



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Sarera Konektatutako
Bihurgailuen Hutsuneen
Aurreko Erantzuna**

*Alexander Gomez-Raya,
Amaia Lopez-de-Heredia, Endika
Bilbao eta Alain Sanchez-Ruiz*

43-50 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.05>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



Sarera Konektatutako Bihurgailuen Hutsuneen Aurreko Erantzuna

Alexander Gomez-Raya^{1,2}, Amaia Lopez-de-Heredia¹, Endika Bilbao¹, Alain Sanchez-Ruiz²

¹IKERLAN S.Coop,

²Vitoria-Gasteizko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU)

alexander.gomez@ikerlan.es

Laburpena

Energia berriztagarrien iturrien integrazioaren hazkundea funtsezkoa da sistema elektrikoan, etorkizuneko helburu klimatikoak betetzeko. Energia iturri hauek sisteman dauden sorgailu sinkrono konbentzionalak ordezkatzen dituzten heinean, egonkortasun arazoak sortu daitezke sistemaren inertzia eta indarra murrizten direlako. Hori dela eta, sarearen konexio-kodeek sarera konektatzen diren sorgailuek babes-funtzioak betetzea eskatzen dute.

Lan honetan, sarera konektatutako bihurgailuen kontrol ezberdinak aztertuko dira, tentsio baxuetan jarraitzeko gaitasunaren sare kodearen beharrak asetzeko. Lortutako emaitzetatik bihurgailuen kontrol klasikoa hutsune trifasikoen aurrean mantentzeko gai dela ondorioztatu da, baina sarearen desorekak jasateko sare desorekatuetarako kontrol funtzioak beharrezkoak dira.

Hitz gakoak: Bihurgailuen kontrola, Kontrol bektoriala, Sare-jarraitzaile bihurgailuak, Sare desorekatua, Tentsio hutsuneak.

Abstract

The increasing integration of renewable energy sources into the electricity system is key to meet the future climate objectives. As these energy sources replace the conventional synchronous generators present in the system, stability problems may arise due to reduced inertia and system power. Therefore, grid connection codes require renewable energy generators that are connected to the grid to fulfil these functions.

In this work, different controls of grid-connected converters will be analysed to meet the requirements of the grid code for low voltage ride-through capability. From the obtained results, it is deduced that classical converter control can deal with three-phase sags, but unbalanced grid control functions are needed to support grid unbalances.

Keywords: Converter Control, Grid Following Converters, Unbalanced Grid, Voltage Sags, Vector Control.

1. Sarrera eta motibazioa

Tradizionalki, energiaren hornikuntzarentzako azpiegiturak itxura zentralizatua zeukan, esaterako, zentral elektriko handi batek biztanle kopuru handi bat hornitzen zuen. Sorgailuak haien artean sakabanaturik zeuden, ondorioz, sorkuntza topologia honek transmisio eta banatze sistema konplexuak eraikitzea behartu du.

Gaur egungo sistema elektrikoa sorkuntza banatu batera transformatzen doa, eta horrekin Sorkuntza Banatuaren (SB) terminoa sortu da. Kontzeptu honek orokorrean elektrizitatea kontsumoaren tokian sortzen duela esan nahi du, orokorrean Energia Berriztagarrietan (EB) oinarritzen da, eta sareari konektatuta edo deskonektatuta egon daiteke (Nadeem et al., 2023).

EB-en presentzia handiko sare elektrikoetan sortutako arazo bat sarearen ahultzea da. Sare indartsu batek operazio aldaketak hobeto jasaten ditu, hala nola, energiaren eskaeraren aldaketa eta falten agerpena, sarearen tentsioa eta maiztasuna limite egonkorren aurrean errazago mantenduz. Sare ahul batek ordea, bat-bateko operazio aldaketen aurrean sentikorragoa da eta fenomeno hauen ondorioz tentsio eta maiztasunaren aldaketa handiagoak agertu daitezke. Sareko parametro hauen aldaketa handiek erreleen irekiera eta nahigabeko kargen deskonexioa sorrarazi dezakete (Aljarrah et al., 2024).

Orokorrean, EB-ak sarera konektatzen dituzten bihurgailu hauek sare-jarraitzaile edo grid-following (GFL) bezala ezagutzen dira, eta era egokian funtzionatzeko sarearen tentsio eta frekuentzia jarraitzen dute. Hortaz, sare ahul batera konektatzerakoan, falten aurrean tentsio eta maiztasun erreferentziarik geratzeko arriskua dago, bihurgailu mota hauen funtzionamendua eragotziz.

Hori dela eta, EB-ez betetako sareetan ezinbestekoa da bihurgailuek sareko babes funtzioak betetzea. Transmisio Sistemaren Operadoreek (TSO) etengabe aldatzen dituzte EB-ek sarera konektatzeko araudiak, sarearen efizientzia eta fidagarritasuna ziurtatzeko. Esaterako, tentsio hutsune baten aurrean araudiak korrante erreaktiboa injektatzea agintzen du hutsunearen sakoneraren arabera, eta gainera, bihurgailua denbora jakin bat sarera konektatuta mantendu behar da.

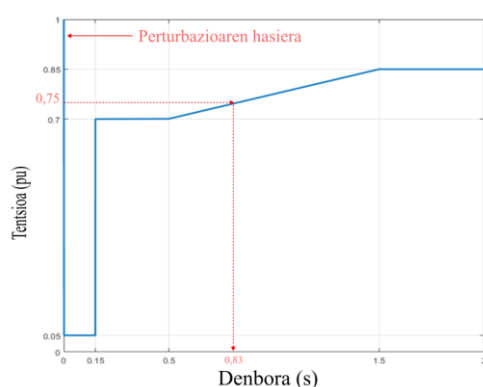
Beste neurri baten adibidea maiztasunaren babesa eskaintzea da, sistemaren maiztasunaren desbiderapenen aurrean sorgailuek potentzia aktiboa doitu behar dute, arazoaren lehen momentuetan egoera egonkortzen saiatzeko (Aljarrah et al., 2024).

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

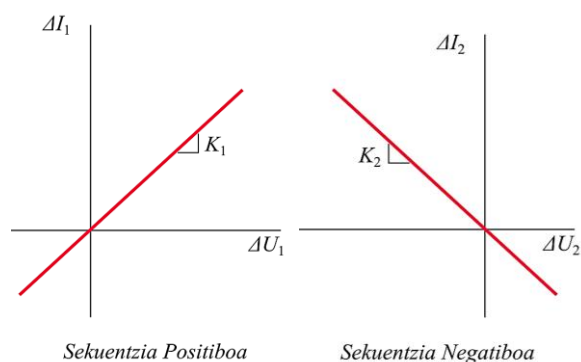
Lan honetan GFL bihurgailu baten tentsio-perturbazioen aurrean konektatuta mantentzeko gaitasunaren analisia egingo da bihurgailuaren kontrol-sistematik jardunez. Helburu nagusia bihurgailuen kontrol-metodo konbentzionalak tentsio perturbazioen aurrean sare babes funtzioak betetzeko mugak aztertzea da.

Sorgailuen sarerako konexioa arautzen duen UE 2016/631 araudiaren arabera, tentsio-hutsune baten aurrean bi funtzio nagusi bete behar dira: lehenengoa, denbora minimo batez konektatuta mantentzea, eta bigarrena, korrante erreaktiboa injektatzea, tentsioaren anplitudea operazio-mugen barruan mantentzeko. Funtzio hauek betetzeko, 1. Irudian adierazitako profilak erabili behar dira. 1. Irudiako profilean, tentsio hutsunearen sakoneraren arabera konektatuta mantentzeko denbora adierazten da 1. Irudia profilek, ordea, falta motaren arabera eta tentsio hutsunearen sakoneraren arabera den korrante erreaktiboaren injekzioa adierazten dute. Bi aldagai hauek K_1 eta K_2 koefizienteen arabera erlazionatzen dira, eta TSO ezberdinek ezartzen dituzte (Commission Regulation (EU) 2016 / 631, 2016; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).

1. Irudia. a) UE 2016/631-araudiko LVRT tentsio profila. b) Korrante erreaktibo azkarraren injekzio profilak.



a)



b)

Lan honetan, tentsio hutsune trifasiko eta bifasikoen aurreko erantzunak aztertuko dira, sare kodeak agintzen duen moduan. Hutsune trifasikoen egoeran, sistema orekatua izaten jarraitzen du, baina hutsune bifasikoen kasuan sistema desorekatu egiten da (Sweeting, 2012).

Orokorrean, bihurgailuen kontrol-metodo konbentzionalak ez daude prestatuta sare desorekatuetan lan egiteko. Sarearen sekuentzia positiboa eta sare desorekatuetan sortzen den sekuentzia negatiboaren arteko gurutzaketaren ondorioz, oszilazioak sortzen dira eta bihurgailuaren kontrol gaitasuna galtzen da.

Arazo honi aurre egiteko metodo ezberdinak daude literatura espezializatuan, hala nola, pasa-baxuko iragazkiak edo notch iragazkiak erabiltzea, seinale atzeratuaren bidezko deuseztapenaren edo DSC (Delayed Signal Cancellation) metodoa eta DSOGI (Dual Second Order Generalized Integrator) sekuentzia banatzaile metodoak (Hassan et al., 2020).

3. Ikerketaren muina

Atal honetan lanaren garapena azalduko da. Esan bezala, lan honen helburu nagusia sarera konektatutako bihurgailuen kontrol-metodo konbentzionalen mugak aztertzea da hutsuneen aurrean tentsio babes funtzioak betetzeko.

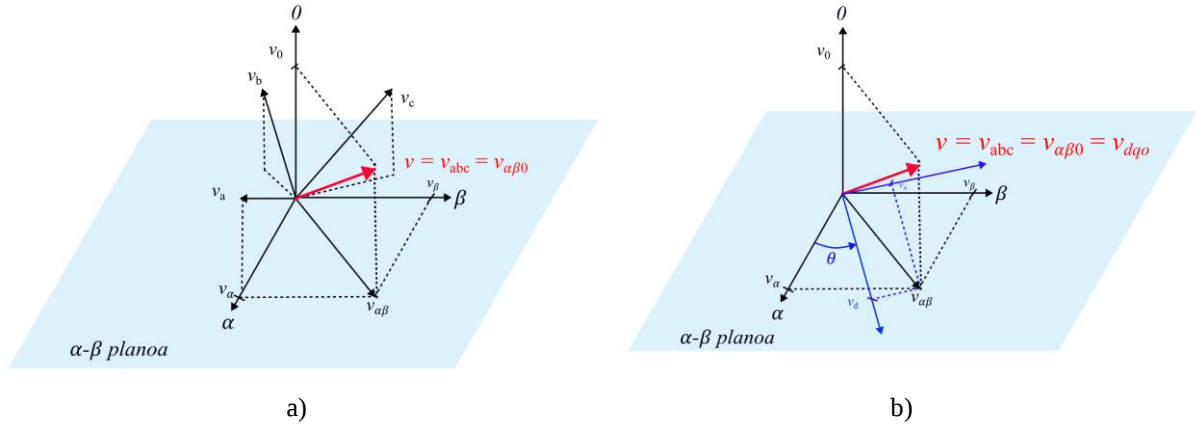
Horretarako, sarera konektatutako bihurgailu baten simulazio modelo bat garatu da metodo konbentzionalen bitartez kontrolatua, eta hutsune trifasiko eta bifasikoen aurreko erantzuna simulatu da.

Artikuluaren gainerakoa honela antolatuta dago: 3.1 atalean kontrol-metodo konbentzionalen garapena azalduko da. Ondoren 3.2 atalean sare trifasiko desorekatuen analisia burutzeko kontzeptuak azalduko dira, eta azkenik, 3.3. atalean lortutako emaitzak azalduko dira.

3.1 Sarera konektatutako bihurgailuen kontrol konbentzionala

Sistema elektriko trifasiko bat elkarri eragiten dauden hiru tentsio eta hiru korrante bezala ulertu daiteke potentzia elektrikoa transmititzeko. Sistema elektriko trifasikoaren fase bakoitzaren tentsio eta korranteak Kirchhoff-en legeen bitartez erlazionatzen dira. Grafikoki, sistema trifasikoa espazio bektorial trifasikoan irudikatu daiteke 2. Irudian bezala. Fase ezberdinen tentsio (edo korrante) bektoreen batuketa bektorialak sistemaren tentsio bektorea adierazten du (v_{abc}) (Teodorescu et al., 2011).

2. Irudia: a) Sistema trifasikoaren irudikapen tridimentsionala eta tentsio bektorearen proiektzioa $\vec{0}$ planoan. b) Tentsio bektorearen proiektzioa dq0 ardatzetan.



Bihurgailuen kontrolean ez dira fase guztien tentsio eta korranteak erabiltzen, kontrolatu beharreko aldagai kopuruagatik. Faseko tentsio eta korrante hauek transformatu batzuen bitartez eraldatu egiten dira beste aldagai batzuetara, kontrolaren konplexutasuna murrizteko.

Lehenik eta behin $\alpha\beta 0$ edo Clarke-n transformatua erabiltzen da, sistemaren tentsio trifasikoak bi ardatz geldikorretan eta ardatz homopolarrean proiektatzeko, bektore bat bihurtuz. Ondoren dq0 edo Park-en transformatua erabiltzen da, $\alpha\beta$ planoko erreferentzia sistema biratzeko. Erreferentzia sistema berri hau tentsio bektorearen $\alpha\beta$ planoko proiektzioaren abiadura berdinarekin biratzen badu, irakurriko diren konponenteak balio konstante bat mantenduko dute. Bi transformatu hauek (1) eta (2) espresioetan adierazten dira eta hauen irudikapena 2. Irudian aurkitu daitezke (Yazdani eta Iravani, 2010).

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

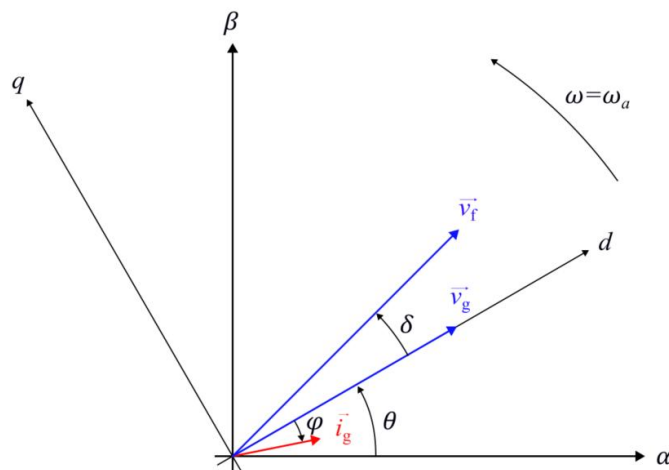
$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sarera konektatutako bihurgailuaren kontrola, bektore espazialen kontrol estrategian oinarritzen da. Dq erreferentzia sisteman lan egitean neurtutako bektore birakariak balio konstante bilakatzen dira, eta kontrolaren ikuspuntutik hau oso interesgarria da PI erreguladore tradizionalen erabilpena ahalbidetzen duelako (Milicua eta Abad, 2016).

Bihurgailuak sarearekin trukutzen duen potentzia bi korrante kontrol begizten bidez inplementatzen da, d eta q ardatzetan. Orokorrean dq marko birakorraren “d” ardatza $\vec{v}_g$ sarearen tentsio bektorearekin lerrokatzen da. Lerrokatze hau grafikoki 3. Irudian adierazten da.

Horrela, potentzia aktiboa eta erreaktiboa bakoitza bere aldetik kontrolatu daiteke, hau da, i_d -rekin P_g kontrolatu daiteke eta i_q -rekin, ordea, Q_g . Estrategia honi “sareko tentsioarekiko orientatutako bektore kontrola” deritzo edo ingelesez “grid voltage oriented vector control” (GVOVC) (Milicua eta Abad, 2016; Teodorescu et al., 2011).

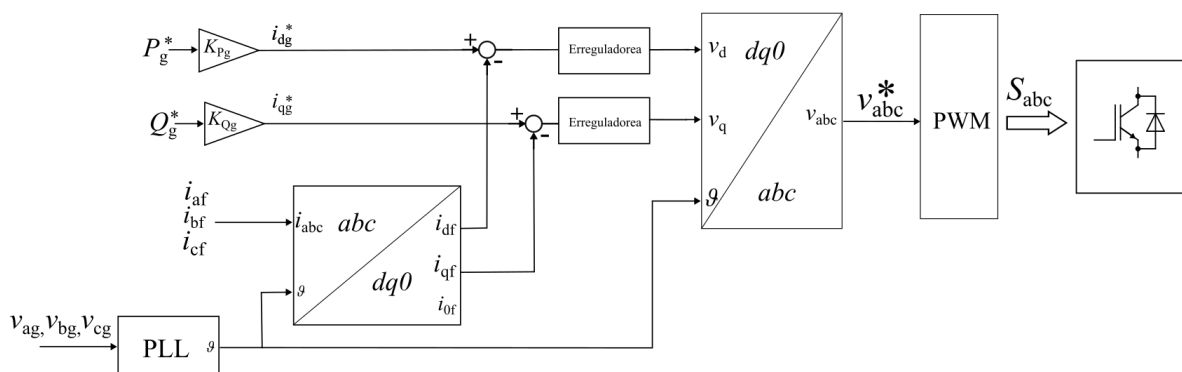
3. Irudia: Marko sinkronoaren d ardatzaren lerrokatzea sarearen tentsio bektorearekin.



Park-en transformatua aplikatzeko, sarearen tentsio bektorearen angelua beharrezkoa da. Angelu hau PLL (Phase-Locked Loop) algoritmoak erabiliz lortu daiteke. Motarik sinpleena erreferentzia sinkronokoa da, (SRF-PLL, synchronous reference frame PLL) alegia (Aljarrah et al., 2024).

4. Irudian, GVOVC kontrolaren bloke diagrama orokorra laburbiltzen da.

4. Irudia: GVOVC Kontrolaren blokeen diagrama.



3.2 Sare desorekatuak

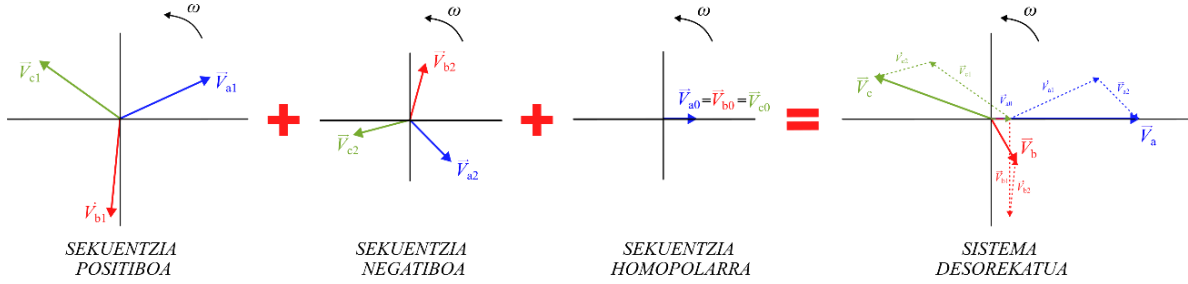
Sare elektrikoaren sistema osatzen duten faseak elkarrekiko simetrikoak ez direnean, hau da, faseek anplitude edo desfase desberdinak dauzkatenean, sarea desorekatua dagoela deritzo. Desoreka hauek arrazoi ezberdinak eduki ditzakete: sareko faltak edo kontsumo monofasikoak nagusienak izanda (Sweeting, 2012).

Sistema trifasiko desorekatuak analizatzeko 1918-an C.L. Fortescue-k osagai simetrikoen metodoa proposatu zuen. Metodo honen arabera, edozein sistema polifasiko desorekatu, sistema horren sekuentzia ezberdinez osatutako sistema orekatuen batura bezala deskonposatu daiteke, osagai simetrikoak deituak (Fortescue, 1918).

Sistema trifasikoaren kasuan, sistema desorekatu bat hiru sekuentzia sistemetan deskonposatu daiteke, hauen sekuentzia zuzena edo positiboa, alderantzizkoa edo negatiboa, eta zero edo

homopolarra izanik. 5. Irudian, sistema desorekatu baten osagai simetrikoen deskonposaketa irudikatzen da.

5. Irudia: Sistema trifasiko desorekatu baten osagai simetrikoak.



(3) espresioan adierazten den transformazio matrizea “a” fasearen osagai simetrikoak kalkulatzeko erabili daiteken non $\underline{V}_a^+$, $\underline{V}_a^-$ eta $\underline{V}_a^0$ sekuentzia positiboaren, negatiboaren eta zeroaren fasoreak diren, hurrenez hurren, eta α Fortescueren operadorea da, bere balioa $\alpha = e^{j2\pi/3} = 1 \angle 120^\circ$ izanik.

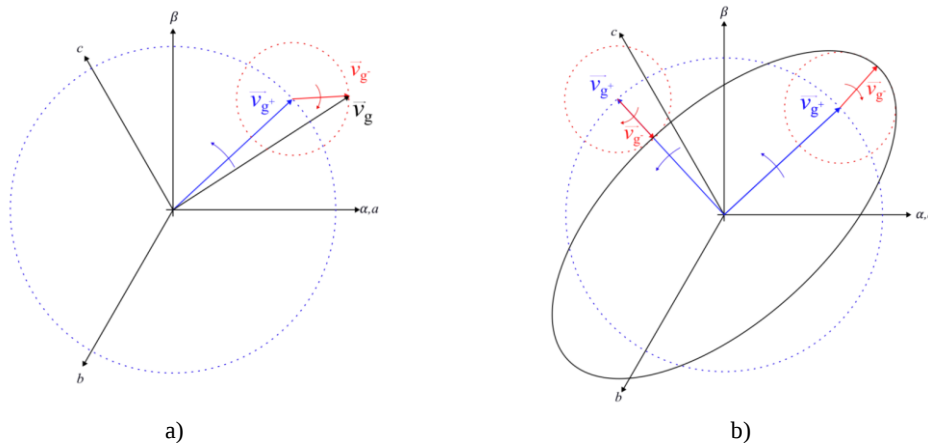
$$\underline{V}_a^{+-0} = [T_{+-0}] \cdot \underline{V}_{abc} \quad \text{non:} \quad [T_{+-0}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Osagai homopolarra mespretxatuz, zirkuitua ixteko biderik ez dagoelako (Joshi et al., 2021), sistema trifasikoaren tentsio bektorea sekuentzia zuzen eta alderantzizkoan deskonposatu daiteke. Bi bektoreek abiadura angeluar berdina daukate eta hauen mugimenduen norabidea kontrakoa da.

Orokorrean bektoreek anplitude eta desfase angelu desberdinak daukate euren artean, hortaz bi bektoreen batuketa bektorialak sekuentzia positiboko bektorearen periodo oso batean ibilbide eliptiko bat deskribatuko du. Bi sekuentziak lerrokatzen diren puntuan, tentsio bektore erresultanteak $\vec{V}_g$, balio maximo eta minimo bat hartuko du. Elipsearen deformazioa sekuentzia negatiboko osagaiaren magnitudearen arabera izango da.

6. Irudian, sekuentzia positibo eta negatiboen batuketa bektorialak tentsio bektore erresultantearen magnitudea eta ibilbide eliptikoa adierazten dira, sekuentzia positiboaren periodo batean (Milicua eta Abad, 2016; Teodorescu et al., 2011).

6. Irudia: Sare desorekatuen sekuentzien tentsio bektoreak $\vec{U} \neq 0$ planoan: a) Sareko tentsio bektore erresultantea; b) Ibilbide eliptikoa.

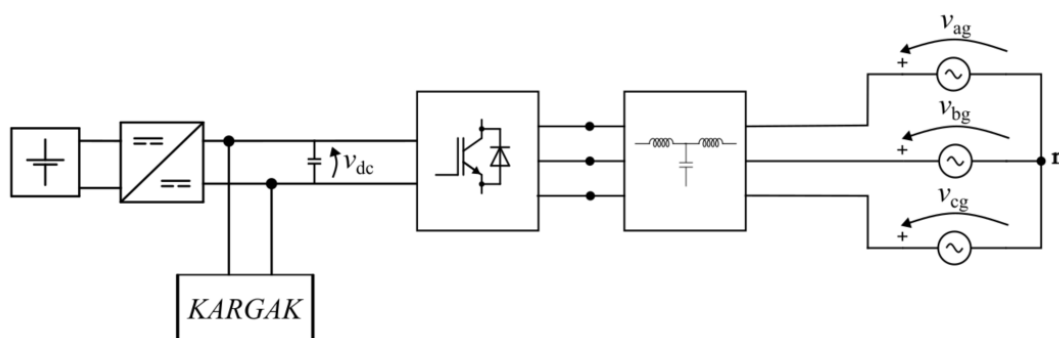


Sekuentzia positibo eta negatiboko tentsioen arteko gurutzaketek, sarearen maiztasun bikoitzeko oszilazioak eragiten ditu dq ardatzen irakurketan. Hori dela eta, kontrol konbentzionalak oszilazio hauek irakurriko dituzte korrante begiztetan kontrolagarritasuna murriztuz (Aljarrah et al., 2024; Hassan et al., 2020). Esan bezala, arazo hau konpontzeko metodo ezberdinak daude, baina hauek ez dira lan honetan erabili, kontrol konbentzionalaren mugak aztertzea baida helburua.

3.3 Tentsio hutsuneen aurreko simulazio emaitzak

Behin kontrol mota bakoitzaren funtzionamendua ulertuta, atal honetan egoera ezberdinen aurrean simulatutako emaitzak aztertuko dira. Simulazio hauetan kontsideratuko den sarera konektatutako bihurgailuaren aplikazioa 7. Irudian adierazten da, hau korrante zuzeneko (KZ) mikro-sare bat elikatzea edo energia sortzaile baten sarerako integrazioa izanik. Baldintza normaletan lan egiten duenean bihurgailuak potentzia aktiboa xurgatzen duela suposatuko da, eta sarean falta bat agertzen denean, bihurgailuak potentzia aktiboaren kontsigna aldatzen du eta sareari babesa emateko potentzia erreaktiboa injeztatzen du.

7. Irudia: KZ mikro-sare bat elikatzen duen sarera konektatutako bihurtgailuaren diagrama orokorra.

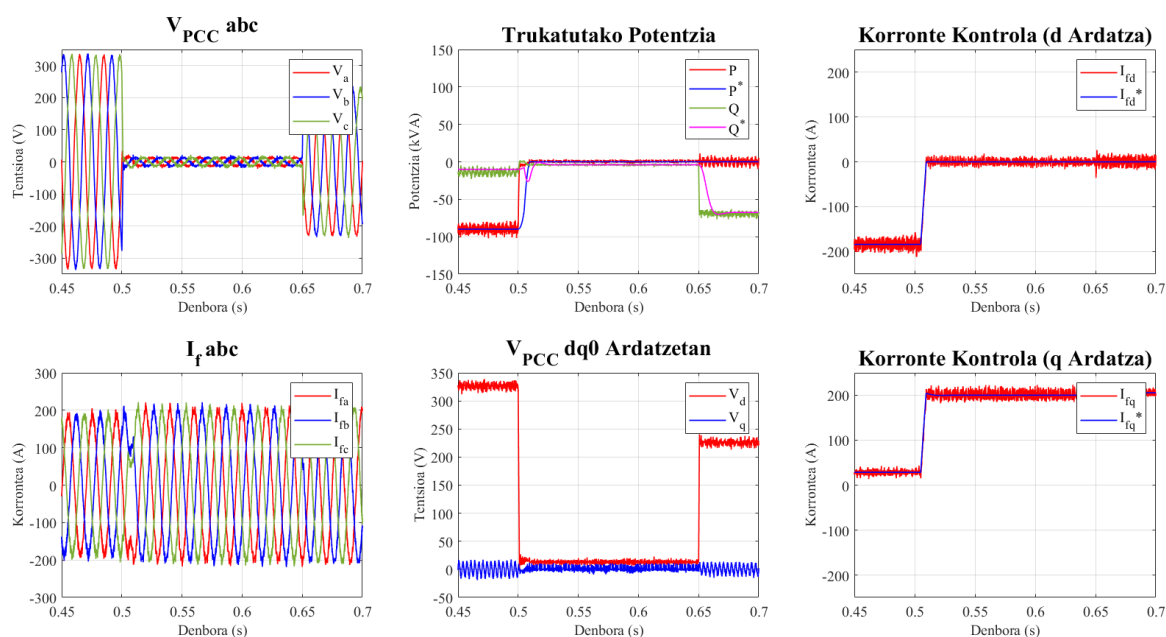


Simulazioak Matlab-Simulink software-an garatu dira. Sarera konektatutako bihurturik baten eta bere kontrol modeloak inplementatu dira. Sareko tentsioen magnitudeak aldatuz, perturbazio ezberdinak simulatu dira. Hutsuneak simulatzeko, 1. Irudian adierazitako 0.05 pu-ko (per unit) hondar tentsioa duen hutsune profila faseei aplikatuko zaie. Hutsune trifasikoaren kasuan hiru faseei, eta hutsune bifasikoaren kasuan b-c faseei.

Lehenik eta behin hutsune trifasikoaren aurreko erantzuna aztertuko da. 8. Irudian ikusi daitekeen bezala, kontrolak hutsunea detektatzen duenean potentzia aktiboaren erreferentzia zerora eramaten du eta ahal bezain beste potentzia erreaktiboa injektatzen du sarean. Korrante kontrolean ikusi daitekeen bezala, hutsunea detektatzerakoan kontrolaren kontsignak aldatzen dira eta korrante erreaktiboa injektatzera pasatzen da (q ardatzean), gainera, gainkorronterik ez da ikusten hutsunearen gertaera momentuan.

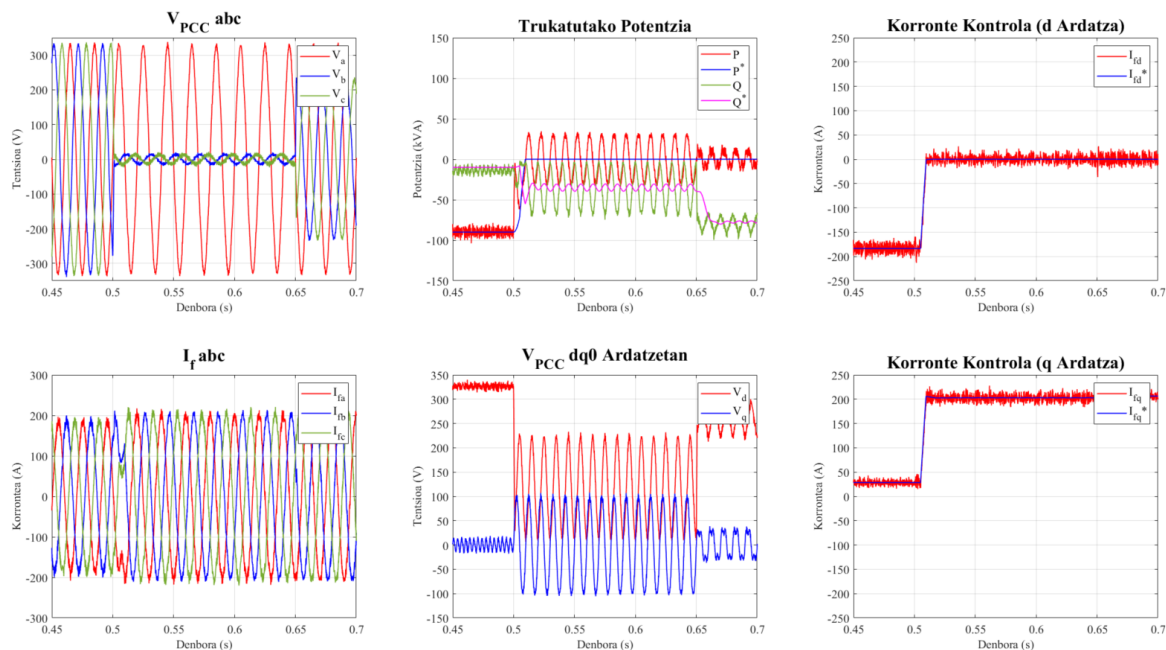
Falta trifasikoetan sistema orekatua mantentzen denez, kontrola gai da hutsunean konektatuta mantentzea. Esan bezala, sareko tentsioaren magnitudea hutsunetik erreuperatzen denean, bihurgailua korrante errektiboa injektatzeko gai da, sarearen babes arauak dioten bezala.

8. Irudia: Bihurgailuaren erantzuna hutsune trifasikoaren simulazio egoeren aurrean.



Ondoren, hutsune bifasikoen aurreko bihurtgailuaren erantzuna aztertuko da, emaitzak 9. Irudian adieraziz. Emaitzak analizatuz, ikusi daiteke kontrola gai dela hutsunearen aurrean konektatua jarraitzeko eta sekuentzia positiboko korrante errektiboa injektatzeko. Sarean sekuentzia negatiboa agertzen denez, potentzia aktiboaren oszilazioak sorrazten dira, baina kontrol mota honek ez dauka oszilazioak kentzeko gaitasunik.

9. Irudia: Bihurtgailuaren erantzuna hutsune bifasikoaren simulazio egoeren aurrean.



4. Ondorioak

Lan honetan, bihurtgailuen kontrol klasikoen mugak aztertu ondoren hurrengo ondorioak atera dira. Hutsune trifasikoen aurrean era egokian funtzionatzen duela ikusi da, kontsideratu diren baldintzekin. Hutsunearen aurrean denbora minimoan zehar konektatuta jarraitzeko gai izan da, eta araudiak agintzen duen korrante errektibo azkarra injektatzeko gai izan da.

Hutsune bifasikoen aurrean, ordea, bihurtgailua sarera konektatuta mantentzea lortu da, baina sarearen desoreka dela eta, sekuentzia negatiboko tentsioek potentzia aktiboaren oszilazioak eragiten dituzte, eta hauek KZ busari kalte egin diezaiokete.

Bestalde, kontrol konbentzionalak soilik sekuentzia positiboko korranteak injektatzeko gaitasuna du, eta ezin du araudiak eskatzen duen sekuentzia negatiboko korrante errektiboa injektatu.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Etorkizuneko lerro moduan, lehenik eta behin, sare desorekatuetarako kontrolen funtzioak inplementatzea bihurtgailuen kontrolean, sareko tentsio desorekek sortzen dituzten oszilazioak deuseztatzeko.

Bestalde, egindako simulazioen erantzuna sare ahulagoetan ebaluatzea planteatzen da, emaitzen errepikaportasuna egiaztatzeko.

Ondoren, simulazioak “Hardware-In-the-Loop” denbora errealeko ingurune batean balioztatzea aurreikusten da, inplementazio errealerako modeloa prestatzeko eta kontrol-metodo bakoitzaren eskakizun konputazionalak aztertzeko.

Azkenik, kontrol modeloak hardware errealean inplementatzea eta bihurtgailua sare desorekatuetara konektatuta entseatzea planteatzen da, simulazioen eta esperimentalaren emaitzak alderatzeko.

6. Erreferentziak

- Aljarrah, R., Fawaz, B. B., Salem, Q., Karimi, M., Marzooghi, H., & Azizipanah-Abarghooee, R. (2024). Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review. *IEEE Access*, 12, 5534-5561. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3349630>
- Commission Regulation (EU) 2016/ 631. (2016). COMMISSION REGULATION (EU) 2016/ 631— Of 14 April 2016—Establishing a network code on requirements for grid connection of generators. *Official Journal of the European Union*, L 112, 1-68.
- Fortescue, C. L. (1918). Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XXXVII(2), 1027-1140. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>
- Hassan, Z., Amir, A., Selvaraj, J., & Rahim, N. A. (2020). A review on current injection techniques for low-voltage ride-through and grid fault conditions in grid-connected photovoltaic system. *Solar Energy*, 207, 851-873. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.085>
- Joshi, J., Swami, A. K., Jatelly, V., & Azzopardi, B. (2021). A Comprehensive Review of Control Strategies to Overcome Challenges During LVRT in PV Systems. *IEEE Access*, 9, 121804-121834. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109050>
- Milicua, A., & Abad, G. (2016). Control of grid-connected converters. En *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications* (pp. 148-220). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118954454.ch4>
- Nadeem, T. B., Siddiqui, M., Khalid, M., & Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. *Energy Strategy Reviews*, 48, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096>
- Orden TED/749/2020, de 16 de julio, por la que se establecen los requisitos técnicos para la conexión a la red necesarios para la implementación de los códigos de red de conexión, Pub. L. No. Orden TED/749/2020, BOE-A-2020-8965 62406 (2020). <https://www.boe.es/eli/es/o/2020/07/16/ted749>
- Sweeting, D. (2012). Applying IEC 60909, Fault Current Calculations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(2), 575-580. IEEE Transactions on Industry Applications. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2180011>
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011a). Appendix A: Space Vector Transformations of Three-Phase Systems. En *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems* (pp. 355-362). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470667057.app1>
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011b). Control of Grid Converters under Grid Faults. En *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems* (pp. 237-287). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470667057.ch10>
- Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). Space Phasors and Two-Dimensional Frames. En *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications* (pp. 69-114). Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications. IEEE. <https://doi.org/10.1002/9780470551578.ch4>

7. Eskerrak

Artikulu hau garatzeko prozesuan lagundu didaten pertsona eta erakundeei eskerrak eman nahi dizkiet. Lehenik eta behin, nire MAL-aren garapenean gidari izan ditudan nire tutoreei, Alain Sanchez, Amaia Lopez de Heredia eta Endika Bilbaori, haien prestutasuna, orientazioa eta emandako aholku baliotsuengatik.

Bestalde, eskerrak eman nahi dizkiet Ikerlan S. Coop.-i, ikerketa hau aurrera eramateko emandako baliabideengatik, aukerengatik eta taldearen aldetik jasotako hurbiltasun eta babesagatik.

Azkenik, nire familia eta lagunei eskerrak eman nahi dizkiet, beti nire ondoan egon direlako eta prozesu honetan zehar emandako babesagatik.

Eskerrik asko guztioi!