



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Lítium-ion akkumulátor modellek alkalmazás-specifikus vizsgálata

TDK dolgozat

Szebedy Bence

Konzulensek:

Debreceni Tibor

Dr. Balázs Gergely György

Automatizálási és Alkalmazott
Informatikai Tanszék

Siemens Zrt.

Debreceni.Tibor@aut.bme.hu

gergely.balazs@siemens.com

2015.10.26.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Debreceni Tibornak, mert konzulensként minden segítséget megkaptam Tőle a munkámhoz. Nem csupán nyomon követte a dolgozat alakulását, hanem a kutatás minden fázisában figyelme és szakmai tanácsai nélkülözhetetlen támaszt adtak a megvalósításhoz.

Külön köszönetet szeretnék mondani Dr. Balázs Gergely Györgynek, amiért az elektromos járművek és energiatárolók tématerületeit összekötő kutatási lehetőségeket nyújtott számomra, illetve amiért hozzáférést biztosított a Siemens Zrt. laborjához és betekintést engedett a kutatás-fejlesztés folyamatába.

Kivonat

A nem megújuló energiaforrások körébe tartozó fosszilis tüzelőanyagok jelenlegi mértékű felhasználása a Föld olajkészleteinek drasztikus mértékű fogyatkozása és környezetvédelmi szempontok miatt is tarthatatlan folyamat. A korszerű lítium-ion cellák a magas energia- és teljesítménysűrűségüknek köszönhetően már egyre elterjedtebb helyettesítőjét képezik hagyományos fosszilis energiahordozóknak.

Az akkumulátoros energiatárolók tervezése és fejlesztése viszont a mai napig igen problematikus feladat, ugyanis a fejlesztőknek számos specifikációs ponttal kell szembenézniük. Kulcsfontosságú szempont többek között az energiatárolók kapacitása, a kinyerhető teljesítmény maximuma, a cellák illetve a cellapakk feszültség szintje, a maximálisan megengedhető tömeg és térfogat valamint adott terhelési profil mellett megfelelő és biztonságos működés. A méretezési eljárás összetettségét tovább fokozzák a terhelés specialitásai és a fejlesztési folyamatban előkerülő mechanikai korlátok. Az akkumulátor nemlineáris karakterisztikája és a viselkedésének kiszámíthatósága kritikus pont a megfelelő biztonsági szint és a hatékonyság maximalizálása szempontjából.

Az akkumulátoros rendszerek elengedhetetlen része a felügyeleti rendszer, angol szakirodalomban Battery Management System (BMS). Feladatai közé tartoznak többek között cella- és pakk szintű mérések és állapotbecslések elvégzése az akkumulátor cellák biztonságos és kézben tartható működése érdekében. Kötelező feladata továbbá olyan védelmi funkciók megvalósítása, mint a hőmérséklet védelem illetve túlfeszültség és mélykisütés elleni védelmek, ugyanis ezek visszafordíthatatlanul károsítják a cellákat. Az előbbieken kívül természetesen számos más feladattal ruházható fel a BMS, mint például különféle adatok gyűjtése és számítása (ciklusszám, működési idő), kommunikáció más egységekkel (központi vezérlőegység), és az energiafelhasználás optimalizálása.

A BMS funkciói közül kiemelt fontosságú a töltöttségi szintet – State-of-Charge (SoC) – becselő algoritmus. A töltöttségi szint valós idejű, lehető legpontosabb számítása mind a fejlesztő, mint a felhasználó számára kulcsfontosságú és biztonságkritikus információ. Amennyiben a fejlesztő számára mindig elérhető a töltöttségi szint értéke, hatékonyan tudja használni a rendelkezésre álló akkumulátor kapacitását, optimalizálni tudja az energiafelhasználást, és növelni tudja az akkumulátor élettartamát, emellett megelőzheti az akkumulátor visszafordíthatatlan károsodását túlzott mértékű kisütés vagy töltés miatt.

Az előző pontban bemutatott igények következtében a fejlesztés felgyorsítása és megkönnyítése érdekében feltétlenül szükségessé válik a számítógépes segítség, még hozzá a szimuláció. Szimulációk segítségével gombnyomásra meghatározhatók az akkumulátor karakterisztikái különböző paraméterek változása esetén is, ami pedig igen gyakori az energiatárolók fejlesztése során. A szimuláció sikeressége és pontossága pedig elsősorban a megfelelő modell választásában rejlik.

Az alkalmazás azonban olyan speciális igényeket támaszt a rendszerrel és ezáltal a modellel szemben, amelyek kizárják egy általános érvényű, alkalmazástól független modell létezését. TDK dolgozatom keretén belül biztonság-kritikus rendszerekben is használható és helyüket megálló cella modelleket vizsgálok, majd szimulációk segítségével próbálok választani egy olyan modellt, amely a legalkalmasabb lehet energiatárolók méretezését segítő szimulációk végzésére, illetve egy BMS központi mikrokontrollerébe viszonylag kevés erőforrás felhasználással implementálható, valamint modell alapú SoC becslőkhöz is hatékonyan használható.

Abstract

The current consumption level of non-renewable fossil fuels is an unsustainable process due to the depletion of Earth's oil reserves and environmental issues. Owing to the high energy and power density of the modern lithium-ion cells, they are increasingly used to substitute the traditional fossil fuels.

However, the design and development of battery energy storage systems is a highly problematic task to the present day, because the developers have to face numerous specification points. Key aspects are the energy storage capacity, the maximum of obtainable power, the voltage levels of the individual cells and the cell pack, the upper limit of volume and weight as well as proper and safe functioning under a given load profile. The complexity of the design process is further increased by the load specialties and the mechanical limits originating from the development process. The non-linear characteristics of the battery and the predictability of behavior are critical to maximize security and efficiency.

An essential part of battery systems is the Battery Management System (BMS). Its responsibilities include performing cell and pack level measurements and state estimations to ensure the safe and controllable operation of battery cells, realizing protection functions such as temperature, over- and under-voltage protection, as they cause permanent damage in the cells. The BMS can be further improved to collect and calculate various data (number of cycles, operating time), communicating with other units (Central Control Unit) and optimizing energy usage.

The State-of-Charge (SoC) estimation algorithm carries an emphasized significance among the BMS functions. The real-time, most accurate calculation of SoC is key and safety-critical information for the developer, as well as for the user. If the SoC is always available, it is possible to effectively use the remaining battery capacity, optimize the power consumption, extend battery life and prevent permanent damage of the battery due to excessive charging or discharging.

As a result of the previously described claims and requirements, simulation-aided design becomes necessary in order to facilitate and accelerate the development. By using simulation, it is possible to determine battery characteristics at the touch of a button, even if various parameters change in the meantime, which is in fact very common in energy storage

developments. The success and precision of simulation lies mainly in the choice of an appropriate model.

However, it can be stated that the system and thus the model have to meet such special requirements due to the application, that the existence of a generally valid, application-independent model is highly unlikely. Within the scope of this paper, I will investigate cell models that are applicable and cope with safety-critical systems, and by simulation design I will identify the most suitable model for carrying out simulations in order to assist battery design, which can also be implemented in the core microcontroller of the BMS using relatively few resources, and can be used effectively for model based SoC estimation as well.

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás	2
Kivonat	3
Abstract.....	5
Tartalomjegyzék	7
1. Bevezetés.....	9
1.1 Problémakörnyezet	9
1.2 Szimuláció szerepe és irányai	10
2. Elméleti áttekintés	12
2.1 Modellezési lehetőségek.....	12
2.1.1 Thevenin alapú villamos modellek	14
2.1.2 Impedancia alapú villamos modellek	14
2.1.3 Üzemidő alapú villamos modellek	14
2.2 Vizsgált modellek	15
2.2.1 IR modell	15
2.2.2 RC modell.....	15
2.2.3 OTC modell	16
2.2.4 TTC modell.....	17
2.2.5 PNGV modell	18
2.2.6 További modellek	19
3. Modellek megvalósítása és vizsgálata.....	20
3.1 Általános információk és követelmények.....	20
3.1.1 Üresjárási feszültség becslése	22
3.1.2 Töltöttségi szint becslése	23
3.2 Modellek Simulink implementációja.....	24
3.2.1 IR modell	24
3.2.2 RC modell.....	26

3.2.3	OTC modell	27
3.2.4	TTC modell.....	29
3.2.5	PNGV modell	30
3.3	Vizsgálatok eredménye - javasolt modell.....	34
3.3.1	Skálázás	36
4.	Paraméter identifikáció	37
4.1	CCCV teszt	37
4.2	HPPC teszt.....	39
5.	Értékelés és további feladatok.....	40
	Irodalomjegyzék	41

1. Bevezetés

1.1 Problémakörnyezet

A nem megújuló energiaforrások körébe tartozó fosszilis tüzelőanyagok jelenlegi mértékű felhasználása több szempontból is tarthatatlan folyamat. Az olajfelhasználás jelentős részéért felelős belső égésű motorok környezetszennyező hatása mellett a Föld olajkészleteinek drasztikus mértékű fogyatkozása is indokolja egy új helyettesítő energiaforrás használatba kerülését. Tagadhatatlan tény, hogy még mindig nagyságrendekkel kisebb teljesítménysűrűség érhető el az akkumulátoros technológiákkal, azonban a korszerű lítium-ion cellák a magas energia- és teljesítménysűrűségüknek köszönhetően már egyre elterjedtebb helyettesítőjét képzik hagyományos fosszilis energiahordozóknak. Emellett az energiahatékonyság, CO₂ kibocsátás és zajszint csökkentés kimagasló fontosságát szem előtt tartva, a hibrid- és tisztán elektromos hajtások e korszerű lítium alapú akkumulátoros technológiának köszönhetően igen figyelemre méltó kutatás-fejlesztési irányokat diktálnak, és kiemelkedő eredményeket szolgáltatnak.

Az akkumulátoros energiatárolók tervezése és fejlesztése viszont a mai napig igen problematikus feladat, ugyanis a fejlesztőknek számos specifikációs ponttal kell szembe nézniük. Kulcsfontosságú szempont többek között az energiatárolók kapacitása, a kinyerhető teljesítmény maximuma, a cellák illetve a cellapakk feszültség szintje, a maximálisan megengedhető tömeg és térfogat valamint adott terhelési profil mellett megfelelő és biztonságos működés. A méretezési eljárás összetettségét tovább fokozzák a terhelés specialitásai és a fejlesztési folyamatban előkerülő mechanikai korlátok. Az akkumulátor nemlineáris karakterisztikája és a viselkedésének kiszámíthatósága kritikus pont a megfelelő biztonsági szint és a hatékonyság maximalizálása szempontjából.

A korszerű, lítium alapú akkumulátor cellákból felépülő energiatárolók (továbbiakban akkumulátoros rendszerek) elengedhetetlen része a felügyeleti rendszer, angol szakirodalomban Battery Management System (BMS). Feladatai közé tartoznak többek között cella- és pakk szintű mérések és állapotbecslések elvégzése az akkumulátor cellák biztonságos és kézben tartható működése érdekében. A pakk szintű feszültségek és áramok mérése a rendszerszintű működés, a cella szintű feszültség- és hőmérsékletmérések az egyes cellák működésének felügyeletül szolgálnak alapul. A State-of-Charge (SoC) vagy Depth-of-

Discharge (DoD), valamint a State-of-Health (SoH) becslése mind az akkumulátor pillanatnyi állapotáról szolgáltatnak hasznos információt. Kötelező feladata továbbá olyan védelmi funkciók megvalósítása, mint a túlmelegedés és fagyásvédelem, vagy a túlfeszültség védelem, ugyanis töltéskor túl magas cellafeszültség elérése esetén az akkumulátor robbanásveszélyes is lehet, kisütéskor pedig feszültségbeesés esetén egyaránt visszafordíthatatlanul károsodik. Az előbbieken kívül természetesen számos más feladattal ruházható fel a BMS, mint például különféle adatok gyűjtése és számítása (ciklusszám, működési idő), kommunikáció más egységekkel (központi vezérlőegység), és az energiafelhasználás optimalizálása töltéskiegyenlítő konverterekkel.

A BMS funkciói közül szeretném kiemelni a töltöttségi szintet (SoC) becslő algoritmusok fontosságát. Belső égésű motorral működő járművek esetén az üzemanyagszint mérő berendezéssel hasonlítható össze. A töltöttségi szint pontos valós idejű számítása mind a fejlesztő, mind a felhasználó számára kulcsfontosságú lehet. Biztonság-kritikus rendszerekben, mint például egy személygépjármű, vagy még inkább egy repülőgép esetén a töltöttségi szint helytelen számítása és kijelzése akár emberi életetekbe is kerülhet, de a mindennapos használatban is igen hasznos információ. Amennyiben a fejlesztő számára mindig elérhető a töltöttségi szint pontos értéke, hatékonyan tudja használni a rendelkezésre álló akkumulátor kapacitását, optimalizálni tudja az energiafelhasználást, és növelni tudja az akkumulátor élettartamát. Emellett megelőzheti az akkumulátor visszafordíthatatlan károsodását túlzott mértékű kisütés vagy töltés miatt.

1.2 Szimuláció szerepe és irányai

Az előző pontban bemutatott igények következtében a fejlesztés felgyorsítása és megkönnyítése érdekében feltétlenül szükségessé válik a számítógépes segítség, méghozzá a szimuláció. Szimulációk segítségével különböző paraméterek változása esetén is gombnyomásra nyomon követhető az akkumulátoros rendszer dinamikus viselkedése az adott alkalmazásban.

A szimulációnak két meghatározó húzóereje van. Első az offline szimuláció, melynek alapvető célja az akkumulátor rendszer szintű optimalizálása különféle terhelési profilok esetén. Ezen kívül az offline szimuláció segítségével lehetőség nyílik akár olyan szélsőséges állapotok vizsgálatára, amelyek valóságos körülmények között nehezen megvalósíthatóak, illetve veszélyt jelentenek a vizsgált berendezésre, vagy akár a vizsgálatot végző személyekre.

Ilyen szélsőséges állapot villamos hajtású járművekben a DC buszon keletkező rövidzár, de emellett szimulálható az akkumulátor viselkedése például a DC busz feszültségének tranziens beesése, vagy más hibajelenség előfordulása esetén. Második húzóerő az akkumulátor SoC kalkulációja, melyre már online szimuláció során is szükség van. Az SoC kalkulációra számos módszer létezik a szakirodalomban, melyek közül az egyik legelterjedtebb működési mechanizmusa a következő: A modell a cella kimeneti áramának integrálásából számított SoC alapján meghatározza a cella feszültségét, amelyet a BMS mér, és a mért és számított értékek különbségéből kapott hibajel alapján egy szabályozó korrigálja az aktuális SoC-t.

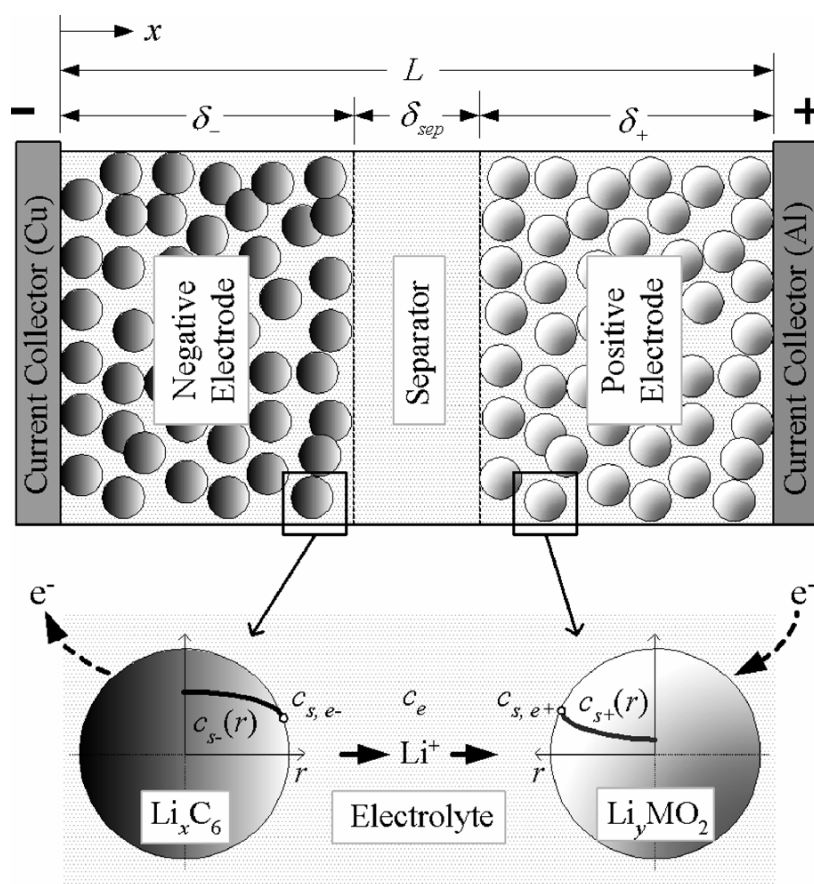
A szimuláció sikeressége és pontossága elsősorban a megfelelő modell választásában rejlik. Az alkalmazás azonban olyan speciális igényeket támaszt a rendszerrel és ezáltal a modellel szemben, hogy nem létezik általános érvényű, alkalmazástól függetlenül felhasználható modell.

A TDK dolgozatomban keretein belül olyan modelleket azonosítok, melyek megfelelnek az alábbi követelményeknek. A modell legyen mindenekelőtt használható és helyét megálló biztonságkritikus rendszerekben. Nem fordulhat elő sem hibás érték, sem számottevő mértékű eltérés a modell által számított és a valós értékek között. A modellnek alkalmasnak kell lennie az energiatárolók méretezésének megkönnyítésére. Itt többek között olyan szempontok kerülnek előtérbe, mint a skálázhatóság, például nagyobb teljesítményigény esetén az újabb soros vagy párhuzamos cellák hozzáfűzése a modellben egyértelmű paraméterváltoztatásokkal reprodukálhatónak kell lennie. Elvárás továbbá, hogy a modell számítási erőforrásigénye olyan kereteken belül mozogjon, hogy egy közép kategóriás mikrokontrollerbe is implementálható legyen, ne legyen szükség külön DSP egységre, vagy korszerű CPU-ra a modell futtatásához egy modell-alapú SoC becslő algoritmus számára.

2. Elméleti áttekintés

2.1 Modellezési lehetőségek

A tudományágak széles spektruma kínál lehetőséget akkumulátoros energiatárolók modellezésére, különböző pontossággal, felhasználhatósággal és komplexitással. Az elektrokémiai modellek elsősorban az akkumulátorok fizikai tervezési szempontjainak optimalizálására és az energiatermelés alapvető mechanizmusainak jellemzésére használhatóak fel, valamint az akkumulátortervezési paraméterek és a makroszkopikus (pl. feszültség és áram) illetve mikroszkopikus (pl. koncentráció-eloszlás) jellemzőinek összekapcsolására.



2.1. ábra Elektrokémiai modell

A 2.1. ábrán látható elektrokémiai modell azt szemlélteti, hogy az akkumulátor kisütése közben a negatív elektródában a lítium ionok a szén részecskék felületére diffundálnak, ahol reakcióba lépnek és átkerülnek az elektrolit oldatba. A pozitívan töltött részecskék diffúzió és migráció segítségével átjutnak az elektrolit oldaton, ahol újra reakcióba

lépnek és diffundálnak a fém-oxid aktív anyagi részecskébe. A negatív elektródában lejátszódó reakciók során elektronok termelődnek, a pozitív elektródában pedig elnyelődnek, ám útjukat akadályozza egy elektromosan szigetelő elválasztó réteg, így egy külső áramkörön kell átjutniuk [1]. A modell célja az akkumulátor belső potenciál-eloszlásának, koncentráció gradienseinek és töltöttségi szintjének becslése, külső áram és feszültség mérési eredmények alapján.

A szakirodalomban még számos, különböző célokra felhasználható elektrokémiai modell található. Mindazonáltal ezek igen komplex és számításigényes modellek, ugyanis időben és térben változó parciális differenciál-egyenletrendszereket használnak, amelyek szimulációja akár napokat is igénybe vehet, komplex numerikus algoritmusok szükségesek hozzá, valamint szabadalmazottságuk miatt nehezen megszerezhető akkumulátor-specifikus információk.

A matematikai modellek általában túl elvonatkoztatottak ahhoz, hogy gyakorlati jelentésük legyen, de a rendszertervezők számára hasznosak lehetnek olyan empirikus egyenletek vagy matematikai módszerek felírásában, mint például sztochasztikus közelítések a rendszer szintű viselkedés előrejelzésére, úgymint az akkumulátor töltöttségi szintje, hatékonysága és kapacitása. Létezik olyan matematikai modell, amely lehetőséget nyújt az akkumulátor üzemidejének becslésére különböző terhelési profilok alapján [2], és olyan is, amely egy cellapakk energiafelhasználását hivatott optimalizálni [3]. Viszont az áramkör szimulációhoz és optimalizációhoz szükséges feszültség-áram információt a matematikai modellek nem tudnak szolgáltatni, ezen kívül igen pontatlan, 5% – 20% nagyságrendű hiba várható az eredményekben. Például a töltöttségi szint becslő Peukert törvény maximális hibája a 100%-ot is elérheti időben változó terhelésre [4].

A villamos modellek feszültségforrásokból, ellenállásokból és kapacitásokból felépíthető helyettesítő kapcsolások. Pontosságuk az elektrokémiai és a matematikai modellek közé tehető (nagyjából 1% – 5% hiba). Az elektronikai áramkörökbe és rendszerekbe integrálhatóságuk miatt villamosmérnökök számára intuitív, hasznos és könnyen kezelhető megoldást nyújtanak, és kiválóan implementálhatóak szimulátor programokban. Az ólomsavastól kezdve a polimer Li-ion akkumulátorig sokféle villamos akkumulátor modell létezik. Legtöbbjük az alábbi három kategóriába sorolható: Thevenin, impedancia, és üzemidő alapú modellek.

2.1.1 Thevenin alapú villamos modellek

A Thevenin alapú villamos modellek egy feszültséggenerátort használnak az akkumulátor üresjárási feszültségének modellezésére, a különböző terhelésekre adott tranziens viselkedésért pedig soros R illetve RC tagok felelősek. Hátrányuk, hogy az akkumulátor üresjárási feszültségét a töltöttségi szinttől függetlenül konstansnak feltételezik, amely mind üresjárási állapotban, mind terhelés közben jelentős pontatlansághoz vezet. Egyes továbbfejlesztett változatai viszont a töltöttségi szint és az egyenáramú viselkedés jóslása érdekében további komponensekkel bővítik az alapkoncepciót, például egy változó kapacitás az üresjárási feszültség - SoC függés modellezésére, matematikai egyenletek a töltöttségi szint számítására, vagy egy bonyolult áramköri kapcsolás a üresjárási feszültség meghatározására. A Thevenin alapú villamos modellek tehát könnyen és változatosan bővíthetők, ezáltal alkalmasak lehetnek a töltöttségi szint pontos és egyszerű meghatározására áramkör szimulátor programok segítségével.

2.1.2 Impedancia alapú villamos modellek

Az impedancia alapú villamos modellek az impedancia spektroszkópia módszerét alkalmazva határozzák meg az akkumulátor váltóáramú ekvivalens modelljét a frekvenciatartományban, azután egy bonyolult áramköri hálózattal illesztik az impedancia spektrumot. Az illesztési eljárás nehéz, komplex és nem intuitív, továbbá kizárólag állandó töltöttségi szint és hőmérséklet mellett működik [5], így nem alkalmazható az egyenáramú viselkedés meghatározására.

2.1.3 Üzemidő alapú villamos modellek

Az üzemidő alapú villamos modellek komplex áramköri hálózattal szimulálják az akkumulátor üzemidejét és egyenáramú feszültség reakcióját állandó terhelés mellett. A szakirodalomban található SPICE szimulátorral implementált folytonos idejű modell [6], illetve VHDL (Very high speed Hardware Description Language) kóddal implementálható diszkrét idejű modell is [7], viszont változó terhelés mellett nagyon pontatlanok, nem használhatóak a feszültség karakterisztika meghatározására. [8]

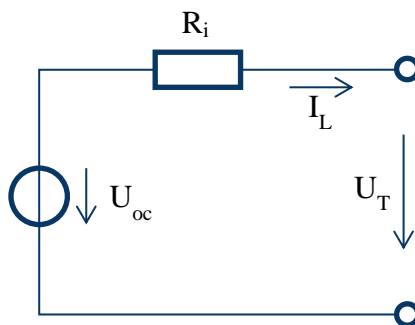
2.2 Vizsgált modellek

Mivel szimulációra leginkább a villamos modellek közül a Thevenin alapú modellek alkalmasak, emellett a szakirodalomban széles választékban megtalálhatóak az egyszerűtől kezdve a komplex kibővített változatokig, a továbbiakban ezek a modellek fogják a vizsgálat tárgyát képezni. Az összes cellamodell esetében az előjel konvenció az I_L cella áramra a következő: pozitív, ha a cellát kisütjük, és negatív, ha töltjük.

2.2.1 IR modell

A belső ellenállás (Internal Resistance) modell a legegyszerűbb a vizsgált modellek közül. A 2.2. ábrán található U_{oc} (open circuit voltage) feszültségforrás az akkumulátor üresjárású feszültségéért felelős, az R_i (internal resistance) ellenállás pedig a terhelés esetén fellépő feszültségcsökést valósítja meg. Mivel nem tartalmaz reaktáns elemet, így a kimeneti feszültség, U_T (terminal voltage) meghatározása egyetlen egyenlettel, integrálás illetve deriválás nélkül felírható:

$$U_T = U_{oc} - R_i \cdot I_L \quad (2.1)$$



2.2. ábra Az IR modell kapcsolási rajza

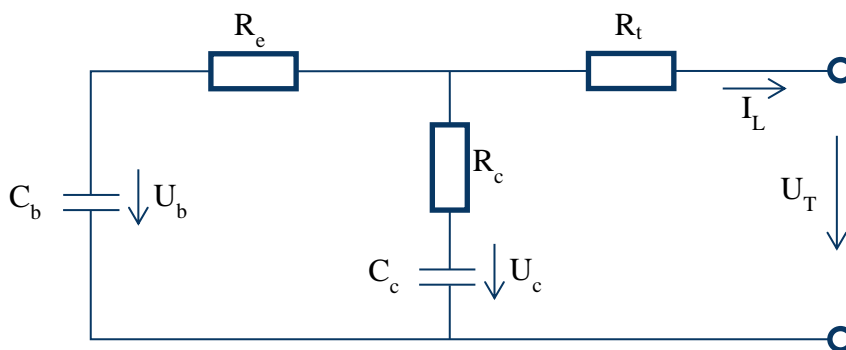
2.2.2 RC modell

Az RC modellt a nemzetközileg elismert SAFT akkumulátortervező és gyártó cég fejlesztette ki, és kiváló eredményeket ért el az Advisor szoftverben implementálva. A 2.3. ábrán látható, hogy mindössze két kondenzátort (C_b , C_c) és három ellenállást (R_e , R_c , R_t) tartalmaz, feszültségforrást viszont nem. A C_c kondenzátor, amely alacsony kapacitás értékkel rendelkezik, az akkumulátor felületén lejátszódó folyamatokért felelős, így felületi kondenzátornak hívják. A C_b kondenzátor nagyon nagy kapacitás értékkel rendelkezik, és az akkumulátor kémiai úton történő töltéstároló képességével vonható párhuzamba, így

energiatároló kondenzátornak hívják. Az R_t , R_e és R_c ellenállások sorra a lezáró, végső és kondenzátor ellenállások (terminal, end & capacitor resistor) [9]. Mivel a modell nem tartalmaz vezérelhető feszültségforrást, a paraméterek SoC függőek, különben a modell képtelen lenne az akkumulátor nemlineáris töltési és kisütési karakterisztikáját visszaadni. Végül U_b és U_c rendre a C_b és C_c kondenzátoron eső feszültségek. Az áramkör elektromos viselkedését az alábbi állapotegyenletek írják le:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L] \quad (2.2)$$

$$[U_T] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \left[-R_t - \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \right] [I_L] \quad (2.3)$$



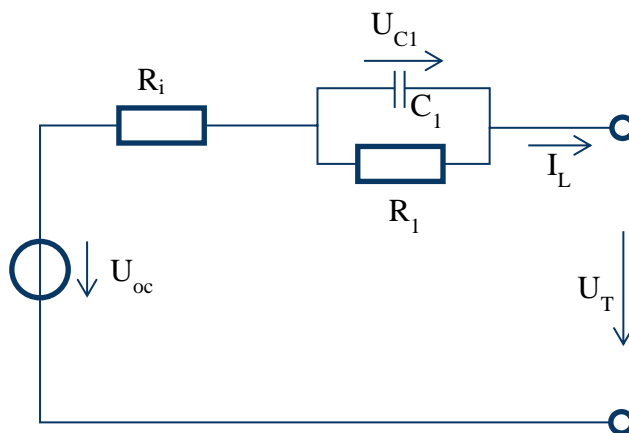
2.3. ábra Az RC modell kapcsolási rajza

2.2.3 OTC modell

Az egy időállandós (One Time Constant) modell, amelyre a szakirodalomban gyakran Thevenin modellként hivatkoznak, az IR modell kiegészítése egy további RC taggal. A párhuzamos RC tag az akkumulátor dinamikus karakterisztikáját hivatott modellezni. A terhelőáram ugrásszerű változása esetén a polarizációs jelenségeknek köszönhetően a cellafeszültség ugrása után exponenciális jelleggel áll be egy végső üresjárású értékre, amely egy RC taggal kiválóan modellezhető. Az IR modellhez hasonlóan a 2.4. ábrán látható U_{oc} itt is az akkumulátor üresjárású feszültségéért felelős feszültségforrás, az R_i ellenállás pedig a terhelés esetén fellépő feszültségcsökést valósítja meg. Az akkumulátor tranzienst viselkedéséért az R_1 ellenállásból és C_1 kondenzátorból álló tag felelős, a rajtuk eső feszültség pedig U_{C1} . A modell működést leíró egyenletek:

$$\dot{U}_{C1} = -\frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_{C1} + \frac{1}{C_1} \cdot I_L \quad (2.4)$$

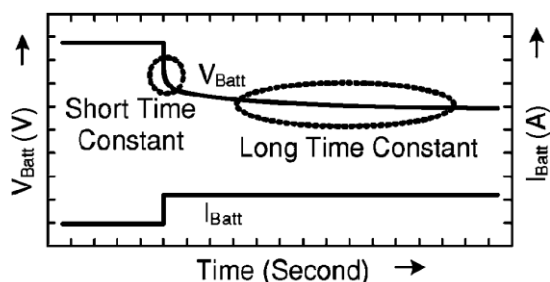
$$U_T = U_{oc} - U_{C1} - R_i \cdot I_L \quad (2.5)$$



2.4. ábra Az OTC modell kapcsolási rajza

2.2.4 TTC modell

Az két időállandós (Two Time Constant) modell, amely a szakirodalomban Double Polarization, Enhanced Thevenin és Combined Model néven is előfordul, az OTC modell kiegészítése egy további sorosan csatlakoztatott párhuzamos RC taggal. Ez jelentős mértékű pontosítást jelent az OTC-hez képest, ugyanis a terhelőáram ugrásszerű változása esetén a belső ellenálláson fellépő feszültségugrás utáni exponenciális jellegű folyamat két részre bontható. Először egy meredekebb, kisebb időállandóval leírható, majd egy laposabb, nagyobb időállandójú exponenciális görbe szuperpozíciója precízen közelíti a valóságot.



2.5. ábra Az akkumulátor tranziens viselkedése [8]

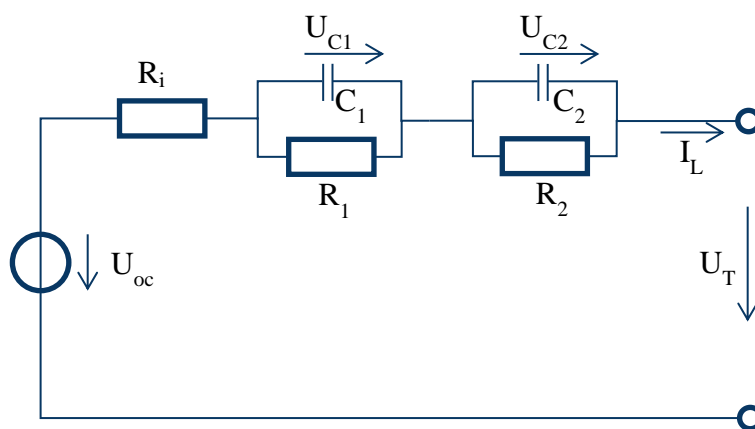
A kisebb időállandójú folyamatért az elektrokémiai polarizáció felelős, a nagyobb időállandóval leírható folyamat pedig a koncentrációs polarizáció jelenségét reprezentálja [10]. A 2.6. ábra mutatja a modell áramkörti kapcsolási rajzát. U_{oc} a jól ismert üresjárási

feszültség feszültségforrása, az R_i ellenállás a terhelés esetén fellépő feszültségesésért felelős. Az akkumulátor tranziens viselkedésének kis időállandójú komponensét az R_1 ellenállásból és C_1 kondenzátorból álló tag írja le, a nagy időállandójú tag, pedig R_2 ellenállásból és C_2 kondenzátorból áll. Az RC tagokon eső feszültségek sorra U_{C1} és U_{C2} . A következő egyenletrendszer írja le a modell működését:

$$\dot{U}_{C1} = -\frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_{C1} + \frac{1}{C_1} \cdot I_L \quad (2.6)$$

$$\dot{U}_{C2} = -\frac{1}{R_2 C_2} \cdot U_{C2} + \frac{1}{C_2} \cdot I_L \quad (2.7)$$

$$U_T = U_{oc} - U_{C1} - U_{C2} - R_i \cdot I_L \quad (2.8)$$



2.6. ábra A TTC modell kapcsolási rajza

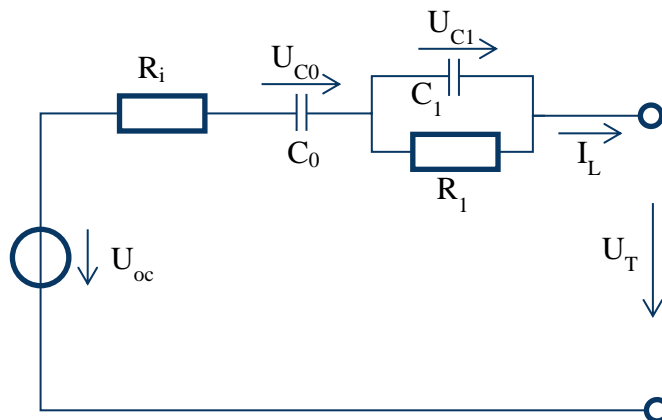
2.2.5 PNGV modell

A PNGV modell, amely nevét a létrehozásáért felelős, 1993-ban alapított Partnership for a New Generation of Vehicles programról kapta, egyetlen soros kondenzátor hozzáadásával generálható az OTC modellből. Áramköri megvalósítása a 2.7. ábrán látható. U_{oc} itt is az akkumulátor üresjárási feszültségéért felelős feszültségforrás, az R_i ellenállás pedig a terhelés esetén fellépő feszültségesést valósítja meg. A C_0 kondenzátor a terhelőáram hatására bekövetkező OCV változást modellezi. Az akkumulátor tranziens viselkedéséért az R_1 ellenállásból és C_1 kondenzátorból álló tag felelős, a rajtuk eső feszültség pedig U_{C1} . A modell működést leíró egyenletrendszer a következő:

$$\dot{U}_{C0} = \frac{1}{C_0} \cdot I_L \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_{C1} = -\frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_{C1} + \frac{1}{C_1} \cdot I_L \quad (2.10)$$

$$U_T = U_{oc} - U_{C0} - U_{C1} - R_i \cdot I_L \quad (2.11)$$



2.7. ábra A PNGV modell kapcsolási rajza

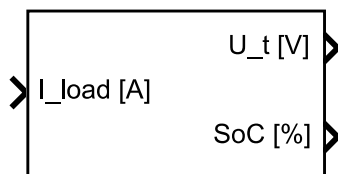
2.2.6 További modellek

Az előző pontokban bemutatott modelleken kívül számos megtalálható a szakirodalomban, mint például az improved PNGV, amely egy további RC taggal pontosítja a transziens viselkedést, vagy a Warburg impedanciás TTC modell, amely impedancia a lítium ionok diffúziójának hatását reprezentálja a frekvenciatartományban. Ezen kívül a TTC modell is tovább bővíthető tetszőleges számú RC taggal, a transziens viselkedés még pontosabb ábrázolásának céljával. Ezen dolgozat keretein belül viszont csak az előbbieken bemutatott öt, fejlesztési és ipari alkalmazásokban legelterjedtebb modell vizsgálatára térek ki.

3. Modellek megvalósítása és vizsgálata

3.1 Általános információk és követelmények

A modelleket az R2013b verziójú Matlab/Simulink segítségével implementáltam. Kiindulásnak mindig az áramköri megvalósításból kinyert egyenletek szolgáltak. Az egyes modell blokkok létrehozásának fő követelménye az volt, hogy a bemeneti jelként megadható terhelőáram (negatív érték esetén töltőáram) gerjesztésre a kimeneten a cella pillanatnyi feszültsége legyen leolvasható. Második szempontként lehetőséget kell biztosítani a felhasználó számára az SoC inicializálására, valamint hogy a szimuláció során az SoC pillanatnyi értéke monitorozható legyen. Ezen specifikációs pontoknak megfelelően az összes cella blokk kívülről megfigyelve a 3.1. ábrán látható alakot fogja ölteni.



3.1. ábra Általános modell blokk

A szimuláció számítási műveleteihez szükség van további, konstansként felhasználható paraméterekre. Egy blokkra duplán kattintva módosíthatóak a modell paramétereinek értékei, melyek modellenként különbözőek. Két paraméter viszont összes blokkban megadható, az *Initial State-of-Charge [%]*, tehát a kezdeti töltöttségi szint százalékban, valamint a *Nominal cell capacity [Ah]*, vagyis a névleges cellakapacitás. A többi, modell-specifikus paraméter az áramköri megvalósításban szereplő diszkrét elemek értékeinek felel meg, SI mértékegységben.

A továbbiakban egy 2.6 Ah névleges kapacitású, 3.6 V névleges feszültségű lítium-ion akkumulátorcella paramétereit vettem alapul, melyet a Siemens Zrt. biztosított számomra a TDK munkámhoz.

A modellek megvalósításánál az alábbi feltételezésekkel éltem:

1. A modellparaméterek konstansok a töltési és kisütési ciklusok alatt, nem függenek az áram nagyságától, az SoC-től és a hőmérséklettől.

2. Az akkumulátor kapacitása nem függ az áram nagyságától (Peukert effektus) és a hőmérséklettől.
3. Az önkisülés jelensége nincs reprezentálva a modellben.
4. Az akkumulátor nem rendelkezik memória effektussal és a kisütési ciklusoktól nem használódik el.

Az 1. feltételezésre azért van szükség, mert a modellparaméterek egyéb paramétereiktől való függésének megállapításához igen bonyolult identifikációs eljárások szükségesek (lásd 3.3.1. fejezet). Emellett kifejezetten előnyös, ha sikerül a vizsgálatok során egy olyan modellt azonosítani, amely konstans paraméterekkel is képes leírni a dinamikus viselkedést.

A Peukert törvény az akkumulátor kapacitását fejezi ki a kisütő áram nagyságának függvényében az alábbi képlet alapján:

$$t = H \left(\frac{C}{I \cdot H} \right)^k \quad (3.1)$$

Ahol H az elméleti kisütési idő, C a hozzá tartozó elméleti kapacitás, I a valódi kisütő áram nagysága, k az akkumulátorra jellemző Peukert konstans, t pedig a kisítéshez szükséges valódi időtartam. Viszont ez az effektus nem minden akkumulátor típusra jellemző, és a vizsgált cellára az adatlapja alapján egyértelműen nem érvényes. A 3.2. ábrán látható kisütési karakterisztikából látszik, hogy 0.5 A és 20 A esetén körülbelül 0.1 Ah-val nagyobb az akkumulátor kapacitása, mint 2.5 A és 10 A esetén. Az áramfüggése mellett a kapacitás hőmérsékletfüggése is egyértelműen definiálva van az adatlapban, ám mivel a névleges kapacitás változtatható paraméter minden modell esetében, egyelőre fölösleges bonyolítás lenne a hőmérsékletet, mint újabb paramétert fölvenni a rendszerbe.

Az önkisülés jelensége lítium-ion cellák esetében egy hónapra 1 és 8 % közé tehető, amely csak akkor nem elhanyagolható, ha minimum egy hetes nagyságrendben vannak használaton kívül, amely a jelenlegi alkalmazásra nem jellemző, így a modellezés során nem vettem figyelembe.

A memória effektus jelensége főleg nikkell-kadmium akkumulátorokra jellemző. Ha ismételten csak egy bizonyos hányadát sütik ki egy Ni-Cd cella kapacitásának, a ciklusszám növekedésével a cella névleges kapacitása egyre inkább a jellemzően elhasznált kapacitást fogja közelíteni. Ezzel szemben a ciklusszámból adódó általános felhasználható kapacitás

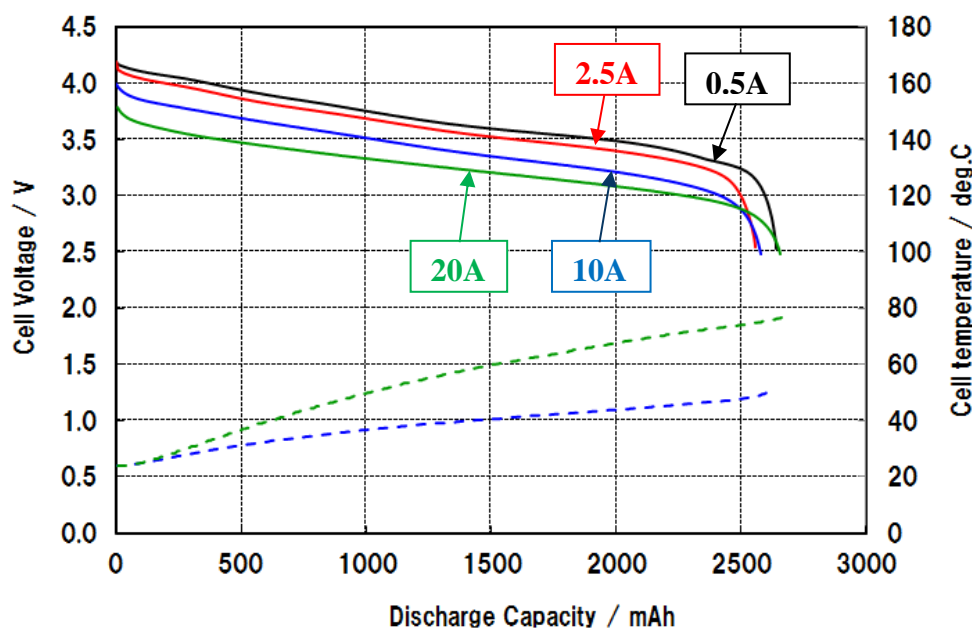
csökkenés a Li-ion akkumulátorokra is jellemző, viszont a hőmérsékletfüggéshez hasonlóan egy egyszerű paraméter átállítással figyelembe lehet venni a szimuláció elindítása előtt. Ráadásul ez a karakterisztika jó közelítéssel lineáris, így a névleges kapacitás új értéke egyszerűen becsülhető.

3.1.1 Üresjárési feszültség becslése

Mivel több modellben is szükség van az akkumulátor üresjárési feszültségének becslésére, valamint a módszer nem magától értetődő, ebben a fejezetben külön kitérek a meghatározására és felhasználására.

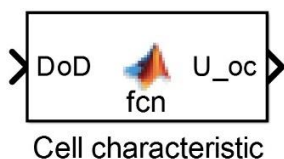
Az üresjárési feszültség becsléséhez szükségünk van az akkumulátorcella adatlapjára, ugyanis egy kisütési görbe már elegendő információt tartalmazhat az üresjárési feszültség pontos meghatározására. A 3.2. ábrán látható a cella feszültség-kisütési vagy más néven felhasznált kapacitás karakterisztikája, négy különböző értékű áramgenerátoros kisütés esetén.

A görbék egyike sem az üresjárési feszültséget reprezentálja, ugyanis az akkumulátor minden esetben terhelve van, ám látszik, hogy főleg 10%-nál nagyobb töltöttségi szint felett a görbék szinte teljesen párhuzamosak, így az üresjárési feszültség görbe egy egyszerű offset hozzáadásával jól közelíthető. Mivel az üresjárési állapotot leginkább a 0.5A-es kisütési görbe közelíti, annak pontjait beolvastva kapott adathalmazt szolgált kiindulásként a karakterisztika meghatározásához.



3.2. ábra Cella kisütési karakterisztikája

A 3.2. ábrán látható karakterisztika értelmezési tartománya a kisütési kapacitás mAh-ban megadva, viszont az alkalmazáshoz célszerűbb a kisütési szintre, azaz százalékosan megadott DoD értékre definiálni a görbét, így az értelmezési tartomány a [0,100] intervallumra lett skálázva. A Matlab Curve Fitting Toolbox segítségével egy 20-ad rendű polinom illesztése után ofszet hozzáadására volt szükség. Mivel a cella teljesen feltöltve 4.2 V üresjárási feszültséggel rendelkezik, a polinom kezdőértékét 4.2 V-ra ofszet-elve a cella U_{oc} üresjárási feszültség – DoD karakterisztikájának megfelelő becslését kaptuk.

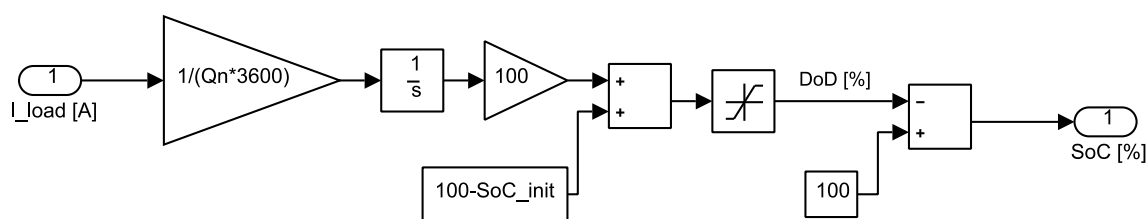


3.3. ábra A kisütési karakterisztika Simulink blokkja

A karakterisztika Simulinkben egy MATLAB Function nevű blokkal valósítható meg, amely 3.3. ábrán látható. Ennek bemeneti paramétere a DoD százalékban megadva, kimenete pedig az üresjárási feszültség.

3.1.2 Töltöttségi szint becslése

Mivel az akkumulátor méretezési eljárásához használható offline szimuláció számítógép segítségével, a modellekben folytonos idejű integrátorokat alkalmaztam, többek között az SoC becslésére is. A 3.4. ábrán látható az SoC becslő megvalósítása Simulinkben.



3.4. ábra Folytonos idejű SoC becslő

A becslő bemenete a terhelőáram Amperben mérve, kimenete az SoC százalékban, amelyet az alábbi képlet szemléltet:

$$SoC_{\%}(t) = SoC_{init\%} - \frac{100}{Q_n \cdot 3600} \int_0^t I_L(t) dt \quad (3.2)$$

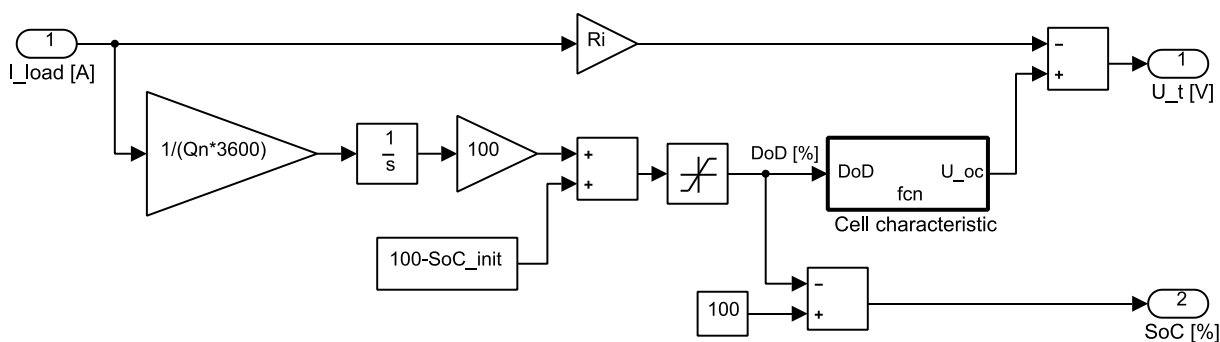
A 3600-as szorzóra azért van szükség a névleges kapacitás mellett, hogy annak mértékegysége Amperszekundum legyen a gyakorlatban használt és paraméterként definiált Amperóra helyett. A szaturációs blokk megakadályozza, hogy 100-nál nagyobb, vagy esetleg negatív DoD értéket kapjunk, amelyre azért van szükség, mert az illesztett U_{oc} - DoD görbe értelmezési tartományából kilépnénk, és nem valós értéket kapnánk.

Természetesen ez a becslő mikrokontrollerbe már nem implementálható, ugyanis ott a folytonos idejű integrátor már nem közelíthető elegendően kicsi mintavételi idejű diszkrét idejű integrátorral, így biztonságkritikus rendszerekben nem megengedhető mértékű lineáris hibát eredményezne. Szerencsére e probléma megoldására több módszer is létezik, mint például az Kálmán szűrőt alkalmazó modell alapú becslők [11].

3.2 Modellek Simulink implementációja

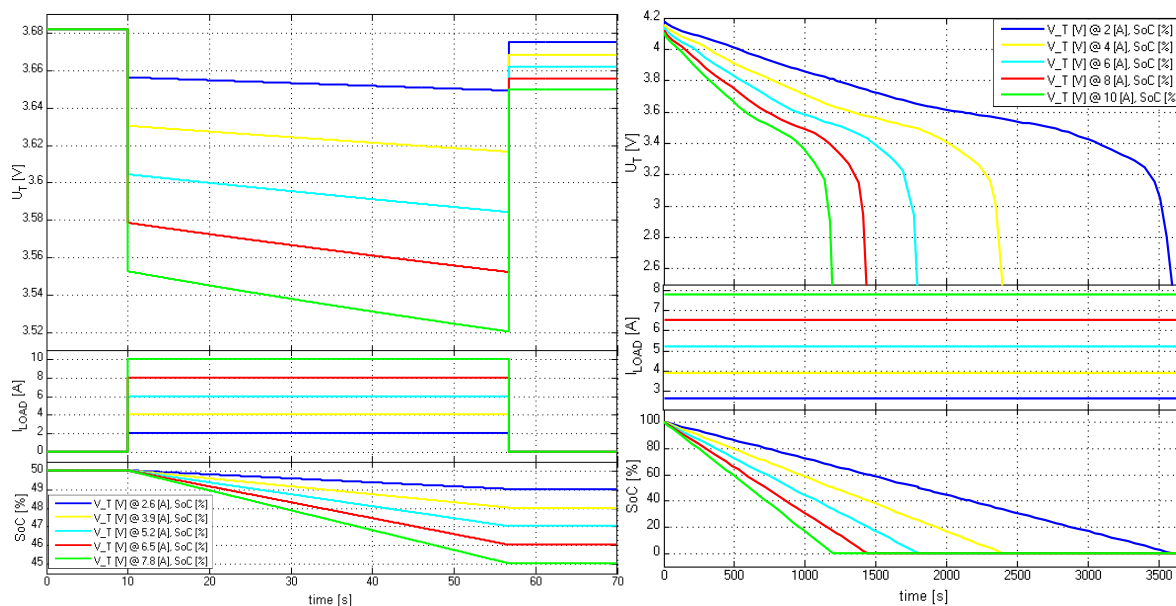
3.2.1 IR modell

Mint korábban is említettem, az IR a legegyszerűbb a vizsgált modellek közül, és ez a 3.5. ábrán látható Simulink megvalósításából is látszik. Egyetlen modell-specifikus paramétere az *Internal Resistance* [Ω], tehát az akkumulátor belső ellenállása.



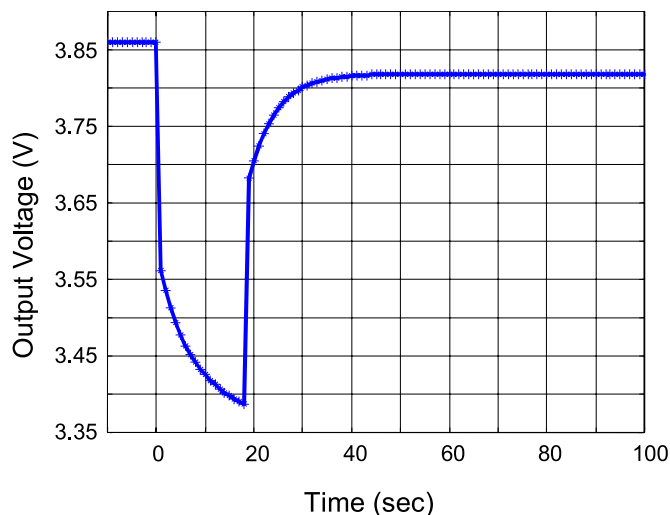
3.5. ábra IR modell Simulink implementációja

Az SoC becslő által számított DoD szolgál bemenetként az üresjárási feszültség karakterisztikának. A következő ábrán látható a cella transziens viselkedése és teljes kisütése különböző terhelő áramok esetén.



3.6. ábra Az IR modell dinamikus és kisütési karakterisztikája

Az impulzusválaszról könnyen észrevehető, hogy csak a belső ellenállást tartalmazza a modell. A következő ábrán szereplő valódi mérésből kapott karakterisztikával összehasonlítva első ránézésre megállapítható, hogy e modell alkalmazása esetén jelentős hibára kell számítani.



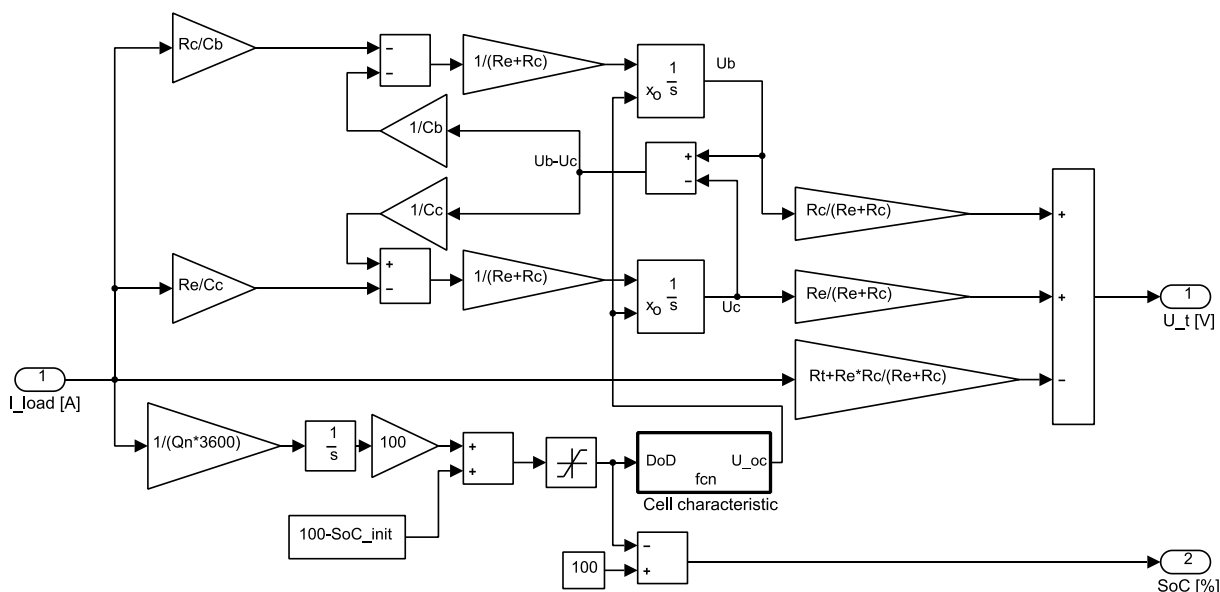
3.7. ábra Valódi akkumulátor karakterisztika [14]

A modell rendkívüli egyszerűségét mind előnyként, mind hátrányként fel lehet sorolni. Előny, mivel egyszerűen implementálható a szimulációs modellje, ezen kívül rendkívül alacsony a számítási erőforrás igénye. Előny továbbá, hogy egyetlen paraméterét egyértelműen és pontosan lehet identifikálni. Hátrány viszont, mivel a valós folyamatoktól

eltérő, pontatlan eredményekhez vezethet, főleg ugrásszerű terhelőáram változások esetén. Ezen kívül fontos megemlíteni, hogy tranziens viselkedés vizsgálatára sem kis- sem nagyfrekvenciás tartományban nem alkalmas.

3.2.2 RC modell

Az RC modell rendelkezik a legbonyolultabb egyenletrendszerrel az öt vizsgált modell közül, és ez a 3.8. ábrán látható Simulink megvalósításán is látszik.



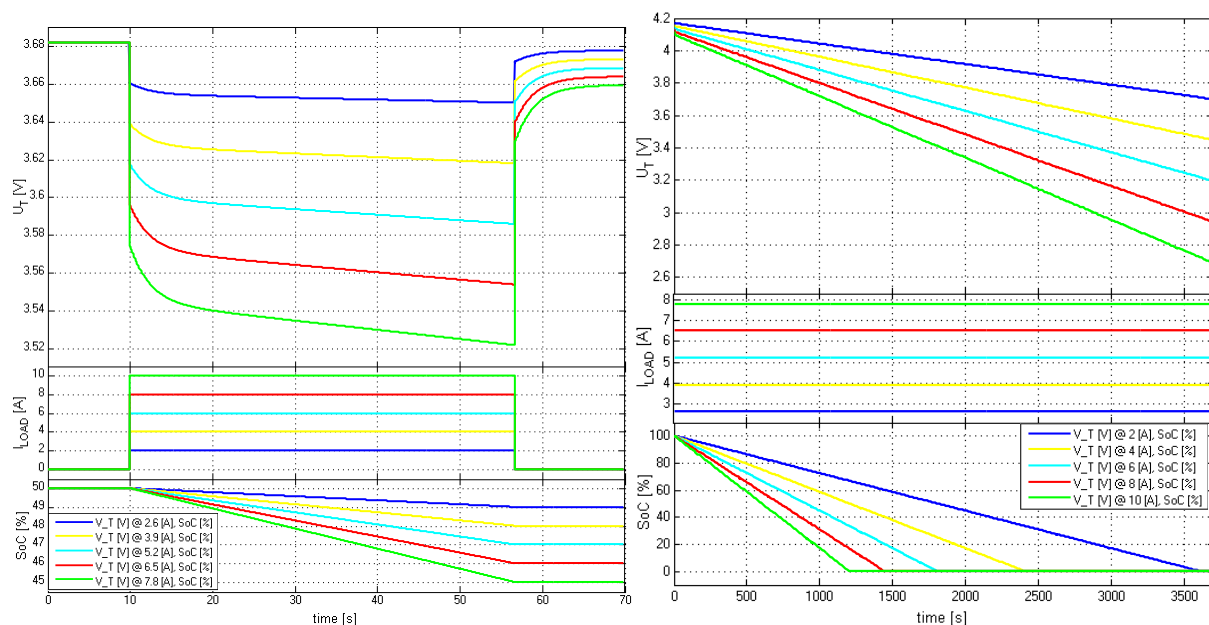
3.8. ábra RC modell Simulink implementációja

A modell egyedi paramétereit a következők:

- C_b : Bulk Capacity [F], energiatároló kondenzátor
- R_c : End Resistance [Ω], végső ellenállás
- C_c : Surface Capacity [F], felületi kondenzátor
- R_c : Capacitor Resistance [Ω], kapacitás ellenállás
- R_t : Terminal Resistance [Ω], lezáró ellenállás

Mivel ez az egyetlen modell, amely nem tartalmaz vezérelhető feszültségforrást az üresjárási feszültség modellezésére, az SoC inicializálása kicsit másképp történik, mint a többi modell esetében. A két kondenzátor feszültségét összegző integrátorokat a kezdeti SoC-ből számított üresjárási feszültség értékére kell inicializálni. A feszültségforrás hiánya azt a problémát is magával vonja, hogy az akkumulátor nemlineáris kisütési karakterisztikáját a modell képtelen visszaadni, így legalább az ellenállás értékeit SoC függővé kell tenni.

A 3.9. ábrán látható a modell impulzus terhelőáramra adott válasza, amely az IR modellnél szemmel láthatóan jobban közelíti a valódi mérési eredményeket. Ezzel szemben a kisütési karakterisztika lineáris jellegű, amely jelentős pontatlanságot okoz, főleg a 20 % alatti SoC tartományban.

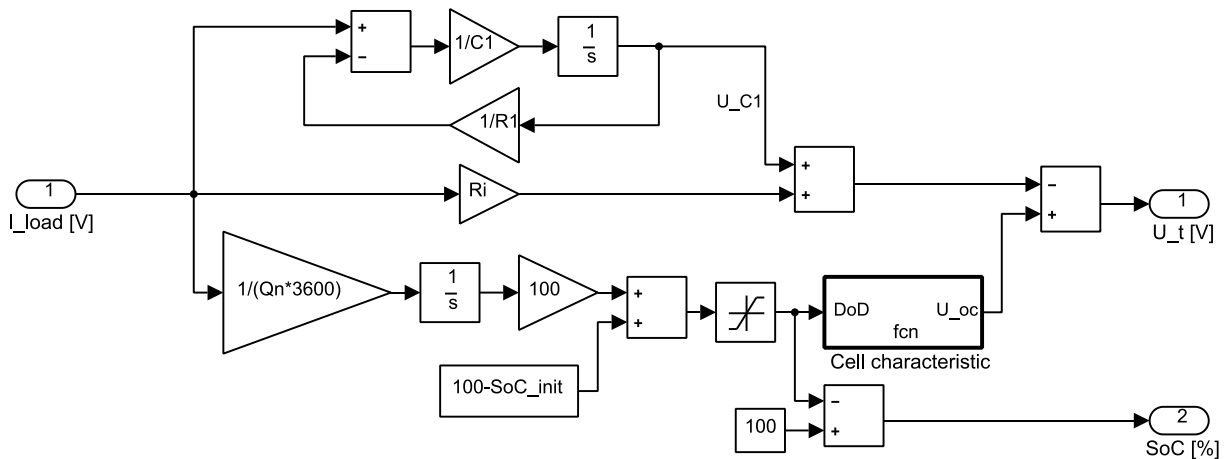


3.9. ábra Az RC modell dinamikus és kisütési karakterisztikája

Az RC modell előnye, hogy egyenletes SoC, feszültség- és áramjeleket produkál, kapacitív csillapítása révén nincsenek feszültségingadozások, és egy ciklus alatt alacsony átlagos és maximális hibát eredményez. Hátránya viszont, hogy mivel nem tartalmaz vezérelhető feszültségforrást, a paramétereket SoC függővé kell tenni, ugyanis ennek hiányában a modell a cella nemlineáris karakterisztikáit képtelen lenne követni, főleg alacsony töltöttségi szinten [14]. Végül pedig bonyolult egyenletrendszeréből adódóan a nagy számításigényű modellek közé tartozik.

3.2.3 OTC modell

Az OTC modell az IR modell kiegészítése egy sorosan csatlakoztatott párhuzamos RC taggal. A kimeneti feszültséget meghatározó képlet így egy újabb taggal bővül, az üresjárási feszültségből a belső ellenálláson eső feszültség mellett megjelenik kivonandó tagként az RC tagon eső feszültség is. A 3.10. ábrán látható a modell Simulink megvalósítása. A már ismert belső ellenálláson kívül hangolható paraméter a polarizációs jelenségek okozta tranziens viselkedést reprezentáló RC tag kapacitása és ellenállása.

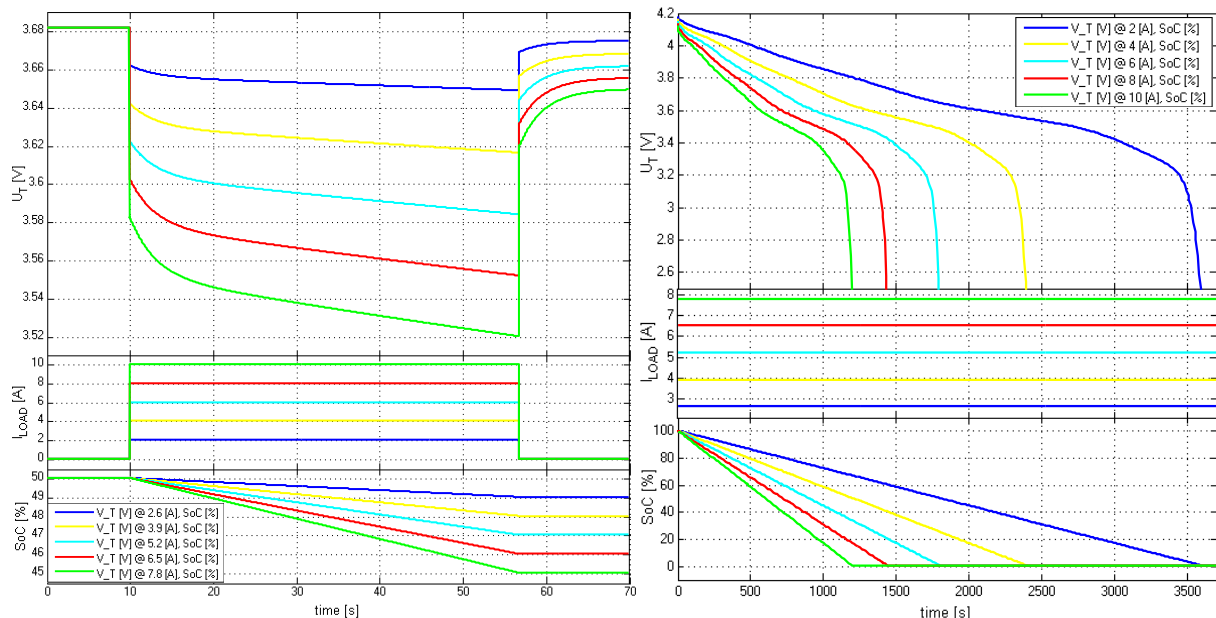


3.10. ábra OTC modell Simulink implementációja

A modellt meghatározó paraméterek:

- R_i : *Internal Resistance* [Ω], belső ellenállás
- R_1 : *Transient Resistance* [Ω], tranziens ellenállás
- C_1 : *Transient Capacity* [F], tranziens kondenzátor

A következő ábrán látható a cella terhelőáram impulzusra adott feszültségválasza és kisütési görbéje. A dinamikus karakterisztika jól közelíti az akkumulátor valós viselkedését, az ugrás utáni exponenciális jellegű folyamat pedig az RC tag paramétereivel hangolható.

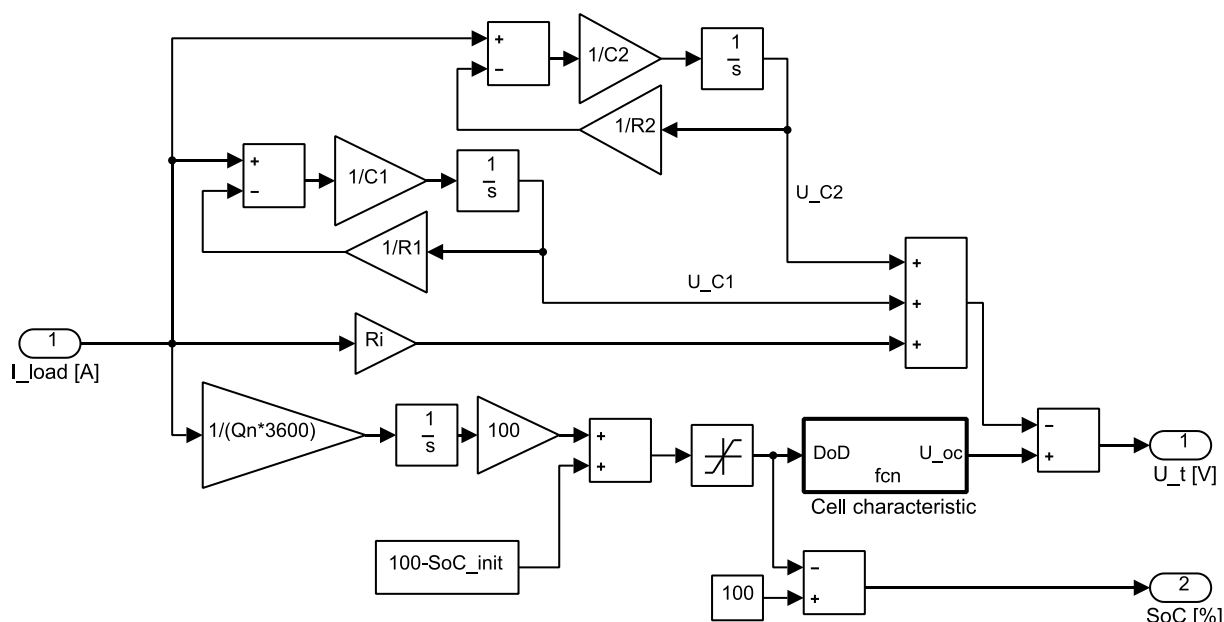


3.11. ábra Az OTC modell dinamikus és kisütési karakterisztikája

Az OTC modell előnye, hogy lehetőséget nyújt az akkumulátor dinamikus viselkedésének szimulálására, de mégis egyszerű, és kis számítási igényű. A cella szintű modellből pakk szintű modell alkotása is könnyen megoldható feladat, emellett a szakirodalomban jól definiált módszerek találhatók a paraméterek azonosítására.

3.2.4 TTC modell

A TTC modell az IR és OTC modellek továbbfejlesztése egy újabb sorosan csatlakoztatott párhuzamos RC taggal. Az akkumulátor üresjárású feszültségén így a belső ellenállás mellett már két RC tag osztozik a kimeneti feszültséggel. A modell 3.12. ábrán látható Simulink megvalósításán megjelennek az újabb állapotváltozót számító blokkok.



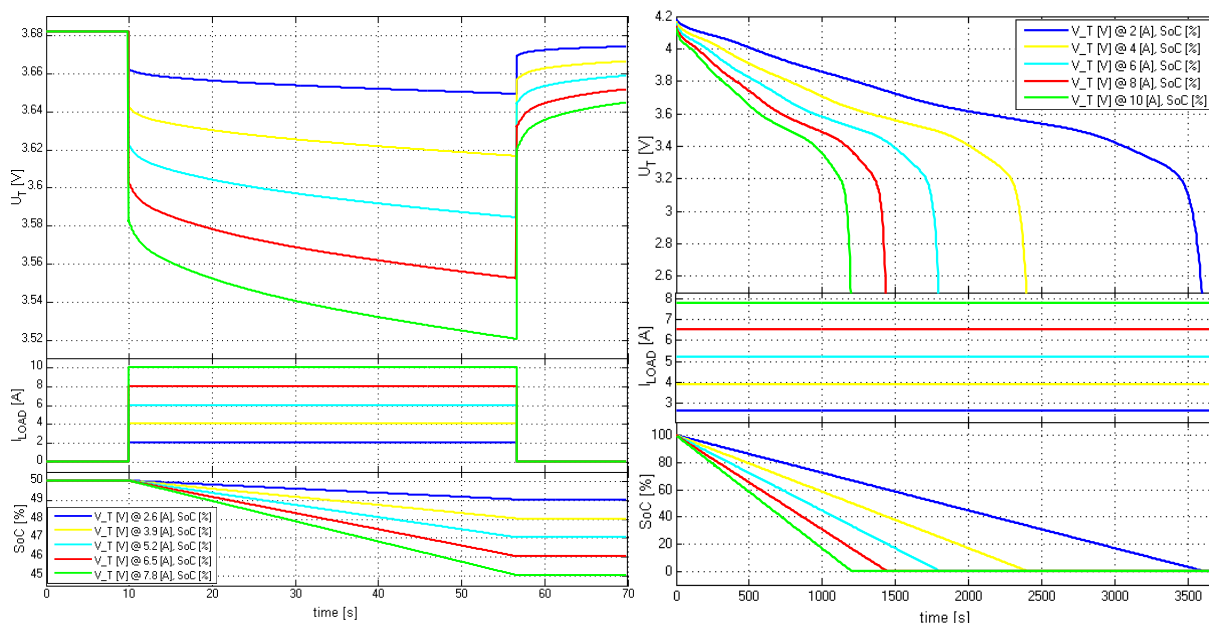
3.12. ábra TTC modell Simulink implementációja

A modell hangolható paramétereit:

- R_i : *Internal Resistance* [Ω], belső ellenállás
- R_1 : *Short Transient Resistance* [Ω], rövid tranziens ellenállás
- C_1 : *Short Transient Capacity* [F], rövid tranziens kondenzátor
- R_2 : *Long Transient Resistance* [Ω], hosszú tranziens ellenállás
- C_2 : *Long Transient Capacity* [F], hosszú tranziens kondenzátor

A következő ábra mutatja a cella terhelőáram impulzusra adott feszültségválaszát és kisütési karakterisztikáját. Az ugrás utáni exponenciális jellegű folyamat hangolásához immár

két RC tag paraméterei állnak rendelkezésre, így sokkal pontosabban illeszthető a valódi karakterisztikához.

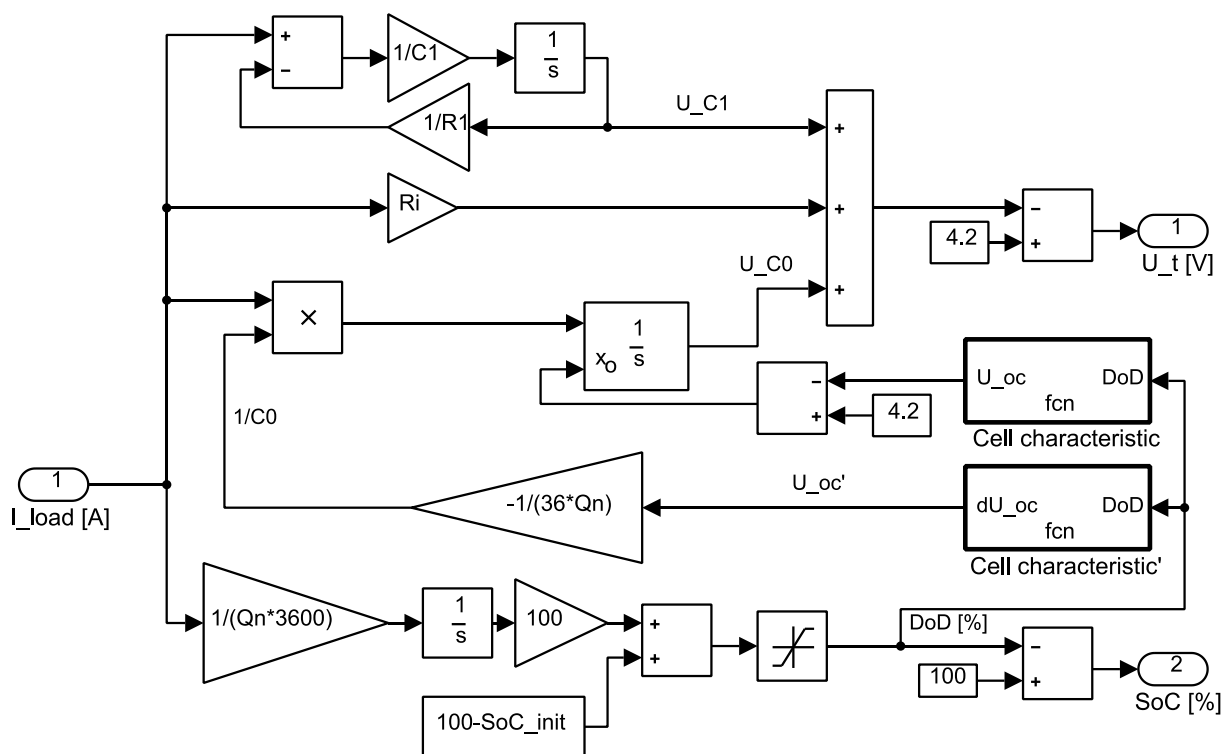


3.13. ábra A TTC modell dinamikus és kisütési karakterisztikája

A TTC modell előnye, hogy rendkívül pontosan írja le az akkumulátor dinamikus viselkedését. Emellett a paraméter identifikációhoz a szakirodalomban egyértelmű módszer található. Pakk szintű modellé skálázható a cella szintű modell, az értékek szimpla szorzásával illetve osztásával. Habár két reaktáns elemet is tartalmaz, az öt leíró egyenletrendszer nem túl bonyolult, így pontosságához képest számítási igénye is kedvező.

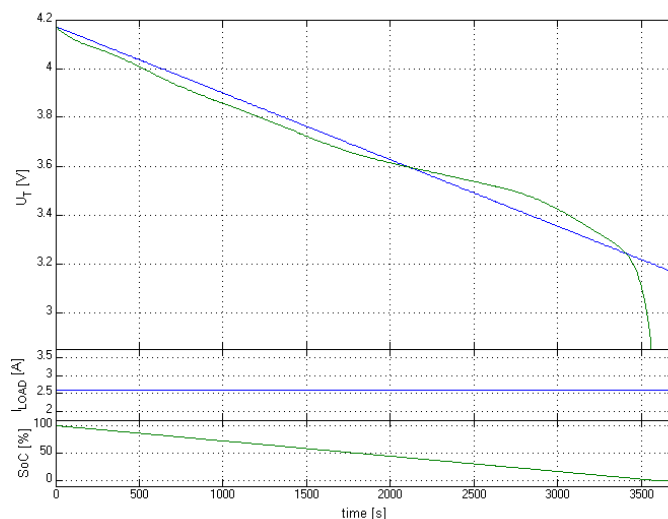
3.2.5 PNGV modell

A PNGV modell tekinthető az OTC modell változatának. A különbség főként az üresjárású feszültség SoC függésének megvalósításában rejlik. Az OTC modellben egy vezérelhető feszültségforrás reprezentálja az üresjárású feszültséget, amelynek értéke csökkenő SoC esetén az akkumulátor karakterisztikájának megfelelően csökken. A PNGV modellben ezzel szemben a feszültségforrás konstans értékű, cserébe egy soros kondenzátor kap helyet a többi tag között. A cella kisütése közben a kondenzátor feltöltődik, egyre nagyobb feszültség esik rajta, így az akkumulátor kapcsai közt csökken a feszültség, pont úgy, mint az OTC modell esetében. A 3.14. ábrán látható a PNGV modell Simulink megvalósítása.



3.14. ábra PNGV modell Simulink implementációja

A C_0 kondenzátor feszültségét (3.14. ábrán U_{C0}) számító blokk azért ilyen komplex, mert ha a kondenzátor konstans kapacitással rendelkezne, az akkumulátor konstans árammal való kisütése esetén feszültsége is egyenletesen csökkenne, amely nem felel meg a valóságnak. A 3.15. ábra szemlélteti az előbbi problémát. Mindkét görbe egy 2.6 A-es, egy óra hosszú kisütési folyamatot ábrázol, ám míg a kék egyenesnél C_0 értéke konstans, a zöld görbénél az akkumulátor karakterisztikájának megfelelően változik.



3.15. ábra Kisütés szimulációja konstans illetve SoC függő C_0 esetén

A C_0 kondenzátor töltöttségi szinttől való függését az alábbi módszerrel határoztam meg. Terhelőáram hatására a kondenzátoron eső feszültségnek meg kell egyeznie az üresjárási feszültség változásának abszolút értékével.

$$U_{C0} = \Delta U_{oc} = U_{oc_init} - U_{oc} \quad (3.3)$$

Az egyenletet idő szerint deriválva a (3.2) összefüggéshez jutunk:

$$\frac{dU_{C0}}{dt} = -\frac{dU_{oc}}{dt} \quad (3.4)$$

Bal oldalt (2.9) alapján behelyettesítve, és jobb oldalt bővítve:

$$\frac{1}{C_0} \cdot I_L = -\frac{dU_{oc}}{dDoD} \cdot \frac{dDoD}{dt} \quad (3.5)$$

A DoD-t a terhelőáram integrálásával, majd a névleges kapacitásnak megfelelően 0-tól 100-ig skálázásával kapjuk:

$$DoD = \frac{100}{Q_n} \int_0^t I_L dt \rightarrow \frac{dDoD}{dt} = \frac{100 \cdot I_L}{Q_n} \quad (3.6)$$

Végül a (3.5) egyenletbe behelyettesítve, majd a terhelőárammal egyszerűsítve az alábbi összefüggéshez jutunk a kondenzátor reciprokának értékére:

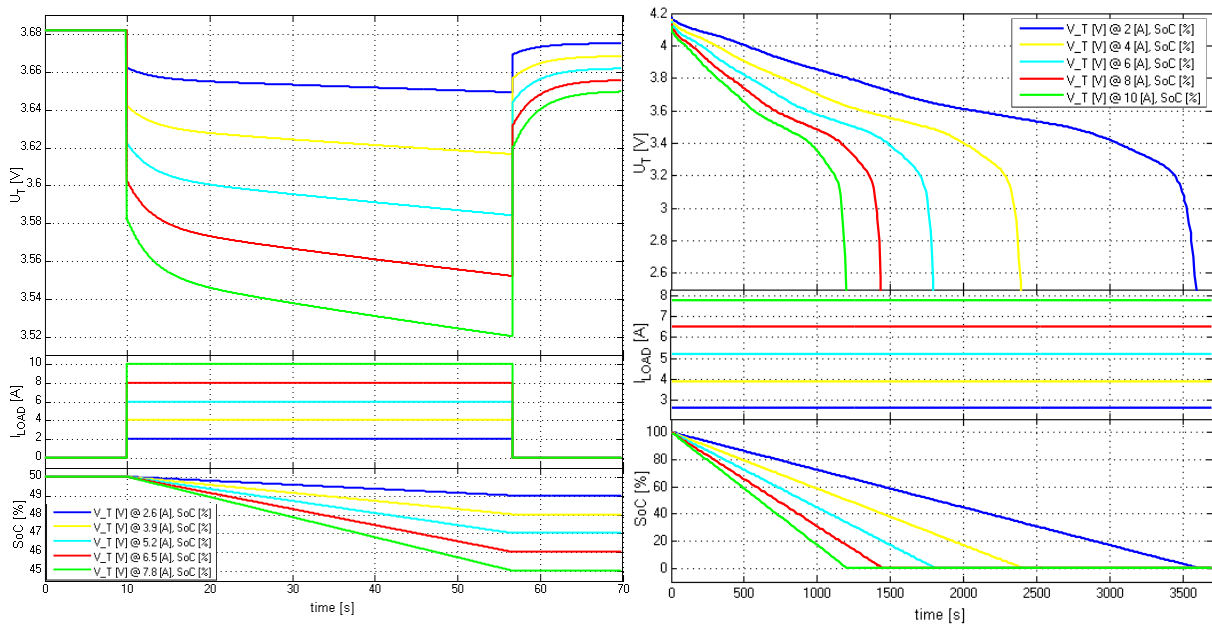
$$\frac{1}{C_0} \cdot I_L = -\frac{dU_{oc}}{dDoD} \cdot \frac{100 \cdot I_L}{Q_n} \rightarrow \frac{1}{C_0} = -\frac{dU_{oc}}{dDoD} \cdot \frac{100}{Q_n} \quad (3.7)$$

Mivel a már rendelkezésünkre álló $U_{oc}(DoD)$ függvény egy polinom, deriválása könnyen elvégezhető, és az eredetihez hasonlóan egy MATLAB Function blokkban implementálható.

A kondenzátor feszültségének inicializálása miatt a modellben szükség van az eredeti üresjárási feszültség karakterisztika implementálására is. A teljesen feltöltött állapotra jellemző 4.2 V-ból a DoD kezdeti értékéből számított üresjárási feszültséget levonva számítható a kondenzátor feszültségének kezdeti értéke.

A modell hangolható paraméterei:

- R_i : *Internal Resistance* [Ω], belső ellenállás
- R_1 : *Transient Resistance* [Ω], tranziens ellenállás
- C_1 : *Transient Capacity* [F], tranziens kondenzátor



3.16. ábra A PNGV modell dinamikus és kisütési karakterisztikája

A PNGV modell előnye, hogy az OTC modellhez hasonlóan könnyen skálázható, pontos eredményt biztosít, viszont mivel az üresjárási feszültség karakterisztika mellett szükséges annak deriváltját is implementálni, az OTC modellnél jelentősen nagyobb erőforrás igényű.

3.3 Vizsgálatok eredménye - javasolt modell

A 3.1. táblázat összefoglalja az előző fejezetben bemutatott modellek főbb tulajdonságait. Az egyes modellek feszültségválaszának átlagos és maximális hibáját több kutatócsoport is vizsgálta, melyet a táblázatban forrásmegjelöléssel tüntettem fel. A táblázat alapján a TTC modell tűnik a legalkalmasabbnak a kívánt alkalmazásra.

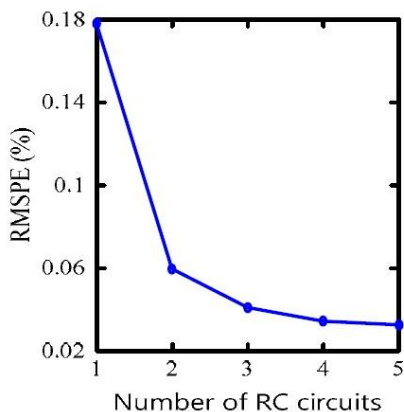
modell	IR	RC	OTC	TTC	PNGV
komplexitás	egyszerű	bonyolult	egyszerű	közepes	közepes
erőforrásigény	nagyon alacsony	nagy	alacsony	közepes	nagy
hiba [12]	3% átl. (12% max.)	1% átl. (4% max.)			
hiba [13]	0.7% átl. (2.8% max.)	0.4% átl. (2% max.)	0.1% átl. (0.5% max.)	0.02% átl. (0.4% max.)	0.2% átl. (1% max.)
hiba [14]		1.2% átl. (5% max.)			
hiba [15]			0.2% átl. (4% max.)	0.02% átl. (0.4% max.)	
hiba [16]			1.2 % max.	0.2% max.	0.7% max.
hiba [8]				0.02-0.4% átl. (0.4-0.8% max.)	
paraméterfüggőség		SoC			SoC
skálázhatóság	egyszerű	bonyolult	egyszerű	egyszerű	egyszerű
identifikálhatóság	egyszerű	bonyolult	egyszerű	egyszerű	egyszerű

3.1. táblázat Modellek tulajdonságainak összehasonlítása

Az RC modell a legbonyolultabb az összes közül, mind erőforrásigény, mind skálázhatóság, mind identifikálhatóság szempontjából, mégis pontatlan eredményeket szolgáltat, így e modell használata semmiképp sem javasolt.

A PNGV modell használhatóságát és pontosságát tekintve megegyezik az OTC modellel, mégis jóval nagyobb erőforrás igényű az SoC függő kapacitás karakterisztikájának szükségessége miatt, így e modell használata sem javasolt.

A három fennmaradó modell, tehát az IR, OTC és TTC csupán a párhuzamos RC tagok számában különböznek. Mivel az alkalmazás biztonság-kritikus, a választott modellnek pontos információt kell szolgáltatni az akkumulátor állapotáról. Emellett a modell komplexitásának és erőforrás igényének minimumon tartása is fontos elvárás a valós idejű alkalmazás szempontjából. A pontosság és az alacsony erőforrás igény kritériuma a három modell esetében viszont ellentmond egymásnak, ugyanis a pontossághoz az RC tagok számának növelése szükséges, amely a számítási igény növekedésével jár.



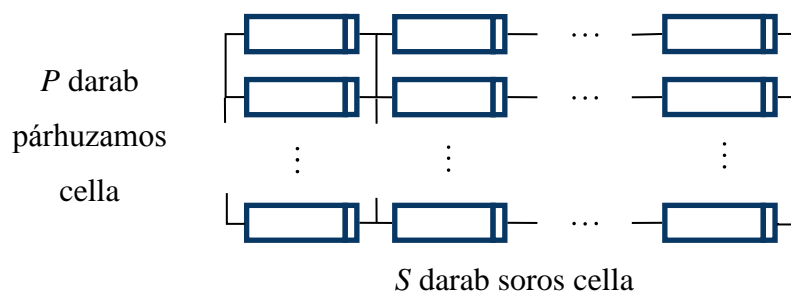
3.17. ábra Összefüggés a feszültségválasz hibája és az RC tagok száma között [15]

A 3.17. ábrán a modellek feszültségválaszának négyzetes hibája látható az RC tagok számának függvényében. Észrevehető, hogy míg két RC tagig nagyságrendbeli különbség van a modellek pontossága között, a további RC tagok már egyre kisebb mértékben csökkentik a hiba nagyságát. A 3.1. táblázat is egyértelműen alátámasztja ezt a megfigyelést. A TTC modell hibája minden forrás szerint egy nagyságrenddel alacsonyabb az OTC modellénél.

Az eddigiek figyelembevételével megállapítható, hogy pontosságának köszönhetően mind offline szimulációhoz, mind valós idejű alkalmazáshoz a TTC modell javasolt. Természetesen, ha a modell számára nem áll rendelkezésre a TTC modell futtatásához szükséges erőforrás valós idejű alkalmazásnál, vissza lehet térni az OTC, vagy akár az IR modellhez, de ekkor nagyságrenddel nagyobb hibára kell számítani.

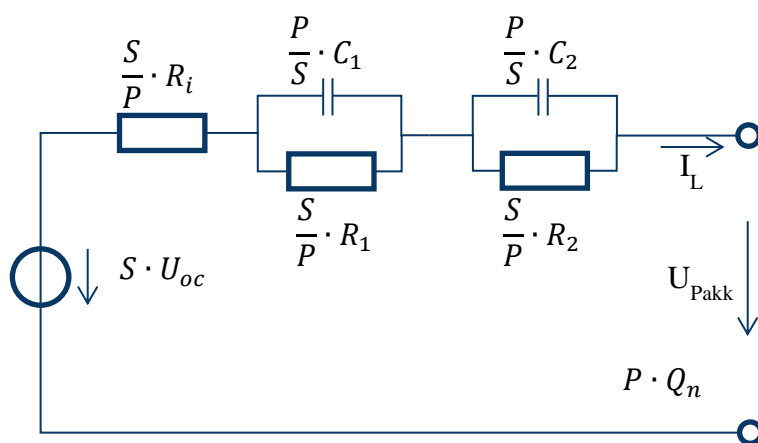
3.3.1 Skálázás

A TTC cellamodell alapján egyszerűen készíthető akkumulátor pakk modell. Ha a 3.18. ábrának megfelelően P darab párhuzamos ágon S darab cellát sorba kapcsolunk, a cellamodell paramétereinek egyszerű megváltoztatásával az akkumulátor pakk modellhez juthatunk.



3.18. ábra Akkumulátor pakk felépítése

Természetesen ez csak abban az esetben érvényes, ha a pakk összes cellája teljesen egyforma, tehát azonos cellák azonos töltöttségi szinten, azonos elhasználódási állapotban, azonos hőmérsékleten és körülmények között vannak. Ez a valóságban nyilván nem feltételezhető állapot, de offline szimulációhoz kiváló támpontnak bizonyul. A paraméterek a 3.19. ábrának megfelelően változnak. Az üresjárási feszültség S -szeresére, a névleges kapacitás pedig P -szeresére nő, az ellenállások értéke S/P -vel, míg a kondenzátorok kapacitása P/S -el szorzódik.



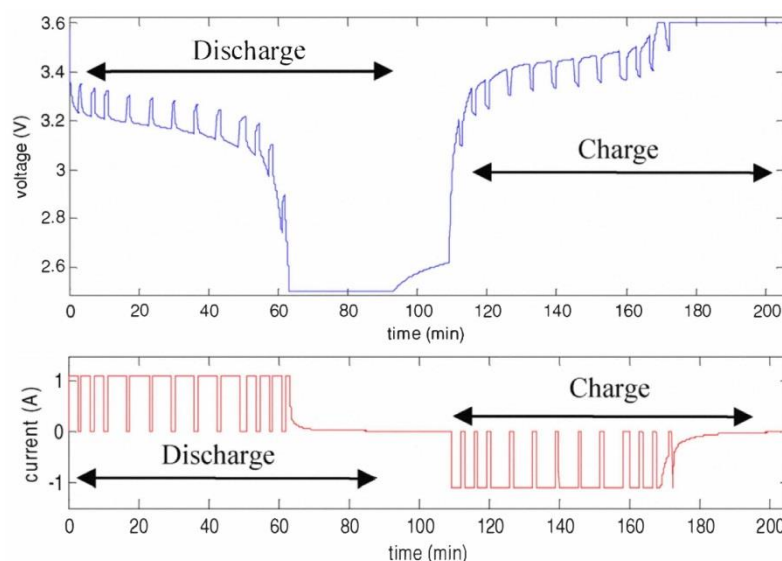
3.19. ábra Skálázott paraméterek

4. Paraméter identifikáció

A TTC modell paramétereinek meghatározására a szakirodalomban több módszer is létezik, mint például a constant current constant voltage (CCCV) [10] vagy a hybrid pulse power characterization (HPPC) [11] teszt. Mindkét módszerrel egy előre definiált terhelőáram jellel gerjesztjük a cellát, amelynek feszültségválasza tartalmazza a paraméter identifikációhoz szükséges információt.

A mérési elrendezéshez a cellán kívül szükség van egy áramgenerátoros funkcióval rendelkező elektronikus terhelésre, amely képes a kívánt jelalakokkal gerjeszteni a cellát, egy multiméterre, amely méri a cella feszültségválaszát, és egy adatgyűjtő eszközre, amely a mért feszültségértékeket tárolja. Ezekkel az eszközökkel a paraméter identifikáció már megvalósítható, de egy hőkamra segítségével a mérés különböző hőmérsékleteken is elvégezhető, így a modell pontossága tovább növelhető a paraméterek hőmérsékletfüggésének definiálásával.

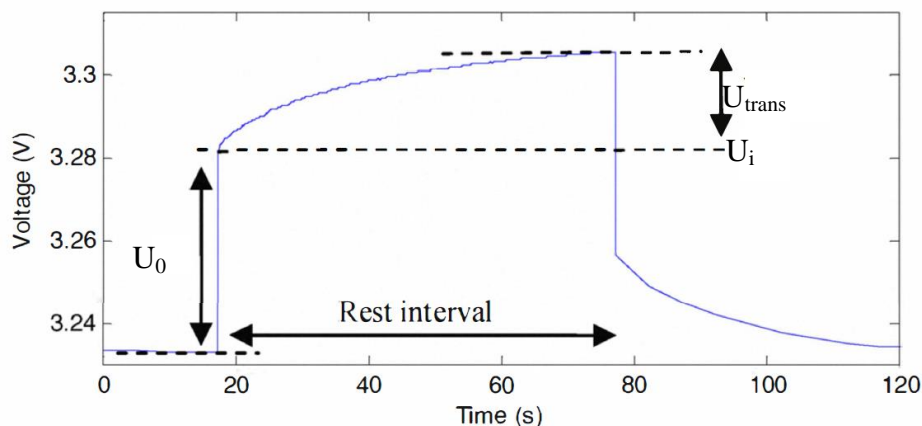
4.1 CCCV teszt



4.1 CCCV teszt feszültségválasz és gerjesztőáram jelalakjai [10]

A CCCV teszt során első lépésként a cellát az adatlap javaslatának megfelelően teljesen fel kell tölteni. Ezt követően egy óra pihentetés után feltételezhető, hogy a cellában zajló elektrokémiai és termikus folyamatok elértek egy egyensúlyi állapotot, így megkezdődhet a cella kisütése. A 4.1. ábrának megfelelően 1C körüli áramerősséggel N

lépésben kisütjük az akkumulátort és a lépések között bizonyos ideig pihenni hagyjuk. Míg a cella pihen feszültsége a 4.2. ábrának megfelelően változik.



4.2. ábra Példa a feszültségválaszra pihentetés közben a kisütési ciklus alatt [10]

U_0 feszültségből a modell belső ellenállása, az U_{trans} görbéből pedig az RC tagok paraméterei identifíkáhatóak a következő egyenletek alapján:

$$U_0 = R_i \cdot I_L \quad (4.1)$$

$$U_{trans} = U_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + U_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \quad (4.2)$$

$$U_1 = R_1 \cdot I_L \quad U_2 = R_2 \cdot I_L \quad (4.3)$$

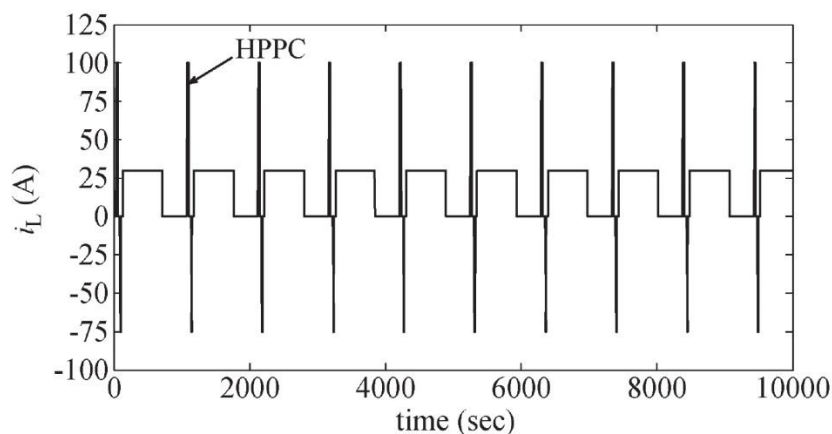
$$\tau_1 = R_1 \cdot C_1 \quad \tau_2 = R_2 \cdot C_2 \quad (4.4)$$

$$U_{oc} = U_1 + U_2 + U_i \quad (4.5)$$

Ahol U_0 a terhelőáram lekapcsolásakor bekövetkező feszültségugrás nagysága, U_{trans} pedig az ugrás utáni exponenciális jellegű folyamat, melynek két időállandója τ_1 és τ_2 . U_{oc} az adott SoC szinthez tartozó üresjárás feszültség, U_i pedig a feszültség pillanatnyi értéke az ugrás után. I az áramerősség nagysága a pihenési intervallum előtt, amely a konvenciónak megfelelően kisütés közben pozitív, töltés közben negatív.

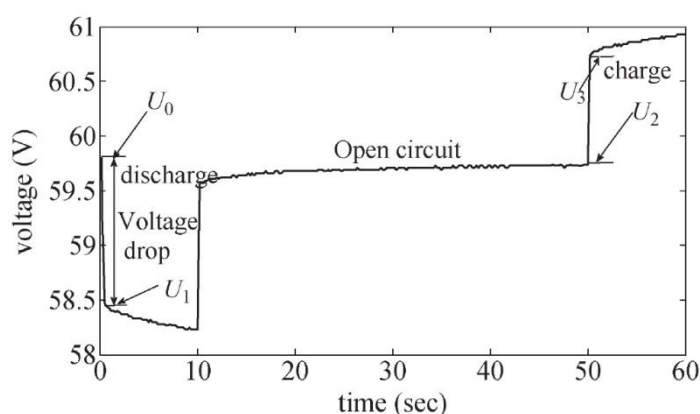
A mérés elvégzése után a Matlab Curve Fitting Toolbox segítségével illeszthetünk a (4.2) egyenletnek megfelelő görbét a mérési pontokra, amelyből a terhelőáram értéke valamint a (4.1), (4.3) és (4.4) egyenletek segítségével számolhatóak a modellparaméterek. Ha a kisütések közötti szünetek száma N , akkor N különböző SoC értékre meghatározhatóak a paraméterek értékei, így az egyes paraméterek SoC függése egy görbe illesztésével pontosan definiálható. Természetesen a modell egyszerűsítése érdekében lehetőség van a különböző SoC-hez tartozó paraméter értékek átlagával dolgozni.

4.2 HPPC teszt



4.3. ábra HPPC teszt gerjesztőáram jelalakja [11]

A HPPC teszt abban különbözik a CCCV tesztől, hogy a teljesen feltöltött, elektrokémiai és termikus egyensúlyi állapotban lévő cellát kis késleltetéssel egymás után egy 1C nagyságrendű amplitúdójú kisütő, majd egy töltő áramimpulzussal gerjesztjük, amelyek közben az SoC elhanyagolható mértékben változik, így konstansnak tekinthető. Ezután egy kisebb amplitúdójú ($C/3 - C/4$), jóval hosszabb időtartamú áramimpulzus süti ki a cellát a következő SoC szintre (lásd 4.3. ábra). A nagyobb amplitúdójú impulzusok hatására a cella feszültsége a 4.4. ábrán látható görbének megfelelően fog változni. A CCCV teszthez hasonlóan a (4.1) – (4.5) egyenletek és a Matlab Curve Fitting Toolbox segítségével identifíkáhatóak a paraméterek.



4.4. ábra Cella feszültségválaszának részlete a HPPC teszt során [11]

5. Értékelés és további feladatok

Sikerült azonosítani és fejlesztésekben felhasználható formába önteni egy olyan akkumulátor cella modellt, amely egyszerűségének és hatékonyságának köszönhetően alkalmas energiatárolók méretezését segítő szimulációk végzésére, egy BMS központi mikrokontrollerébe viszonylag kevés erőforrás felhasználással implementálható, valamint modell alapú SoC becslőkhöz is hatékonyan használható.

Az IR, RC, OTC, TTC és PNGV modellek részletes vizsgálata, Simulink implementációja és szimulációk futtatása alapján levonható a konklúzió, mely szerint a Two Time Constant (TTC) modell segítségével precízen modellezhető egy Li-ion cella dinamikus viselkedése különféle működési feltételek és terhelési profilok mellett. Pontosságát legfőképp annak köszönheti, hogy a terhelés utáni relaxációs folyamat során zajló elektrokémiai polarizáció és koncentráció polarizáció effektusokat, melyek időállandója között nagyságrendbeli különbség van, két külön RC tag képviseli.

A jövőben a 4. fejezetben javasolt módszer alapján elvégezhető a modell paramétereinek identifikációja, amely igény szerint, valamint a rendelkezésre álló időtől és eszközállománytól függően a paraméterek töltöttségi szint (SoC), hőmérséklet és elhasználódási állapot (SoH) függésének definiálását is jelentheti. Feladat továbbá egy minimális erőforrás igényű SoC becslő algoritmus azonosítása és implementálása, amely használható valós idejű alkalmazásban.

Irodalomjegyzék

- [1] Kandler A. Smith, Christopher D. Rahn, and Chao-Yang Wang: *Model-Based Electrochemical Estimation of Lithium-Ion Batteries*, CCA 2008. IEEE International Conference on Control Applications, pp. 225-236
- [2] M. Pedram and Q. Wu, *Design considerations for battery-powered electronics*, Proc. 1999 Des. Autom. Conf., pp. 861–866.
- [3] C. F. Chiasserini and R. R. Rao, *Energy efficient battery management*, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 19, no. 7, pp. 1235–1245, Jul. 2001.
- [4] D. Rakhmatov, S. Vruthula, and D. A. Wallach, *A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer*, IEEE Trans. VLSI Syst., vol. 11, no. 6, pp. 1019–1030, Dec. 2003.
- [5] S. Buller, M. Thele, R. W. D. Doncker, and E. Karden, *Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications*, Conf. Rec. 2003 Ind. Appl. Conf., vol. 3, p. 159601600.
- [6] S. Gold, *A pspice macromodel for lithium-ion batteries*, Proc. 12th Annu. Battery Conf. Applications and Advances, 1997, pp. 215–222.
- [7] L. Benini, G. Castelli, A. Macci, E. Macci, M. Poncino, and R. Scarsi, *Discrete-time battery models for system-level low-power design*, IEEE Trans. VLSI Syst., vol. 9, no. 5, pp. 630–640, Oct. 2001.
- [8] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, *Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance*, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21m no. 2, pp. 504-511. Jun. 2006.
- [9] ADVISOR Documentation: *Chapter 3: How ADVISOR works*, http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/ess_rc.html
- [10] L. Long, P. Bauer and E. Kelder, *A practical circuit-based model for Li-ion battery cells in electric vehicle applications*, IEEE Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-9, October 2011.
- [11] W.-Y. Chang, *The State of Charge Estimation Methods for Battery: A Review*, ISRN Applied Mathematics, vol. 2013, Article ID 953792, 2013.
- [12] Johnson, V.H. *Battery performance models in ADVISOR*, J. Power Sources 2002, 110, 321–329.
- [13] Hongwen He, Rui Xiong and Jinxin Fan, *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach*, Energies 2011, 4, 582-598.

- [14] Valerie H. Johnson, Ahmad A Pesaran and Thomas Sack, *Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries*, 17th Annual Electric Vehicle Symposium Conference Paper, January 2001.
- [15] H. Zhang, M.Y. Chow, *Comprehensive dynamic battery modelling for PHEV applications*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, July 2010.
- [16] M. Daowd, N. Omar, B. Verbrugge, P. V. D. Bossche, J. V. Mierlo, *Battery Models Parameter Estimation based on Matlab/Simulink*, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010.
- [17] Huria, T., Ceraolo, M., Gazzarri, J., and Jackey, R., *Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells*, SAE Technical Paper 2013-01-1544, 2013