



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

III. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2019ko maiatzaren 27, 28 eta 29
Baiona, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Biziraupen Estimazio Modeloa
Garraio Astuneko Aplikazioetan
Erabiltzen Diren Superkondentsa-
doreentzako**

*Josu Olmos, Iñigo Gandiaga, Jon
Crego, Xabier Agirre, Txomin Nieva
eta Iosu Aizpuru*

72-78 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iii.03.09>



Biziraupen Estimazio Modeloa Garraio Astuneko Aplikazioetan Erabiltzen Diren Superkondentsadoreentzako

Olmos, Josu^{1,3}; Gandiaga, Iñigo¹; Crego, Jon¹; Agirre, Xabier²; Nieva, Txomin² eta Aizpuru, Iosu³

¹Ikerlan Technology Research Centre

²CAF Power and Automation, Parque Tecnol'ogico de San Sebasti'an,

³Mondragon Unibertsitatea, Elektronika Departamendua

jolmos@ikerlan.es

Laburpena

Kutsadurak sortutako arazo en eraginez, azken hamarkadan efizientzia handiagoko garraio aukeren beharra areagotu da. Testuinguru honetan, metatze elektrikoko sistemekin bultzatutako garraioek aukera oso aproposa aurkezten dute. Efizientzia handiko eta metatze sistemen bidez bultzatzen diren garraioen adibide argi bat tranbiak dira. Hala ere, eskuragarri dauden metatze teknologiek merkatu mailan berme altuagoa eskaini ahal izateko, pairatzen duten zahartzea aurreikustea garrantzitsua da. Hain zuzen ere, lan honek mota honetako aplikazioetan erabiltzen diren superkondentsadoreen biziraupena estimatzeko modelo bat aurkezten du. Modeloa baldintza errealistetan burututako froga esperimentaletan oinarriturik garatu eta balidatu da. Azkenik, ikerketa kasu bat aztertu da benetako tranbia baten operazio profila erabiliz.

Hitz gakoak: Superkondentsadorea, biziraupen estimazio modeloa, garraio astuneko aplikazioak.

Abstract

Due to the high pollution levels, in the last few years the need of improving the efficiency of the transportation sector has increased. In this context, transport applications powered by electric storage systems emerge as a very convenient solution. Tramways are a clear example of high efficient transport applications powered by energy storage systems. Nevertheless, in order to achieve a higher reliability in the market, it is important to properly foresee the ageing effect that the existing storage systems suffer. This paper presents an ageing model to estimate the lifetime of supercapacitors, which are widely used in the mentioned transport applications. The model is developed and validated based on experimental tests developed in real application conditions. Finally, a study case is analyzed applying the operation profile of a real tramway to the proposed model.

Keywords: Supercapacitor, ageing model, high-duty applications.

1. Sarrera eta motibazioa

Azken urteetan, mundu mailan aurre egin beharreko erronka garrantzitsu bat hiri eta hiriarteko garraioak sortutako kutsaduraren murrizketa da. Helburu hau epe laburrean lortu ahal izateko, jada existitzen diren mugikortasun aukerak mantendu egin behar dira. Egoera honek efizientzia handiagoko garraio aukeren beharra areagotu du. Testuinguru honetan, tranbiak aukera oso aproposa aurkezten dute, batez ere eragiten duten bidaiariko kontsumo baxua dela eta (Ceraolo eta Lutzemberger, 2014). Hala ere, garraio mota honek baditu ere bere desabantailak. Besteak beste, inbertsio kostu altuak edo funtzionamendurako beharrezkoa den katenariaren ikusmen inpaktua aipa daitezke. Desabantaila hauek tranbien eskala handiagoko merkaturatzea eragozten dute.

Kableek eragiten duten arazoari aurre egiteko planteamendu eraginkor bat ibilgailu barneko metatze sistemen (ingelesez Onboard Energy Storage System, OESS) erabilera da (Ceraolo eta Lutzemberger, 2014). Publikazio batzuek jada azpimarratu dutenez (Reynaud *et al.*, 2018), azken urteetan zehar tranbietan OESS-ak integratzeko joera altua dago, eta etorkizun oparoa aurreikusten da. Adibidez, CAF Power & Automation enpresak tranbietarako EVODRIVE eta FREEDRIVE metatze sistemak proposatzen ditu, hurrenez hurren efizientzia energetikoa eta

kateneriarik gabeko ibilbidea ahalbidetzeko helburuekin (Obando *et al.*, 2017). Era berean, beste hainbat hornitzaileek ere mota honetako metatze sistemak proposatu dituzte. Besteak beste, Bombardier-Primovek Nanjingeko tranbian (Txina), Alstomek Nizako tranbian (Frantzia) edo Skodak Eskişehirko tranbian (Turkia) instalatutakoak azpimarra daitezke.

Testuinguru honetan, garrantzitsua da metatze teknologia desberdinen aipamena egitea. Azken hamarkadan interes handia sortu da bateria eta superkondentsadoreen garapenaren inguruan, besteak beste energia berriztagarrien eta garraio elektrikoaren mugak gainditzeko aproposak bilakatu baitira (Ajuria *et al.*, 2017). Superkondentsadoreak, geruza bikoitzeko superkondentsadore izenez ere ezagunak (ingelesez Electric Double Layer Capacitor, EDLC), tranbiak bezalako garraio astuneko aplikazioetarako teknologia oso erakargarria dira. Gaur egun ibilgailu elektrikoetan oso erabiliak diren Litio-ioizko bateriekin konparatuz, potentzia espezifikoa altua (karga eta deskarga azkarrak egiteko ahalmena) eta bizi iraupen luzea (10 urte eta 1.000.000 ziklo baino gehiago) eskaintzen dute (Campillo *et al.*, 2016; Ratniyomchai *et al.*, 2014).

Dena den, EDLC-ak bezalako metatze teknologiek etorkizun oparoa izan dezaten, garrantzitsua da fidagarritasun maila altua eskaini eta bermatzea, batez ere zahartze prozesuarekin erlazionaturik dagoena (German *et al.*, 2014). Helburu hau lortzeko, degradazio prozesuak aurreikusi eta estimatzea tresna oso garrantzitsua bilakatu da, hainbat publikazioetan zehaztu den moduan (Reynaud *et al.*, 2018; Obando *et al.*, 2017). Orrialde hauetan aurkeztu den komunikazioak jakintza-arlo honetan ekarpen berri bat egiten du, ikerketa benetako aplikazioen baldintza goerara hurbilduz.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Aurreko atalean azpimarratu den moduan, EDLC teknologia heldutasun maila altura iritsi da azken hamarkadan. Dena den, oraindik merkatu mailan fidagarritasun altuagoa eskaini ahal izateko, hauek pairatzen duten zahartzea aurreikustea lagungarria da.

Zahartzea estimatu ahal izateko, lehenik degradazio prozesua ulertu behar da. Beste metatze sistemen antzera, EDLC-ek biltegitratze denbora eta ziklatzearen eraginez kapazitate galera eta barne erresistentziaren igoera sufritzen dute. Kapazitate edo barne erresistentzia balio zehatzetara iristean, EDLC-aren bizitza amaitu dela kontsidera daiteke. Biltegitratze denbora bidezko degradazioan tentsioak eta tenperaturak eragin zuzena daukate, hainbat ikerketek azpimarratu duten moduan (El Mejdoubi *et al.*, 2016; Bohlen *et al.*, 2007). Beste aldetik, ziklatze bidezko degradazioan intentsitatearen efektua aipatu daiteke eragile garrantzitsu gisa (German *et al.*, 2014; Gally *et al.*, 2012).

EDLC-aren biziraupena estimatzen duen modelo bat garatzeko, aipatutako parametroen efektua kuantifikatu behar da. Helburu hori lortzeko bideetako bat froga esperimentalak garatzea da. Literaturan hainbat dira laborategiko saiakuntzen emaitzak aurkeztu dituzten publikazioak. El Mejdoubi *et al.* autoreek (2016) publikazioan biltegitratze denboran oinarritutako degradazioaren efektua aztertzen dute. Horretarako, frogak tentsio eta tenperatura balio altuetan garatzen dituzte, degradazioa azeleratu eta esperimendazio denbora 20 egunetara laburtu ahal izateko. Antzerako lana egin dute Bohlen *et al.* autoreek (2007) publikazioan, non tentsio eta tenperaturaren efektua aztertzen duten 100 egun irauten duten frogak azeleratuetan. Beste aldetik, Gally *et al.* autoreek (2012) publikazioan biltegitratze eta ziklatze bidezko degradazioan eragina duten parametroak aztertzen dituzte. Aurreko lanen antzera, tenperatura eta tentsio altuak erabiltzen dituzte frogaren luzera 167 egunetara mugatuz. Azkenik, Kovaltchouk *et al.* autoreek (2015) publikazioan beste lan batzuetako frogak biltzen dituzte biltegitratze eta ziklatze bidezko degradazio modelo bat lortzeko. Hala ere, frogak tenperatura zein tentsio balio altuetan daude burututa.

Laburtuz, arloko egoeraren azterketan egiaztatu da EDLC-en frogak esperimentalak aurkeztu dituzten publikazio gehienek epe motzeko saiakuntzak garatu dituztela, gehien bat kontuan izanik EDLC-ek 1.000.000 ziklo eta 10 urte arte iraun ditzaketela. Froga azeleratuetan lortutako emaitzak baldintza errealistagoetara moldatu daitezkeen eztabaidagarria da.

Testuinguru honetan, lan honek EDLC-tarako bizitza estimazio modelo berri bat proposatu du. Lanaren ekarpen nagusia, arloko egoeran aztertutako publikazioekin konparatuz, modelo baldintza errealisteko frogak esperimendatzen oinarriturik garatu dela da. Biltegitratze eta ziklatze bidezko degradazio frogak denbora luzean zehar garatu dira tentsio, tenperatura eta intentsitatearen efektuak aztertzeko helburuarekin. Ondoren, bizitza estimazio modelo balioesteko, lortutako emaitzak fabrikatzaileak emandako datuekin alderatu dira. Azkenik, benetako tranbia baten operazio profila erabili da ikerketa kasu erreal bat aztertzeko.

3. Ikerketaren muina

Atal honetan, batetik, EDLC-entzako biziraupen estimazio modeloa garatzeko prozesua aurkezten da. Hartutako suposizioak, burututako froga esperimentalak eta modeloaren eraikuntza azalduko dira. Bigarrenik, biziraupen modeloarekin lortutako emaitzak fabrikatzaileak emandako datuekin balioztatuko dira. Azkenik, ikerketa kasu moduan, modeloa Kaohsiung-eko tranbiaren operazio profilari aplikatuko zaio, bertan erabiltzen diren EDLC-en bizitza estimatzeko helburuarekin.

3.1. Garatutako Biziraupen Estimazio Modeloa

Modeloaren garapenerako, EDLC-en biziraupena Redox erreazioaren ratioarekiko alderantzizko proportzionala dela kontsideratu da (Alcicek *et al.*, 2007). Aurreko atalean azaldu diren tentsio (V), tenperatura (T) eta intentsitatearen (I_{rms}) efektuak indibidualizatu egin dira, (1) ekuazioan aurkezten den moduan:

$$t_{EDLC} = f(V, T, I_{rms}) = f_1(V) \cdot f_2(T) \cdot f_3(I_{rms}) \quad (1)$$

non t_{EDLC} EDLC-aren biziraupena [urteak] den.

Faktore bakoitzaren eragina kuantifikatzeko, gelaxka mailako biltegitratze eta ziklatze bidezko degradazio frogak garatu dira. Biltegitratze bidezko degradazio frogen helburua T eta V -ren efektuak indibidualizatzea izan da. Beste aldetik, ziklatze bidezko degradazio frogetan I_{rms} -ren efektua aztertu da. Horrela, ziklatzearen eraginez degradazioa zenbat areagotzen den kuantifikatu da. Hau kontuan izanik, modu honetan berridatzi daiteke (1) adierazpena:

$$t_{EDLC} = f(V, T, I_{rms}) = \frac{t_{bilt}(V, T)}{K_{azel}(I_{rms})} \quad (2)$$

non K_{azel} ziklatzearen eraginezko degradazioaren azelerazio faktorea [-] den ($K_{azel} \geq 1$, zenbat eta altuagoa, degradazio handiagoa eta biziraupen motzagoa), eta t_{bilt} tentsio eta tenperatura jakin batean biltegitratuta egoteagatik EDLC-ak duen biziraupena [urteak] den.

Saiakuntza esperimentaletan degradatu diren EDLC gelaxkak Maxwell 3000 F 2,7 V (BCAP3000) dira. Gelaxkaren ezaugarri nagusiak 1. Taulan erakusten dira. Horretaz gain, 2. eta 3. Tauletan garatutako biltegitratze eta ziklatze bidezko degradazio frogen laburpenak aurkezten dira, hurrenez hurren. Ikusten denez, T hiru baldintzetan aztertu da (10/25/45 °C), V bost egoeretan (0,5/1,0/1,5/2,0/2,5 V) eta I_{rms} beste hiru baldintzetan. Azken parametroari dagokionez, 50 A karga eta deskarga, 100 A karga eta deskarga, eta 250 A karga eta 100 A deskarga zikloetan aztertu da, 3. Taulan zehazten den tentsio tartean.

1. taula. Maxwell 3000 F Gelaxkaren Ezaugarriak

Ezaugarria	Balioa
Tentsio Nominala [V]	2,7
Kapazitate Nominala [F]	3.000
Metatutako Energia [Ah]	3,04
Operazio Tenperatura [°C]	-40/65
Pisua [kg]	0,51

2. taula. Biltegitratze Bidezko Degradazio Frogen Matricea

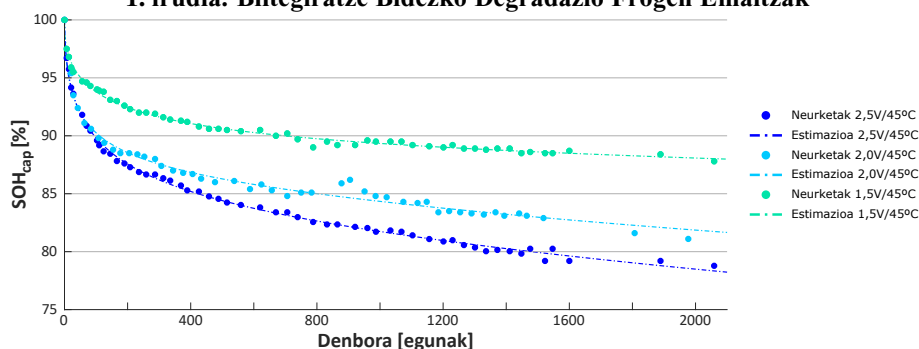
T[°C] / V[V]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
10	x				
25	x	x	x	x	x
45			x	x	x

3. taula. Ziklatze Bidezko Degradazio Frogen Matricea

T[°C] / I[A]	50/50	100/100	250/100
45	1,55-2,55 V	1,25-2,5 V	1,35-2,7 V

Degradazio frogak urteetan zehar luzatu egin dira, biltegitratzearen kasuan 2.000 egun ingurura (5 urte eta 6 hilabete) iritsiz, eta ziklatzearen kasuan 1.000.000 ziklo baino gehiago burutuz. 1. Irudian frogen emaitzen adibide

1. irudia. Biltegitratze Bidezko Degradazio Frogen Emaitzak



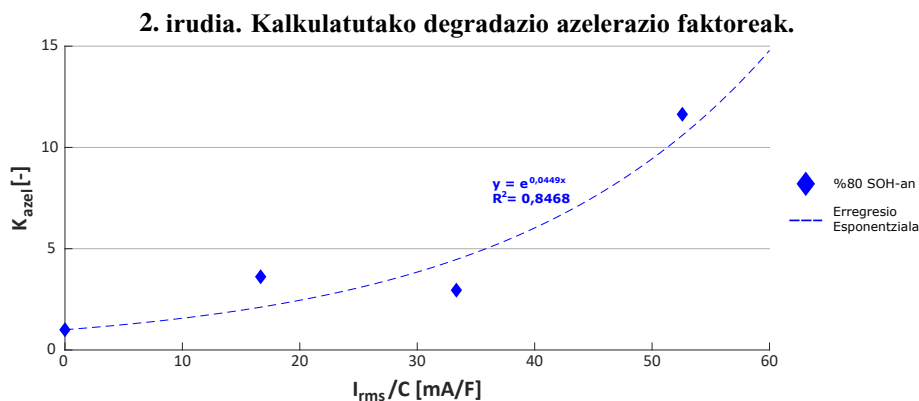
bat irudikatzen da, hain zuzen ere, 45 °C-tan biltegitratuta dauden gelaxken emaitzak. Degradazioa kapazitatearen osasun egoeraren bidez (ingelesez State Of Health, SOH) adierazten da, zeinak bizitza hasierarekiko kapazitate galera zehazten duen. Emaitza hauek kapazitate galeraren estimazio kurbak lortzea ahalbidetzen dute, aipatutako irudian erakusten den moduan. Halaber, estimazio kurben bidez gelaxken bizitza amaierako unea kalkulatu daiteke.

Biltegitratze frogetan lortutako emaitzetan oinarrituz, eta antzerako publikazioetan aurkeztutako adierazpenak kontuan izanik (El Mejdoubi *et al.*, 2018; Gallay *et al.*, 2012), t_{bilt} aldagaiarentzat ondorengo ekuazioa (3) proposatzen da, kontuan izanik bizitzaren amaiera % 80-ko SOH-ra iristean zehazten dela:

$$t_{bilt}(V, T @ \%80 SOH) = \eta \cdot \left[\frac{V_{ref}}{V} \right]^n \cdot \exp \left[\frac{Ea \cdot (T_{ref} - T)}{\delta \cdot \beta \cdot T} \right] + \alpha \cdot \exp \left[\frac{Ea \cdot (T_{ref} - T)}{\delta' \cdot \beta \cdot T} \right] \quad (3)$$

non V eta V_{ref} terminalaren tentsioa eta EDLC-aren tentsio nominala [V] diren, hurrenez hurren; Ea aktibazio energia [eV]; β Boltzmann-en konstantea ($\beta = 8,617e-5$ eV/K); T eta T_{ref} EDLC azaleko temperatura eta erreferentzia temperatura [K] hurrenez hurren; eta δ , δ' , η eta n parametro konstanteak [-], froga esperimentalen emaitzen bidez parametrizatu direnak.

Ziklatze frogei dagokionez, 3. Taulan adierazten den baldintzetan EDLC-aren degradazio kurbak lortu dira. Emaitza hauetatik degradazioaren azelerazio faktorea kalkulatu da, kontsideratuz EDLC-aren bizitza % 80-ko SOH-an amaitzen dela. Kalkulatutako K_{azel} balioak 2. Irudian aurkezten dira, saiakuntza bakoitzean aplikatutako I_{rms} balioaren arabera irudikatu direnak. I_{rms} balioa gelaxken kapazitatara (C) normalizatu da.



Kontsideratuz intentsitaterik gabe K_{azel} aldagaiaren balioa 1 dela, ekuazioa lortutako emaitzei doitzeko erregresio esponentziala aplikatu da, grafikoan irudikatzen den moduan. Lortutako adierazpena ondoko ekuazioan aurkezten da:

$$K_{azel}(I_{rms} @ \%80 SOH) = \exp \left[\frac{\lambda \cdot I_{rms}}{C} \right] \quad (4)$$

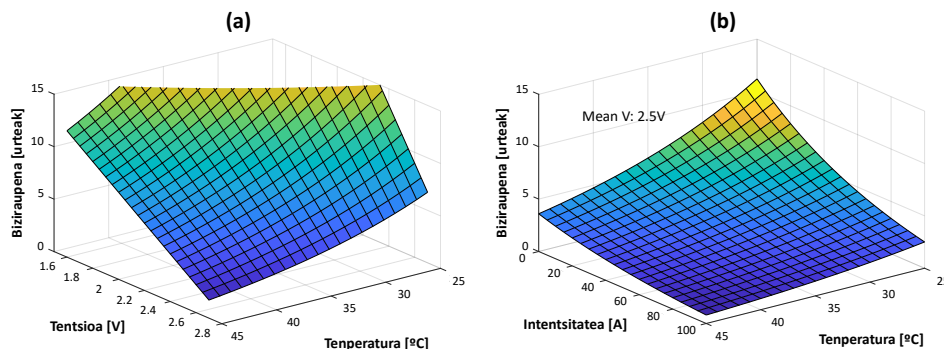
non I_{rms} EDLC-an neurtutako RMS intentsitatea [A] den; C neurtutako EDLC-aren kapazitatea [F] den; eta λ parametro konstante bat [-] den.

Ondorengo ekuazioan EDLC-rako biziraupen modeloa aurkezten da (5), aurretik aurkeztutako (2), (3) eta (4) adierazpenetan oinarrituz:

$$t_{EDLC}(V, T, I_{rms} @ \%80 SOH) = \left[\eta \cdot \left[\frac{V_{ref}}{V} \right]^n \cdot \exp \left[\frac{Ea \cdot (T_{ref} - T)}{\delta \cdot \beta \cdot T} \right] + \alpha \cdot \exp \left[\frac{Ea \cdot (T_{ref} - T)}{\delta' \cdot \beta \cdot T} \right] \right] \cdot \exp \left[\frac{\lambda \cdot I_{rms}}{C} \right]^{-1} \quad (5)$$

3. Irudian erakusten da zein biziraupen ematen dituen modeloak V , T eta I_{rms} balio desberdinetarako. Ikusten denez, modeloa baliagarria da tentsio, temperatura eta intentsitate tarte handi batean estimazioak egiteko.

3. irudia. Estimaturako biziraupenak: (a) Biltegitratze egoeran (b) Ziklatze egoeran.



3.2. Modeloaren Balidazioa

Modeloa balidatzeko helburuarekin, lortutako biziraupen estimazioak fabrikatzaileak emandako datuekin (Kreczanik *et al.*, 2014) konparatu dira (4. Taula). Ikusten denez, proposaturako modeloaren iragarpenak nahiko gertu gelditzen dira fabrikatzailearen estimazioetatik (% 2,7-ko errore maximoa).

4. taula. Modeloaren Balidazioa

Estimazioak @ V = 2,7 V; I = 0 A	T = 45 °C	T = 35 °C	T = 25 °C
Fabrikatzailea [egunak]	612	1.221	2.446
Modeloa [egunak]	628	1.249	2.453
Errorea [%]	2,7	2,3	0,3

3.3. Ikerketa Kasua: Kaohsiung-eko Tranbia

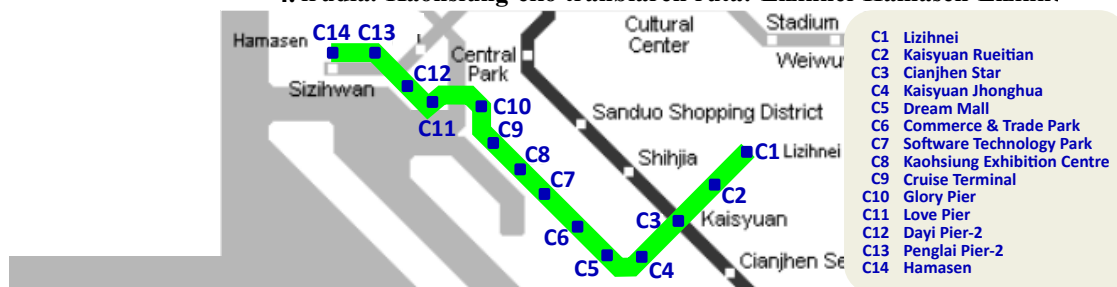
Ikerketa kasu bat aztertzeko helburuarekin, proposaturako degradazio modeloa benetako tranbia baten operazio profilari aplikatu zaio. Erabilitako operazio profila Kaohsiung-eko (Taiwan) tranbiak burutzen duena da. Tranbia hau CAF enpresak garatu du, eta mundu mailan %100 katenariarik gabeko operazioa eskaintzen duen lehen tranbia izan da. Katenaria gabeko ibilbidea burutu ahal izateko, tranbia honek EDLC-*ez* osatutako OESS bat dauka integraturik.

Tranbiaren ibilbideari dagokionez, 8,6 kilometroz eta 14 estazioz dago osaturik, 4. Irudian erakusten den moduan. Estazio bakoitzean karga azkar bat aplikatzen da bidaiariak tranbiatik jaitsi eta igotzen diren bitartean. Horrela, estazio bakoitzean EDLC-ek karga maila berreskuratzen dute. EDLC-en tentsioaren bilakaera 5. Irudian erakusten da, karga puntuen kokapenarekin batera. 5. Irudiko operazio profila aurkeztutako biziraupen modeloan (5) aplikatzerakoan, 9,5 urteko bizitza estimazioa lortu da EDLC-entzako.

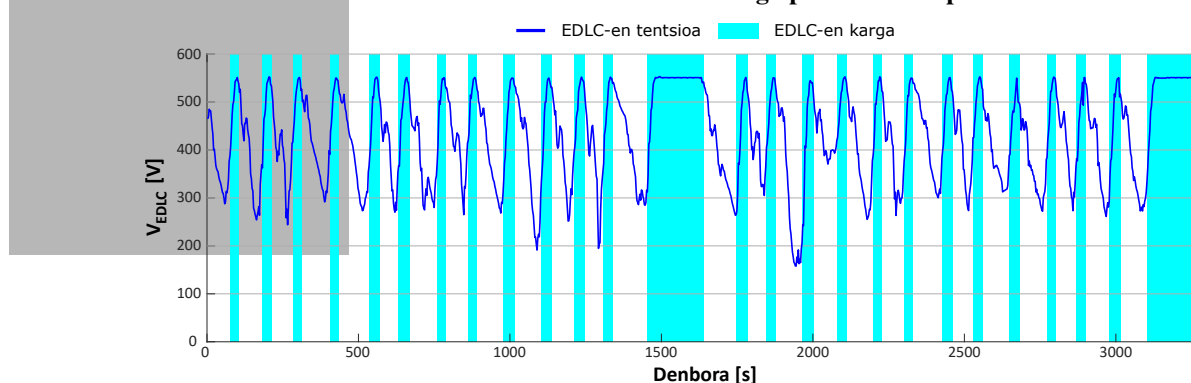
4. Ondorioak

Lan honek superkondentsadoreen biziraupena estimatzeko modelo bat aurkeztu du. Modeloa baldintza errealistetan burututako froga esperimentaletan oinarriturik garatu da, eta tentsio, intentsitate eta temperaturaren efektuak

4. irudia. Kaohsiung-eko tranbiaren ruta: Lizihnei-Hamasen-Lizihnei



5. Irudia: EDLC-en tentsioa eta karga puntuen kokapena.



indibidualki kontsideratzen ditu. Behin modeloa eraikita, fabrikatzaileak emandako datuekin balidatu da, % 2,7-ko errore maximoa lortuz proposatutako baldintzetan. Azkenik, ikerketa kasu bat aurkeztu da, benetako tranbia baten operazio profila modelora aplikatuz eta 9,5 urteko estimazioa lortuz.

Garatutako bizitza estimazio modeloa mota desberdineko aplikazioetara egokitu daiteke. Garraio astuneko aplikazio desberdinetan operatzen duten EDLC-en bizitza estima dezake, adibidez, tranbia edo autobus hibridoetan erabiltzen direnak. Era berean, eskaera maila baxuagoa erakusten duten aplikazio geldikorretan erabilitako EDLC-en bizitza ere estima dezake, adibidez etengabeko elikatze sistemetan (ingelesez Uninterrupted Power Systems, UPS) erabilitakoak.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Garatutako modeloak ez du EDLC-ak erabiltzen ez direnean gertatzen den kapazitate berreskurapena kontuan hartzen. Modeloaren doitasuna hobetzeko asmoz, prestazio hobekuntza hau kontuan hartzen duen modelo bat garatu beharko litzateke. Horretaz gain, behin aplikazio erreal batean instalatuta (Kaohsiung-eko tranbia adibidez), modeloa erabat balioztatzeko asmoz OESS-aren egoeraren jarraipen bat egitea proposatzen da. Azkenik, biziraupen modeloan oinarrituta, tranbia bezalako garraio astunen operazio, azpiegitura eta OESS kostuak optimizatzen dituen tresna bat garatu daiteke.

6. Erreferentziak

- Ajuria, Jon, Edurne Redondo, eta Eider Goikolea. 2017. Superkondentsadoreak: Energia Biltzeko Gailuak. *EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzi eta Teknologia Aldizkaria* Ale Berezia (2017).97–113.
- Alcicek, G., H. Gualous, P. Venet, R. Gallay, eta A. Miraoui. 2007. Experimental study of temperature effect on ultracapacitor ageing. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications, EPE*.
- Bohlen, Oliver, Julia Kowal, eta Dirk Uwe Sauer. 2007. Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors. *Journal of Power Sources* 173.626–632.

- Campillo, Jose Miguel, Laura Oca, eta Jon Andoni Barrena. 2016. Superkondentsadoreak: Etorkizuneko energia-metagailuak. *Elhuyar Aldizkaria* 321.53–55.
- Ceraolo, M., eta G. Lutzemberger. 2014. Stationary and on-board sotrage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways. *Journal of Power Sources* 264.128–139.
- El Mejdoubi, Asmae, Hicham Chaoui, Jalal Sabor, eta Hamid Gualous. 2018. Remaining Useful Life Prognosis of Supercapacitors under Temperature and Voltage Aging Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65.4357–4367.
- , Amrane Oukaour, Hicham Chaoui, Hamid Gualous, Jalal Sabor, eta Youssef Slamani. 2016. Prediction Aging Model for Supercapacitor's Calendar Life in Vehicular Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65.4253–4263.
- Gallay, R., M. Al Sakka, A. Oukaour, H. Gualous, B. Boudart, eta B. Tala-Ighil. 2012. Calendar and cycling ageing of activated carbon supercapacitor for automotive application. *Microelectronics Reliability* 52.2477–2481.
- German, R., P. Venet, A. Sari, O. Briat, eta J. M. Vinassa. 2014. Electrochemical Double Layer Capacitors (supercapacitors) ageing impacts and comparison on different impedance models. *EPE Journal (European Power Electronics and Drives Journal)* 24.6–13.
- Kovaltchouk, Thibaut, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Judicaël Aubry, eta Pascal Venet. 2015. Enhanced Aging Model for Supercapacitors Taking into Account Power Cycling: Application to the Sizing of an Energy Storage System in a Direct Wave Energy Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications* 51.2405–2414.
- Kreczanik, Paul, Pascal Venet, Alaa Hijazi, eta Guy Clerc. 2014. Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.4895–4902.
- Obando, Andres F., Victor I. Herrera, Haizea Gaztañaga, Begoña Gallardo, Txomin Nieva, eta Maider Varela. 2017. Optimization Methodology of Infrastructure and Onboard Energy Storage System for Cost-Reduction in Tramway Lines Design. In *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–7. IEEE.
- Ratniyomchai, Tosaphol, Pietro Tricoli, eta Stuart Hillmansen. 2014. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electrical Systems in Transportation* 4.9–20.
- Reynaud, Jean François, Maitane Garmendia, eta Txomin Nieva. 2018. Comprehensive integration of On-board Energy Storage systems in tramways: Birmingham tram case study. In *5th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference*.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan hau BIKAINTEK 2018 programaren barruan garatu da, CAF Power & Automation eta IKERLAN zentro teknologikoaren elkarlanaren ondorioz.