

Bendiák István, Sándor Tamás: utóbuszok villamos hajtásának összehasonlítása és optimalizálása

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, bendiak.istvan@uni-obuda.hu

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet, Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék, sandor.tamas@uni-obuda.hu

Absztrakt: A pályamunka témája hatékonyság optimalizálása villamos hajtású járművek számára, amely minden környezeti szempontot figyelembe vesz, ami befolyásolja hatásfok javítását. Számos tényezőnek kell figyelni a jármű mozgása közben, amelyek csökkentik ezt a tényezőt. A téma széles mivolta miatt elsősorban városi autóbuszokra koncentrálnak a vizsgálat. A szakterület tág nemzetközi szakirodalommal rendelkezik, amellyel összhangban követtük a munkafolyamatát.

1. Bevezető

Napjainkban az energiahatékony közlekedés kérdése egyre kiemeltebb szerepet kap. A villamos hajtások rohamos fejlődését követni sem egyszerű feladat. A dolgozat célja egy szegmens területet kiemelni az összetett terület optimalizálási kérdéseiből. A téma központi célterülete rendkívül széles, [1-26] emiatt elsősorban városi autóbuszokra koncentrálnak a számítások. A szakterület tág nemzetközi szakirodalommal [1-26] rendelkezik, amellyel összhangban követtük a munkafolyamatát.

2. Tranziens üzem, indukált feszültség és fluxusszámítás, modellezési elképzelések

A villamos gép hajtás modellezésének „elkezdésekor” egyenáramú és váltakozó áramú számítási módszereket is használtunk. Egyenáramú gépek tárgyalásának oka az egyszerű áttekinthetőség, viszont csak alapként alkalmaztuk. Az armatúra fluxus számítása kétféleképpen lehetséges:

- A feszültség időszerinti integrálja a fluxus (Ψ).
- A fluxus időszerinti deriváltja az indukált feszültség (U_i).

A feszültség időszerinti integrálja:

Általánosan felírva:

$$\Psi = \int_0^t U dt$$

Ezt átírva a kapcsolófeszültségre:

$$\Psi = \int_0^t U_k dt$$

Ami nem ad teljesen helyes eredményt, mert az armatúra feszültségesést le kell vonni belőle, vagyis:

$$\Psi = \int_0^t (U_k - I_a \cdot R_a) dt$$

Ami az indukált feszültség időszerinti integrálját adja, vagyis:

$$\Psi = \int_0^t U_i dt$$

Indukált feszültség vesz részt a hasznos nyomaték képzésében.

A fluxus időszerinti deriváltja:

Általánosan felírva:

$$u_{(t)} = I_{a(t)} \cdot R_a + \frac{d\Psi_{(t)}}{dt}$$

Átírva a kapcsolófeszültségre:

$$u_{k(t)} = I_{a(t)} \cdot R_a + \frac{d\Psi_{(t)}}{dt}$$

Indukált feszültség szerint (Lenz-törvényt figyelembe véve):

$$u_{i(t)} = \left(- \frac{d\Psi_{(t)}}{dt} \right)$$

Ami egyben azt is jelenti, hogy a fluxus megváltozása okozhat olyan feszültségcsúcsokat, amelyek károsíthatják a szigetelésrendszert, illetve frekvenciaváltós üzem egyféle „impulzus-szerű” állapotnak tekinthető. Ha a tervezett motor szigetelésének kialakításakor a stacionárius állapotot vették alapul, akkor problémát okoz vagy korai meghibásodást, vagyis átütést, ami az esetek többségében a tekercsfejen szokott keletkezni.

A kétmódszer felírva újra:

$$\Psi = \int_0^t U_i dt$$
$$u_{i(t)} = \left(- \frac{d\Psi_{(t)}}{dt} \right)$$

Méréstechnikai szempontból feszültséget és áramot mérek és ebből levonva az állórész feszültségesést lehet számolni az indukált feszültséget, majd integrálva meg lehet kapni a gép fluxusát (Ψ -főfluxus (motor teljes fluxusa, szórást elhanyagolva)).

A korábbi képlet szerint felírva az armatúrára:

$$\Psi_{\text{armatura}} = \int_0^t (U_k - I_a \cdot R_a) dt$$

Indukált feszültségre kifejezve:

$$\Psi_{\text{armatura}} = \int_0^t U_i dt$$

A modell készítés során alapvető fontosságú a fluxus folyamatos számítása. A LabView folyamatosan figyeli a motor feszültség viszonyait.

Egyenáramú gépek tranziens állapotra vonatkozó feszültségegyenlete

$$u_{k(t)} = u_{i(t)} + i_{a(t)} \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_{a(t)}}{dt}$$

Vagy a tekercs fluxussal kifejezve N-menetszámra (R_a -armatúra ellenállás):

$$u_{k(t)} = u_{i(t)} + i_{a(t)} \cdot R_a + N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$$

A menetszámot természetesen az esetek többségében nem ismerjük, ezért:

$$u_{k(t)} = i_{a(t)} \cdot R_a + \frac{d\Psi(t)}{dt}$$

Ψ -alatt a teljes tekercs fluxust értve, a szórásokat elhanyagolva. A LabView-modell folyamatosan számítja a fluxust a nyomatékképzéshez.

A szórási reaktanciák változása miatt elég nagy bizonytalanságot tud okozni valós mérés esetén. Egyenáramú gépek tranziens nyomatékegyenlete:

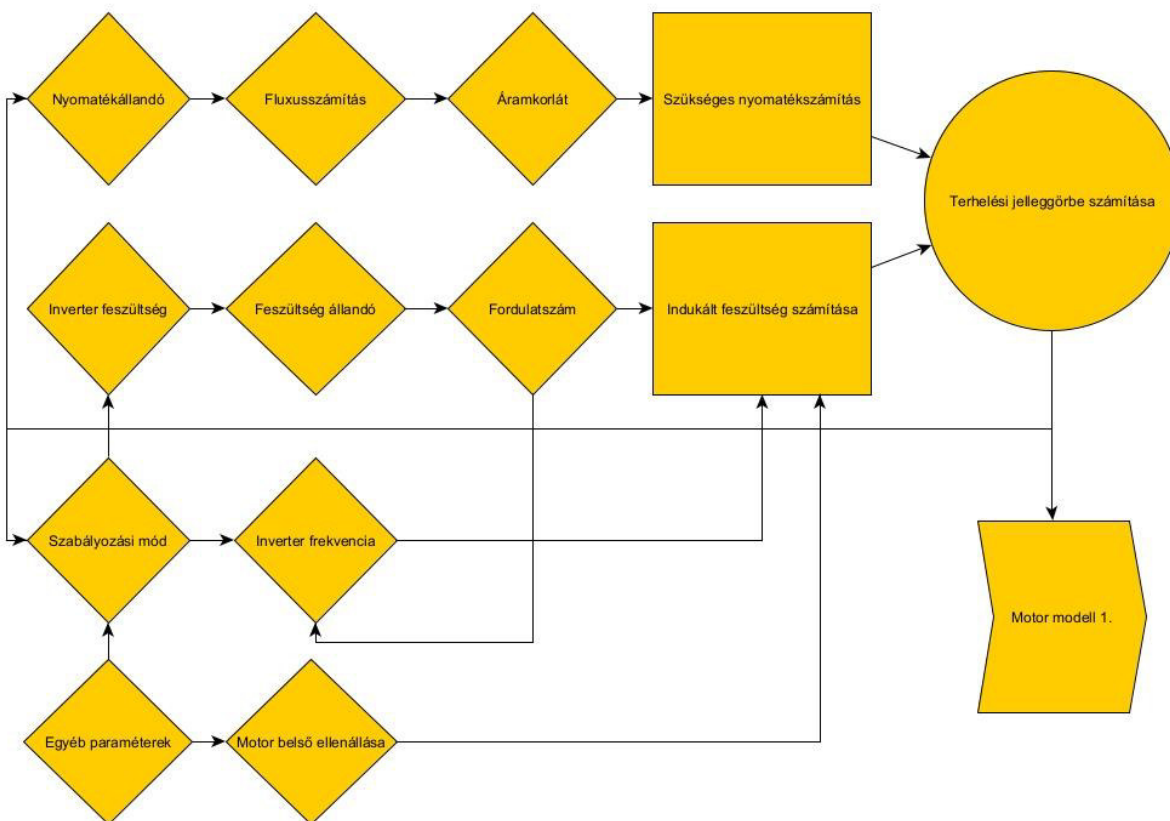
$$m_{(t)} = k_m \cdot \phi \cdot i_{a(t)}$$

A „kis” betűs jelölések a tranziens üzemre utalnak (ϕ -gép fluxusa, k_m -nyomatéki állandó).

Állandó fluxusú egyenáramú motor differenciálegyenlete elektromechanikai és villamos időállandókkal.

3. Iker-szinkron gép hajtás bevezető mérési koncepciója

A buszhajtás számításának kezdeti szakaszában három feszültségcsatornát és négy áramcsatornát tudunk használni. Szabályozási elképzelések (3.1. ábra):



3.1. ábra. Iker-szinkron gép hajtás mérési elképzelése.

Állandó fluxusra szabályozás

Változó fluxusra szabályozása

Állandó áramra való szabályozás

Állandó szögsebességre való szabályozás

Állandó nyomatékra történő szabályozás

Állandó tartományú (adott területet át nem lépő) $M \cdot \omega$ -ra való szabályozás

A felsorolt lehetőségek megvalósítása a következő további jellemzőket követeli meg:

A felsorolt paramétereket csoportosítani kell prioritás szerint!

Ha állandó fluxus, akkor feszültségtartalékot kell képezni!

A feszültségtartalék a névleges érték felett tartósan nem növelhető!

A névleges feszültség alatt lehet tartalékot képezni, de egyébként csökkent fluxussal dolgozik a gép.

Az áramkorlát mértéke rontja a szinkron gép szabályozási jellemzőit.

Milyen megoldást lehet találni?

Ha intelligens áramkorlátozás kell megvalósítani, akkor egy összetett szabályozási feladatot kell először létrehozni. Ez a folyamat előkészíti a magasabb szintű adaptív alapú beavatkozási lehetőséget. Az áramkorlát beállításához motoridentifikációt kell végezni.

A motor adatokat minden esetben megkapja az inverter is, illetve szabályzó kör felhasználja az irányítási feladat előkészítéséhez.

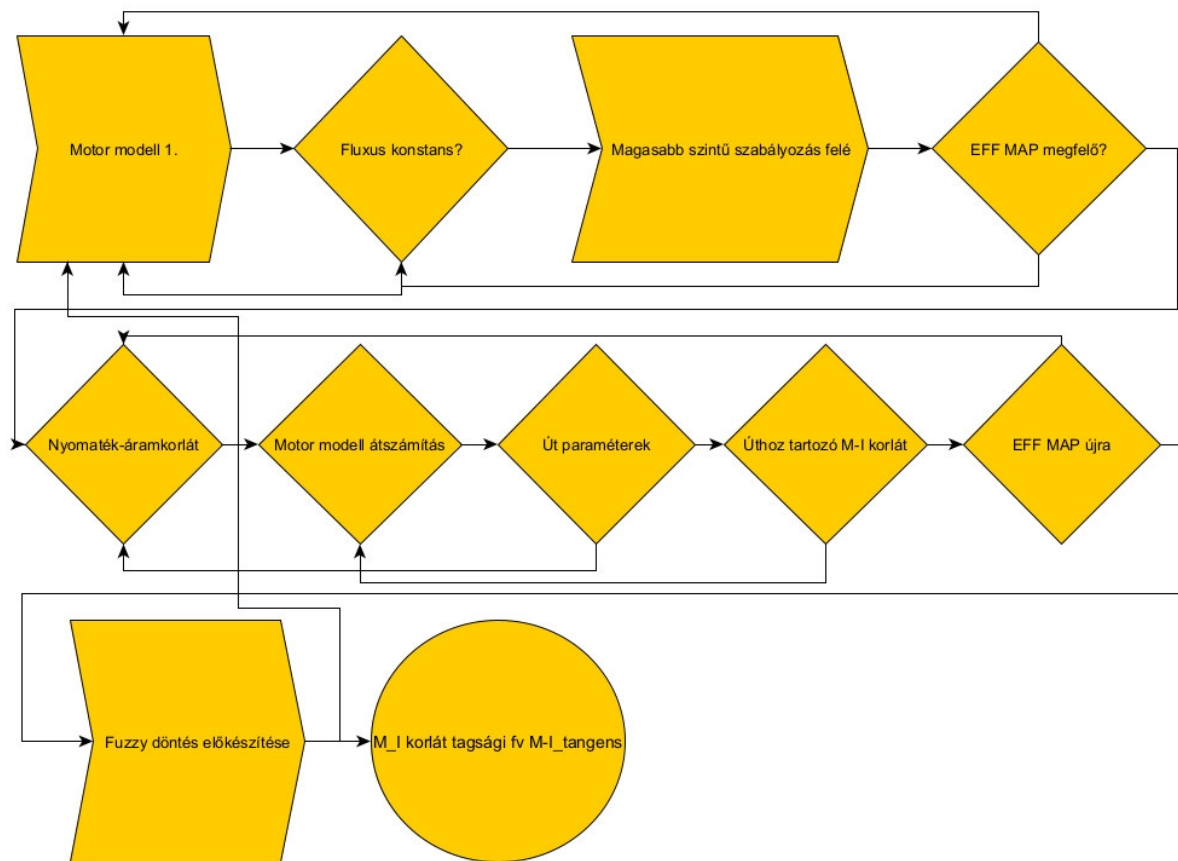
- Szabályozási mód
- Nyomatékállandó
- Áramkorlát vagy áramhatár beállítása
- Inverter feszültségszint megválasztása
- Inverter frekvencia beállítása
- Feszültség állandó
- Motor belső ellenállása
- Egyéb paraméterek: pl.: hőmérséklet

Ennek alapján történik egy motor paraméterszámítás, amely magába foglalja az összes olyan jellemzőt, amely a motor modell felállításához szükséges.

4. Villamos hajtásrendszer identifikáció több villamos hajtás szabályozása esetén

A villamos hajtású járművek esetén a menetciklushoz tartozó adatokat át kell számítani a motor által generált adatokkal összehangban. Ennek egy példáját mutatja a 4.1. ábra.

A hajtómotorok nem egyedül és nem kizárólagos szabályozási ciklusokban vannak, ezért az ábra szerinti láncszámítása egy motor vagy két motor optimalizálási adataiból elindítva.



4.1. Motormodell és útparaméterek összehangolt számítása.

Ennek a folyamatnak a célja az, hogy a terhelési jelleggörbe szakaszához mindig a legközelebb álljon a választott áramkorlát, vagyis a motor ne „essen ki” az optimális hatásfoktartományból.

Ennek több befolyásoló tényezője is van.

A működés során keletkező veszteségek és annak a járműmenet időintervallumához történő egyeztetés nélkül nem lehetséges hatásfokoptimalizálás. Busz esetén jármű tömege széles tartományban változik, tehát a motorok szabályozásának ezt több ezer kg ingadozást is követniük kell. Ez az algoritmus feladata, amely kutatás alapját képezi. A járműbiztonsági követelmények mint pl. a gyorsuláskorlát, aminek a beállítása más a változó tömeg miatt folyamatos feladatot jelent, amely integrált részét a képezi a hajtásszabályozásnak.

5. Összefoglalás

A tudományos szakirodalmak széleskörben tárgyalja [1-26] a szinkron gépek és reluktancia gépek efficiency map felvételének változatait, valamint összefüggésbe hozzák a gépkonstrukcióval.

A hatásfok-orientált beavatkozással szinkronban lévő nyomaték-áramkorlát fokozott követelményt jelent a terhelési jelleggörbe-sereg számítása és kiválasztása esetén.

Jelen állás szerint a LabView modell segítségével, olyan számítás létrehozására volt szükség, amely alkalmas arra, hogy kiszámítsa azt a fluxus értéket, amit a nyomatékképzéshez

biztosítani kell. A tudományos publikációk is vizsgálják ezt a tartományt a mezőgyengítéssel együtt. A jármű gyorsítónyomatékának csökkentésének következtében elérhető ez a rész, de a busz esetében a gyorsuláskorlátozás miatt nem feltétlenül mérvadó szempont.

Az ikerhajtásra kidolgozott előre számolt nyomaték-áramigény segíti a következő ciklus áramkorlátjának beállítását. Az áramkorlát itt nem a tranzien্স jelenségekre vonatkozik, hanem a két hajtómotor teljesítmény összehangolásának felmérésére.

Fluxusszámító LabView modell: A modellalkotás fontos szerepét képezte az állandó fluxusra való szabályozás, amely vizsgálja a fluxustartalék meglétét is. A fluxustartalék azt jelenti, hogy gépben jelenlévő fluxust és annak változását pl. mekkora feszültség beavatkozással lehet fenntartani. Ha van tartalék, milyen határig lehet növelni, vagy ha túlforszírozásban van a gép, akkor visszaállítani, ez a folyamat gépfüggő. A szinkron gép paraméterei határozzák meg, hogy ez milyen mértékben engedhető meg. Ikerhajtás előnye, hogy a két motor képes egymástól terhelést átvenni, így az említett folyamat mérsékelhető.

6. Irodalomjegyzék

- [1] K. Sundaresan and N. R. Mahapatra, "Value-Based Bit Ordering for Energy Optimization of On-Chip Global Signal Buses," Proceedings of the Design Automation & Test in Europe Conference, 2006, pp. 1-2, doi: 10.1109/DATE.2006.243997.
- [2] J. Zhang, Q. Wu and Q. Qiu, "Bus encoding for simultaneous delay and energy optimization," Proceeding of the 13th international symposium on Low power electronics and design (ISLPED '08), 2008, pp. 209-212, doi: 10.1145/1393921.1393976.
- [3] D. Liu and S. Chen, "Optimization methodology of bus network along metro corridors based on key performance indicators analysis," 7th Advanced Forum on Transportation of China (AFTC 2011), 2011, pp. 79-85, doi: 10.1049/cp.2011.1381.
- [4] M. Gao and J. Du, "Design method of energy management strategy for range-extended electric buses based on convex optimization," 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2016, pp. 286-290, doi: 10.1109/IFOST.2016.7884249.
- [5] K. Gkiotsalitis and N. Maslekar, "Improving Bus Service Reliability with Stochastic Optimization," 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015, pp. 2794-2799, doi: 10.1109/ITSC.2015.449.
- [6] H. Bertold János and S. Tamás, "The role of traffic effects and environmental effects in optimizing the consumption of an electric bus," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 187-192, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667879.
- [7] A. Fodor and T. Sándor, "Study of vehicle dynamic properties and gear shifting mechanism of electric vehicles," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 177-180, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667815.
- [8] I. Bendiák and T. Sándor, "Comparison of the propulsion of electric vehicles for passenger cars and buses in terms of efficiency optimization," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 173-176, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667858.
- [9] S. K. Somogyi and T. Sándor, "Efficiency optimization of electric buses through transmission control," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 181-186, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667803.
- [10] M. Muteba, "Dual Stator Dual Rotor Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Hybrid Electric Vehicles," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020, pp. 462-465, doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161707.

- [11] T. Imakawa, K. Chimata, N. Hoshi, A. Chiba, M. Takemoto and S. Ogasawara, "Characteristic measurements of switched reluctance motor on prototype electric vehicle," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183265.
- [12] Motoki Takaeno, Akira Chiba, Nobukazu Hoshi, Satoshi Ogasawara, "Power and Efficiency Measurements and Design Improvement of a 50kW Switched Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition, pp.1495-1501, 2011.
- [13] B. V. Ravi Kumar, K Sivakumar and S. Karunanidhi, "A new Dual Stator-Dual Rotor Switched Reluctance Motor for Electric vehicle propulsion", 2018 IEEE International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 18-21, Dec. 2018.
- [14] S. Stipetic and J. Goss, "Calculation of efficiency maps using scalable saturated flux-linkage and loss model of a synchronous motor," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016, pp. 1380-1386, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732704.
- [15] Li Qi, Fan Tao, Wen Xuhui, Tai Xiang, Li Ye and Zhang Guangzhen, "Modeling of the efficiency MAP of surface permanent magnet machine for electrical vehicles," 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013, pp. 1222-1225, doi: 10.1109/ICEMS.2013.6713361.
- [16] M. H. Mohammadi and D. A. Lowther, "A computational study of efficiency map calculation for synchronous AC motor drives including cross coupling and saturation effects," 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016, pp. 1-1, doi: 10.1109/CEFC.2016.7816154.
- [17] M. Hafner, T. Finken, M. Felden and K. Hameyer, "Automated Virtual Prototyping of Permanent Magnet Synchronous Machines for HEVs," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 5, pp. 1018-1021, May 2011, doi: 10.1109/TMAG.2010.2091675.
- [18] S. Stipetic, J. Goss, D. Zarko and M. Popescu, "Calculation of Efficiency Maps Using a Scalable Saturated Model of Synchronous Permanent Magnet Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4257-4267, Sept.-Oct. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2837672.
- [19] W. Jiang, S. Feng, Z. Zhang, J. Zhang and Z. Zhang, "Study of Efficiency Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018, Art no. 8108005, doi: 10.1109/TMAG.2018.2847328.
- [20] P. Zheng, R. Liu, Q. Wu, C. Tong and Z. Tang, "Compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for HEVs," 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 2916-2920.
- [21] M. Novak, J. Novak and Z. Novak, "Methodology for efficiency mapping of permanent magnet synchronous motors," 2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2017, pp. 205-210, doi: 10.1109/EDPE.2017.8123234.
- [22] K. Li, A. Bouscayrol, S. Cui and Y. Cheng, "A Hybrid Modular Cascade Machines System for Electric Vehicles Using Induction Machine and Permanent Magnet Synchronous Machine," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 1, pp. 273-281, Jan. 2021, doi: 10.1109/TVT.2020.3047219.
- [23] Q. Li, T. Fan, Y. Li, Z. Wang, X. Wen and J. Guo, "Optimization of external rotor surface permanent magnet machines based on efficiency map over a target driving cycle," 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8055991.
- [24] A. Rassolkin, H. Heidari, A. Kallaste, T. Vaimann, J. P. Acedo and E. Romero-Cadaval, "Efficiency Map Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors," 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWED.2019.8664334.
- [25] S. Müller and N. Parspour, "Applying a Measurement-Based Iron Loss Model to an Efficiency Optimized Torque Control of an Electrically Excited Synchronous Machine," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020, pp. 779-785, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9271029.
- [26] S. Ferrari, P. Ragazzo, G. Dilevrano and G. Pellegrino, "Flux-Map Based FEA Evaluation of Synchronous Machine Efficiency Maps," 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2021, pp. 76-81, doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425678.