



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Villamos Energetika Tanszék

Vajsz Tibor

**ÁLLANDÓMÁGNESES FORGÓRÉSZŰ  
SZINKRON MOTOROS SZERVO- ÉS  
ROBOTHAJTÁSOK TÉRVEKTOR-  
MODULÁCIÓVAL MEGVALÓSÍTOTT  
KÖZVETLEN  
NYOMATÉKSZABÁLYOZÁSÁNAK  
VIZSGÁLATA ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSE**

Tézisfüzet

Témavezető:

Dr. Számel László

Budapest, 2019

# 1. Bevezetés

Manapság, a szervo- és robothajtások területén az egyik leggyakrabban alkalmazott motortípus az állandómágneses forgórészű szinuszmezős szinkron motor. Ennek oka, hogy ezeknek a motoroknak kiemelkedő a teljesítménysűrűsége, illetve konstrukciójukból adódóan kiválóan alkalmasak magas minőségi követelményeket támaztó szabályozott mozgások precíziós megvalósítására.

Az állandómágneses forgórészű szinuszmezős szinkron motorok esetében jelenleg az egyik legígéretesebbnek tűnő nyomatékszabályozási módszer az úgynevezett közvetlen nyomatékszabályozás térvektor-modulációval (angolul röviden: DTC-SVM).

A disszertációm keretében egy eddig még nem vizsgált problémakört tárgyalok, nevezetesen a DTC-SVM túlterheléses állapotbeli viselkedését. Kutatásaim során bebizonyítottam, hogy:

1. a DTC-SVM alacsony maximális terhelhetőséggel rendelkezik,
2. a DTC-SVM túlterheléses állapotban instabilitásra hajlamos,
3. egy DTC-SVM-et használó állandómágneses forgórészű szinkron motoros hajtás maximális terhelhetősége nagymértékben függ a motor fordulatszámától.

Ezen problémák okaira sikerült fényt derítenem.

Az eredeti DTC-SVM módszer túlterheléses állapotbeli problémáinak megoldása céljából újfajta DTC-SVM módszereket dolgoztam ki, amelyek:

1. maximális terhelhetőség tekintetében nagymértékben meghaladják az eredeti DTC-SVM módszert,
2. túlterheléses állapotban stabilak,
3. az eredeti DTC-SVM-mel gyakorlatilag megegyező dinamikával szabályozzák a motor elektromágneses nyomatékát,
4. nyomatéklüktetés tekintetében is lényegében ekvivalensnek tekinthetők az eredeti DTC-SVM módszerrel.

Az új módszereket Matlab-Simulink környezetben végzett szimulációs vizsgálatok segítségével validáltam. A szimulációs vizsgálatok a motor Park-vektoros egyenletein, illetve a hajtást leíró differenciálegyenleteken alapultak.

Az új módszereknek köszönhetően nagymértékben megnőtt a hajtásrendszer maximális terhelhetősége, ami jelentős költségcsökkentést, illetve jóval helytakarékosabb mechanikai kialakítást tesz lehetővé. Ezen felül, a nagyobb terhelhetőség miatt nagymértékben megnőtt a szervó-rendszerben rendelkezésre álló maximális dinamikai nyomaték, ami jóval gyorsabb működést, többek között jóval gyorsabb pozicionálást eredményez.

A disszertáció célja az előbbieken említett kutatási eredményeim bemutatása és összefoglalása, illetve az új eredmények gyakorlati alkalmazási lehetőségeinek megjelölése. Az eddigieknek megfelelően a disszertáció felépítése a következő.

1. Az állandómágneses forgórészű szinkron motoros hajtások és a DTC rövid bemutatása.
2. A DTC-SVM bemutatása, illetve az azzal kapcsolatos szakirodalom áttekintése.
3. A DTC-SVM-mel kapcsolatos saját kutatási eredményeim bemutatása, az eddig még nem tárgyalt problémakör, azaz a DTC-SVM túlterheléses állapotbeli viselkedésének ismertetése és elemzése.
4. Az általam kifejlesztett újfajta DTC-SVM módszerek ismertetése és elemzése.
5. Az általam elért új tudományos eredmények összefoglalása, az általam kifejlesztett újfajta DTC-SVM módszerek gyakorlati alkalmazási lehetőségeinek megjelölése, illetve a további kutatási és fejlesztési lehetőségek számbavétele.

## **2. Új tudományos eredmények**

### **1. tézis**

Bebizonyítottam, hogy az eredeti DTC-SVM módszer nagymértékű terhelések mellett súlyos stabilitási problémákkal küzd. Vizsgálataim eredményeként kiderült, hogy az eredeti DTC-SVM módszer maximális terhelhetősége nagymértékben függ a fordulatszámától. Bebizonyítottam, hogy az eredeti DTC-SVM esetében az alacsony maximális terhelhetőség és az instabilitás okaként a terhelési szög szabályozó számára nem megfelelően előállított referenciajel, illetve az állórész-fluxusamplitúdó szabályozó hiánya jelölhető meg.

A DTC-SVM terhelhetőségi problémáinak megoldása érdekében egy olyan új DTC-SVM módszert fejlesztettem ki, amelyik az eredeti módszert lényegesen felülmúló maximális terhelhetőséggel rendelkezik, és ráadásul a maximális terhelhetősége gyakorlatilag független a fordulatszámától. Az új módszer a Módosított DTC-SVM (angolul: „Modified DTC-SVM”, röviden: MDTC-SVM) nevet kapta.

Az MDTC-SVM a maximális terhelhetőségét jelentős mértékben meghaladó terhelések mellett is stabil marad. Mindezekon felül, az MDTC-SVM megőrizte az eredeti DTC-SVM kitűnő nyomatékszabályozási dinamikáját és nyomatéklüktetés tekintetében is gyakorlatilag ekvivalensnek tekinthető vele.

A tézisponthoz kapcsolt publikációim: [F1], [K1], [K3]

### **2. tézis**

Az általam kidolgozott MDTC-SVM módszer továbbfejlesztéseként egy olyan új módszert dolgoztam ki, amely maximális terhelhetőség tekintetében messzemenőkéig felülmúlja mind az MDTC-SVM-et, mind az eredeti DTC-SVM-et. Ezt egy újfajta állórész-fluxusamplitúdó referencia szabályozóval, újfajta referenciajel-képzéssel, az állórész-fluxusamplitúdó szabályozó és a terhelési szög szabályozó továbbfejlesztésével, illetve a feszültségvektor kalkulátor adaptív tételének segítségével értem el. Az új módszer a Továbbfejlesztett Módosított DTC-SVM (angolul: „Improved Modified DTC-SVM”, röviden: IMDTC-SVM) nevet kapta.

Az IMDTC-SVM a maximális terhelhetőségét jelentős mértékben meghaladó terhelések mellett is stabil marad. Mindezekon felül, az IMDTC-SVM megőrizte az eredeti DTC-SVM és az MDTC-SVM kitűnő nyomatékszabályozási dinamikáját és nyomatéklüktetés tekintetében is gyakorlatilag ekvivalensnek tekinthető az előbbi két módszerrel.

A tézisponthoz kapcsolt publikációim: [F3], [K1], [K2]

### **3. tézis**

Az általam kifejlesztett IMDTC-SVM módszer számítási igényének csökkentése, struktúrájának egyszerűsítése, illetve a szabályozók beállításának könnyítése érdekében a módszer két egyszerűsített változatát dolgoztam ki. Ezek a Továbbfejlesztett Módosított DTC-SVM Egyszerűsített Változat XY (angolul: „Improved Modified DTC-SVM Simplified Form XY”, röviden: IMDTC-SVM SFXY), illetve a Továbbfejlesztett Módosított DTC-SVM Egyszerűsített Változat DQ (angolul: „Improved Modified DTC-SVM Simplified Form DQ”, röviden: IMDTC-SVM SFDQ) nevet kapták.

Ugyan az egyszerűsített változatok az eredeti IMDTC-SVM-nél valamivel kisebb maximális terhelhetőséggel rendelkeznek, de még így is nagymértékben felülmúlják az MDTC-SVM-et, illetve az eredeti DTC-SVM-et. Az egyszerűsített változatok számottevően kevesebb számítást igényelnek, mint az eredeti IMDTC-SVM, mindamelllett, hogy felépítés tekintetében is egyszerűbbek, áttekinthetőbbek. A szabályozók beállítása csak az IMDTC-SVM SFXY esetében lényegesen egyszerűbb, mint az eredeti IMDTC-SVM esetében, mivel a behangolandó paraméterek száma is kevesebb.

Az egyszerűsített változatok a maximális terhelhetőségüket jelentős mértékben meghaladó terhelések mellett is stabilak maradnak. Mindezekon felül, az egyszerűsített változatok megőrizték az eredeti DTC-SVM, az MDTC-SVM és az eredeti IMDTC-SVM kitűnő nyomatékszabályozási dinamikáját és nyomatéklüktetés tekintetében is gyakorlatilag ekvivalensnek tekinthetőek az előbbi módszerekkel.

Végezetül, megadtam az új módszerek más motortípusokra történő általánosítási lehetőségeivel kapcsolatban néhány fontosabb szempontot.

A tézisponthoz kapcsolt publikációim: [F2], [F4], [F5], [F6], [K2]

### **3. Az új eredmények gyakorlati alkalmazási lehetőségei**

A tézisekben megfogalmazott módszerek hatékonyan alkalmazhatóak a szervó- és robothajtások dinamikájának növelésére. A nagyobb dinamikai nyomaték következtében a hajtás jóval gyorsabban lesz képes elérni a fordulatszám-referenciajel által előírt értéket, illetve a terhelésugrások kiszabályozása is sokkal gyorsabb lesz. Mindezekon felül, a hajtás maximális terhelhetősége is nagymértékben megnő.

Azokban a hajtásrendszerekben, amelyek esetében a legnagyobb terhelhetőség és/vagy a legnagyobb dinamika a cél, az IMDTC-SVM módszer használata javasolt.

Azokban az alkalmazásokban, amelyek esetében a kisebb számítási szükséglet, illetve az egyszerűbb és áttekinthetőbb irányítási struktúra is lényeges szempontok, az IMDTC-SVM SFXV, az IMDTC-SVM SFDQ és az MDTC-SVM módszerek közül érdemes az egyiket kiválasztani annak függvényében, hogy a felhasználó mekkora kompromisszumot hajlandó kötni dinamika/terhelhetőség tekintetében.

Az MDTC-SVM hasonlít a legjobban az eredeti DTC-SVM-re, így „konzervatív” felhasználók esetében – amennyiben ez a módszer terhelhetőség és dinamika tekintetében megfelelő – az MDTC-SVM alkalmazása javasolt. Ha nagyobb dinamikára és/vagy terhelhetőségre van szükség, akkor az IMDTC-SVM SFXV és az IMDTC-SVM SFDQ módszerek közül a felhasználó igényeinek legmegfelelőbbet célszerű kiválasztani. Az IMDTC-SVM SFDQ esetében a maximális terhelhetőség valamivel nagyobb, míg az IMDTC-SVM SFXV esetében a szabályozók beállítása lényegesen egyszerűbb.

## 4. A szerző publikációi

Lektorált, idegen nyelvű folyóiratcikkek:

[F1]: Tibor Vajsz, László Számel, György Rácz: A Novel Modified DTC-SVM Method with Better Overload-capability for Permanent Magnet Synchronous Motor Servo Drives, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 61, No. 3, pp. 253-263, 2017, doi: 10.3311/PPee.10428

[F2]: László Számel, Tibor Vajsz: The special characteristics of stepping motor drives and a new type of classification, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 13, No. 7, pp. 83-102, 2016, doi: 10.12700/APH.13.7.2016.7.5

Impakt faktor a megjelenés évében: 0.745

[F3]: Tibor Vajsz, László Számel: Improved Modified DTC-SVM Methods for Increasing the Overload-capability of Permanent Magnet Synchronous Motor Servo- and Robot Drives – Part 1, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 62, No. 3, pp. 65-73, 2018, doi: 10.3311/PPee.11744

[F4]: Tibor Vajsz, László Számel: Improved Modified DTC-SVM Methods for Increasing the Overload-capability of Permanent Magnet Synchronous Motor Servo- and Robot Drives – Part 2, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 62, No. 3, pp. 74-81, 2018, doi: 10.3311/PPee.11762

[F5]: Tibor Vajsz, László Számel, Árpád Handler: An Investigation of Direct Torque Control and Hysteresis Current Vector Control for Motion Control Synchronous Reluctance Motor Applications, *Power Electronics and Drives*, pp. 1-12, megjelentetésre elfogadva

[F6]: Tibor Vajsz, László Számel, Árpád Handler: Analysis of Direct Torque Control with Space Vector Modulation for Synchronous Reluctance Motor Motion Control Applications and a Comparison with Other Torque-Control Algorithms, *Power Electronics and Drives*, pp. 1-11, megjelentetésre elfogadva

Konferenciatickek:

[K1]: Tibor Vajsz, László Számel: Overload-capability analysis of PMSM servo- and robot-drives using DTC-SVM methods: Part 1, 2018 IEEE 18th International Power

- Electronics and Motion Control Conference (PEMC), pp. 730-736, doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521929
- [K2]: Tibor Vajsz, László Számel: Overload-capability analysis of PMSM servo- and robot-drives using DTC-SVM methods: Part 2, 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), pp. 737-743, doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521944
- [K3]: Vajsz Tibor, Számel László: Állandómágneses forgórészű szinkron motorok közvetlen nyomatékszabályozása, V. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2015, pp. 1-5, ISBN: 978-963-9299-27-6
- [K4]: Tibor Vajsz, László Számel: Nonlinear variable gain position control for permanent magnet synchronous motor servo- and robot drives, Proceedings of the Workshop on the Advances of Information Technology: WAIT 2017, pp. 111-115, ISBN: 978-963-313-242-5
- [K5]: Tibor Vajsz, László Számel: An investigation of robust speed-controllers for permanent magnet synchronous motor servo drives, Proceedings of the Automation and Applied Computer Science Workshop 2015: AACS'15, pp. 117-128, ISBN: 978-963-313-187-9
- [K6]: Tibor Vajsz, László Számel: Robust speed-control for permanent magnet synchronous motor servo drives, Proceedings of the Workshop on the Advances of Information Technology: WAIT 2015, pp. 78-82, ISBN: 978-963-313-178-7
- [K7]: Tibor Vajsz, László Számel: Controlling of switched reluctance motor drives, XXXI. Kandó Conference 2015, pp. 1-19, ISBN: 978-963-7153-06-3
- [K8]: Tibor Vajsz, László Számel, György Rácz: Simulation, analysis and comparison of field-oriented control and direct torque control, XXX. Kandó Conference 2014, pp. 1-17, ISBN: 978-615-5460-24-1
- [K9]: Vajsz Tibor, Dr. Számel László, Rácz György: A közvetlen nyomatékszabályozás elve, megvalósítása, és főbb tulajdonságai aszinkron motoros hajtások esetében, ENELKO 2014 XV. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, pp. 119-124, ISSN: 1842-4546



Magyar nyelvű folyóiratcikkek:

[FM1]: Vajsz Tibor, Számel László: Szinkron reluktancia motoros hajtások: 1. rész, Elektronet, 2017/1, pp. 30-31, ISSN: 1219-705 X (nyomtatott), 1588-0338 (online)

[FM2]: Vajsz Tibor, Számel László: Szinkron reluktancia motoros hajtások: 2. rész, Elektronet, 2017/2, pp. 36-37, ISSN: 1219-705 X (nyomtatott), 1588-0338 (online)