

## EGYENÁRAMÚ HÁLÓZATRA KAPCSOLT VEKTORIÁLISAN SZABÁLYOZOTT SZINKRONGENERÁTOR SZIMULÁCIÓJA

### SIMULATION OF THE VECTOR CONTROLLED SYNCHRONOUS GENERATOR SUPPLYING A DC LINE

Imecs Mária<sup>1</sup>, Szabó Csaba<sup>2</sup>, Incze János Jób<sup>3</sup>, Szőke (sz. Benk) Enikő<sup>4</sup>

Technical University of Cluj-Napoca, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Machines and Drives, Cím: RO-400114, Romania, Cluj-Napoca, Str. Memorandumului Nr. 28; Phone: +40(0)264401242, Fax: +40(0)264592055.

<sup>1</sup> maria.imecs@emd.utcluj.ro, <sup>2</sup> csaba.szabo@emd.utcluj.ro,

<sup>3</sup> ioan.incze@emd.utcluj.ro, <sup>4</sup> eniko.szoke@emd.utcluj.ro

#### Abstract

The paper presents the field-orientation principle based vector controlled wound-excited synchronous generator running autonomously and feeding a local DC line, which is connected to the national 3-phase AC grid. The connection between the two systems is realized by a switch mode power electronic converter operating at unity power factor and sine-wave currents allowing two direction energy flow. The loading of the DC line is made by some vector controlled AC drives. The synchronous generator was simulated with a motor type mathematical model, deduced from the so called Park's general equations. The power electronic converters are modeled similar to the quadripole theory in two variants: the direct model is suitable for PWM-controlled converters, and the reverse one is applied to square-wave converters. The simulation of the whole system was made in MATLAB-Simulink<sup>®</sup> dynamic simulation environment, which is suitable for future practical implementation on an experimental rig controlled by a dSPACE<sup>®</sup> DS1104 Controller Board.

**Keywords:** *Stator-field-orientation, Wound-excited synchronous machine, Power electronic converter, PWM control, Park-transformation*

#### Összefoglalás

A dolgozat az egyenárammal gerjesztett szinkrongenerátorok mezőorientációs elven alapuló vektoriális szabályozását mutatja be, autonóm üzemmódban, mely egy olyan helyi egyenáramú hálózatot táplál, ami egy kétirányú kényszerkommutációs áramirányítón keresztül rá van kapcsolva az országos háromfázisú hálózatra. A két hálózat összekapcsoló áramirányító maximális teljesítménytényezőt és szinuszos áramot biztosít. Az egyenáramú hálózat vektoriálisan szabályozott váltakozó áramú hajtásokkal van terhelve. A szinkrongenerátort motormodellel szimuláltuk, melyet az úgynevezett általános Park-egyenletekből származtattunk. A teljesítményelektronikai áramirányítókat két változatban modelleztük. Az úgynevezett direkt modell megfelel az impulzusszélesség-modulációval vezérelt konvertereknek, míg az inverz modell a négyszöghullámmal működő áramirányítóknak. A teljes rendszert a MATLAB-Simulink<sup>®</sup> dinamikus szimulációs környezetben vizsgáltuk, mely lehetőséget biztosít a jövőbeli gyakorlati implementációra a dSPACE<sup>®</sup> cég DS1104-es vezérlőkártyájára alapozott fejlesztési rendszer segítségével.

**Kulcsszavak:** *sztátormező-orientáció, gerjesztőtekerceses szinkrongép, teljesítményelektronika, áramirányító, ISzM vezérlés, Park-transzformáció*

## 1. Bevezető

A villamosítás kezdetén a XIX. század vége felé, jelentős érvek mellett, az egyenáramú (EÁ) villamos energia (ViEn) szolgáltatás mellett foglalt állást a Siemens cég és számos, az elektrotechnika terén híressé vált személyiség, mint például Edison is, szembekerülve Teslával, aki a váltakozó áramú (VÁ) ViEn-szállításban látta a jövőt, és amit a Ganz cég is alkalmazott.

A konvencionálisan termelt 3 fázisú (3F) VÁ ViEn-t villamos gerjesztésű, azaz gerjesztőtekerceses (GT) szinkrongenerátorok (SzG) szolgáltatják, melyek nagy teljesítményű tartományokban való alkalmazása a teljesítmény/méret, illetve teljesítmény/súly magas arányértékének tulajdonítható. A GT-SzG másik jelentős előnye, amiért a VÁ-hálózatok (VÁH) legfőbb energiaszolgáltatója maradt, annak tulajdonítható, hogy a teljesítmény-tényezőjét (TT), azaz a meddőteljesítményét a gerjesztési árammal szabályozni lehet.

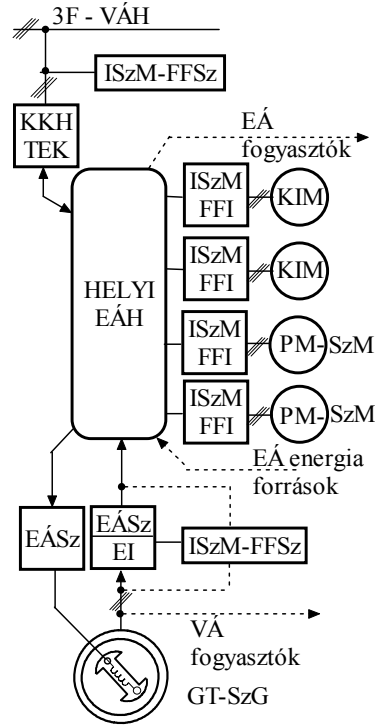
A termelt ViEn felhasználása annál gazdaságosabb, minél kevesebb átalakításon megy keresztül, és minél kevésbé messzire kell szállítani. A kisebb teljesítményű erőművek helyi energiaforrásaiból termelt ViEn-t érdemesebb közcélú áramszolgáltatással lokálisan felhasználni. Az egyre jobban elterjedő megújuló energiatermelési eljárásokat helyileg általában kombinálva szokták alkalmazni. Mivel a napelemek közvetlenül egyenfeszültséget állítanak elő, az utóbbi időben az EÁ hálózatok (EÁH) tanulmányozása és fejlesztése újból időszerrév vált [10], [11], [13], [14].

Az EÁ-szolgáltatással a kezdetekkor jelentkező hátrányok később a tirisztor feltalálása után a teljesítményelektronika elterjedésével nagyrészt már megoldódtak. A XX. század második felében kifejlesztett új típusú félvezető eszközökkel és modern felépítésű áramirányítókkal mind az EÁ-feszültség, mind a VÁ-feszültség szabályozása lehetővé vált [4] – [7].

## 2. A helyi egyenáramú hálózat

Az EÁH-k ma is érvényes előnyei között említhetjük, hogy állandósult állapotban (ÁÁ) csak aktív (ohmos) ellenállással kell számolni. Az EÁ energia akkumulátorokban tárolható – és nem túl hosszú áramkimaradás esetén – a ViEn-ellátás folytonossága biztosítható.

Az 1. ábrán egy helyi EÁH látható, melyet lokális energiaforrásból előállított villamos energia táplál [10], [14].



1. ábra. A VÁH-val összekapcsolt lokális EÁH, melyet helyi energiával működtetett szinkrongenerátor táplál, VÁ villamos motoros meghajtású fogyasztókkal.

A tanulmányozott EÁH rá van kapcsolva az országos 3F-VÁH-ra, ahova ViEn-t szolgáltat, vagy ahonnan fogyaszt.

A rendszer EÁ és VÁ részeit vezérelhető áramirányítók, azaz teljesítményelektronika

nikai konverterek (TEK) kapcsolják össze, melyek egyben az energiaátvitel vezérlését is elvégzik [6], [7], [10], [11], [13], [14].

Az **1. ábrán** az EÁH fogyasztói 3F-VÁ villamos hajtások, melyek az alkalmazásokban leggyakrabban kefe nélküli motorokkal működnek. Ezek közé tartoznak a kalickás indukciós motorok (KIM), illetve az állandó (permanens) mágneses szinkronmotorok (PM-SzM), melyeket EÁ közben-sőkörös (EÁ-KK) indirekt sztatikus frekvenciaváltókkal (SzFV) táplálnak és vezérelnek. Több kisebb teljesítményű hajtás esetén nem érdemes mindegyiknek egy saját egyenirányítót alkalmazni. Ilyen esetben előnyössé válik egy közös EÁ-KK, amit egy nagyobb teljesítményű egyenirányító táplál, és amit helyi EÁH-vá is ki lehet fejleszteni. A villamos hajtás fékezése esetén a forgó motor kinetikai energiáját az EÁH-ba vissza is lehet táplálni [10], [11], [13], [14], [16].

### **3. Teljesítményelektronikai konverterek és vezérlésük**

A TEK-ek (áramirányítók) vezérelhető félvezető eszközöket tartalmaznak, a szabályozott rendszerekben a beavatkozó eszközök szerepét töltik be. Az utóbbi időben a klasszikus tirisztort a magasfrekvenciás kényszerkommutációs félvezető eszközök nagyrészt már kiszorították. A kis és közepes teljesítménytartományokban a legelterjedtebb TEK – a hajtástechnikából jól ismert – impulzusszélesség-modulációval (ISzM, angolul PWM – „*Pulse-Width Modulation*”) vezérelt szigetelt rácsú bipoláris tranzisztoros (IGBT – „*Insulated-Gate Bipolar Transistor*”) feszültség típusú hidkapcsolású váltóirányító (inverter), mely az indirekt SzFV-k kimenő, azaz a VÁ motorok felőli TEK-je felőli. Ezeket ma már mint egyenirányítót is alkalmazzák a VÁH-i oldalon és aktív szűrőként is négyszög hullámmal működő TEK-eknél, szinuszos áram biztosítására.

A feszültségforrás jellegű (FF) invertert (ISzM-FFI) angol nyelvű megnevezése (PWM-VSI – „*Voltage-Source Inverter*”) mintájára hasonlóan nevezték el egyenirányító üzemmódban (ISzM-FFR, angolul PWM-VSR – „*Voltage-Source Rectifier*”) és aktív szűrőként (ISzM-FFSz, angolul PWM-VSF – „*Voltage-Source Filter*”).

Minden ISzM eljárás, melyet a hajtástechnikában az inverterek számára már a 80-as években nagyrészt kidolgoztak és később továbbfejlesztettek, alkalmazható mindhárom üzemmódban [4], [5].

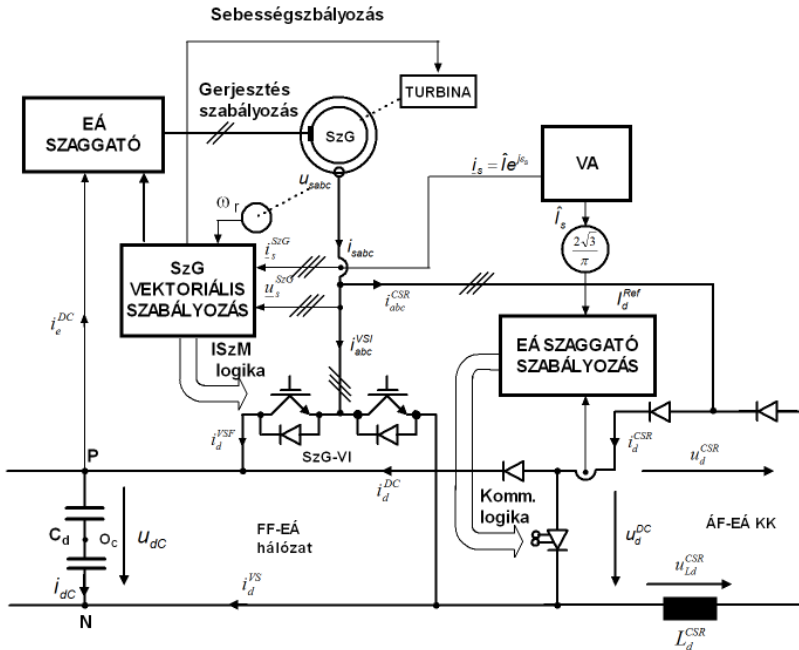
Nagyobb teljesítményeknél vezérlőjellel kikapcsolható (GTO – „*Gate Turn Off*”) tirisztorokat alkalmaznak. Ezeket általában amplitúdómodulációs (angolul PAM – „*Pulse-Amplitude Modulation*) áramforrásjellegű (ÁF) inverterekben (angolul CSI – „*Current-Source Inverter*”) alkalmazzák. Ezek is alkalmasak kétirányú energiaátvitelre, tehát egyenirányítóként is alkalmazhatók, viszont négyszög hullámos működésük miatt szinuszos áram biztosítására szűrést kell alkalmazni [5] – [8].

Az **1. ábrán** bemutatott helyi EÁH-t a 3F-VÁH-val egy ilyen kényszerkommutációs hálózati áramirányító (KKH-TEK) kapcsolja össze, mely kétirányú energiaátvitelt biztosít, és az ISzM-FFSz aktív szűrő segítségével VÁH felé szinuszos áramot szolgáltat. A GT-SzG gerjesztését egy kisebb teljesítményű egyenáramú szagató (EÁSz angolul „*DC-to-DC Chopper*”) táplálja az  $i_e^{DC}$  árammal az FF-EÁ hálózatról, mely a **2. ábrán** is látható [10], [13], [14], [16], [18], [19].

Az SzG által termelt energiát egy ISzM-FFSz szűrővel ellátott EI egyenirányítóval egyenirányítjuk, és egy (az SzG teljesítményének megfelelő) EÁSz-szel kapcsoljuk az EÁH-ra (**1. ábra**). Erre azért van szükség, mert az EI egyenirányító áramforrás jellegű, viszont a helyi EÁH feszültségforrás jelleggel bír [10], [13], [14], [16].

A 2. ábrán láthatók az FF-EÁ-hálózat  $C_d$  szűrőkondenzátorai, melyek FF jellegű  $(U_{dC}=ct)$  biztosítanak a fogyasztóknak. A SzG által szolgáltatott ViEn egyenirányítása, az energia egyirányú haladásának köszönhetően, diódás (nem vezérelhető) 3F hídkapcsolással is elvégezhető. Az  $L_d^{CSR}$  tekercs az ÁF jellegű  $(i_d^{CSR}=ct.)$  biztosítja

az EÁ-KK-nak, melynek következtében az SzG armatúra árama elvileg négyzet hullámú. Az ennek tulajdonítható forgáslüktetésének a kiküszöbölésére az áram szinuszosra való szűrését az SzG-VI IGBT-s aktív szűrő fogja elvégezni, amit az FF jellege miatt a FF-EÁ-hálózatra kell kapcsolni [7] – [11], [13], [14], [16].



2. ábra. Az egyenáramú hálózatot tápláló gerjesztőtekercses szinkrongenerátor kapcsolási rajza

A két különböző jellegű EÁH-t a „Boost” kapcsolású GTO tirisztoros EÁSZ kapcsolja össze, melynek a kommutációs (Komm.) logikáját az áramviszacsatolásos ISzM generálja az armatúraáram térfázorának (TF) a modulusa függvényében (mivel arányos az egyenirányított áram nagyságával) [7] – [11], [13], [14], [16].

#### 4. Szinkrongenerátorok mezőorientációs szabályozása

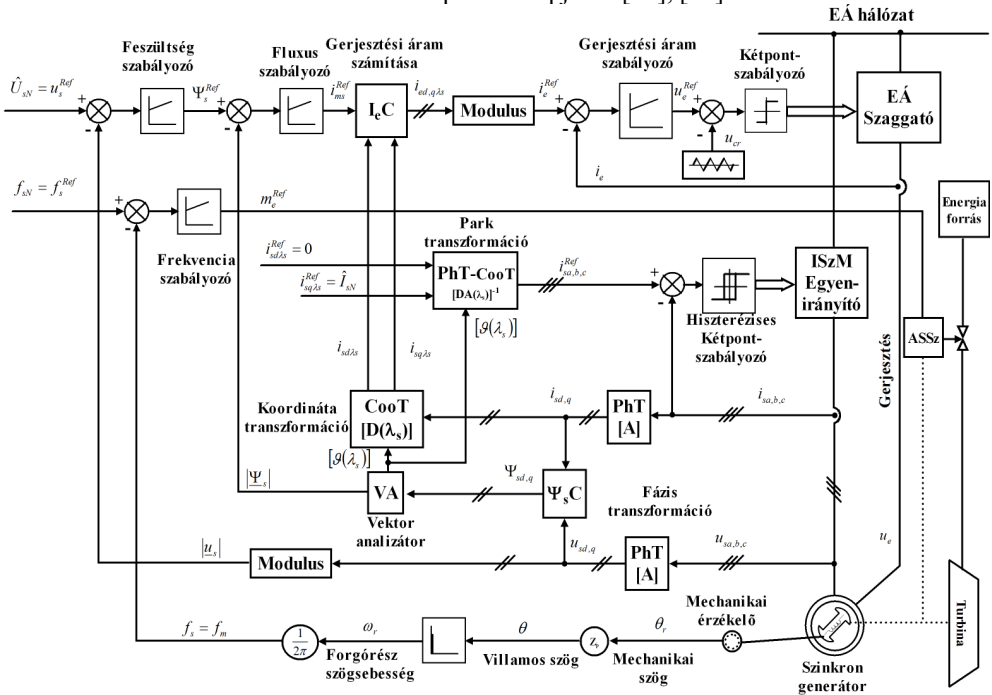
A VÁH-ra kapcsolt GT-SzG-nek a követelményei mellett (a frekvencia névleges értéken való tartása és az előírt feszültség

bizonyos értékhatárok közötti biztosítása) meddő energiát is kell termelnie, ami túlgerjesztéssel állítható elő [18], [19]. Ha az SzG-t EÁH-ra kapcsoljuk, a termelt ViEn-t szükséges egyenirányítani, amit meddőenergia-termelés nélkül is meg lehet oldani [14], [16].

A 3. ábrán az EÁH-t tápláló GT-SzG vektoriális szabályozási struktúrája látható. A generátor VÁ energiáját egyenirányító EI áramirányító vezérlése hisztérezises két-pont szabályozókkal áramviszacsatolásos ISzM-vel történik. A gerjesztést tápláló EÁ szaggató vezérlése nyílt hurkú FF-jellegű

vivő-/hordozó-hullámos ISzM, mely szimp-la két-pont szabályozót igényel, és amire ráépül a gerjesztő áram (alapjele  $i_e^{Ref}$ ) PI jellegű zárt hurkú szabályozása. A mecha-nikai beavatkozó szerv a klasszikus felépi-

tésű centrifugális automata sebességszabá-lyozó (ASSz), mellyel a turbina által szol-gáltatott energiát vezéreljük a frekvencia-szabályozóból kijövő nyomaték ( $m_e^{Ref}$ ) alapjellel [14], [16].



3. ábra. Egyenáramú hálózatra kapcsolt gerjesztőtekerces szinkrongenerátor sztátormező-orientált vektoriális szabályozási struktúrája

Mivel a fogyasztók teljesítménye állandó jelleggel ingadozhat, az EÁH-t tápláló SzG szabályozása elkerülhetetlen. Előnyös, ha az EÁH össze van kapcsolva VÁH-val, mert akkor állandó értékű energiatermelés mellett a többletet az országos hálózatba tudja szolgáltatni, vagy az EÁH túlterhelése esetén onnan ViEn-t tud szívni.

A GT-SzG klasszikus szabályozása két egymástól független hurokban történik, ahol a frekvencia alapjele a fordulatszámot állítja be, a feszültség alapjele pedig a gerjesztést. Eddig is tudott dolog volt, hogy a gerjesztő áramtól nemcsak a meddő teljesítmény függ, hanem a szinkrongép nyomatéka is, viszont ez a skaláris szabályozások-

ban nincs figyelembe véve. A modern vektoriális szabályozás abban különbözik a konvencionális skaláris jellegűtől, hogy a szabályozási hurkok a matematikai modellt (MaMo) figyelembe véve össze vannak csatolva TF-ek közti összefüggések alapján.

A szinkrongépekben nemcsak a sztátor (itt az armatúra-) áramnak van mágnesező (reaktív), illetve nyomatékképző (aktív) összetevője, mint az indukciós motorokra érvényes hagyományos mezőorientáció (MO) esetén, hanem a gerjesztő áramnak is, tehát ezt is mezőorientálni kell. Következésképpen a gerjesztő áram alapjelét nemcsak a feszültséget szabályozó hurokban állítjuk elő.

Vektoriális szabályozás esetén a feszültség szabályozása az eredő armatúrafluxus változtatásával történik, melynek a szabályozója a vele arányos mágnesezési áramot ( $i_{ms}^{Ref}$ ) generálja. Azután az  $I_cC$  blokkban kiszámoljuk az  $i_e = i_{ed\lambda_s} + j i_{eq\lambda_s}$  gerjesztő áram ténfázorának a sztátormező-orientált (SzMO) két összetevőjét ( $i_{ed\lambda_s}^{Ref} - i_{eq\lambda_s}^{Ref}$ ) [1] – [3], [7], [10], [12] – [14], [16], [18], [19]:

$$i_{ed\lambda} = i_{ms} - (1 + \sigma_s) i_{sd\lambda}; \quad (1)$$

$$i_{eq\lambda} = -(1 + \sigma_s) i_{sq\lambda}; \quad (2)$$

figyelembe véve az armatúraáram SzMO összetevőit ( $i_{sd\lambda_s} - i_{sq\lambda_s}$ ). Ezek a  $[D(\lambda_s)]$  mátrixszal jelölt CoT koordináta transzformációs blokkból következnek, miután a megmért három fázisáramot ( $i_{sa,b,c}$ ) természetes kétfázisú összetevőkké ( $i_{sd,q}$ ) alakítottuk egy  $[A]$  mátrixszal jelölt PhT fázistranszformációs blokk segítségével.

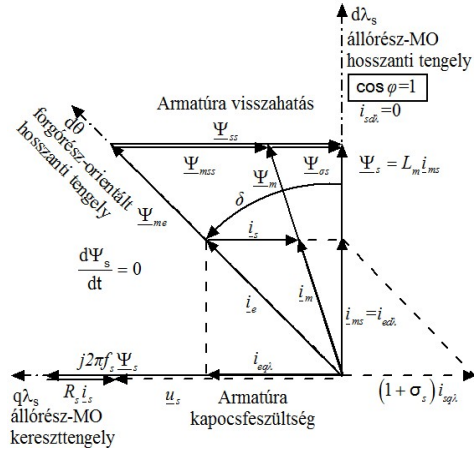
A két egymást követő transzformációt (CooT+PhT) együttesen Park-transzformációnak nevezik, és egy lépésben is el lehet végezni, mint ahogyan a vezérlő ágba is alkalmazást nyert az inverz Park-transzformáció a  $[DA(\lambda_s)]^{-1}$  mátrixszal jelölt Park-transzformációs (PhT-CooT) blokkban, ahol a 3F armatúraáram alapjeleit számoljuk.

A  $\Psi_s C$  blokkban történik az orientációs fluxus vektoriális identifikációja az armatúra elektromotoros feszültségének az integrálása által. Ez a módszer került implementálásra a kísérleti laboratóriumunkban mind az indukciós motoros hajtás, mind a szinkrongenerátor vektoriálisan szabályozott próbapadján [9], [18], [19].

A szinkronmotoros hajtásnál implementált áram-modell fluxus-identifikáció a GT-SzG-nál is alkalmazható. Előnye, hogy kis számitásigényű, és mentes az integrátorok okozta nehézségektől [15].

A 4. ábrán a GT-SzG TF-diagramját láthatjuk állandó sztátorfluxus ( $\Psi_s = ct.$ ) és maximális TT ( $\cos\varphi=1$ ) esetében, amikor az állórészáram ( $i_s$ ) fázisban van az  $u_s$  kapocs-

feszültséggel. Látható, hogy ebben az esetben az áram TF-je merőleges a sztátorfluxus TF-re, a sztátoráram reaktív összetevője nulla, és a (2) alapján a gerjesztő áram reaktív összetevője egyenlővé válik az  $i_{ms} = \Psi_s / L_m$  mágnesezési árammal. A GT-SzG vektoriális szabályozási struktúrájában az egységnyi TT-t az  $i_{sd\lambda_s}^{Ref} = 0$  alapjel előírásával valósítjuk meg [14], [16].



4. ábra. A GT-SzG ténfázordiagramja egységnyi TT esetén  $AA$ -ban [14], [16]

Az EÁH-t tápláló GT-SzG esetében a frekvenciájának és feszültségének kizárólagosan állandó értéken való tartása csak akkor szükséges, ha a generátor kapcsairól közvetlenül ilyen igényvel rendelkező VÁ-fogyasztókat is táplálunk. Ellenkező esetben az armatúra-kapocsfeszültség alapjelét  $u_s^{Ref}$  az EÁH feszültségének előírt értékéből lehet generálni. Az EÁH-ra kapcsolt GT-SzG árama a VÁ-fogyasztók aktív áramától függ. A VÁ-fogyasztók meddő teljesítményének az ingadozása az SzG-t nem érinti, mivel a két VÁ rendszert az EÁ-KK (itt az EÁH) választja szét. A fogyasztó megváltozott meddőteljesítménye módosítja ugyan a VÁ-fogyasztó állórészáram modulusát, így az EÁ-KK-ból szívott EÁ-t is, melynek megnöveli a lüktetését.



## 5. A rendszer matematikai modellezése

A szimulált rendszer tartalmaz VÁ villamos gépeket (generátort és motorokat), az energiavezérlésre szolgáló sztatikus áramirányítókat (TEK-eket), szabályozási struktúrákat, passzív elemekkel (kondenzátorok, tekercsek) ellátott EÁ- és VÁ-vonalakat, melyek ellenállással is rendelkeznek

### 5.1. VÁ villamos gépek matematikai modellezésének az elvei

Az elektromechanikai energiaátalakítás egyik lényeges törvénye alapján, ha az energiaáramlás irányát tekintjük, a villamos gépek reverzibilisek. Ez azt jelenti, hogy mind meghajtó motorként, mind generátorként tud üzemelni. A reverzibilis működés feltételéhez hozzátartozik a tengelyen fellépő külső nyomaték jellege: terhelő (reaktív), a gép forgásirányával ellenkező irányú (motor üzemmód) vagy a forgásiránnyal megegyező, meghajtó (aktív) jellegű (generátor üzemmód).

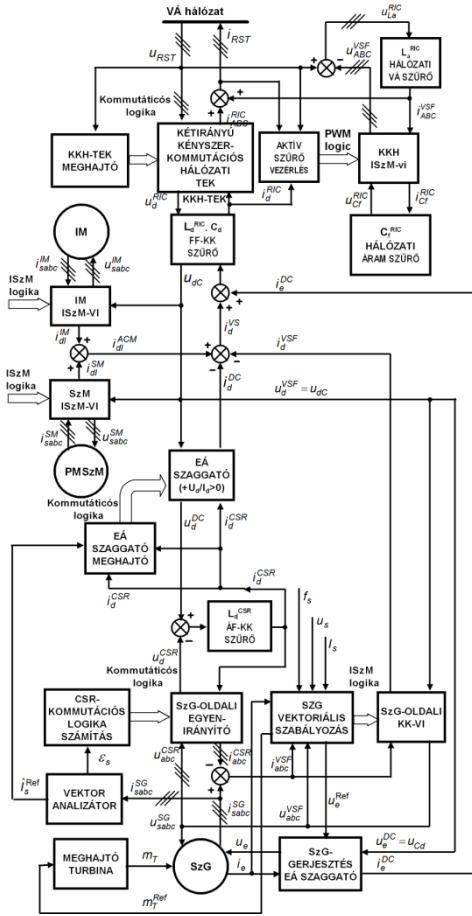
A matematikai modell (MaMo) mindkét üzemmódra felállítható: motor- (M-MaMo), illetve generátormodell (G-MaMo). Mindkét típusú modell képes mindkét üzemmódot imitálni [12], [17]. A VÁ (szinkron és aszinkron) gépek matematikai modellezése ma már kizárólag az úgynevezett „általános egyenletek”-kel (Ált-Egy) végzik. Az alapokat R. H. Park fektette le a múlt század első felében, megalkotva a ma is használatos szinkrongépek MaMo-ját. Mind az M-MaMo, mind a G-MaMo az Ált-Egy-ből származtatható. Az Ált-Egy térfázoros formája egyúttal a mezőorientációs elv és a vektoriális szabályozás alapjait képezi, így kompatibilissé vált a VÁ gépek és szabályozási struktúráinak a modellezése és szimulációja. Az Ált-Egy-ek nagy előnye – azon kívül, hogy érvényes a tranzienst jelenségek leírására –, hogy nem tesznek semmiféle kikötést a mennyiségek időbeli változására, ezért alkalmasak nemszinuszos (áram-

irányítás) 3F-VÁ rendszerek kezelésére. Az Ált-Egy-ek másik jellemző tulajdonsága, hogy a rotor és sztátor MaMo-ja azonos koordináta-rendszerben történik. Az SzG-k Ált-Egy-ei klasszikusan a forgórész irányába orientált komplex síkban vannak értelmezve, az úgynevezett  $d\theta$ - $q\theta$  koordináta-rendszerben, mely tulajdonképpen a forgórész két szimmetriatengelyének felel meg:  $d\theta$  a hosszanti ( $d$  – direkt) tengely, a rotor mágnesezési irányát mutatja, míg az erre merőleges  $q\theta$  a keresztirányú ( $q$  – kvadratúra) tengely (lásd a **4. ábrát**);  $\theta$  a rotor villamos elfordulásszöge. A KIM-eket állórészhez rögzített koordináta-rendszerben modelleztük, mert ott avatkozunk be a váltóirányítóval. Matematikai értelemben az M-MaMo jellemzője, hogy a *vezérelhető bemeneti változók* a kapcsolófeszültségek (beleértve a frekvenciát is), a *zavaró bemeneti változó* a terhelő nyomaték. A *kimeneti változók*: az elektromágneses nyomaték és a (szög-) sebesség, valamint az áramok. Következésképpen a feszültségegyenleteket és a mozgásegyenletet integrálni kell. A G-MaMo esetében a kapcsolófeszültség helyett a bemeneti változók az áramok lesznek (a kapcsolófeszültségek helyett), valamint a mozgásegyenletben a külső terhelő nyomaték előjele megváltozik. Következésképpen a feszültségegyenletekben az áramokat deriválni kell [12], [17].

Az **1. ábrán** szereplő mindhárom villamos gép típust (GT-SzG, KIM, PM-SzM) az M-MaMo-jával szimuláltuk, ugyanis ez felel meg az implementálásra alkalmazott módszernek.

### 5.2. A teljesítmény-elektronikai áramirányítók modellezése

A TEK-ek modellezési eljárásait úgy választjuk meg, hogy megfeleljen az implementálási módszernek, mely a MATLAB-Simulink® szimulációs környezetben történik. Mint ahogyan az **5. ábrán** is követhető, minden TEK két bemenettel és két kimenettel rendelkezik [6], [11], [14], [16].



5. ábra. Az EÁ-hálózat összefoglaló szimulációs tömbvázlata [14]

Mind az áramok (I), mind a feszültségek (V) számára, van egy bemenet, illetve egy kimenet, valamint egy vezérlőjel-bemenet, mely az ISzM logikának vagy a kapcsolási állapotoknak felel meg. Minden TEK MaMo-ja két alegységből áll: egy I áram-, illetve egy V feszültségszámítási tömbből, melyek közül az egyik fordított irányú számítási modellel rendelkezik az adott TEK topológiai konfigurációjának a függvényében, és melyeket a bemenő vezérlőjel köt össze. Következésképpen két modell-típussal dolgoztunk. *Direkt* struktúrának neveztük azt a MaMo-t, melynél a V-

modell EÁ-ból VÁ-ba és az I-modell VÁ-ból EÁ-ba számol. Ez alkalmas minden ISzM-vel vezérelt TEK-nél, ide sorolhatók az FF-jellegű váltóirányítók, egyenirányítók és aktív szűrők, valamint az EÁ-szaggatók is. Az *Inverz* struktúra ennek a fordítottja, ahol a V-modell VÁ-ból EÁ-ba és az I-modell EÁ-ból VÁ-ba számol. Ez megfelel az ÁF-jellegű négyszög hullámmal működő áramirányítónak, azaz a diódás egyenirányítónak (2 ábra) és a hálózati KKH-TEK-nek (1 ábra).

## 6. A teljes rendszer numerikus szimulációja

Az 1. ábrán bemutatott teljes rendszer minden elemének megalkottuk a MaMo-ját, figyelembe véve a 2. és 3. ábrákat. A KIM-es és PM-SzM-es hajtások vektoriális vezérléssel már előző munkáinkban bemutatásra kerültek [8], [10] – [14], [17], [19].

A numerikus szimulációt a jól ismert MATLAB-Simulink® dinamikus szimulációs környezetben végeztük el, mely támogatja a gyakorlati implementációt a dSPACE® cég által kifejlesztett DS1104 típusú, személyi számítógépre illeszthető vezérlőkártya segítségével, mellyel a próbapadunk el van látva. A szimulációs eredmények a 6–20. ábrákon láthatók. A rendszer szimulálását a GT-SzG elindításával kezdtük (a szabályozóknak előírt alapjelek értékei a névlegesek). A termelt ViEn ekkor a VÁ-hálózat felé áramlik. A  $t = 1$  s pillanatban egyidejűleg indítunk két PM-SzM-et, majd 0,5 s után indítjuk el a két KIM-et. A  $t = 3,5$  s pillanatban mindkét KIM-es hajtást forgásirányváltásra vezéreljük, ami következtében a fékezésekor generált ViEn a hálózat felé irányul, és egységnyi TT-vel a VÁH-ba kerül. A szimulált villamos gépek adatlapján megadott névleges értékek [14], [17] – [19]:

- GT-SzG (U.M.E. Bukarest) szinkron gép:  
 $P_N = 0,8 \text{ kW}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $U_{sN} = 220 \text{ V}^{\text{eff}}$ ,  
 $I_{sN} = 1,52 \text{ A}^{\text{eff}}$ ,  $n_N = 1500 \text{ ford./perc}$ ,  $\cos \varphi$

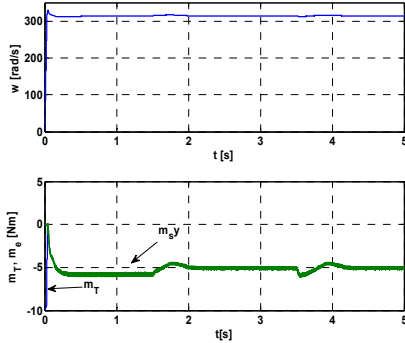


= 0,8 (kapacitív), a gerjesztés  $U_{eN} = 110$  V<sup>EÁ</sup>,  $I_{eN} = 0,6$  A<sup>EÁ</sup>,

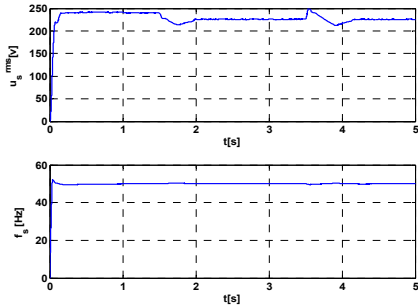
– KIM (Siemens) indukciós motor:

$P_N = 2,2$  kW,  $U_{sN} = 230$  V<sup>eff</sup>,  $I_{sN} = 4,7$  A<sup>eff</sup>,  
 $f_N = 50$  Hz,  $n_N = 1420$  ford./perc,  $\cos \varphi = 0,82$ ,  $z_p = 3$  póluspár;

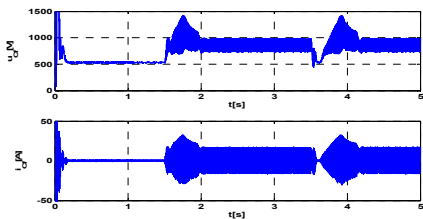
– PM-SzZM (Stöber Antriebstechnik GmbH) szinkron motor:  $P_N = 0,5$  kW,  $U_{sN} = 220$  V<sup>eff</sup>,  $I_{sN} = 1,6$  A<sup>eff</sup>,  $f_N = 150$  Hz,  $n_N = 1500$  ford./perc,  $2z_p = 6$  pólus.



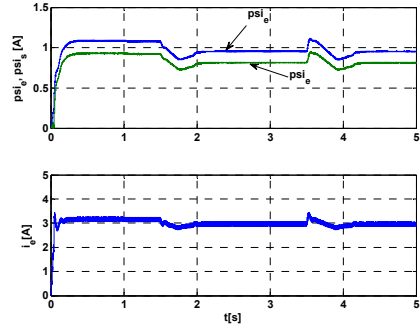
6. ábra. A GT-SzG szögsebessége ( $w$ ), elektromágneses nyomatéka ( $m_e$ ) és a turbina meghajtó nyomatéka ( $m_T$ )



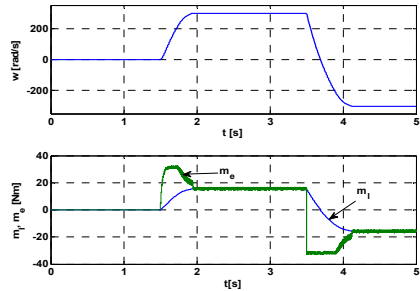
7. ábra. A GT-SzG armatúrafeszültségének effektív értéke ( $u_s$ ) és frekvenciája ( $f_s$ )



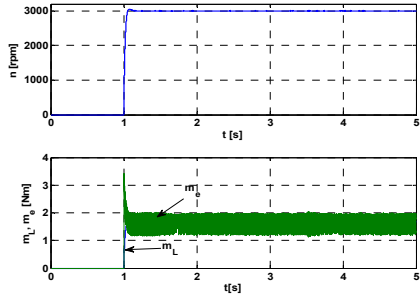
8. ábra. A VÁH aktív szűrő kondenzátorának feszültsége ( $u_{cf}$ ) és árama ( $i_{cf}$ )



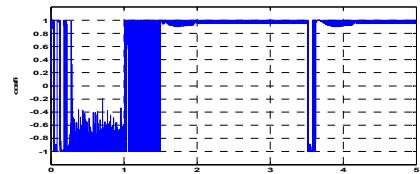
9. ábra. A GT-SzG gerjesztőárama ( $i_a$ ), armatúra- ( $\psi_{i_a}$ ) és gerjesztőfluxusa ( $\psi_{i_e}$ )



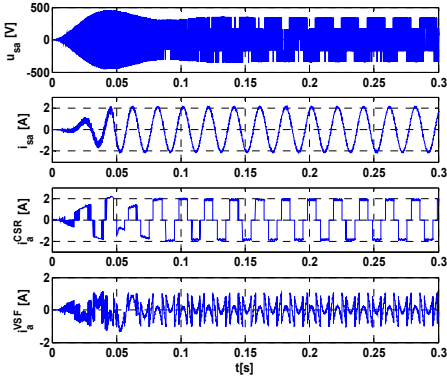
10. ábra. A KIM indukciós motor szögsebessége ( $w$ ), elektromágneses nyomatéka ( $m_e$ ) és terhelőnyomatéka ( $m_L$ )



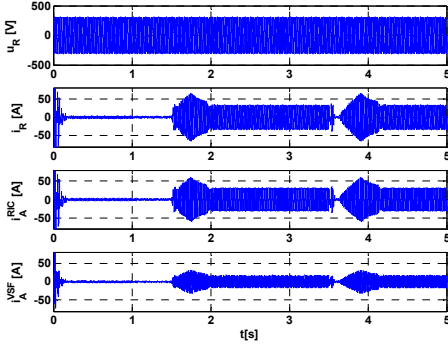
11. ábra. A PM-SzZM fordulatszám ( $n$ ), elektromágneses nyomatéka ( $m_e$ ), és terhelőnyomatéka ( $m_L$ )



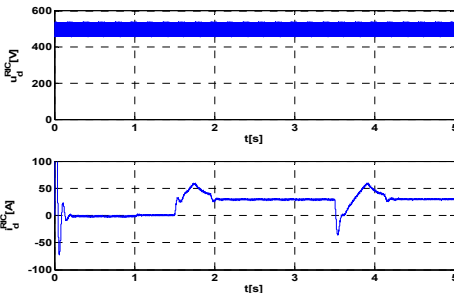
12. ábra. A KKH-TEK THD-je a VÁ hálózat felé



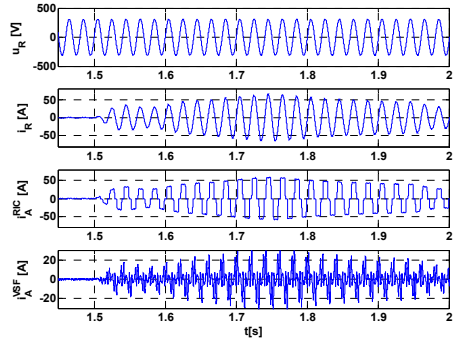
13. ábra. A GT-SzG “a” fázisfeszültsége ( $u_{sa}$ ) és árama ( $i_{sa}$ ), a négyszög hullámú EI árama ( $i_a^{CSF}$ ) és az ISzM-FFSz árama ( $i_a^{VSF}$ ) az indítás pillanataiban



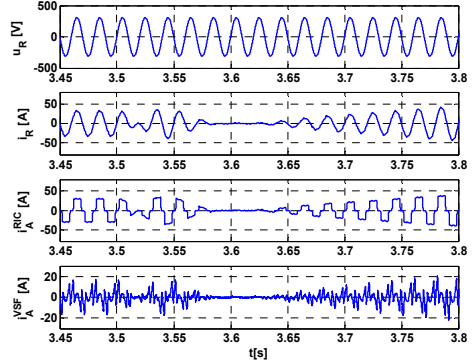
14. ábra. A VÁH “R” fázisának a feszültsége ( $u_R$ ) és árama ( $i_R$ ), a KKH-TEK árama ( $i_A^{RIC}$ ), illetve az ISzM aktív szűrő árama ( $i_A^{VSF}$ ) az “A” fázison.



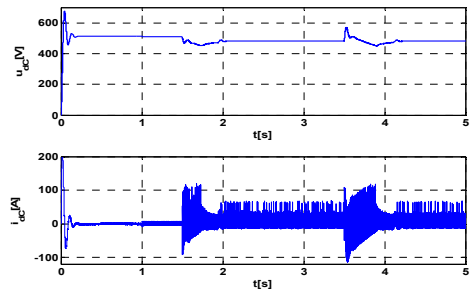
15. ábra. A hálózati KKH-TEK áramirányító EÁ közbensőkör felé irányuló árama ( $i_d^{RECT}$ ) és feszültsége ( $u_d^{RECT}$ )



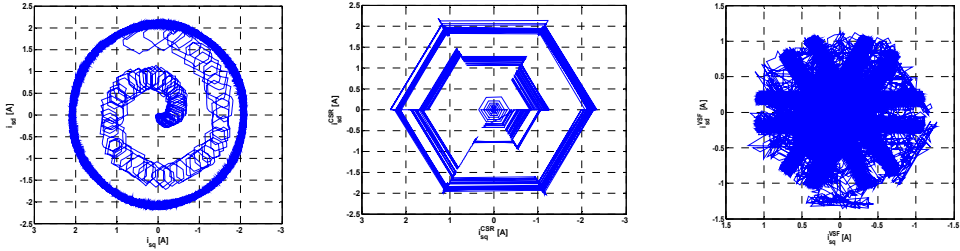
16. ábra. A VÁH “R” fázisának a feszültsége ( $u_R$ ) és árama ( $i_R$ ), a KKH-TEK árama ( $i_A^{RIC}$ ), illetve az ISzM aktív szűrő árama ( $i_A^{VSF}$ ) az “A” fázison az indukciós motoros hajtások indításakor



17. ábra. A VÁH “R” fázisának a feszültsége ( $u_R$ ) és árama ( $i_R$ ), a hálózati KKH-TEK árama ( $i_A^{RIC}$ ), illetve az ISzM aktív szűrő árama ( $i_A^{VSF}$ ) az “A” fázison a KIM-ek forgásirányváltásakor.

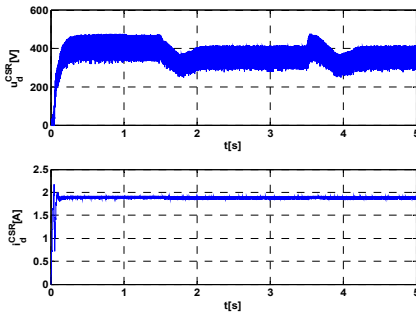


18. ábra. Az EÁ-hálózat kondenzátorának feszültsége ( $u_{dc}$ ) és árama ( $i_{dc}$ ).



a) A szűrt armatúraáram      b) A négyszöghullámú E1 árama      c) Az ISM-FFSz szűrő árama

19. ábra. A GT-SzG áramainak a térfázordiagramjai



20. ábra. Az áramforrás-jellegű EÁ közbenső kör feszültsége ( $u_d^{CSR}$ ) és árama ( $i_d^{CSR}$ )

## 7. Következtetések

Az egyenárammal gerjesztett nagy teljesítményű szinkrongenerátoroknak a jelenleg alkalmazott jól ismert, klasszikusnak tekinthető szabályozása két, egymástól független hurokban történik: az egyikben a meghajtó turbina teljesítményének a szabályozásával a fordulatszámot, azaz a *frekvenciát* állítják be, míg a másik hurokban a *feszültséget* a gerjesztőáram módosításával érik el. Ez az eljárás *skaláris* jellegűnek tekinthető, mert nem veszi figyelembe a mágneses és villamos mennyiségeket képviselő térfázorok egymáshoz viszonyított pozícióját, ugyanis csak ezek modulusával avatkozik be, nem pedig az összetevőivel, s így figyelmen kívül hagyja a villamos gépben végbemenő bizonyos, a matematikai modelljében fellelhető fizikai jelenségeket. A hajtástechnikából ismert mezőorientáció elvén alapuló *vektoriális* eljárással stabilabb

és dinamikusabb szabályozási rendszereket lehet létrehozni a GT-SzG-k számára is, ahol figyelembe vesszük, hogy a gerjesztőáramnak nemcsak meddő energia előállító szerepe van, hanem hozzájárul a nyomatékképzéshez is.

A két szabályozási hurok összekapcsolását a mezőorientált összetevőkkel valósítjuk meg: a mindkét részében keringő áramok ( $i_e$  az armatúrában és az  $i_e$  a gerjesztésben) térfázorait a gépben létrejövő eredő sztátormező (mely tartalmazza mind a gerjesztést, mind az armatúraáram visszahatását) irányába orientált  $d\lambda_s$ - $q\lambda_s$  tengelyek által meghatározott komplex síkban bontjuk komponensekre [1] – [3]. A vektoriális szabályozással nemcsak a terhelésben hirtelen beállt változások esetén csökken le a tranzienens folyamat időtartama, hanem manapság már a gyors digitális jelfeldolgozásnak köszönhetően egy jól behangolt szabályozási struktúra a gépbe beépített lengéscsillapító tekercs feladatát is meg tudja valósítani időben oldani. Mivel ezek feleslegessé válnak, olcsóbb (csillapító kalicka/rudak nélküli) szinkrongépet lehet alkalmazni [15], [19].

Az egyenáramú hálózatokat tápláló generátorokat nem szükséges túlgerjesztetni, mint a klasszikus, természetes kommutációjú tirisztoros vezérelt egyenirányító esetén, mert a diódás vagy kényszerkommutációs egyenirányítók gyakorlatilag nem igényelnek meddő energiát, tehát közel maximális teljesítménytényezővel és jobb hatásfokkal működnek [14], [16].

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kelemen Arpad, Imecs Maria: *Metodă și sistem de reglare automată vectorială a puterii active și reactive a generatoarelor sincrone*. Brevet de invenție, Romania, Nr. 104278, 30.10.1989.
- [2] Kelemen Arpad, Imecs Maria: *Vector control system for frequency and voltage of synchronous generators*. 9<sup>th</sup> Internat. Conf. on Electrical Machines, ICEM'90, Cambridge, Massachusetts, USA, 1990. 416–421.
- [3] Kelemen Árpád, Imecs Mária: *Vektor Control of AC Drives*. Vol. 1, OMIKK Publisher, Budapest, 1991. Vol. 2, Ecriture Publisher, Budapest, 1993. ISBN 963 593 140 9.
- [4] Imecs Maria: *Synthesis about pulse modulation methods in electrical drives*. Part 1 and 2, 9<sup>th</sup> CNAE 1998, Craiova, pp. 19–33.
- [5] Imecs Maria: *Open-loop voltage-controlled PWM procedures*. 3<sup>rd</sup> ELECTROMOTION, 1999. Patras, Greece, Vol. I, 285–290.
- [6] Imecs Maria, Szabó Cs., Incze I.I.: *Active power filtering of line and motor currents for AC drives, modelling and simulation*. TEQREP Workshop, Ed. UPB, Printech Press, Bucharest, 2004. pp. 41–48.
- [7] Imecs Mária, Incze J. J., Szabó Cs., Ádám T., Szőke Benk Enikő: *Kis és nagy teljesítményű hálózatbarát egyenáramú közbenső-körös frekvenciaváltós hajtások*. V. ENELKO, Kolozsvár 2004, EMT kiadó Kolozsvár, ISBN 973-86852-9-X, 86–96.
- [8] Imecs Maria, Trzynadlowski A. M., Incze I. I., Szabó C.: *Vector control structures of the tandem converter fed induction motor*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, no. 2, 2005, 493–501.
- [9] Incze J. J., Imecs Mária, Mátis I. Szabó Cs.: *Korszerű kísérleti próbapad szabályozott váltakozóáramú villamos hajtások fejlesztésére*. VI. ENELKO, Kolozsvár 2005, ISSN 973-7840-06-2, 62-68 old.
- [10] Imecs Maria, Incze I. I., Szabo Cs.: *Ecological power system with local distribution DC-line for AC-drive consumers*, IFAC Workshop ICPS'07, Cluj-Napoca, 2007, ISBN: 978-973-713-180-5, 71–76.
- [11] Imecs Mária, Szabo Cs., Incze I. I.: *Modelling and simulation of controlled bi-directional power electronic converters in a DC energy distribution line with AC grid- and motor-side active filtering*. EPE 2007. Aalborg, CD-ROM, ISBN: 9789075815108/ IEEE Catalog No. 07EX1656C.
- [12] Imecs Mária, Incze J. J., Szabó Cs.: *Stator-field oriented control of the synchronous generator: numerical simulation*. 12<sup>th</sup> IEEE INES 2008, Miami, Florida, USA, ISBN: 978-1-4244-2083-4, IEEE Catalog Number: CFP08IES-CDR, Library of Congress: 2008900450, 93–98.
- [13] Imecs Mária, Incze I. I., Szabo Cs.: *Control of the energy flow in a DC distribution line, autonomous synchronous generator and AC grid by means of power electronic converters: modeling and simulation*. 9<sup>th</sup> ICCS 2008, Sinaia, ISBN 978-973-746-897-0, 255–258.
- [14] Imecs Maria, Szabó Cs., Incze I. I.: *Modelling and simulation of a vector controlled synchronous generator supplying a DC energy distribution line coupled to the AC grid*. 19<sup>th</sup> SPEEDAM 2008, Ischia, IEEE Catalog Nr. CFP 0848 A-CDR, ISBN: 978-1-4244-1664-6, Library of Congress: 2007936381, 538–543.
- [15] Szabó Cs., Incze J. J., Imecs Mária: *Szinkronmotor fluxusának áram-modellen alapuló identifikációja*. IX. ENELKO, Csíksomlyó 2008, EMT, ISSN 1842-4546, 64–69.
- [16] Imecs Mária: *Vector control of the current-excited synchronous generators*. 2<sup>nd</sup> MACRO 2010, Tg. Mureș SAPIENTIA Univ., Scientia Publishing House, Cluj-Napoca, 2010. ISBN 978-973-1'970-39-4, 143–154.
- [17] Imecs Mária, Rus D. C., Szabó Cs., Incze J. J.: *Skalárisan szabályozott szinkron generátor matematikai modelljeinek vizsgálata numerikus szimuláció útján*. XIII. ENELKO Gyulafehérvár 2012, EMT kiadó, Kolozsvár, ISSN: 1842-4546, 90–95.
- [18] Rus D. C., Incze I. I., Imecs Maria, Szabo Cs.: *Vector control implementation for a wound-excited synchronous generator neglecting the damping effect*. ELECTROMOTION Journal, Vol. 20, Nr. 1-4, 2013. Cluj-Napoca, ISSN 1223-057X, 178–182.
- [19] Imecs Mária, Rus D. C., Szabó Cs., Incze J. J., Szőke sz. Benk Enikő: *Vektoriálisan szabályozott szinkron generátor numerikus szimulációja és implementációja*. XVI. ENELKO, Arad 2015. EMT kiadó, Kolozsvár, ISSN 1842-4546, 63–68.