek, hogy közelítőleg szinuszos AC áramokat állítson elő, a három analitikusan kapott fixpont közül csak az egyiket elérve felel meg. Általában a referencia jelek nagy ugrására van szükség ahhoz, hogy a kívánt fixponthoz tartozó vonzási medence határát átlépjük. Az egymás mellett létező fixpontok és határciklusok extrém nagy áram amplitúdót hoznak létre, így ezek az állapot a gyakorlatban elkerülendők. Tervezési kritériumokat adtam meg a rendszer nem kívánt működésének elkerülésére. A nemkívánt fixpontok egyike az állapot térben mindig egy nyeregpont, míg a másik lehet csomópont, spirális csomópont vagy nyeregpont. Ez a pont pár a bifurkációs paraméter változtatásával egy nyereg-csomó vagy egy nyereg-nyereg bifurkációval jelenik meg ill. tűnik el a fixpontok létezési tartományának határán. Nyereg-csomó bifurkációkkal határciklusok is létrejöhetnek, ekkor egy stabil és egy nemstabil határciklus alakul ki. Homoklinikus bifurkációkat is észleltem. A nyeregpont stabil és nemstabil sokaságainak homoklinikus kapcsolódása után határciklus jelenik meg ill. tűnik el. Nemstabil feltételek mellett nemkívánt fixpont, kaotikus állapot és határciklus egyaránt kialakulhat, de az ebben a tartományban kapott eredményeknek főleg elvi sem mint gyakorlati a jelentősége. Bár a kaotikus állapotok a szinuszos referencia közelében maradnak, de a harmonikus torzítás nagy. Amikor a kaotikus attraktor a bifurkációs paramétert változtatva összeütközik egy nyeregponttal vagy egy nemstabil határciklussal, egy határkrízis során megszűnik, és egy kaotikus tranziens jön létre.

3. Tézis (DTC-IM). *Levezettem egy a DTC-IM rendszer gyors kapcsolási folyamatait figyelembe vevő, szakaszonként értelmezett, nem stroboszkópikus, diszkrét-idejű, Poincaré leképezést. Ehhez a két szabályozott változó, az állórész tekercsfluxus és a villamos nyomaték hiszterézis sávon belüli mozgását kellett meghatározni. A Ljapunov exponensek spektrumának meghatározásához kiszámítottam a leképezés függvényének Jacobi mátrixát. Periodikus, szubharmonikus, kaotikus és intermittens kaotikus állapotokat észleltem egy a Poincaré leképezés diszkontinuitásával magyarázható bifurkációs folyamat mentén. Egy 1-dimenziós, szakaszonként lineáris, nemfolytonos iterált leképezést konstruáltam, mely a fenti bi-*

furkációs folyamattal analóg tulajdonságokat mutat (lásd a 6. fejezetben és a 4.10 pontban).

A klasszikus DTC-IM rendszer változó struktúrájú folyamatainak leírására egy Poincaré leképezést dolgoztam ki. A fő cél kettős volt: (i) egyrészt a DTC-IM működésébe történő mélyebb betekintés révén a szabályozási paraméterek (hiszterézis sávok szélessége) tervezésének támogatása, (ii) másrészt a rendszer állapotaiban az erős nemlinearitások miatt várt hirtelen változásoknak ill. bifurkációknak a kimutatása és tanulmányozása.

A kidolgozott Poincaré leképezés a fluxus térvektor nagyságából és az elektromágneses nyomatéből vett mintákat számít, amikor a fluxus térvektorra merőleges fiktív feszültségvektor elér egy előre megszabott pozíciót a VSC két szomszédos aktív feszültségvektora által megszabott 60° -os szabályozási szektorban. A teljes leképezési függvényt a rendszer két egymást követő struktúraváltása között felírt kapcsolási leképezések kaszkádosításával kaptam. A kapcsolási leképezéseknél a struktúraváltások időpontjai implicit módon adóttak, azok számítása numerikusan történik egy intervallum felezéssel kombinált módosított Newton-Raphson gradiens módszerrel. A leképezéssel együtt annak Jacobi mátrixát is meghatároztam. A Jacobi mátrixból a Gram-Schmidt ortogonalizációs algoritmus alkalmazásával számítottam a Ljapunov exponensek spektrumát. A lehetséges állapotok és bifurkációs folyamatok feltárására bifurkációs diagramok, trajektóriák és frekvencia spektrumok számítása és rajzoltatása mellett egy kiválasztott állapotváltozó, a nyomatékhiba késleltetett Poincaré mintáiból rekonstruált állapotvektor alapján visszatérési diagramok is bemutatásra kerültek.

Periodikus, szubharmonikus, kaotikus és intermittens kaotikus állapotokat azonosítottam be. A tapasztalt nemlineáris jelenségek általában az összetett, nemfolytonos Poincaré leképezés miatt alakulnak ki, ahol a folytonos szakaszok leginkább lineárisak. A trajektóriák időnként a leképezési függvények kisebb szegmenseihez rögzülnek, ahol csak egy diszkontinuitás határozza meg a rendszer működését. Ilyen helyzetben analizáltam egy periodikus és kaotikus állapotok közötti bifurkációs átmenetet. A vizsgálatok egyszerűsítése érdekében egy 1-dimenziós (1D) szakaszonként lineáris leképezést konstruáltam. Az 1D leképezés a rendszerrel analóg módon viselkedik, lehetővé teszi néhány jelenség magyarázatát. Az iterált leképezés paramétereit változtatva az ASP-HCC rendszerrel megfigyelt speciális periódus-összegződés jelensége is magyarázható (lásd 1. Tézis és 4.10 pont). A bifurkációs paramétert, a DTC-IM referencia nyomatékát változtatva a period-1 pálya fixpontja a leképezési függvény stabil tartományán mozog, amíg össze nem ütközik a diszkontinuitással, azaz a leképezési függvény két lineáris szegmense közötti határral. Ennél a határ-ütközési bifurkációnál a fixpont eltűnik, és nagy rendszámú szubharmonikus állapot alakul ki, ami egymást követő periódus-összegzödések sorozata után válik kaotikussá. A kaotikus attraktor összeütközik a leképezési függvény egy nemstabil fixpontjával, és elveszti a stabilitását. Ezek után, egy új intermittens kaotikus attraktor jelenik meg, mely az állapottér egy szélesebb tartományán mozog.

IV. TOVÁBBI KUTATÁSI CÉLOK

Az eddigi munka főleg a szabályozott VSC rendszerek nemlineáris jelenségeinek feltárására összpontosított. A kutatás elsődleges célja volt a különös jelenségek megértése és magyarázata, a számos bifurkációs folyamat szisztematikus kezelése a nemlineáris dinamikai rendszerek elméletének segítségével. A három példa rendszer kiváló gyakorlattal szolgált némely összetett vizsgálati és modellezési technikának a teljesítményelektronikában való alkalmazásához.

A további kutatásnak a felhalmozott tapasztalatok sokkal gyakorlatibb kiaknázásának irányába kellene továbblépnie. A paraméterter részletes feltérképezése, ahol nem kívánt rendszer állapotok léphetnek fel gyakorlati szempontból is fontos, segíthet ezeknek az állapotoknak az elkerülésében. Ha ráadásul az elméleti vizsgálatokkal a jelenségekért felelős háttérfolyamatokat is megértjük, sokkal hatékonyabb szabályozási stratégiákat dolgozhatunk ki. A vizsgált rendszerek különös jelenségeket tártak elénk a nemlineáris dinamika majd minden területéhez kapcsolódóan, ez a fajta gazdagság további elméleti vizsgálatokat von maga után.

Új jelenségek, új bifurkációs folyamatok felfedezése reményében a vizsgált rendszerek egy nyilvánvaló bővítése lenne több energiatároló alkalmazása, a szabadsági fokok növelése. Ez akár a VSC DC és/vagy AC oldalán használt kifinomultabb modellekkel megvalósítható lenne. A vizsgálatok kiterjedhetnének az aszinkron gépek teljes modelljére vagy más AC gépekre pl. az állandó mágnesű szinkron gépre (PMSM). Egy további nyitott kérdés, mennyire érzékeny a rendszer viselkedése a motor paramétereinek, a belső feszültségnek a becslésére. Több működési tartományt mint például generátoros üzemmódot is összehasonlíthatnánk a nemlineáris dinamika fényében. További algoritmusok és más háromfázisú, több áramköri struktúrával rendelkező többszintű konvertereket is tesztelhetnénk. Például az ASP–HCC és a DCC–SVM rendszereknél, lévén az AC áram d – q koordináta rendszerbe transzformált, ez maga után vonja a lehetőséget a vizsgálatok kiterjesztésének a mezőorientált szabályozás alkalmazására. Természetesen a modellek fenti finomításai jobb képet adnának a fizikai rendszerekről, de ugyanakkor az elméleti vizsgálatokat nehezebbé tehetnék, így a valóságos és az absztraktabb modellek közötti körütekintő egyensúlyozás döntő fontosságú.

A hiszterézis alapú szabályozások, mint pl. az ASP–HCC és a DTC–IM rendszerek egy hátránya a változó kapcsolási frekvencia, valamint a trajektóriák többnyire aperiodikus mozgása. Mérnöki szempontból általában a periodikus állapotot részesítjük előnyben, mivel ekkor a rendszer viselkedése előre látható, a kapcsoló elemek igénybevétele számítható, optimalizálható. Láthattuk, hogy a rendszer állapota hiszterézises szabályozásnál is lehet periodikus. Ez reményt kelt és további kutatást ösztönöz olyan technikák fellelésére, melyek periodikus állapothoz szinkronizálják a rendszer trajektóriát. A periodikus állapotok mellett szubharmonikus állapotokat is detektáltunk. Ezek az állapotok problémát jelenthetnek, ha a szubharmonikus változók frekvenciája közel kerül akár a gép mechanikai rezonanciájához akár valamely

elektromos áramkör rezonanciájához.

A kaotikus állapotok alkalmazására is nyitható egy másik kutatási vonal. Néhány lépést tettünk már az ASP–HCC rendszernél észlelt különféle rendszer állapotoknak a kapcsolási számok és a harmonikus tartalom szempontjából történő összehasonlítására. Általában lényeges különbség van a közeli paraméter beállításoknál kialakuló különböző rendszer állapotok kapcsolási számai között, de akár periodikus akár kaotikus állapot is mutathat jobb tulajdonságokat ebből a szempontból. Továbbá, a kaotikus állapot, szélessávú, szétkenődő spektruma miatt nyújthat előnyöket az elektromágneses kompatibilitás (EMC) szempontjából. Néhány megfigyelésünk szerint a spektrum csúcsok csökkennek ugyan egy kaotikus trajektória esetén, de a teljes energiatartalom gyakorlatilag változatlan, a káosz csak átrendezi azt a spektrumon belül. További munkára van még szükség, hogy a fenti kérdésekre meggyőző válaszokat adjunk.

A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI

- [1] I. Nagy and Z. Sütő, „Nonlinear phenomena in the current control of induction motors,” in *Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Bifurcations, Chaos, Control and Applications* (S. Banerjee and G. C. Verghese, eds.), section 7.4, pp. 328–338, New York, USA: IEEE Press, 2001.
- [2] Z. Sütő and I. Nagy, „Study of chaotic and periodic behaviours of a hysteresis current controlled induction motor drive,” in *Applied Electromagnetics and Computational Technology II* (H. Tsuboi and I. Vajda, eds.), vol. 16 of *Studies of Applied Electromagnetics and Mechanics*, pp. 233–244, Amsterdam, The Netherlands: IOS Press, 2000.
- [3] Z. Sütő and I. Nagy, „Analysis of nonlinear phenomena and design aspects of three-phase space-vector-modulated converters,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications — Special Issue on Switching and Systems*, vol. 50, pp. 1064–1071, Aug. 2003. IF:0.642.
- [4] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear dynamics in current control converters,” *Electronics, International Journal of University of Banjaluka*, vol. 5, no. 1–2, pp. 45–49, 2001.
- [5] I. Nagy, P. Korondi, Z. Sütő, T. Ruzsányi, and J. Móricz, „Investigation on insulation breakdown of field winding in turbine-generator fed from static exciter,” *Electromotion*, vol. 8, no. 3, pp. 169–179, 2001.
- [6] Z. Sütő, I. Nagy, L. Backhausz, and K. Zabán, „Áramszabályozott aszinkronmotoros hajtás kaotikus viselkedése,” *Elektrotechnika — A Magyar Elektrotechnikai Egyesület lapja*, vol. 90, pp. 171–175, május 1997.
- [7] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear dynamics and three-phase voltage source converters: Review,” in *Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE2007)*, (The High Tatras, Slovakia), pp. 1–12, Sept. 24–26, 2007. CD Rom ISBN: 978-80-8073-868-6.

- [8] Z. Sütő, I. Nagy, and E. Masada, „Nonlinear dynamics in direct torque controlled induction machines analyzed by recurrence plots,” in *Proceedings of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2007)*, (Aalborg, Denmark), Sept. 2–5, 2007. CD Rom ISBN: 9789075815108.
- [9] Z. Sütő, I. Nagy, and E. Masada, „Four possible states of direct torque controlled induction machines,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2006)*, (Nagasaki, Japan), Nov. 20–23, 2006.
- [10] J. Hamar, I. Nagy, R. K. Jordan, and Z. Sütő, „Environmental-friendly electrical-energy by utilizing renewable and waste energy sources,” in *Renewable Energy Conference and Exhibition 2006*, (Makuhari Messe, Chiba, Japan), Oct. 9–13, 2006.
- [11] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinearity in controlled electric drives: Review,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2006)*, (Montréal, Canada), pp. 2069–2076, July 9–13, 2006. CD Rom ISBN: 1-4244-0497-5.
- [12] Z. Sütő and I. Nagy, „Recurrence plot based study of direct torque controlled induction machines,” in *Proceedings of the 1th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (CHAOS'06)*, (Reims, France), pp. 121–126, June 28–30, 2006.
- [13] J. Hamar, Z. Sütő, and I. Nagy, „Signal processing by multimedia in nonlinear dynamics and power electronics: Review,” in *Proceedings of the 13th World Enformatika Conference (WEC2006) — Transactions on Engineering, Computing and Technology*, vol. 13, (Budapest, Hungary), pp. 34–44, May 26–28, 2006. CD Rom ISBN: 975-00803-2-7, ISSN 1305-5313.
- [14] Z. Sütő and I. Nagy, „Bifurcation phenomena of direct torque controlled induction machines due to discontinuities in the operation,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2005)*, (Hong Kong), Dec. 14–17, 2005. CD Rom ISBN:0-7803-9484-4.
- [15] P. Bartal, P. Bauer, J. Hamar, R. K. Járdán, P. Korondi, I. Nagy, Z. Sütő, K. Zabán, H. Funato, and S. Ogasawara, „Multimedia course for power electronics, nonlinear dynamics and motion control,” in *Proceedings of the 2005 IEEE Power Electronics Education Workshop (PEEW2005)*, (Recife, Brasil), June 16–17, 2005. CD Rom ISBN: 0-7803-9002-4.
- [16] J. Hamar, R. K. Járdán, P. Korondi, I. Nagy, Zs. Sepa, Z. Sütő, K. Zabán, and H. Weiss, „Teaching and learning nonlinear dynamics by multimedia,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS'05)*, (Hamamet, Tunisia), Apr. 17–20, 2005. CD Rom ISBN: 2-921145-51-0.
- [17] P. Bartal, J. Hamar, R. K. Járdán, P. Korondi, I. Nagy, Z. Sütő, K. Zabán, H. Funato, E. Masada, and S. Ogasawara, „Interactive e-learning multimedia software for teaching nonlinear dynamics, control in power electronics and motion control,” in *Proceedings of the 2005 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005)*, (Toki Messe, Niigata, Japan), pp. 757–764, Apr. 4–8, 2005. CD Rom ISBN: 4-88686-065-6.

- [18] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear analysis of direct torque controlled induction machines,” in *Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'04)*, (Aachen, Germany), pp. 1348–1354, June 20–25, 2004. CD Rom ISBN: 07803-8400-8.
- [19] M. Bajnok, B. Buti, Z. Sütő, and I. Nagy, „Surprises stemming from using linear models for nonlinear systems: Review,” in *Proceedings of the 29th Annual Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'03)*, vol. I, (Roanoke, Virginia, USA), pp. 961–971, Nov. 2–6, 2003. CD Rom ISBN:0-7803-7907-1.
- [20] Z. Sütő and I. Nagy, „Study of nonlinear dynamics of current controlled converter embedded in a general approach of variable structure systems,” in *Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2003)*, (Toulouse, France), Sept. 2–4, 2003. CD Rom ISBN:90-75815-07-7.
- [21] Z. Sütő and I. Nagy, „Design conditions for space vector modulated three-phase converter to avoid instability,” in *Proceedings of the IEEE International Conference PowerTech2003*, (Bologna, Italy), June 23–26, 2003. CD Rom ISBN:0-7803-7968-3.
- [22] Z. Sütő and I. Nagy, „Saddle-nodes and coexisting attractors in three-phase space vector modulated converters,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2002)*, vol. II, (Bangkok, Thailand), pp. 1061–1066, Dec. 11–14, 2002.
- [23] Z. Sütő and I. Nagy, „Bifurcation phenomena in three-phase space vector modulated converters,” in *Proceedings of the International Conference EPE-PEMC2002*, (Cavtat-Dubrovnik, Croatia), Sept. 9–11, 2002. CD Rom ISBN: 953-184-047-4.
- [24] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear phenomena in three-phase hysteresis controlled converters,” in *Proceedings of the 11th International Symposium on Power Electronics (Ee2001)*, (Novi Sad, Yugoslavia), pp. 116–120, Oct. 31–Nov. 2, 2001.
- [25] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear dynamics in two and in four energy storage hysteresis controlled converter systems,” in *Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE2001)*, (The High Tatras, Slovakia), pp. 108–113, Oct. 3–5, 2001.
- [26] Z. Sütő and I. Nagy, „Periodic and chaotic responses of a controlled rectifier for telecommunication applications,” in *Proceedings of the 3rd International Telecommunications Energy Special Conference (TELESCON2000)*, (Dresden, Germany), pp. 173–176, May 7–10, 2000.
- [27] Z. Sütő, I. Nagy, and E. Masada, „Period adding route to chaos in a hysteresis current controlled AC drive,” in *Proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2000)*, (Nagoya, Japan), pp. 299–304, Mar. 30–Apr. 1, 2000.
- [28] Z. Sütő and I. Nagy, „Coexisting system states in a nonlinear current controlled ac drive,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE'99)*, (The High Tatras, Slovakia), pp. 94–99, Oct. 5–7, 1999.

- [29] Z. Sütő and I. Nagy, „Bifurcation due to discontinuity of return map in hysteresis current control of induction motor,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS'99)*, vol. III, (Lisboa, Portugal), pp. 275–280, Sept. 14–16, 1999.
- [30] I. Nagy, P. Korondi, Z. Sütő, T. Ruzsányi, and J. Mórica, „Insulation breakdown of field winding in turbine-generator fed from static exciter,” in *Proceedings of the IEEE International Conference Power-Tech'99*, (Budapest, Hungary), pp. 240–245, Aug. 29–Sept. 2, 1999.
- [31] Z. Sütő and I. Nagy, „Study of chaotic and periodic behaviours of a hysteresis current controlled induction motor drive,” in *Proceedings of the 5th Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology*, (Budapest, Hungary), pp. 155–158, Sept. 24–26, 1998.
- [32] I. Nagy, P. Korondi, Z. Sütő, T. Ruzsányi, and J. Mórica, „Voltage stress of the rotor winding in turbine-generator furnished by thyristor exciter,” in *CIGRÉ Session Papers, Group 11: Rotating Machines*, (Paris, France), pp. 1–6, Sept. 1998. 11-205.
- [33] Z. Sütő and I. Nagy, „Nonlinear phenomena in hysteresis current controlled three-phase converters,” in *Proceedings of the 6th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES'98)*, (Budapest, Hungary), pp. 299–302, July 16–18, 1998.
- [34] Z. Sütő, I. Nagy, and K. Zabán, „Nonlinear current control of three phase converter,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'98)*, vol. 2, (Pretoria, South Africa), pp. 353–358, July 7–10, 1998.
- [35] I. Nagy and Z. Sütő, „Electronic motion control — Chaos theory,” in *Proceedings of First Conference on Mechanical Engineering (GÉPÉSZET'98)*, vol. 1, (Budapest, Hungary), pp. 184–188, May 28–29, 1998.
- [36] Z. Sütő, I. Nagy, and E. Masada, „Avoiding chaotic processes in current control of AC drive,” in *Proceedings of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'98)*, vol. 1, (Fukuoka, Japan), pp. 255–261, May 17–22, 1998.
- [37] I. Nagy, P. Korondi, E. Masada, Z. Puklus, and Z. Sütő, „Resonant converter as current generator,” in *Proceedings of the 23th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'97)*, vol. 2, (New Orleans, United States), pp. 471–476, Nov. 10–14, 1997.
- [38] Z. Sütő, I. Nagy, and Z. Jákó, „Periodic responses of a nonlinear current controlled IM drive,” in *Proceedings of the 7th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'97)*, vol. 3, (Trondheim, Norway), pp. 3.847–3.852, Sept. 8–10, 1997.
- [39] I. Nagy, P. Korondi, Z. Puklus, and Z. Sütő, „Asymmetrical operation of a new resonant DC-DC converter family,” in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION'97)*, (Cluj-Napoca, Romania), pp. 54–59, May 8–9, 1997.

- [40] Z. Sütő, I. Nagy, L. Backhausz, and K. Zabán, „Controlling chaos in current forced induction motor,” in *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC'96)*, vol. 3, (Budapest, Hungary), pp. 282–286, Sept. 2–4, 1996.
- [41] P. Baranyi, P. Korondi, H. Hashimoto, and Z. Sütő, „Learning fuzzy controller based on linguistic model inversion,” in *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC'96)*, vol. 3, (Budapest, Hungary), pp. 467–471, Sept. 2–4, 1996.
- [42] P. Korondi, H. Hashimoto, T. Gajdár, and Z. Sütő, „Optimal sliding mode design for motion control,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'96)*, vol. 1, (Warsaw, Poland), pp. 277–282, June 17–20, 1996.
- [43] I. Nagy and Z. Sütő, „Repetitive and chaotic processes in current controlled induction motor,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'96)*, vol. 2, (Warsaw, Poland), pp. 946–951, June 17–20, 1996.
- [44] P. Baranyi, P. Korondi, H. Hashimoto, and Z. Sütő, „Automatic fuzzy set generation for discrete-time fuzzy controller,” in *Proceedings of the 5th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD'96)*, (Budapest, Hungary), pp. 539–542, June 10–13, 1996.
- [45] I. Nagy, Z. Sütő, and L. Backhausz, „Periodic states of hysteresis current control of I.M.,” in *Proceedings of the 29th International Power Conversion and Intelligent Motion Conference (PCIM'96)*, (Nürnberg, Germany), pp. 605–619, May 21–23, 1996.
- [46] I. Nagy, H. T. Duong, Z. Sütő, and L. Backhausz, „Advanced current controllers of bi-directional converters with nearly sinusoidal input current and with minimized switching frequency,” in *Proceedings of International Conference (INTELEC'95)*, (Amsterdam, The Netherlands), pp. 223–228, Oct. 29–Nov. 1, 1995.
- [47] I. Nagy, Z. Sütő, L. Matakas Jr., and E. Masada, „Features of adaptive PWM explored by the theory of chaos,” in *Proceedings of the 6th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'95)*, vol. 1, (Sevilla, Spain), pp. 1.013–1.018, Sept. 19–21, 1995.
- [48] S. Halász, Z. Sütő, and H. T. Duong, „Sinusoidal PWM techniques with additional zero-sequence harmonics,” in *Proceedings of International Conference on Problems of Automation*, (Kharkov, Ukraine), pp. 118–121, Oct. 4–9, 1994. Published in russian.