

Hibrid energiatároló rendszer energiamenedzsmentje

Energy management of a hybrid energy storage system

FERENCZ János¹, doktorandusz; dr. KELEMEN András, egyetemi adjunktus²;
dr. IMECS Mária, emeritus egyetemi tanár³

¹ S. N. Radiocomunicații S. A.,
Csíkszereda, Hunyadi János utca, 28 A, janos.ferencz@radiocom.ro, www.radiocom.ro,

² Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar,
540485 Marosvásárhely, O.p. 9, C.p. 4, kandras@ms.sapientia.ro, www.ms.sapientia.ro,

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem,
Memorandumului utca 28, Kolozsvár 400114 maria.imecs@emd.utcluj.ro, www.utcluj.ro

Abstract

In electric vehicles the battery life can be prolonged by using hybrid energy storage systems (HESS), combining the high energy density batteries with supercapacitors, characterized by high power density. The paper presents a rule-based fuzzy energy management algorithm for a HESS powered electric vehicle and its simulation in MATLAB/Simulink[®] environment using the Quasi Static Simulation (QSS) and Fuzzy toolboxes.

Kivonat

A hibrid energiatároló rendszerek (HETR) az energiaforrásként használt akkumulátorok élet-tartamának a meghosszabbítására szolgálnak. A tanulmány egy olyan HETR energiamenedzsmentjét vizsgálja, amely elsődleges energiaforrásként egy nagy energiasűrűségű lítium-ion akkumulátor-csomagot, illetve másodlagos energiaforrásként egy nagy teljesítménysűrűségű szuperkondenzátor-csomagot tartalmaz. A dolgozat bemutat egy fuzzy szabályalapú HETR energiamenedzsment-algoritmust, valamint annak szimulációját MATLAB/Simulink[®] környezetben, a QSS (Quasi Static Simulation) és fuzzy könyvtárak felhasználásával.

Kulcsszavak: Hibrid energiatároló rendszer, energiamenedzsment algoritmus, villamos jármű matematikai modell, QSS modell, regeneratív fékezés.

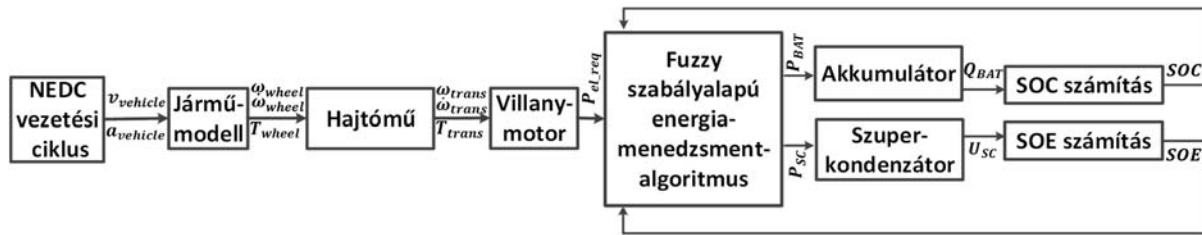
1. Bevezető

A villamos járművek fejlődése eredményezte a hibrid energiatároló rendszerek (HETR) elterjedését. Ezáltal az energiaforrásként használt akkumulátorok élettartama meghosszabbítható, mivel a HETR megvédi a pillanatnyi teljesítménysokkuktól, melyek károsítanák az akkumulátort [1].

Amikor a jármű villamos meghajtásához vagy fékezéséhez viszonylag nagy pillanatnyi teljesítményre van szükség, akkor a villamos gép által felvett, vagy leadott teljesítmény megosztását a szuperkondenzátor és az akkumulátor között a HETR menedzseli.

Gyorsításkor, amikor hirtelen meg kell növelni a járművet meghajtó villamos gépnek a teljesítményét, akkor a HETR ezt az energiát a szuperkondenzátorból fogja biztosítani, mentesítve az akkumulátort a teljesítménysokkuktól. Hasonlóképpen a jármű visszatápláló regeneratív fékezésénél, amikor ugyancsak hirtelen viszonylag nagy pillanatnyi teljesítményen a villamos gépből áramló energiát kell eltárolni, akkor a HETR ezt az energiát a szuperkondenzátorba fogja betölteni.

A fuzzy szabályalapú HETR energiamenedzsment-algoritmusnak (EMA), három bemenete (SOC, SOE és P_{el_req}) és két kimenete van (P_{SC} és P_{BAT}), mint ahogyan az 1. ábrán is látható.



1. ábra

A fuzzy-szabályalapú HETR energiamedzsment-algoritmus szimulálási tömbvázlata.

A fuzzy szabályalapú HETR EMA az akkumulátor töltöttségi állapotából (*SOC* – „*State of Charge*”) és a szuperkondenzátor energiaállapotából (*SOE* – „*State of Energy*”), valamint a P_{el_req} igényelt vagy a visszatáplálendő pillanatnyi villamos teljesítményből, ami szükséges a jármű meghajtásához, illetve a fékezéséhez, kiszámítja a szuperkondenzátor P_{SC} pillanatnyi teljesítményét.

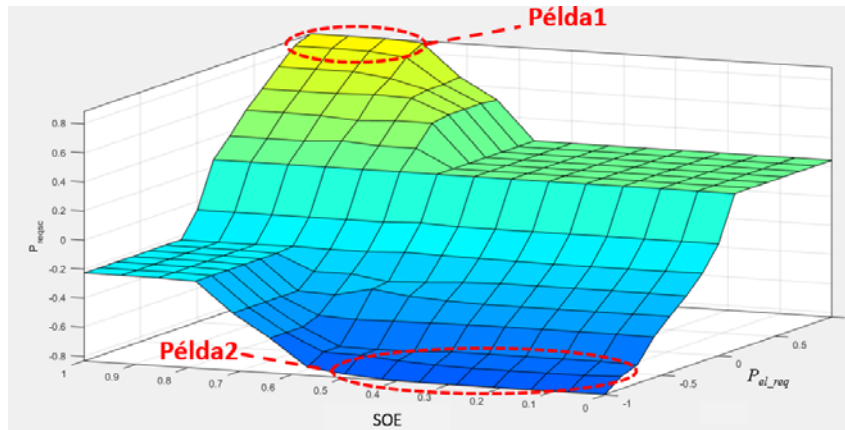
2. A fuzzy szabályalapú HETR energiamedzsment algoritmus tervezése

Az akkumulátor töltöttségi állapota (*SOC*) és a szuperkondenzátor energiaállapota (*SOE*) csak a 0-100% pozitív tartományban változhat (teljesen lemerült állapotban 0%, teljesen feltöltött állapotban 100% pozitív értékeket vehetnek fel). A fuzzy szabályalapú HETR EMA bemeneteként megjelenő P_{el_req} változó megfelel annak a villamos teljesítménynek, amely minden pillanatban szükséges a villamos jármű meghajtásához vagy fékezéséhez. Ez a P_{el_req} pillanatnyi teljesítmény a jármű gyorsításakor pozitív értéket vesz fel, ami változhat nulla és egy maximális érték között, valamint, a jármű visszatápláló regeneratív fékezési állapotában (lassításkor) negatív, tehát nulla és egy minimális teljesítményérték között változik. A fuzzy következtető rendszer által számított kimeneti P_{SC} érték (a szuperkondenzátort lemerítő, vagy feltöltő teljesítmény), a jármű gyorsítási állapotában nulla és egy maximális közötti pozitív értékeket, valamint a regeneratív fékezés állapotában nulla és egy minimális közötti tartományban negatív értékeket vesz fel. A dolgozatban bemutatott fuzzy szabályalapú HETR EMA, a MATLAB® „*Fuzzy Logic Designer*” alkalmazása segítségével terveztük meg. A fuzzy következtető rendszer az akkumulátor töltési állapotához (*SOC*) három háromszög alakú tagsági függvényt rendel [2]. A szuperkondenzátor energiaállapotához (*SOE*) ugyancsak három háromszög alakú tagsági függvényt rendelünk. A kért villamosteljesítmény bemenetnél (P_{el_req}), mivel negatív értékeket is felvehet (a visszatápláló regeneratív fékezés folyamán), összesen hat háromszög-függvényt alkalmaztunk. A kimenet a szuperkondenzátor által biztosított pillanatnyi teljesítmény (P_{SC}), hat háromszög-függvénnyel van lefedve, ami a jármű gyorsításakor pozitív, illetve a regeneratív fékezési üzemmód folyamán negatív.

A HETR fuzzy szabályalapú EMA-nak összesen 54 különálló szabályát fogalmaztunk meg, amelyek úgy határozzák meg a kért szuperkondenzátor-teljesítményt, hogy az akkumulátor ne károsodjék.

A 2. ábrán a tervezett fuzzy EMA által az 54 logikai szabály alapján kiszámított szuperkondenzátor-teljesítmény (P_{SC}) látható. A számítások során figyelembe voltak véve a fent említett, ki és bemeneti tagsági függvények.

A bemutatott felületdiagramot a MATLAB® „*Fuzzy Logic Designer*” alkalmazás segítségével generáltuk. Bemeneteként az igényelt pillanatnyi teljesítmény (P_{el_req}) és a szuperkondenzátor energiaszintje (*SOE*) jelenik meg, kimenetként pedig a kiszámított teljesítmény (P_{SC}), amelyet a HETR-nek a szuperkondenzátorból kell biztosítania. A diagramon az algoritmus által hozott döntések eredményeit szemléltetjük két szélsőséges esetben. Példaként először vegyük azt az esetet, amikor hirtelen megnő a pozitív P_{el_req} teljesítmény, mely a jármű meghajtásához szükséges, és mind az akkumulátor, mind a szuperkondenzátor töltöttségi szintje magas. Ekkor az akkumulátor károsodásának elkerülése céljából a szuperkondenzátor nagy pillanatnyi teljesítményen fogja biztosítani a szükséges (pozitív) energiát. Ez a példa a 2. Ábra felületdiagramja felső sárga színű részében „Példa1”-es szöveggel van megjelölve. Példaként a következőkben vegyük azt az esetet, amikor a jármű regeneratív fékezési állapotában hirtelen megnő a negatív P_{el_req} teljesítmény, aminek következtében az akkumulátornak és a szuperkondenzátornak energiát kell eltárolnia.



2. ábra

A fuzzy szabályalapú HETR energiamenedzsment-algoritmus felületdiagramja, ahol bemenetként a P_{el_req} igényelt pillanatnyi teljesítmény és a szuperkondenzátor energiaszintje (SOE), kimenetként pedig az a teljesítmény szerepel, amelyet a szuperkondenzátorból kell biztosítani.

Ebben az esetben, ha az akkumulátor töltöttségi szintje közepes és a szuperkondenzátor töltöttségi szintje alacsony, akkor a szuperkondenzátor kell, hogy az összes generált villamos energiát eltárolja. Ez a példa a 2. Ábra felületdiagramja alsó sötétkék színű részében „Példa2”-es szöveggel van megjelölve.

3. A HETR energia-menedzsment algoritmusának a hajtásrendszerben alkalmazott szimulációja

A fuzzy szabályalapú HETR EMA-nak a szimulációja, egy villamos géppel meghajtott jármű modelljével történt, MATLAB/Simulink® környezetben. A hajtásrendszer modelljének az első tömbje (lásd az 1. Ábrát) a vezetési ciklus, mely generálja a jármű sebesség és gyorsulás értékeit, városi környezetben, körülbelül 20 perc időtartamig. A szimulált vezetési ciklus „NEDC” (New European Driving Cycle) típusú és a Simulink® „QSS” (Quasi Static Simulation) könyvtára tartalmazza. Azért választottuk ezt a vezetési ciklust, mert folyamatos indításokat és megállásokat tartalmaz, ami alatt tesztelni lehet a teljesítménymegosztást a jármű gyorsítási és lassítási állapotaiban [3].

A villamos jármű szimulációs modelljének a következő tömbje maga a jármű matematikai modellje, amely a vezetési ciklus lineáris sebesség és gyorsulás értékeit átszámítja a jármű kerekére, vagyis forgó mozgássá alakítja [3]. A jármű-modell kimenetei a kerék szögsebessége és szöggyorsulása, valamint a kerékre ható forgató nyomaték. A jármű kerekének a szögsebességét (ω_{wheel}) illetve szöggyorsulását ($\frac{d\omega_{wheel}}{dt}$) a jármű lineáris sebességéből ($v_{vehicle}$), illetve gyorsulásából ($a_{vehicle}$) lehet kiszámítani az alábbi összefüggések alapján:

$$a) \omega_{wheel} = \frac{v_{vehicle}}{r_{wheel}} ; \quad b) \frac{d\omega_{wheel}}{dt} = \frac{a_{vehicle}}{r_{wheel}}, \quad (1)$$

ahol az r_{wheel} a kerék sugara.

A kerékre ható forgató nyomaték kiszámításához a járműre ható külső erőket szükséges meghatározni. A súrlódási erő ($F_{friction}$) és a légellenállási erő (F_{air}) mindig ellentétes irányú a jármű haladási irányával, és ezeket az alábbi összefüggésekkel lehet kiszámolni:

$$a) F_{friction} = \mu Mg \cos \alpha; \quad b) F_{air} = \frac{1}{2} \rho C_d A_{front} v_{vehicle}^2; \quad c) F_{gravity} = Mg \sin \alpha; \quad (2)$$

ahol μ a súrlódási együttható, M a jármű tömege, g a gravitációs gyorsulás, ρ a levegő sűrűsége, C_d a légellenállási tényező, A_{front} a jármű homlokfelülete, amely merőleges a jármű menetirányára és α az emelkedő/lejtő szöge.

A (2)-ben megadott erők hozzájárulnak a villamos gép tengelyén az úgynevezett terhelő nyomatékot. Abban az esetben, ha a jármű nem sík terepen, hanem egy lejtőn vagy egy emelkedőn közlekedik,

akkor $\alpha \neq 0$ és a járműre egy $F_{gravity}$ potenciális aktív-jellegű erő-összetevő is hat, a (2, c) szerint, mely fékező vagy meghajtó hatású, attól függően, hogy a jármű felfele halad az emelkedőn ($\alpha > 0$), vagy lefele a lejtőn ($\alpha < 0$). Ez utóbbi esetben aktívvá válik, a mozgás irányába hat és nem „terhelni”, hanem hajtani fog.

A jármű dinamikus modellje előre haladáskor ($\omega_{em} > 0$), melyben figyelembe vettük a gyorsulásából származó tehetetlenségi erőt ($F_{inertia} = Ma_{vehicle}$), a következő egyenlőséggel írható fel:

$$F_{traction} = Ma_{vehicle} + \left[Mgsin\alpha + \frac{1}{2} \rho k_d A_{front} v_{vehicle}^2 + \mu Mgcos\alpha \right], \quad (3)$$

ahol $F_{traction}$ a hajtómű (sebességváltó) által a keréken kifejtett húzóerő.

Az 1. Ábra alapján a „Vezérlési ciklus” nevű blokk generálja a sebesség és gyorsulás pillanatnyi értékét, amiből a „Jármű-modell” blokk kiszámítja a jármű kerekére ható T_{wheel} nyomatékot, amit a hajtómű (sebességváltó) kell kifejtse, hogy legyőzze a terhelőnyomatékot és hogy a villamos gép gyorsítson vagy fékezzen. A jármű kerekére ható nyomaték a következő összefüggéssel számítható ki:

$$T_{wheel} = F_{traction} r_{wheel} \quad (4)$$

A szimuláció során a jármű tömegnek $M=750$ kg, a jármű keresztmetszetének $A_{front} = 1.8$ m², a legellenállási koefficiensnek $k_d = 0.22$, és a súrlódási koefficiensnek $\mu = 0.008$ paraméterértékeket választottunk. Az 1. Ábrán a szimulációs struktúra következő számítási blokkja a mechanikai áttételének nevezett hajtómű (sebességváltó), ami a járműmodell-blokk bemeneti szögsebességét (ω_{wheel}) és szöggyorsulását, valamint a kerékre ható meghajtó forgató nyomatékot (T_{wheel}) átszámolja a mechanikai áttétarány (a_{trans}) segítségével a motor tengelyére. A motortengely szögsebessége (ω_{trans}) és szöggyorsulása ($\frac{d\omega_{trans}}{dt}$) az alábbi összefüggésekkel számíthatók ki:

$$a) \omega_{trans} = a_{trans} \omega_{wheel}; \quad b) \frac{d\omega_{trans}}{dt} = a_{trans} \frac{d\omega_{wheel}}{dt} \quad (5)$$

A hajtómű bemenetén a motor tengelyére ható T_{trans} terhelő nyomatékot a kerék T_{wheel} nyomatékból számítjuk át, figyelembe véve az a_{trans} mechanikai áttétel értékét, a P_{loss} mechanikai teljesítményvesztéséget, amely a fogaskerekek súrlódásból származik és egy megadott szögsebesség-határ fölött jön számításba, valamint a forgó részek további veszteségeit (például a csapágyakét, beleértve a villamos gépét is) az η_{trans} hatásfok által. A villanymotor tengelyére ható nyomatékokat előrehaladáskor ($\omega_{em} > 0$) a következő összefüggésekkel lehet meghatározni:

$$\begin{cases} T_{trans} = \frac{T_{wheel} + \frac{P_{loss}}{\omega_{trans}}}{a_{trans} \eta_{trans}}, & \text{ha } T_{wheel} > 0 \text{ - I. síknegyed} \\ T_{trans} = \frac{T_{wheel} + \frac{P_{loss}}{\omega_{trans}}}{a_{trans}} \eta_{trans}, & \text{ha } T_{wheel} < 0 \text{ - II. síknegyed} \end{cases} \quad (6)$$

A hajtóművet a következő adatokkal szimuláltuk: a mechanikai áttétel aránya $a_{trans} = 3$, a fogaskerekek súrlódásból származó teljesítményvesztés $P_{loss} = 50$ W és a további veszteségeknek megfelelő hatásfok $\eta_{trans} = 98\%$.

A villamos jármű következő szimulációs tömbje a meghajtására szolgáló villamos gép, amely a mozgásegyenlet alapján a T_{em} elektromágneses nyomatékot kell kifejtse

$$T_{em} = T_{trans} + J_m \frac{d\omega_{em}}{dt}, \quad (7)$$

ahol $\omega_{em} = \omega_{trans}$ a motor szögsebessége és J_m a motor tengelyére redukált forgó testek tehetetlenségi nyomatéka (beleértve a rotorét is), melynek az értékét a szimulációkban 0,0025 kgm²-re becsültük.

A villanymotor kapcsain a P_{el_req} villamos teljesítményt az elektromágneses nyomatékból és a rotor szögsebességéből számítjuk ki, amelyet előrehaladáskor $\omega_{em} > 0$, az alábbi összefüggésekkel lehet-meghatározni:

$$\begin{cases} P_{el_req} = \omega_{em} T_{em} \frac{1}{\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})}, & \text{ha } \omega_{em} > 0 \text{ és } T_{em} > 0 - \text{ I. síknegyed} \\ P_{el_req} = \omega_{em} T_{em} \eta_{em}(\omega_{em}, T_{em}), & \text{ha } \omega_{em} > 0 \text{ és } T_{em} < 0 - \text{ II. síknegyed} \end{cases}, \quad (8)$$

ahol a η_{em} a motor villamos (tekercs-) és mágneses (vas-) veszteségeinek megfelelő hatásfok. Az I síknegyedben a jármű villanymotorja hajt, a II-ben síknegyedben fékez. A szimulációkban a motor hatásfokát ($\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})$) a Simulink® „QSS” könyvtár „eta EM map” adat-struktúrájának az igénybevételével vettük figyelembe [3]. Az akkumulátort és a szuperkondenzátort is a QSS könyvtár „Battery” és „Supercapacitor” modelljeivel szimuláltuk [3]. Ezeknek a bemenetei a pillanatnyi P_{BAT} és P_{SC} villamos teljesítmények (lásd az 1. Ábrát), melyet az EMA energiamegosztással határoz meg az akkumulátor energia-állapotának (SOC) és a szuperkondenzátor töltöttségi szintjének (SOE) a függvényében, melyeket az alábbi összefüggések határoznak meg:

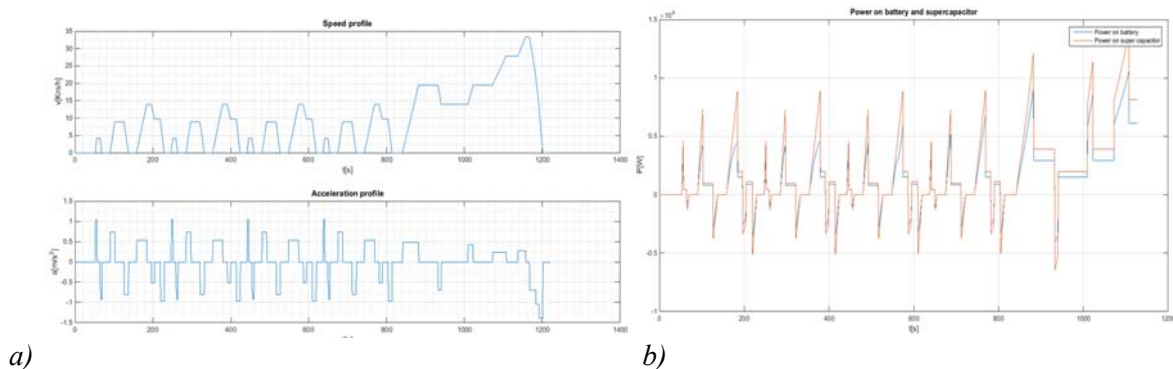
$$a) \quad SOC = \frac{Q_{BAT}}{Q_{BAT_NOM}}; \quad b) \quad SOE = \frac{E_{SC}}{E_{SC_NOM}} \quad c) \quad P_{el_req} = P_{BAT} + P_{SC}, \quad (9)$$

ahol Q_{BAT} az akkumulátor töltése a „Battery” modell kimenete, valamint az E_{SC} a szuperkondenzátor pillanatnyi energiája a „Supercapacitor” modellté, melyet osztjuk a nominális energiájával. amit a névleges értékhez viszonyítunk. A (9)-ben a P_{SC} szuperkondenzátor-teljesítményt az energiamenedzsment-algoritmus EMA határozza meg a megadott fuzzy logikai szabályok figyelembevételével, továbbá a jármű-modellből származó, a jármű meghajtásához szükséges P_{el_req} villamos teljesítmény. A szimuláció során az akkumulátor kezdeti töltöttségi állapota 80%-a a névleges tárolókapacitásnak ($Q_{BAT_NOM}=100\text{Ah}$), valamint a $C_{SC}=48\text{F}$ -os kapacitású szuperkondenzátor kezdeti töltöttségi szintje a névleges érték 70%-a ($E_{SC_NOM} = 1215\text{kJ}$, $U_{SC_NOM} = 225\text{V}$).

4. Szimulációs eredmények

A fuzzy szabályalapú HETR EMA-t Simulink® környezetben a „Fuzzy Logic Controller” nevű modellel szimuláltuk, amelynek a be- és kimenetei relatív mennyiségek, ezért a bemeneten a P_{el_req} teljesítményt a 16 kW alapértékkel osztjuk, viszont a kimeneten ezzel szorzunk, mivel a P_{SC} és P_{BAT} teljesítményeket kW-ban kell továbbítsuk az „Akkumulátor” és „Szuperkondenzátor” blokkok felé.

A 3. ábra a) diagramjai a NEDC vezetési profil által generált sebességet, illetve gyorsulást jelenítik meg míg a b) diagram az energiamenedzsment EMA számításai alapján az akkumulátor és a szuperkondenzátor közötti teljesítménymegosztást ábrázolja.



3. ábra

Szimulációs eredmények a megosztott teljesítmény szemléltetésére.

a) A NEDC vezetési profilok: a sebesség (fent) és a gyorsulás. b) A megosztott teljesítmény: az akkumulátor (kék görbe) és a szuperkondenzátor (piros görbe) által biztosított teljesítmény.

A 3. b) diagramon észrevehető, hogy a teljes, körülbelül 20 perces vezetési ciklus alatt a pillanatnyi villamos teljesítmény több mint felét a HETR a szuperkondenzátorokból biztosítja. Az akkumulátorból kért teljesítmény számítása (P_{BAT}) a (11) összefüggés alapján történt. A vezetési profil alatt a szuperkondenzátor kezdeti feszültsége 70%-ról körülbelül 20%-ra csökkent.

A 4. Ábra a) és b) diagramjain a fuzzy szabályalapú EMA visszacsatolt bemenetei láthatók: *SOC* az akkumulátor töltöttségi állapotának és *SOE* a szuperkondenzátor energia állapotának megfelelő relatív értékű változói, melyeket az NEDC vezetési ciklus profilja határoz meg.



4. ábra

A fuzzy szabályalapú EMA szimulációs eredményei relatív értékekben:

- a) *SOC* az akkumulátor töltöttségi állapota; b) *SOE* a szuperkondenzátor energiaállapota;
c) P_{el_req} a villamos összteljesítmény; d) P_{SC} a szuperkondenzátor-teljesítménye.

Továbbá a 4. Ábrának a c) diagramján a fuzzy szabályalapú EMA-nak az a bemenete látható, amely a jármű meghajtásához szükséges P_{el_req} összteljesítmény relatív értékének felel meg, amit a HETR-nek biztosítania kell és amit a villanymotor-modell blokkja a (9) alapján számol ki. A 4. Ábra d) görbéje a fuzzy szabályalapú EMA által kiszámolt P_{SC} szuperkondenzátor teljesítmény relatív értéke, amely segítségével elkerülhető az akkumulátorkárosodás.

5. Következtetések

A fuzzy szabályalapú EMA hangolása a bemeneti és kimeneti tagsági függvények paramétereinek a módosításával, továbbá a logikai szabályok változtatásával történt. Abban az esetben, amikor a szuperkondenzátor energiaállapota (*SOE*) 10% alá csökken, akkor az EMA a jármű teljes energiáját az akkumulátorból biztosítja. A megtervezett fuzzy szabályalapú EMA megosztja a teljesítményt úgy, hogy az akkumulátor károsodása elkerülhető legyen. A jelen dolgozatban megtervezett fuzzy szabályalapú EMA-t implementálni szeretnénk, a jövőben gyakorlati kivitelezésre szánt, 0.5 kW teljesítményű villamos kerékpár hajtását tápláló hibrid energiatároló rendszerben.

Irodalomjegyzék

- [1] Srdjan Lukic, Jian Cau, Remesh Bansal, Fernando Rodriguez, Ali Emadi, „Energy storage systems for automotive applications”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, Nr. 6, June 2008, pp. 2258-2267.
- [2] Huilong Yu, Federico Cheli, Francesco Castelli-Dezza, Dongpu Cao, Fei-Yue Wang, „Multi-objective optimal Sizing and energy management of hybrid energy storage system for electric vehicles”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 67, Nr. 2, February 2018, pp. 1027-1035.
- [3] L. Guzzella, A. Amstutz, „The QSS Toolbox Manual”, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zürich), Measurement and Control Laboratory, June 2005.