

FPL potentzia-bihurgailuen analisisa akats elektrikoetan zehar

(Analysis of FPL power converters under grid faults)

Asier Davila*, Estefanía Planas, José Antonio Cortajarena,
Ander DeMarcos, Adriano Navarro

Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Teknologia Elektronikoko Saila, Bilbo

LABURPENA: Banaketa-sarea hainbat erronkari aurre egiten ari da, hala nola, kontsumo elektrikoaren hazkunderari, baliabide berriztagarrien integrazioari eta abarri, eta horiek gaur egungo banaketa-sarea, sare adimenduagoetara bideratzen ari dira. Sare adimendu horietan, potentzia-elektronika erabiltzea beharrezko funtzionalitate berriak gehitzeko ezinbestekoa da. Alde horretatik, akats elektrikoak arintzean tentsio desorekatuak sortzen dira eta potentzia-bihurgailuak erabili daitezke tentsioak orekatzeko. Goi-tentsioko lineen kasuan, *Flexible Power Links* (FPL) aukera egokia da, energia fluxua bi norabideetan kontrolatzeko gai izateaz gain, tentsio desorekatuak sor baititzake. Artikulu honek FPL potentzia-bihurgailuetan erabiltzen diren topologia nagusiak aztertzen ditu eta akats monofasikoak arintzean haien portaera aztertzen du. Simulazioaren emaitzak aztertu dira topologia bakoitzaren abantailak eta desabantailak lortuz.

HITZ GAKOAK: Potentzia-bihurgailua, sare adimendua, akatsa, FPL.

ABSTRACT: *Distribution lines are dealing with several challenges such as the increase in power consumption, the integration of renewable resources, etc. which are driving them to more intelligent grids or smart grids. In these smart grids the use of power electronics is essential for adding new required functionalities such as the mitigation of electrical faults. In this sense, mitigation of electrical faults carries out the generation of unbalanced voltages which implies the use of specific power converter topologies. In the case of MV lines, Flexible Power Links (FPL) are a suitable option due to the advantages they report such as bidirectionally of power flow and the possibility of generating unbalanced voltages. This paper analyzes the main topologies used in FPL power converters and studies their behavior when dealing with single-phase faults mitigation. Simulation results are carried out in order to obtain the benefits and disadvantages of each analyzed topology.*

KEYWORDS: *Power converter, smart grid, fault, FPL.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Asier Davila. Teknologia Elektronikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Ingeniero Torres Quevedo plaza, 1 (Bilbo). – asier.davila@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-5926-1040>

Nola aipatu / How to cite: Davila, Asier; Planas, Estefanía; Cortajarena, José Antonio; DeMarcos, Ander; Navarro, Adriano (2024). «FPL potentzia-bihurgailuen analisisa akats elektrikoetan zehar». *Ekaia*, 45, 2024, 279-291. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.24567>).

Jasotze-data: 2023, martxoak 01; Onartze-data: 2023, maiatzak 16.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2024 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Azken urteetan, energia garbiaren pakete europarrarekin aldaketa garrantzitsuak sortu dira Europako energia-politikan. Han, zenbait helburu energetiko ezarri ziren, hala nola, energia berriztagarrien erabilera handiagoa eta eraginkortasun elektrikoaren hobekuntza. Zer esanik ez etorkizunean kontsumituko den energia gehiena elektrikoa izango dela. Beraz, hau garraiatzen duen sarea ahalik eta fidagarriena izatea komeni da, azken urteko energia elektrikoaren garraioa % 98.48 fidagarritasuna izanik [1]. Nahiz eta portzentaia altua iruditu, geratzen den portzentaia garrantzi handia du, batez ere elektrizitate barik geratzen diren guneak erabiltzaile kritikoak (industrialak edo ospitaleak) badira. Horregatik, % 100-ean fidagarria den garraioa izatea ezinezkoa dela jakinda, enpresa banatzaileen helburua ahalik eta modu fidagarrienean garraiatzea izan beharko litzateke, eta akatsa emanez gero, behala konpontzea kontsumitzaileengan duen eragina murrizteko.

1.1. Akats elektrikoak sarean

Akats bat linea elektrikoaren barruan desiragarria ez den gertakaria da. Akatsa agertzeko arrazoiak ugariak izan daitezke: faseen artean kontaktua ematea, zuhaitz bat linea gainean erortzea, eta abar. Banaketa-lineatan akats bat gertatzen denean, intentsitatearen balioa asko handituko da. Sare tradizional batean, lineak dituen babesen helburua intentsitate balio handi horietara heldu aurretik deskonexioa gauzatzea izango da, intentsitate balio handi horiek sor ditzaketan kalteak ekiditeko.

Banaketa-lineatan aurkitu daitezkeen zirkuitulaburrak mota bitan desberdinu daitezke: akats simetrikoak eta akats asimetrikoak. Lehenengoak akats trifasikoak dira eta asimetrikoen barnean beste akats guztiak sartzen dira [2]:

- **Akats trifasikoa:** hiru faseen artean gertatzen den zirkuitulaburra da (1c irudia). Akats ezohikoena da, gertatzen diren akats guztien % 5. Hala eta guztiz ere, ondorio larrienak sortzen dituzten akats motak dira, intentsitate handienak sortzen baitituzte.
- **Akats monofasikoa:** fase baten eta lurraren artean gertatzen den zirkuitulaburra da (1a irudia), akats arruntena da, ematen diren falten % 70 izanik.
- **Lurrerako akats bifasikoa:** bi fase eta lurraren artean gertatzen den zirkuitulaburra da (1b irudia). Akatsen % 10 da.
- **Akats bifasikoa:** bi faseen artean gertatzen den zirkuitulaburra da (1d irudia). Akatsen % 15 izanik.

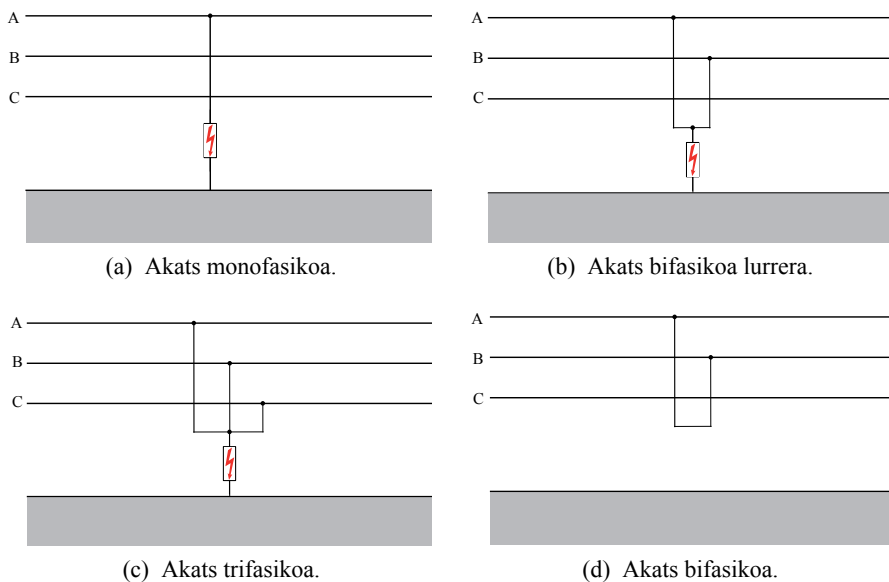
Akatsak gertatzen direnean, horniduraren jarraitutasuna kaltetu egiten da. Beraz, horniduraren kalitateak behera egiten du. Hori saihesteko eta

funtzionalitate berriak ezarri ahal izateko, sare tradizionala sare adimendu batera eraldatu behar da.

1.2. Sare adimenduna

Sare adimenduna teknologia digitaletan oinarritutako sare elektriko bat da, kontsumitzaileei bi norabideko komunikazioaren bidez elektrizitatea hornitzeko erabiltzen dena. Sistema honek aukera ematen du hornidurakatearen jarraipena, analisia, kontrola eta komunikazioa egiteko, eraginkortasuna hobetzeko, energia-kontsumoa murrizteko eta energia-horniduraren fidagarritasuna maximizatzeko. Sare adimenduna (2. irudia) sare elektriko konbentzionalen ahuleziak gainditzeko sortu zen.

Sare adimendunak garatzean, potentzia-elektronikak garrantzi handia du, banaketa-sare elektrikoaren fidagarritasuna eta egonkortasuna hobetzeko modu eraginkorra eskaintzen baitu [3].



1. irudia. Akats mota ezberdinak.

Potentzia-bihurgailu batek, energia elektrikoaren ezaugarriak (tentsioa, maiztasuna eta fasea) aldatzen ditu, normalean maiztasun altuko kommutazioa erabilita. Zentzu horretan, FPLak banaketa-sareetan erabiltzen diren potentzia-bihurgailuak dira, eta *Alternating Current* (AC) moldatzen dute bi faseen bidez (3. irudia). Bi fase horiek *Direct Current* (DC) bus bategen lotzen ditu eta sarera LC edo LCL iragazkien bidez konektaturik daude (3. irudia), irteerako seinalearen kalitatea hobetzeko.

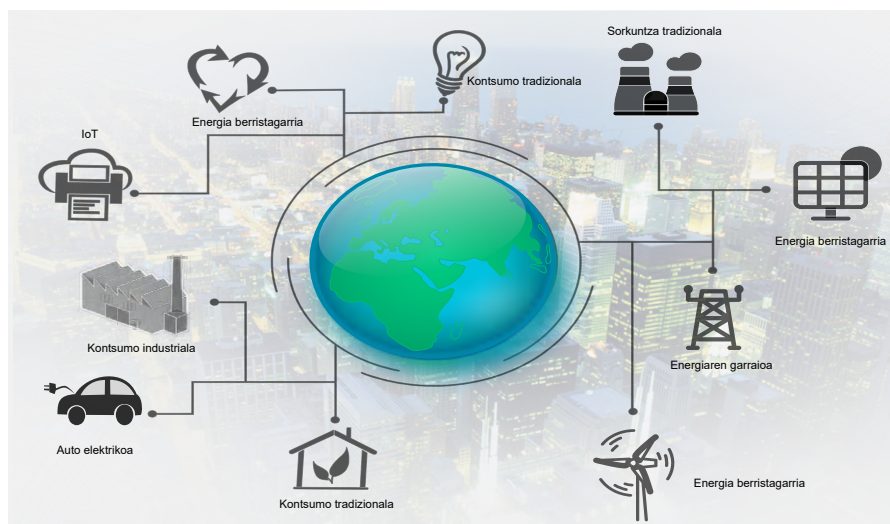
Topologiaren aldetik, sistema hauetan *Neutral-Point-Clamped* (NPC) topologiak erabiltzen dira batez ere, kudeatzen duten potentzia maila altua delako (hainbat MVA inguru) [4] [5].

FPLak bi norabideetan potentzia transmititzeko gai dira, eta aldi berean potentzia erreaktiboaren kontsumoa edo sorkuntza erregulatu dezakete [6]. Gainera, maiztasun, fase edo tentsio-anplitude ezberdinetako sareko bi puntu lotzeko aukera eskaintzen dute.

Sareko akats elektrikoei aurre egiteko, lan batzuek soluzio ezberdinak proposatu dituzte [7] [8]. Hala ere, ez dute hornidura kalitate ona bermatzen eta DC/AC potentzia-bihurgailuan oinarritzen dira, energia guztia DC iturri batetik lortua izanik. [8]-n potentzia-bihurgailu monofasiko baten bidez lurrrera konektatzen da kalitate oneko horniketeta bat bermatzeko, zero-sekuentziaren injekzioaren bidez. FPL sistema bat erabilia, potentzia-bihurgailu monofasikoarekin lorturiko abantaila beraz gain beste hainbat lor daitezke:

- Bi norabideko potentzia-fluxuak kudeatzeko aukera.
- Potentzia-bihurgailu monofasikoekin alderatuz, energia handiagoko akatsak arintzea.
- Matxura bat gertatzean kargen horniduraren kalitatea hobetzea.
- FPL sistemaren bi aldeetan akatsak ebaztea, simetriari esker.

Horrela, lan honetan NPC topologia desberdinen portaera aztertzen da FPL sistemetan, zehazki sarean akats monofasiko bat gertatzen den kasuetan, haiek baitira maizen gertatzen diren akats motak [2].



2. irudia. Sare adimenduaren irudikapena.

2. AKATS MONOFASIKOEI AURRE EGITEA

Akats monofasikoa agertzen denean, kaltetutako fasearen tentsioa bat-batean jaisten da, eta korronea handitzen da. Sortutako tentsioak eta korroneak orekatuta ez daudenez, Fortescue-ren teorema erabil daiteke desorekatuta dagoen sistema trifasiko bat sistema orekatu independenteen batura modura adierazteko.

Fortescueren teorema sistema polifasiko asimetriko bat, n fase dituen, n sistema orekatuen batuketara modura adieraz daitekeela esaten du. Lan honetan aztertzen den kasuan, sistema trifasikoa denez, $n = 3$ izango da. Beraz, sistema asimetrikoa hiru sistema orekatuen batura modura adieraz daiteke: sekuentzia positiboa, negatiboa eta zero-sekuentziak hain zuzen ere. Fortescueren teoreman oinarritzen den kasu berezi hau *Osagai Simetrikoen Metodo* izenez ezagutzen da. Izan ere, sistema honek duen abantaila garrantzitsuena sistemen ebazpena zirkuitu monofasiko baliokidearekin egin daitekeela da, sistema orekatuak lortzen direlako. Sistema bakoitzak izango duen desfasea honela kalkulatu da, desfasea radianetan adierazita:

$$Desfasea = ordena \cdot \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

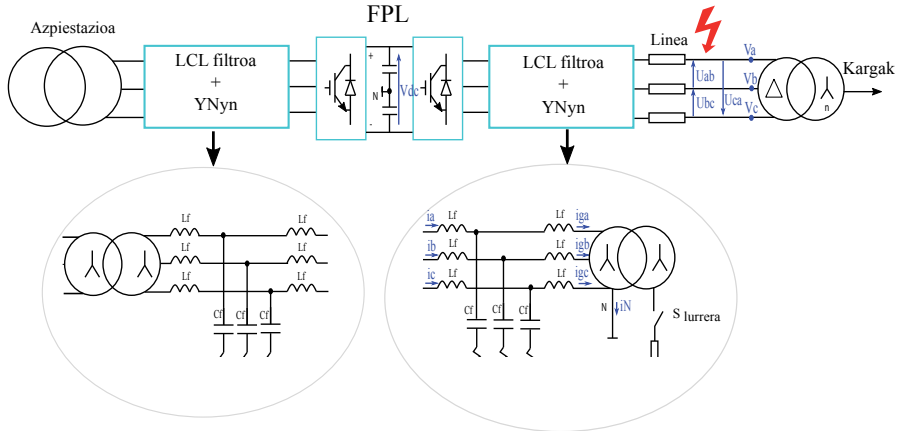
Hiru sistema direnez, ordena 0,1 eta 2 balioak izango ditu. Beraz, lehenengo kasuan, sistemak izango duen desfasea 0° -koa izango da, zero-sekuentzia hain zuzen ere. Bigarren kasuan, 120° -ko desfasea egongo da faseen artean, sekuentzia positiboa izango dena. Modu berean, 2. ordeneko kasuan lortzen den desfasea 240° -koa izango da, sekuentzia negatiboa izango dena. Modu matritzial batean adierazita (2) erabiliko da:

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

non «a» parametroa $a = 1 \angle 120$ modura definituko den. Parametro honen helburua fasore bati biderkatuz, 120° -ko biraketa ematea izango da, fase aldatuta bermatuz modulua konstante utziz.

Akats monofasikoetan, hiru sekuentziak agertzen dira, seriean konektatuta daudenak. Akatsaren eragina konpentsatzeko zero-sekuentziako tentsioak sortzen badira, konektatutako kargak behar bezala hornitu daitezke fenomeno honek dirauen bitartean ere [8]. Kasu honetan, akatsa sarean gertatzen denean, FPLak detektatu egiten du eta kargak tentsio desorekatuekin elikatzen hasten ditu, zero-sekuentziarekin. FPLak sortutako tentsioen helburu nagusia kargetan energia hornidura mantentzea da, sarean akatsa egon

arren. Kargak triangelu-izar (Dyn) transformadoreen bidez konektatuta daudenez, tentsio konposatuek bakarrik eragiten diete, eta tentsio horiek konstante mantendu daitezke prozesu osoan zehar FPL bihurtzailuari esker.



3. irudia. FPLaren eskema orokorra.

Ohiko potentzia-bihurgailu gehienak hiru hariko sistematarako diseinatuta daudenez, kontroladoreak egokiak dira karga trifasiko orekatuetarako [9]. Nahiz eta tentsio desorekatuak sor daitezkeen hiru hariko sistema batean [10], zero-sekuentziako tentsioa agertzen denean lau hariko topologia behar da, hiru hariko bihurtzailuek ez baitute zero-sekuentziako osagaietarako biderik eskaintzen.

Beraz, FPL batekin akatsak ebazteak hornidura elektrikoa mantentzen den bitartean zenbait eskakizun dakartza:

- Bihurgailuak tentsio desorekatuak sortzeko gai izan behar du.
- Kargak triangeluan edo Dyn transformadoreen bidez konektatu behar dira.
- FPLaren irteerako transformadoreak YNyn izan behar du, zero-sekuentziako osagaien zirkulazioa ahalbidetzeko. Horretarako, interuptorea (3. irudia) itxi behar da akatsa agertzen denean.

Eskakizun horiek guztiak 3. irudian laburbiltzen dira.

3. NPC POTENTZIA-BIHURGAILUEN TOPOLOGIAK

Bi mailatako potentzia-bihurgailuak oso erabiliak dira potentzia baxuko aplikazioetan, eta maila anitzetako konfigurazioak egokiagoak dira

potentzia ertain-altuko aplikazioetarako [11]. Alde horretatik, NPC potentzia-bihurgailuek hainbat abantaila dituzte bi mailatako bihurgailu tradizionalekin alderatuta. Antzeko aplikazioetarako, NPC potentzia-bihurgailuek iragazki txikiagoak behar dituzte irteeran, eraginkortasun hobea eta estres txikiagoa dute gailuetan [12].

Bestalde, aplikazio honetan, tentsio desorekatuak sortu behar direnez, lau hariko topologia beharrezkoa da zero-sekuentziarentzat bide bat bermatzeko. Laugarren haria lortzeko, bi aukera daude NPC potentzia-bihurgailuetarako (4. irudia):

- Hiru adarreko NPC bihurgailua DC linkeko lotura zuzenarekin.
- Lau adarreko NPC bihurgailua.

1. taula. NPC bihurgailuen topologiengatik alderaketa.

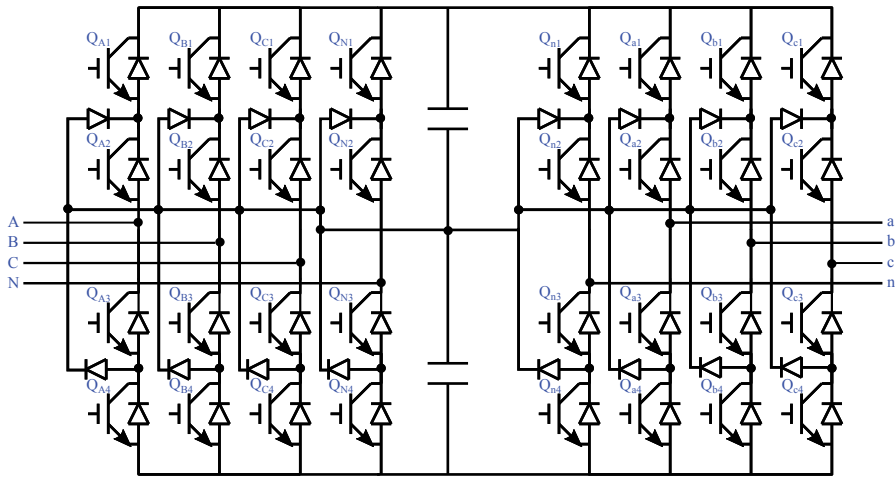
	Hiru adarreko topologia	Lau adarreko topologia
Topologia	Aldaketa gutxi egin behar	Adar berri bat gehitu
Erdi eroaleen kopurua	24 IGBT, 12 diodo	32 IGBT, 16 diodo
IGBTen korrontea	Altua	Baxua
IGBTak jasandako tentsioa	$V_{DC} / 2$	$V_{DC} / 2$
Modulazio teknika	Erraza	Konplexuagoa
Irteerako tentsio maximoa (rms)	$V_{DC} / (2 \cdot \sqrt{2})$	$V_{DC} / \sqrt{2}$

3.1. Hiru adarreko NPC bihurgailua

Topologia hau (4a irudia) bide erraza da laugarren hariko konexioa lortzeko hiru mailako NPC bihurgailu batetik abiatuta. Laugarren haria *DC link*-eko erdiko puntuaren bidez lortzen da. Beraz, aldaketa gutxi dakartza hiru adarreko bihurgailuaren konfigurazioari dagokionez. Gainera, beste topologia batzuek baino erdiekoale gutxiago behar ditu, eta horrek ekipoen tamaina eta kostua gutxitzen ditu. Era berean, modulazio-teknikaren konplexutasuna murrizten du. Bestalde, topologia honen eragozpen nagusia *DC link*-eko tentsioaren erabilera eskasa da, gehienezko irteerako tentsioa $V_{DC} / 2$ delako.

3.2. Lau adarreko NPC bihurgailua

Lau adarreko NPC potentzia-bihurgailuak (4b irudia) laugarren haria lortzen du beste adar baten bitartez. Topologia honekiko interesa handitu egin da azken urteetan desorekak kudeatzeko duen gaitasunagatik [13]. Azken urteetan, topologia honekiko interesa handitu egin da, lortu ahal den faseko tentsio maximoa V_{DC} izanik. Hala ere, laugarren adarra erabiltzeak bihurgailuaren tamaina eta kostua handitzen ditu eta modulazio-teknika konplexuagoen erabilera dakar [14].



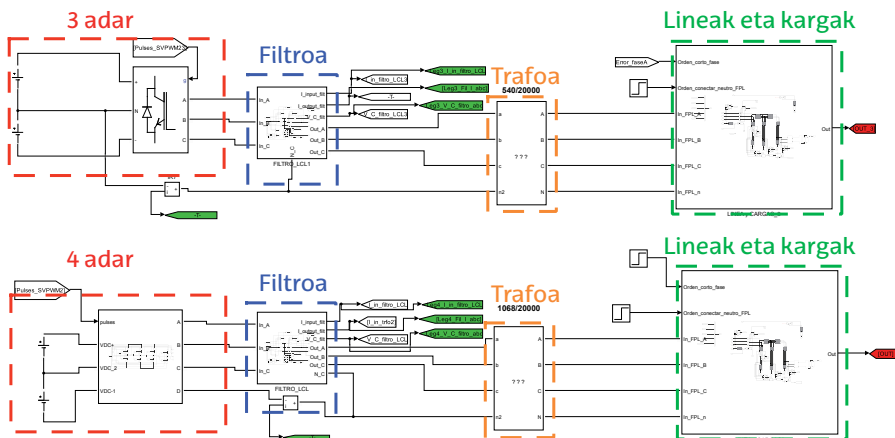
(a) Hiru adarreko topologia.

(b) Lau adarreko topologia.

4. irudia. NPC bihurgailuen topologiak.

3.3. Bi topologien alderaketa

Aztertutako topologien aldetik, hiru adarreko topologia da ohikoena, erdieroale gutxiago erabiltzen dituelako. Gainera, hiru hariko topologiaren aldaketa gutxiren bidez lor daiteke, eta modulazio-teknika konbentzionalak erabil daitezke. Hala ere, lau adarreko topologia aukera hobea da desorekei aurre egiteko, kargaren potentzia bererako IGBT-etan korrante baxuak eskatzen dituelako. Bi topologien abantaila eta desabantaila nagusiak 1. taulan laburbiltzen dira.



5. irudia. Alderaketa egiteko erabilia izan den Simulink modeloa.

4. SIMULAZIO-EMAITZAK

4.1. *Simulink* modeloa

Sistema elektriko osoaren eredu bat egin da *Matlab-Simulink software*-aren bidez. Simulazio-ereduan hiru adarreko eta lau adarreko topologiaren ereduak inplementatu dira ezaugarri berdinak dituen eskema elektriko bati konektatuta. Simulaturiko eskema 5. irudian aurkezten dena da. Topologia bakoitzerako, FPL blokearen barnean (gorriz 5. irudian) aldaketak egin dira, lau adarreko edo hiru adarreko potentzia-bihurgailua simulatzeko. Kommutazio-maiztasun baxua (2 kHz) erabili da, MVAtako potentzia-bihurgailuetarako balio egokia delako.

FPLa sarera konektatzen da LCL iragazki baten bidez. Izan ere, iragazki mota hauek haril txikiagoak erabiltzeaz gain, diseinu trinkoagoa eta galera txikiagoak ahalbidetzen dituzte [15]. Ondoren, YNyn transformadore bat erabiltzen da zero-sekuentziako korronteak bide bat bermatzeko akatsa dagoen bitartean.

Akatsa banaketa-sareko puntu batean gertatuko da eta kargak Dyn transformadoreen (3. irudia) bidez konektatu dira. Simulazio-ereduaren parametro nagusiak 2. taulan laburbiltzen dira.

4.2. Simulazioen emaitzak

Simulazioetan akats monofasikoa gertatzen da $t = 0.1$ segundoan. Horrela, sistemak akatsen aurrean duen erantzuna ikus daiteke. Emaitzak hiru kategoria nagusitan banatu dira: tentsioak, korronteak eta entregaturiko potentzia.

4.2.1. Tentsioak

IGBTek $V_{DC} / 2$ tentsioa jasaten dute bi konfigurazioetan, DC buseko erdiko puntuarekin konektatuta baitaude bi topologietan. V_a , V_b eta V_c tentsioak desorekatu egiten dira «a»fasean 0 V izanda $t = 0.1$ s-an, akatsa gertatzen denean (6. irudia). «a»faseko tentsioa 0ra murrizten den bitartean beste bi faseek $\sqrt{3}$ handitzen dituzte beren balioak. Kargek jasotzen duten tentsioari begira, ikus daiteke bi konfigurazioen kasuetan kargek jasotako tentsioak uneoro orekaturik jarraitzen dutela (7. irudia).

2. taula. Simulazioaren parametroak.

	Parametroa	Balioa		Parametroa	Balioa
Bihurgailua	f_{sw}	2 kHz z	Karga	P^{karga}	1.2 MW
	V_{DC}	1.500 V		V_{rms}	230 V
	I_{rms}^{max}	1.100 A	Dy trafoa	U_{rms}	20kV
Linea aereo	U_{rms}	20 kV		a	$\frac{2000}{400}$
	f	50 H z		S_n	625 kV A
	Luzeera	10 km		f	50 H z
	R_1	0.2 Ω /km		L_1	0.305 H
	R_0	0.4 Ω /km		R_1	9.6 Ω
	L_1	$\frac{0.4}{314}$		L_2	40.7 μ H
	L_0	$\frac{1.5}{314}$		R_2	1.28 m Ω
	C_1	15 nF/km		L_m	7.64 kH
	C_0	10 nF/km		R_m	2.25 M Ω
	Lur azpiko linea	U_{rms}	20 kV	YNyn trafoa	U_{rms}
f		50 H z	a_{4adar}		$\frac{1068}{20000}$
Luzeera		5 km	a_{3adar}	$\frac{534}{20000}$	
R_1		0.2 Ω /km	S_n	2.35 MV A	
R_0		0.4 Ω /km	f	50 H z	
L_1		$\frac{0.4}{314}$	L_1	5.95 mH	
L_0		$\frac{1.5}{314}$	R_1	7.51 m Ω	
C_1		300 nF /k	L_2	0.28 μ H	
C_0		300 nF /k	R_2	0.35 m Ω	
			L_m	2.4 kH	
		R_m	225 M Ω		

4.2.2. *Korronteak*

Bi simulazioetan kargek eskatzen duten potentzia berdina denez, eta tentsio-maila ezberdina denez, hiru adarreko topologiaren korronte-maila altuagoa izatea espero da. Alde horretatik, FPLren irteerako korronteak aztertzen dira bi topologietarako; hiru adarreko konfiguraziorako korronte-maila handiagoa dela baieztatzen da (8. irudia). Neutroko korrontea ikusita, bi topologiaren batez besteko balioa oso antzekoa da (9. irudia).

4.2.3. *Entregaturiko potentzia*

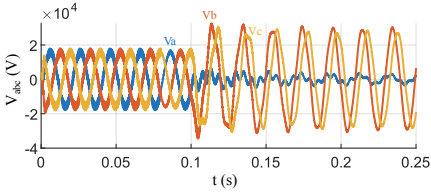
FPLak entregatutako potentzia aktiboa antzekoa da bi kasuetan, eta kargek kontsumitutako potentziaren berdina da. Bestalde, potentzia erreaktiboaren arteko aldeak iragazkiaren potentzia erreaktiboa desberdina delako sortzen da. Iragazkiaren tentsio-maila eta korronteak desberdinak direnez,

potentzia erreaktiboa ere desberdina da. Horiek neurtzeko erabili beharreko formulak honako hauek dira:

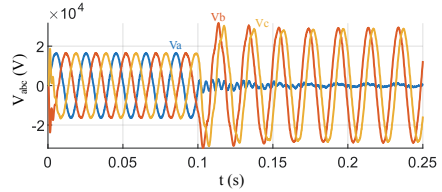
$$Q_C = -V^2\omega C, \tag{3}$$

$$Q_L = I^2\omega L. \tag{4}$$

Simulazioetako balioak 10. irudian ikusi daitezke.

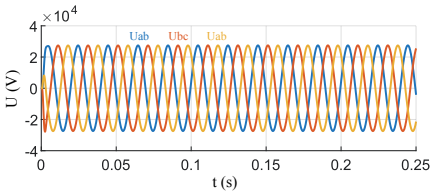


(a) Hiru adarreko topologia.

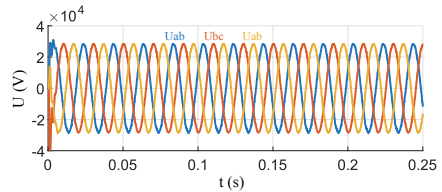


(b) Lau adarreko topologia.

6. irudia. Tentsio sinpleak kargan (Fig. 3 V_a, V_b, V_c).

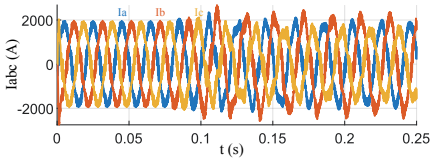


(a) Hiru adarreko topologia.

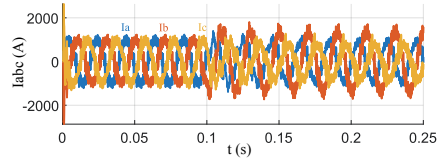


(b) Lau adarreko topologia.

7. irudia. Tentsio konposatuak kargan (Fig. 3 U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}).

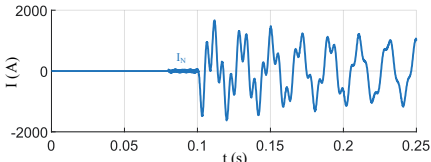


(a) Hiru adarreko topologia.

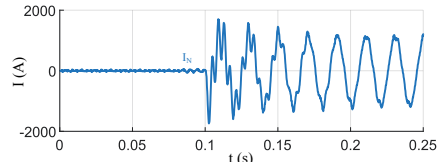


(b) Lau adarreko topologia.

8. irudia. FPLeko irteera korrontek (Fig. 3 i_a, i_b, i_c).

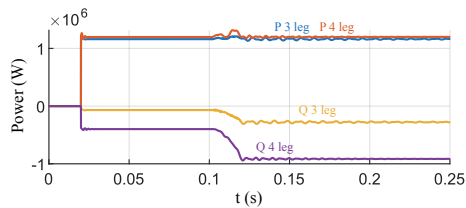


(a) Hiru adarreko topologia.



(b) Lau adarreko topologia.

9. irudia. Neutroko korrontea.



10. irudia. Irteerako potentzia.

5. ONDORIOAK

Artikulu honen bitartez, banaketa-sareko akatsak arintzeko FPL sistema baten estrategia aurkeztu da, banaketa-sareetan energiaren garraioaren kalitatea hobetzeko erabilgarria dena. FPL sistema hauek lau hariko konfigurazioa duten NPC potentzia bihurgailuak erabiltzen dituzte tentsio desorekatuei aurre egiteko. Alde horretatik, alderaketa bat egin da hiru adarreko NPC bihurgailu tradizionalaren eta lau adarreko NPC bihurgailuaren artean, konfigurazio bakoitzaren abantaila eta desabantaila nagusiak ezagutzeko.

Lau adarreko topologiaren onura nagusia DC busa hobeto erabiltzen duela da. Honek potentzia berdina emateko, IGBT-etan zehar doan korrontea txikiagoa izatea dakar. Horri esker, korronte baxuagoko IGBT-ak erabil daitezke, eta konmutazio-maiztasuna handitu daiteke, kontrol-sistemaren diseinua erraztuz. Gainera, tentsio desorekatuei aurre egiteko erantzun hobea ematen dute. Bestalde, erdieoroale gehiago eskatzen ditu, potentzia-bihurgailuaren tamaina eta kostua handituz. Modulazio-teknika bereziak ere behar ditu laugarren adarreko kontrolari aurre egiteko.

BIBLIOGRAFIA

- [1] REE, 2021, «Calidad del servicio de la red», Txosten teknikoa, REE.
- [2] N. TLEIS, 2019, *Power systems modelling and fault analysis : theory and practice*, Academic Press, London.
- [3] M. LISERRE, G. BUTICCHI, M. and RESEN, G. D. CARNE, L. F. COSTA eta Z.-X. ZOU, 2016, «The smart transformer: Impact on the electric grid and technology challenges», *IEEE Industrial Electronics Magazine*, **10**(2), 46-58.
- [4] A. CHEBABHI, M. K. FELLAH, A. KESSAL eta M. F. BENKHORIS, 2015, «Power quality improvement using a three dimensional space vector modulation with SRF theory for three level neutral point clamped four leg shunt active power filter controlling in dq0 axes», *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, IEEE.

- [5] A. TCAI, Y. KWON, S. PUGLIESE eta M. LISERRE, 2021, «Reduction of the circulating current among parallel NPC inverters», *IEEE Transactions on Power Electronics*, **36**(11), 12504-12514.
- [6] S. JUPE, S. HODA, J. KING, D. DALE eta J. BERRY, 2019, «Controlling a 33 kV flexible power link in GB's distribution network», *15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019)*, Institution of Engineering and Technology.
- [7] N. R. MERRITT, C. CHAKRABORTY, P. BAJPA I eta B. C. PAL, 2020, «A unified control structure for grid connected and islanded mode of operation of voltage source converter based distributed generation units under unbalanced and non-linear conditions», *IEEE Transactions on Power Delivery*, **35**(4), 1758-1768.
- [8] F. PAZOS, A. AMEZUA, I. GUTIERREZ, G. SANTAMARIA, J. GARCIA eta V. VALVERDE, 2009, «Active earthing system for mv networks by means of power electronics», *CIREC 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part I*, IET.
- [9] M. R. MIVEH, M. F. RAHMAT, A. A. GHADIMI eta M. W. MUSTAFA, 2016, «Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 1592-1610.
- [10] A. VIJAY, S. DOOLLA eta M. C. CHANDORKAR, 2020, «An emulation platform for mimicking unbalanced loads and sources», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, **24**, 100394.
- [11] J. RODRIGUEZ, J.-S. LAI eta F. Z. PENG, 2002, «Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **49**(4), 724-738.
- [12] F. ROJAS, R. KENNEL, R. CARDENAS, R. REPENNING, J. C. CLARE eta M. DIAZ, 2017, «A New Space-Vector-Modulation Algorithm for a Three-Level Four-Leg NPC Inverter», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **32**(1), 23-35.
- [13] C. ROH, S. KWAK eta S. CHOI, 2021, «Three-phase three-level four-leg NPC converters with advanced model predictive control», *Journal of Power Electronics*, **21**(10), 1574-1584.
- [14] F. H. AWAD, A. A. MANSOUR, M. I. MAREI eta A. A. SATTAR, 2019, «An unbalance mitigation method based on 3d-SVPWM for four-wire three-leg mid capacitor point inverter», *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, IEEE.
- [15] R. PENA-ALZOLA, M. LISERRE, F. BLAABJERG, M. ORDONEZ eta Y. YANG, 2014, «Filter design for robust active damping in grid-connected converters», *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **10**(4), 2192-2203.