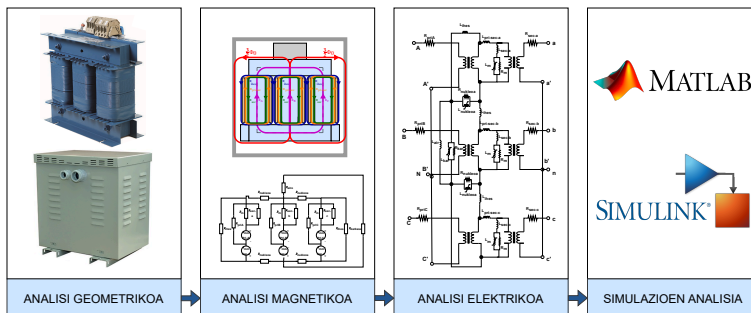


INDUSTRIA INGENIARITZA UNIBERTSITATE MASTERRA

MASTER AMAIERAKO LANA

HIRU ZUTABEKO TRANSFORMADORE BATEN MODELIZAZIO XEHATUA EZAUGARRI GEOMETRIKOETAN OINARRITUTA



Ikaslea: San Andres Ayarza, Ainhize

Zuzendaria: Planas Fullaondo, Estefanía

Ikasturtea: 2023-2024

Data: Bilbon, 2024ko ekainaren 6an

Aurkibidea

Laburpen hirueleduna	V
Notazioa	VII
Akronimoak	XI
Irudien zerrenda	XIII
Taulen zerrenda	XV
1. Sarrera	1
2. Testuingurua	3
2.1. <i>Global Smart Grids Innovation Hub</i> (GSGIH)	4
2.2. APERT ikerkuntza-taldea	5
2.3. Plataforma esperimentalaren deskribapena	5
2.4. Potentzia-transformadoreak	7
3. Helburuak eta Irismena	9
3.1. Helburuak	9
3.2. <i>Garapen Jasangarriko Helburuak</i> (GJH)	9
3.3. Irismena	10
4. Proiektuaren onurak	13
4.1. Onura teknikoak	13
4.2. Onura ekonomikoak	13
4.3. Onura sozialak	14
5. Artearen Egoera	15
5.1. Akatsak sare elektrikoan	15

5.2.	Potentzia-transformadore trifasikoak	18
5.2.1.	Konexio moten erantzuna osagai homopolarraren aurrean	18
5.2.2.	Egoera desorekatuak YNyn motako transformadore trifasikoetan	19
5.3.	Zirkuitu elektriko eta magnetiko baliokideen arteko dualtasuna	22
6.	Alternatiben analisia	25
6.1.	Simulazioak garatzeko <i>softwarea</i>	25
6.2.	Akatsak sare elektrikoan	26
6.3.	Egoera desorekatuak jasateko konfigurazioa	27
6.4.	Inpedantzia homopolarraren modeloa	28
7.	Proposatutako irtenbidearen deskribapena	31
8.	Metodologia	33
8.1.	3 zutabeko YNyn transformadorearen zirkuitu magnetikoa	34
8.2.	3 zutabeko YNyn transformadorearen zirkuitu elektrikoa	36
8.3.	Erresistentziak ezaugarritzea	38
8.4.	Induktantziak ezaugarritzea	39
8.4.1.	Zutabeetako induktantziak	40
8.4.2.	Harilkatu gabeko nukleo zatien induktantziak	41
8.4.3.	Karkasaren induktantzia	42
8.4.4.	Magnetizazio-galeren ondoriozko induktantziak	42
8.5.	Simulazio-emaitzak	44
8.5.1.	Sarrerako parametroak	44
8.5.2.	Garatutako simulazioen emaitzak	52
8.6.	Emaitza esperimentalak	59
8.7.	Tentsio desorekatuen aurreko lan-baldintzen definizioa	65
8.8.	Proiektuaren plangintza	71
9.	Proiektuaren alderdi ekonomikoak	77
9.1.	Barne orduak	77

9.2. Amortizazioak	77
9.3. Gastuak	78
9.4. Kostu totala	79
10. Ondorioak	81
10.1. Etorkizuneko lan-ildo posibleak	82
Bibliografia	82
Eranskinak	86
I. Eranskina	86
II. Eranskina	94

Laburpen hirueleduna

Izenburua: Hiru zutabeko transformadore baten modelizazio xehatua ezaugarri geometrikoetan oinarrituta.

Laburpena: Dokumentu honek hiru zutabeko potentzia-transformadore baten egoera egonkorreko erantzuna modelizatzen duen zirkuitu elektriko trifasiko baliokidea aurkezten du. Horretarako, transformadorearen analisi geometriko eta magnetikotik abiatu da, eta ondoren dualtasun-printzipioa aplikatu zaio. Proposamenaren baliagarritasuna simulazio-emaitzen eta emaitza esperimentalen arteko konparaketaren bidez egiaztatu da. Bukatzeko, egoera egonkorrean eta tentsio desorekatuak elikatzean makina elektrikoaren segurtasuna eta fidagarritasuna bermatzen duten mugako lan-baldintzak simulazio bidez zehaztu dira.

Gako-hitzak: *Potentzia-transformadoreak, MATLAB-Simulink, zirkuitu baliokide trifasikoa, elikadura-tentsio desorekatuak, egoera egonkorreko erantzuna.*

Título: Modelización detallada de un transformador de tres columnas basado en sus características geométricas.

Resumen: Este documento presenta el circuito eléctrico trifásico equivalente que modeliza la respuesta en estado estacionario de un transformador de potencia de tres columnas. Para ello, se ha partido del análisis geométrico y magnético del transformador, y se ha aplicado el principio de dualidad. La validez de la propuesta se ha contrastado mediante la comparación entre resultados de simulación y resultados experimentales. Finalmente, mediante simulación, se han determinado las condiciones de trabajo límites que garantizan la seguridad y la fiabilidad de la máquina eléctrica en condiciones estacionarias ante alimentación de tensiones desequilibradas.

Palabras clave: *Transformadores de potencia, MATLAB-Simulink, circuito equivalente trifásico, tensiones de alimentación desequilibradas, respuesta en régimen estacionario.*

Title: Detailed modeling of a three-limb transformer based on its geometric characteristics.

Abstract: This document presents the equivalent three-phase electric circuit that models the steady-state response of a three-limb power transformer. For this purpose, geometric and magnetic analysis of the transformer have been carried out, and the principle of duality has been applied. The proposal has been validated by comparing simulation and experimental results. Finally, by means of simulation, limit working conditions in stationary regime under unbalanced voltage supply have been determined so as to guarantee the safety and reliability of the electrical machine.

Keywords: *Power transformers, MATLAB-Simulink, three-phase equivalent circuit, unbalanced supply voltage, steady-state response.*

Notazioa

$\mathcal{F}_{mm\text{pri}-A}$ A faseko harilkatu primarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{F}_{mm\text{pri}-B}$ B faseko harilkatu primarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{F}_{mm\text{pri}-C}$ C faseko harilkatu primarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{F}_{mm\text{sek}-a}$ a faseko harilkatu sekundarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{F}_{mm\text{sek}-b}$ b faseko harilkatu sekundarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{F}_{mm\text{sek}-c}$ c faseko harilkatu sekundarioaren indar magnetoeragilea

$\mathcal{R}_{\text{airea}}$ airearen erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{ihes}}$ ihes-fluxua eredutzen duen erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{karkasa}}$ karkasaren erreluktantzia

\mathcal{R}_m harilkatudun zutabeko erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{nukleoa}}$ harilkaturik gabeko nukleo zati horizontaleko erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{pri}-A}$ A faseko harilkatu primarioaren erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{pri}-B}$ B faseko harilkatu primarioaren erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{pri}-C}$ C faseko harilkatu primarioaren erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{sek}-a}$ a faseko harilkatu sekundarioaren erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{sek}-b}$ b faseko harilkatu sekundarioaren erreluktantzia

$\mathcal{R}_{\text{sek}-c}$ c faseko harilkatu sekundarioaren erreluktantzia

ϕ_0 fluxu homopolarra

ϕ_A A faseko fluxua

ϕ_B B faseko fluxua

ϕ_C C faseko fluxua

ϕ_{ihes} ihes-fluxua

$\phi_{pri-sek}$ harilkatu primarioaren eta sekundarioaren arteko fluxu-galera

ϕ_{sek} zutabearen eta harilkatu sekundarioaren arteko fluxu-galera

L_{aire} osagai aktiboen eta karkasaren arteko aire bolumena eredutzen duen inдукtantzia

L_{ihes} ihes-galerak ezaugarritzen dituen inдукtantzia

$L_{karkasa}$ karkasa ezaugarritzen duen inдукtantzia aldakorra

L_m harilkatudun zutabeko inдукtantzia aldakorra

$L_{nukleoa}$ harilkaturik gabeko nukleo zati horizontalaren inдукtantzia aldakorra

$L_{pri-sek-a}$ a faseko harilkatu primarioaren eta sekundarioaren arteko inдукtantzia

$L_{pri-sek-b}$ b faseko harilkatu primarioaren eta sekundarioaren arteko inдукtantzia

$L_{pri-sek-c}$ c faseko harilkatu primarioaren eta sekundarioaren arteko inдукtantzia

L_{sek-a} a faseko zutabearen eta harilkatu sekundarioaren arteko inдукtantzia

$R_{karkasa}$ karkasa ezaugarritzen duen erresistentzia aldakorra

R_m harilkatudun zutabeko erresistentzia aldakorra

$R_{nukleoa}$ harilkaturik gabeko nukleo zati horizontalaren erresistentzia aldakorra

R_{pri-A} A faseko harilkatu primarioaren erresistentzia

R_{pri-B} B faseko harilkatu primarioaren erresistentzia

R_{pri-C} C faseko harilkatu primarioaren erresistentzia

R_{sek-a} a faseko harilkatu sekundarioaren erresistentzia

R_{sek-b} b faseko harilkatu sekundarioaren erresistentzia

R_{sek-c} c faseko harilkatu sekundarioaren erresistentzia

U_{ab} a eta b faseen arteko tentsio konposatua

U_{bc} b eta c faseen arteko tentsio konposatua

U_{ca} c eta a faseen arteko tentsio konposatua

U_{gen-AB} sorkuntzako A eta B faseen arteko tentsio konposatua

U_{gen-BC} sorkuntzako B eta C faseen arteko tentsio konposatua

U_{gen-CA} sorkuntzako C eta A faseen arteko tentsio konposatua

$U_{karga-ab}$ kargako a eta b faseen arteko tentsio konposatua

$U_{karga-bc}$ kargako b eta c faseen arteko tentsio konposatua

$U_{karga-ca}$ kargako c eta a faseen arteko tentsio konposatua

V_a a faseko tentsio sinplea

V_b b faseko tentsio sinplea

V_c c faseko tentsio sinplea

V_{gen-A} sorkuntzako A faseko tentsio sinplea

V_{gen-B} sorkuntzako B faseko tentsio sinplea

V_{gen-C} sorkuntzako C faseko tentsio sinplea

$V_{karga-a}$ kargako a faseko tentsio sinplea

$V_{karga-b}$ kargako b faseko tentsio sinplea

$V_{karga-c}$ kargako c faseko tentsio sinplea

PF potentzia-faktorea

Akronimoak

BIE *Bilboko Ingenieritza Eskola*

EB *Europar Batasuna*

FPL *Full Power Link*

GJH *Garapen Jasangarriko Helburuak*

GSGIH *Global Smart Grids Innovation Hub*

MAL *Master Amaierako Lana*

NBE *Nazio Batuen Erakundea*

UPV/EHU *Euskal Herriko Unibertsitatea*

Irudien zerrenda

2.1.	<i>Bilboko Ingenieritza Eskola (BIE)</i> ko plataforma esperimentalak.	6
5.1.	Zirkuitulabur baten korrante uhina.	16
5.2.	Neutro desplazatuaren eskema.	17
5.3.	Zirkuitulabur mota ezberdinak [1].	17
5.4.	Konexio motak transformadore trifasikoetan [2].	18
5.5.	Sekuentzia homopolarraren portaera konexio motaren arabera [3].	19
5.6.	3 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].	20
5.7.	4 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].	21
5.8.	5 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].	21
5.9.	Nukleo inguratzaileko transformadorearen egitura [4].	21
5.10.	<i>Shunt magnetikoen</i> aplikazio ereduak [5], [6].	22
7.1.	Irtenbidearen deskribapena.	32
8.1.	3 fase eta 3 zutabeko YNyn transformadorearen geometria kotatua. Berdez behe-tentsioko harilkatua eta laranjaz goi-tentsioko harilkatua.	33
8.2.	3 fase eta 3 zutabeko YNyn eremu magnetikoa.	34
8.3.	3 fase eta 3 zutabeko YNyn zirkuitu magnetiko baliokidea.	36
8.4.	3 fase eta 3 zutabeko YNyn zirkuitu elektriko baliokidea.	37
8.5.	<i>ATP-Draw</i> softwarearen XFMR modeloaren zirkuitu elektrikoa [7].	38
8.6.	Harilkatu arteko magnetizazio kalkulurako aztertu beharreko geometria. Berdez behe-tentsioko (BT) harilkatuak eta laranjaz goi-tentsioko (GT) harilkatuak.	43
8.7.	Harilkatuen antolaketa erakusten duen zeharkako azalera.	45
8.8.	M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren $B-P_{Fe}$ magnetizazio-galera kurba.	46
8.10.	M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren B-H magnetizazio kurba.	47
8.9.	M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren V-I magnetizazio-galera kurba.	47
8.11.	M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren Φ -I magnetizazio kurba.	48

8.12. AISI-SEA 1020 burdinazko xaflaren B- P_{Fe} magnetizazio-galera kurba.	50
8.13. AISI-SEA 1020 burdinazko xaflaren V-I magnetizazio-galera kurba.	50
8.14. AISI-SEA 1010 burdinazko xaflaren B-H magnetizazio kurba.	51
8.15. AISI-SEA 1010 burdinazko xaflaren Φ -I magnetizazio kurba.	51
8.16. A faseko zirkuitulaburreko saiakuntzaren simulazio-eskema.	54
8.17. Hutseko saiakuntzarekin zutabeko parametroak ezaugarritzeko simulazio-eskema.	55
8.18. Hutseko saiakuntzarekin nukleoko zati horizontalaren parametroak ezaugarritzeko simulazio-eskema.	56
8.19. Hutseko saiakuntzan ematen diren korrante uhin errealak [2].	57
8.20. Hutseko saiakuntzaren simulazio emaitzak elikadura $V = 100$ V izanik.	57
8.21. Homopolarreko saiakuntzaren simulazio-eskema elektrikoa.	58
8.22. Hutseko saiakuntzaren bidez zutabeko parametroak ezaugarritzeko seinaleak osziloscopioan A faseko elikadura $V_{an} = 150$ V denean. B faseko tentsioa gorritz eta C faseko korrantea urdinez.	61
8.23. Hutseko saiakuntzaren bidez zutabeko parametroak ezaugarritzeko seinaleak osziloscopioan A faseko elikadura $V_{an} = 230$ V denean. B faseko tentsioa gorritz eta C faseko korrantea urdinez.	61
8.24. Hutseko saiakuntzen bidez ezaugarritutako nukleo ferromagnetikoaren erresistentzia baliokide teoriko eta esperimentalen arteko konparaketa.	62
8.25. Hutseko saiakuntzen bidez ezaugarritutako nukleo ferromagnetikoaren inдукtantzia baliokide teoriko eta esperimentalen arteko konparaketa.	62
8.26. Tentsio desorekatuen aurrean lan-baldintzak definitzeko simulazio-eskema karga triangeluan konektatzen denean.	66
8.27. Tentsio desorekatuen aurrean lan-baldintzak definitzeko simulazio-eskema karga izarrean konektatzen denean.	67
8.28. Elikadurako korranteen eboluzioa 1 V-eko desoreka A fasean txertatzean eta izarrean konektatutako karga-maila %86 denean.	70
8.29. Proiektuaren Gantt diagrama.	76

Taulen zerrenda

5.1. Elementuen baliokidetasun dualak.	23
6.1. Egoera desorekatuak jasateko konfigurazioen konparaketa.	28
8.1. Harilkatuen erresistentzia balioak.	44
8.2. Harilkatuen inдукtancia balioak.	45
8.3. Harilkatuen ihes-galeren inдукtancia balioak.	45
8.4. Nukleo ferromagnetikoaren balio geometrikoak.	46
8.5. DD11 xafla motaren konposizioa.	49
8.6. Hozgarriaren inдукtancia balioak.	52
8.7. Sarrerako parametroen balioak.	52
8.8. Zirkuitulaburreko saiakuntzaren simulazio-emaitzak.	54
8.9. Homopolarreko saiakuntzaren simulazio emaitzak.	59
8.10. Zirkuitulaburreko saiakuntzaren emaitza esperimentalak eta simulazio emaitzen erroreak.	60
8.11. Homopolarreko saiakuntzaren emaitza esperimentalak eta simulazio emaitzen erroreak.	63
8.12. Tentsio desorekatuen mugako lan-baldintzak karga triangeluan konektatzen denean.	67
8.13. Tentsio desorekatuen mugako lan-baldintzak karga izarrean konektatzen denean.	68
8.14. Kargapeko entsegua elikadura orekatuan, karga izarrean konektatuta (18Ω eta 4,5 kW).	69
9.1. Barne orduak.	77
9.2. Amortizazioak.	78
9.3. Gastuak.	78
9.4. Proiektuaren kostu totala.	79

1 Sarrera

Dokumentu honek "*Hiru zutabeko transformadore baten modelizazio xehatua ezaugarri geometrikoetan oinarrituta*" izeneko *Master Amaierako Lana* (MAL) aurkezten du, *Iberdrola Taldeko GSGIH* eta *APERT Applied Electronics Research Team* taldearen arteko elkarlanaren emaitza dena. Proiektu honen bidez transformadoreek egoera jakin batzuen aurrean duten erantzuna aurreikusteko gai den modeloa garatzea bilatzen da.

Lehenik eta behin, lanaren testuingurua deskribatzen da. Jarraian, bete nahi diren helburuak finkatzen dira proiektuaren garapenak dakartzan onurekin batera. Ondoren, potentzia-transformadoreen eta tentsio-sistema desorekatuen inguruko artearen egoera azaldu eta, era berean, eremu magnetiko eta eremu elektrikoaren arteko akoplamenduaren funts teorikoa aurkezten da.

Behin ezagutza-oinarri orokorra definituta, erabiliko den *software*aren, aztergai izango den kasuistikaren eta transformadoreen topologia ezberdinen inguruko alternatiben analisisa garatuz, proiektuari ondoen egokitzen zaizkion aukerak hautatu dira. Honela, proiektu honetan proposatzen den soluzioa definitzen da.

Ostean, metodologia atalaren baitan transformadorearen analisi geometrikoa, magnetikoa eta elektrikoari ekin zaio, emaitza bezala zirkuitu baliokide elektriko trifasikoa lortuz. Zirkuitu baliokidea osatzen duten osagai pasiboak modelatzeko transformadorearen osagaien arteko erlazio geometrikoak aplikatzen dira, eta modeloaren baliagarritasuna ebazteko simulazio bidezko analisisa emaitza esperimentalekin alderatu da. Behin modeloa baliozkotzat jota, gailuaren segurtasuna eta fidagarritasuna bermatzen duten lan-baldintzen mugak ezarri dira.

Bukatzeko, proiektua aurrera eramateko plangintza eta alderdi ekonomikoak aitatzten dira. Halaber, proiektuaren ondorio nagusiak laburbildu eta etorkizunera begira aurkeztutako modeloa hobetzeko lan-ildo posibleak proposatu dira.

2 Testuingurua

Europar Batasuna (EB)k 2050erako finkatutako helburuak lortzeko, energia elektrikoaren banaketa-sarea egokitzeari dagokionez, sorkuntza berriztagarriaren integrazio masiboak erronka handiak dakartza. Sistema elektriko deskarbonizatu, eraginkor eta malgu horri euskarria emateko azken urteotan sare adimendunen eta mikrosareen garapena bultzatzen ari da [8].

Garapen horren baitan, mix energetikoa erabat berriztagarria eta deskarbonizatua izatea ahalbidetuko duten simulazio-eredu eta teknologia berriak ikertzen ari dira. Horretarako, banaketa-sarearen kudeatzaileen funtzio berriak definitzearekin batera, eraginkortasuna handitzeko beharrezkoak diren garapen teknologiko berriak ikertzen ari dira, baliabideen malgutasuna aprobeztatuz sistemaren segurtasuna eta egonkortasun globala mantentzen diren bitartean.

Energia sektorean *Iberdrola Taldea* mundu mailako liderretako bat da, eta trantsizio energetikoa aurrera eramateko GSGIH ekimenaren bidez etorkizuneko sareen I+G+b bultzatzen du. Dokumentu honetan *Iberdrola Taldearen* GSGIH eta *Euskal Herriko Unibertsitatea* (UPV/EHU)ko BIEren arteko elkarlanaren emaitzetako bat den MAL azaltzen da, eta bere funtsezko garapena *APERT* ikerkuntza-taldean izan da.

Proiektuaren oinarria *Red Controlada con Electrónica de Potencia* (RECON-EP) izeneko proposamena da, banaketa-aktibo berri bat garatzea helburu duena. Potentzia-elektronikaz baliatuz hornikuntzaren kalitatea eta jarraitutasuna hobetzea bilatzen da, banaketa-sarearen ahalmena eta ustiapena optimizatuz. Era berean, aipatzekoa da dokumentu honetan deskribatuko den proiektuan simulazioak burutzeko, jada eraikitako plataforma experimental batean oinarrituko dela.

Testuinguru orokor honen baitan, funtsezkoa da hornikuntza jarraitutasuna bermatuko duten ekipoa egoera desorekatu eta iragankorretan jarduteko baliagarriak izatea, potentzia-transformadoreei dagokienez bereziki. Izan ere, transformadoreak oro har egoera egonkor eta orekatuetan lan egiteko diseinaturik daude. Hala ere, eta aurretiaz aipatu bezala, egun mikrosareetan garatzen ari den sorkuntza sakanatuak aukera eta erronka berriak sortarazten ditu banaketa-sarea osatzen duten gailuen diseinu irizpideetan.

2.1. GSGIH

Iberdrola Taldeak energia trantsizio eta sare adimenduekin erlazionatutako berrikuntza-proiektuak kudeatu eta bultzatzeko GSGIH sortu zuen, ikerkuntza-zentroekin, zentro teknologikoekin eta ekipo elektrikoekin ekoizleekin lankidetzan arituz egun duen arrakasta-eredua sendotzeko eta zabaltzeko [9]. *Iberdrola Taldea* energia sektorean liderra da mundu mailan, elektrizitate sorkuntza zein banaketaz urteak daromatza Espainia mailan arduratzen, eta azken urteotan munduko beste herrialde batzuetara ere hedatu izan da. GSGIHaren bidez jorratu nahi diren ildo estrategikoak hurrengoak dira:

- Sare elektrikoko azpiegiturak ekipamendu berriz hornitzea prozesu digitalen garapenarekin batera kontsumitzaileei kalitatezko zerbitzua eskaintzeko.
- Banaketa-sareen eraginkortasunari eustea banaketa-prozesuetan teknologia berritzaileak integratuz, hala nola adimen artifiziala, errealitate areagotua eta biki digitalak.
- Instalazioetan funtzionalitate berriak ezartzea langileen segurtasuna hobetzeko, batik bat robotak eta droneak erabiliz.
- Sare elektrikoari malgutasunez jarduteko eta ekonomiaren elektrifikazioari laguntzeko soluzio berrien lotura ematea.
- Fauna eta flora babestea azpiegituren elkarbizitzaren eta ingurumenaren jasangarritasunaren arteko oreka ezartzeko.
- Sare elektrikoaren erresilientzia eta segurtasuna areagotzen lagunduko duen teknologia-sare berritzailea bultzatzea.

GSGIH berrikuntza-zentroak proiektuak koordinatzen eta ildo estrategikoen formakuntzan dihardu. Horrez gain, *Iberdrola Taldeko* nazioarteko filialekin konektatutako zentro globala da, irtenbide berriak garatzen dituen. Merkatura bideratutako soluzioak planteatzen ditu, mundu osoko banaketa-sare elektrikoetan instala daitezkeen eta industria-prozesu eraginkorrekin ekoizten diren produktuak garatuz.

Halaber, aipatzekoa da GSGIH ekimena aliantza publiko-pribatuaren emaitza dela, parte-hartzaile garrantzitsuenetako batzuk *Bizkaiko Foru Aldundia* (BFA), *Euskal Herriko Unibertsitatea* (UPV/EHU), Ikerlan, Tecnalia, Ingeteam, Ormazabal, Artech eta ZIV izanik. Lankidetzaren bidez talentua erakarri eta berrikuntza sustatu gura da.

2.2. APERT ikerkuntza-taldea

APERT elektronika aplikatuko ikerketa taldea Bilboko Ingeniaritza Eskolan lan egiten duten Teknologia Elektronikoko eta Ingeniaritza Elektrikoko saileko irakasle eta ikertzaileek osatzen dute. Talde honek bi ikerketa-ildo nagusi jarraitzen ditu:

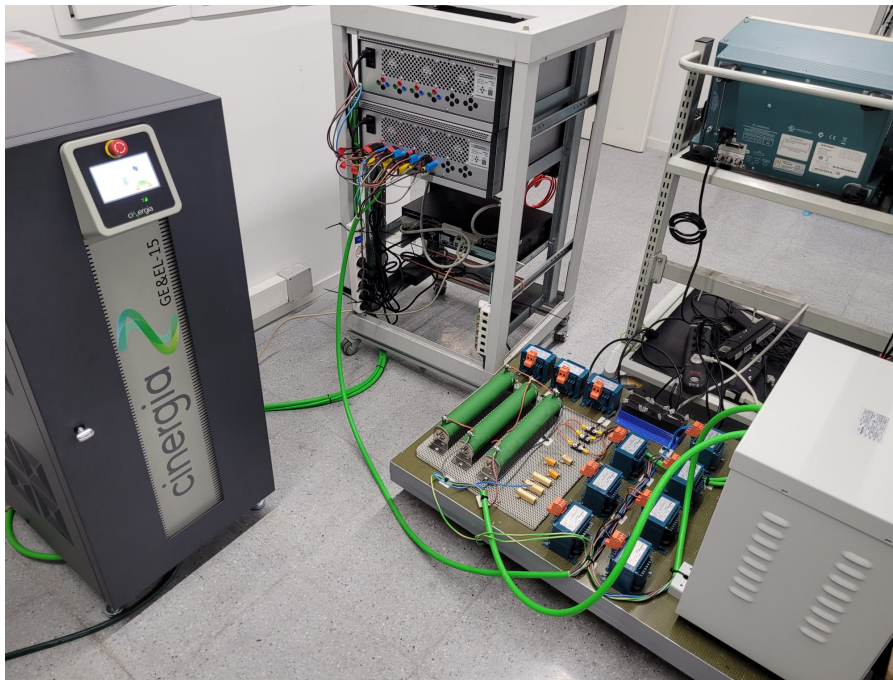
- **Zirkuitu birkonfiguragarriak eta Systems On-chip:** Ikerketa-lerro honek ahalmen handiko FPGAak erabiltzen ditu sistema digitalak zirkuitu integratu bakar batean integrazeko eta gailu horiek birkonfiguratzeko duten gaitasuna aprobetxatzeko. APERTek aztergai ugari ditu esku artean, hala nola sintesirako diseinua, *core* -ak elkarrekin lotzeko arkitekturak eta akatsekiko tolerantzia-teknikak.
- **Energia-bihurgailuetarako potentzia- eta kontrol-zirkuituak:** Ikerketa-lerro honetan, energia elektrikoa sortzeko, eraldatzeko eta biltegitatzeko erabiltzen diren potentzia-sistema elektronikoen portaera diseinatzen eta aztertzen da. Urte askotan zehar erabili izan diren bihurgailuen alternatiba aurreratu eta berritzaileak aztertzen dira.

MAL hau bigarren ikerketa-lerroaren baitan burutuko da, energia-bihurgailuetarako potentzia- eta kontrol-zirkuituen alorrean hain zuzen.

2.3. Plataforma experimentalaren deskribapena

Azken urteetan garatzen ari den proiektua akatsen presentzian banaketa-sare baten portaera hobetuko duen *Full Power Link* (FPL) bihurgailuaren diseinu eta garapenean datza. Horretarako, i-DE enpresak ezarritako irizpideak jarraituz, *MATLAB-Simulink software*aren bidez bihurgailuaren diseinua burutu da, baita FPL bihurgailu horri frogak egiteko plataforma experimentalaren diseinua zein akatsa emulatzen duen arku elektrikoaren zirkuituaren diseinua ere.

Plataforma experimental hau BIEn kokatuta dago eta proiektu hau 2.2 atalean komentaturiko APERT ikerkuntza-taldeari esker garatu da. 2.1 irudian aipaturiko plataforma experimental behatzen da.



2.1. irudia: BIEko plataforma esperimentalak.

Plataforma esperimentalak ondorengo gailuek osatzen dute:

- **Sarea:** Banaketa-sarea simulatzeko ardura du, laborategian *Cinergia* enpresaren GEEL + vAC/DC modelo erabiltzen da. Sare modura jotzen duen gailu honek FPL bihurtzailea tentsio eta korronte alferno zein zuzenarekin elika dezake.
- **Transformadorea:** Proiektua erdi mailako banaketa-tentsiora bideratuta egon arren, laborategian behe-tentsioan lan egiteko plataforman instalaturiko transformadoreak YNyn motako konexioa eta 400/400 V-eko transformazio erlazioa ditu.
- **Iragazkia:** FPL bihurtzailean dauden erdiekoaleen konmutazioek sortzen dituzten harmonikoak ahalik eta gehien murrizteko potentzia-bihurtzailearen eta transformadorearen artean LCL iragazki bat diseinatu da, fase bakoitzeko harila eta kondentsadore banaz osatua, bigarren harilaren funtzioa transformadoreak berak betetzen baitu [10].
- **FPL bihurtzailea:** Potentzia-bihurtzailea *Imperix* enpresak fabrikaturiko 3 PEN 8018 moduluz osatuta dago. Hauek, *Imperix* marka berdineko *rack* baten barnean kokatuta daude. Modulu hauetariko bakoitza 4 IGBTk, bi diodok eta bi kondentsagailuk osatzen dituzte.

- **Linea:** Portaera baliokideko *PI* modelo sinplifikatua erabiliz diseinaturik dago; hots, fase bakoitzean seriean konektaturiko haril eta erresistentzia banaren alde bietara paraleloan kondentsadore bana. Karga-galerei dagokionez, haril eta erresistentziari esker *Joule* efektuaren ondoriozko galerak eta tentsio erorketak simulatuko dira eta kondentsadorearekin berriz, *Foucault* korrante parasitoak.
- **Kargak:** Banaketa-sareetara bideraturiko proiektua denez, enpresa elektrikoak esandako bezeroen kargak edo azpieztazioek eskaturiko potentzia kontsumoak simulatzeko, era esperimentalean triangelu konexio bidez konektaturiko 3 erresistentzia bidez emulatuko da.
- **Arku elektrikoa emulatzeko zirkuitua:** Arku elektrikoa emulatzeko *hardware*-a txartel elektronikoaren bidez simulatzea lortzen da.

2.4. Potentzia-transformadoreak

Potentzia-transformadoreak Potentzia-Sistema Elektrikoa osatzen duten tentsio maila ezberdinen arteko moldaketak gauzatzen dituzten gailu elektrikoak dira. Oinarrian zirkuitu magnetiko amankomun batek akoplatutako harilkatu elektriko bik edo gehiagok osatzen dute. Transformadorea elikatzen den harilkatuari harilkatu primarioa deritzo, eta karga konektatzen denari harilkatu sekundarioa.

Harilkatu primarioa tentsio alternoko iturri batera konektatzen denean fluxu alferno bat sortuko da. Honek, zirkuitu magnetikoan elkarrekiko fluxua sortaraziko du, eta azken honek harilkatu sekundarioan tentsio bat eragingo du [11].

Harilkatu primarioa eta sekundarioa elikadurak ezberdindu arren, potentzia-transformadoreak bi aldeetatik elika daitezkeela kontuan hartuta, gailuaren bi aldeak goi-mailako tentsioaren eta behe-mailako tentsioaren arabera ezberdindu ohi dira. Transformadorea behe-tentsioko aldetik elikatzen denean, transformadorea jasogailua izango da, irteerako tentsioa sarrerakoa baino handiagoa delako. Goi-tentsioko aldetik elikatzean, aldiz, erreduktorea izango da, irteerako tentsioa sarrerakoa baino handiagoa delako.

Transformazio-fenomenoak denboran zeharreko elkarrekiko fluxu aldakorrak elkarlotzen dituen bi haril baino ez du eskatzen. Lotura hori aire bidez akoplatutako bi hariletan gerta daiteke, baina harilen arteko akoplamendua askoz eraginkorragoa da material ferromagnetiko bat erabiltzen denean. Honela, fluxuaren zatirik handiena harilak lotzen dituen iragazkortasun handiko ibilbide zehatz batera mugatzen da. Transformadore hauei burdinazko nukleokoak deritze.

Nukleo motei dagokienez, zutabedun nukleo motako eta nukleo inguratzaile motako transformadoreak daude. Konfigurazio bakoitzean, fluxuaren zatirik handiena nukleora mugatzen da, eta, beraz, bi harilak lotzen ditu. Horrez gain, harilek ihes-fluxu deritzona ere sortzen dute, fluxu osoaren zati txiki bat izan arren, transformadorearen portaera baldintza dezakeena. Orokorrean, ihes-fluxua txikiagotzeko nukleoa elkarrengandik ahalik eta hurbilen dauden xafletan banatzen da.

Azaldutako egiturazko osagaiez gain, potentzia-transformadoreak osatzen dituzten atalek ondorengo sailkapena jasotzen dute [2]:

- **Atal aktiboak:** zirkuitu magnetikoa eta zirkuitu elektrikoa osatzen duten elementuek osatzen dute. Transformadorearen atalik garrantzitsuenak dira, energia elektrikoa transmititzeko ardura baitute.
- **Sarrera-irteera sistema:** transformadorearen zirkuitu elektrikoa sarrera eta irteerako lineekin konektatzea ahalbidetzen du. Goi-tentsioko borneek (isolatzaile altuak eta eroale meheak) eta behe-tentsioko borneek (isolatzaile baxuak eta eroale lodiak) osatzen dute.
- **Hozte-sistema:** transformadorearen funtzionamenduaren ondorioz sortzen diren galerak bero modura emititzen dira, eta gailuaren funtzionamendu egokia bermatzen duen temperatura tartea mantentzeko beharrezkoa da bero hori kanporatzea. Hozgarria potentzia txikiko transformadoreetan aire bidez egiten bada ere, potentzia handien kasuan hegalak edota olioak erabiltzen dira.
- **Babes-sistemak:** hozgarriaren propietateak kaltetzen dituen kanpo agenteek babesteko elementuak eta babes elektrikoa egiaztatzen duten ekipoak (lur-jartze sistema, babes diferentziala, etab.) dira.
- **Kontrol-sistema:** transformadorearen egoera identifikatu eta baldintza egokietan funtzionamendua bermatzen dute.

3 Helburuak eta Irismena

Atal honetan finkatzen diren helburu eta irismenaren bidez proiektuaren garapen eta exekuzioaren gidalerro nagusiak zehaztuko dira. Helburuek lortu nahi diren jomuga zehatzak ezarriko dituzte, eta irismenak, ostera, helburu horiek eraginkortasunez lortzeko jarduerak definituko ditu.

3.1. Helburuak

MAL honen helburu nagusia transformadorearen portaera elektrikoa zehaztasun osoz adierazten duen zirkuitu baliokide trifasikoren eredua garatu eta balioztatzea da. Hala ere, proiektuaren baitan bigarren mailako xedeak ere definitu dira, ondorengo puntuetan laburbiltzen direnak:

- Sekuentzia homopolarreko inpedantzia hiru zutabeko potentzia-transformadore trifasikoaren ereduaren inplementatzeko prozedura ezaugarritu.
- Transformadoreak konektatuta duen kargan aldaketak jasateko eta sareko perturbazioak maneiatzeko duen gaitasuna aztertu.
- Zirkuitu baliokidearen eredua garatu eta balioztatzeko prozesuan erabilitako metodo, tresna eta datuak bestelako egoera eta transformadoreetara estrapolagarria eta etorkizuneko azterketetan erabilgarria izan dadila erdietsi.

3.2. GJH

GJHak *Nazio Batuen Erakundea* (NBE)k 2015ean ezarritako helburu-multzoa da. Pertsonen, planetaren eta oparotasunaren aldeko ekintza-plan bat da, eta honen bitartez bake unibertsala eta justiziarako sarbidea indartzea du asmoa. Guztira 17 helburutan egituratuta eta 169 jomugaz osaturik daude. Honetaz gain, euskararen eta euskal kulturaren garrantzia eta etorkizuna bermatzeko aldarrikapena eginez UPV/EHUK 2019an bere 2030 Agendan 18. helburua (Hizkuntza eta Kultura Aniztasuna) sartu zuen. Proiektu hau, zeharka bada ere, ondorengo GJH helburuekin zerikusia du:

- **GJH 7: Energia irisgarria eta ez kutsagarria.**

Trantsizio energetikoan murgildurik, sare elektrikoaren azpiegiturak egoera berrietara moldatzeak energiaren kudeaketa eraginkorragoa ahalbidetzen du, galerak murriztuz eta banaketa-ahalmena hobetuz. Gainera, transformadorearen diseinu egokiak hornidura elektrikoaren fidagarritasuna eta kalitatea hobeto ditzake. Teknologia garbieratua sustatuz energia zerbitzu moderno eta jasangarriak lortzen dira, eta modu eraginkorrean diseinatutako potentzia-transformadoreek hornidura fidagarriagoa bermatzen dute, landa-eremuetako sare isolatuetan bereziki.

- **GJH 11: Hiri eta komunitate jasangarriak.**

Sare adimenduak eta mikrosareak ezinbestekoak dira hiriak gune iraunkor eta energetikoki jasangarriak bihurtzeko. Izan ere, energia berriztagarria eta sorkuntza deszentralizatua sare elektrikoaren baitan integratzea ahalbidetzen dute, berotegi-efektuko gasen emisioak murriztuz, energia modu eraginkorrean kudeatuz eta ingurumen-jasangarritasuna hobetuz. Era berean, hornidura elektrikoaren jarraitutasuna hobetzea lortzen da, azpiegitura kritikoak dituzten komunitateetan fidagarritasuna suspertuz eta sare elektrikoaren egonkortasuna areagotuz.

- **GJH 18: Hizkuntza eta kultura-aniztasuna.**

Proiektua euskaraz garatu izanak euskarak alor akademikoan duen erabilera sustatzen du, gai tekniko eta zientifikoen erabilera normalizatzen eta indartzen lagunduz. Gainera, etorkizunera begira, baliabide teknikoak eta hezkuntza-baliabideak euskaraz sortzeko euskal hiztunek informazio eta ikasteko aukera berdinzaleagoak izatea bermatzen du, hizkuntzari eta kulturari lotutako desberdintasunak murriztuz.

3.3. Irismena

Irismenarekin proiektuan finkatutako helburuak bete daitezkeen aurrera eraman beharreko ekintzak definitzen dira. Proiektu honen garapen eraginkorrerako hurrengo gidalerroak zehaztu dira:

- Potentzia-transformadorearen eremu magnetikoaren eta fluxu-lerroen portaera sakonki ulertu.
- Eremu magnetikoaren eta eremu elektrikoaren arteko akoplamendua aditu.

-
- Potentzia-transformadorearen egoera egonkorreko portaera zirkuitu elektriko baliokidearen bidez eredu.
 - Transformadorearen ezaugarri geometrikoak arakatu eta makina elektrikoan duten eraginarekin batera zirkuitu elektriko baliokidearen parametroak definitu.
 - Simulazio-emaitzak eta emaitza esperimentalak alderatuz zirkuitu elektriko baliokidearen baliagarritasuna ebatzi.
 - Egoera egonkorrean makina elektrikoaren zein inguruko ekipamendu eta agenteen segurtasuna eta fidagarritasuna bermatzen duten mugako lan-baldintzak azertu.

4 Proiektuaren onurak

Atal honetan MAL honen garapenak dakartzan onurak aurkezten dira. Hiru zutabeko transformadorearen modelizazio xehatuaz baliatuz eragin zabal eta onuragarria lortzen da bai teknikoki, bai ekonomiki, bai gizarteari dagokionez. Hala ere, hiru motatako onurak elkarrekin zerikusia dute, onura tekniko eta ekonomikoek gizartearen garapen eta bizi-kalitateari abantailak dakarzkienak.

4.1. Onura teknikoak

Hiru zutabeko transformadorearen zirkuitu baliokide trifasikoaren eredua garatu eta balioztatzeak hainbat onura tekniko garrantzitsu dakartza. Izan ere, transformadorearen diseinuaren eta analisiaren doitasuna eta eraginkortasuna hobetu, eta honekin batera sistema elektrikoaren moldagarritasuna eta fidagarritasuna ere hobetzea lortzen da. Hona hemen proiektu honek ekarriko dituen onura tekniko nagusiak:

- Zirkuitu baliokidearen eredu xehatua garatuta transformadorearen portaera elektrikoa zehaztasun handiagoz adieraztea erdiesten da, diseinu doiagoak eta eraginkorragoak ahalbidetuz.
- Transformadorearen diseinu prozesuaren baitan makina elektrikoaren energia-galera iturriak identifikatzean, hauek murrizteko neurriak aplikatu daitezke.
- Potentzia-transformadoreak jasan ditzakeen karga-aldaketan edota perturbazioen aurrean egokitze-gaitasuna hobetzean sare elektrikoaren fidagarritasuna areagotzen da.
- Zirkuitu baliokidea lortzeko prozedura beste transformadore-mota eta baldintza batzuetan ere aplikagarria izateak proiektuaren eragin tekniko zabaltzen du.

4.2. Onura ekonomikoak

Proiektuak onura teknikoak izateaz gain, abantaila ekonomikoak era baditu. Simulazio bidezko tresnen erabilera sektore elektrikoaren enpresek baliabideak ez xahutzea eta kostuak murriztea suposatzen du. Gainera, diseinu optimoen bidez enpresaren lehiakortasuna indartzen da, inbertsioak erakarri. Proiektu honek dakartzan onura ekonomiko nagusiak ondorengoak dira:

- Potentzia-transformadoreen diseinuan doiketa optimizatzean banaketa-sarean parte hartzen duten agenteen operazio-kostuak minimizatzea lortzen da, makinaren diseinua energia-galerak eta tentsio-jauskerak minimoak izan daitezen burutzen delako.
- Modelo baliokidearen bitartez errealitatean eraiki gabe, baina diseinu irizpide geometrikoetan oinarrituta, transformadoreak sarean izango lukeen portaera aurreikusita, ekipoa eraikitzeko materiala, eskulana eta denbora aurreztea lortuko litzateke.
- Simulaziozko modeloaren bitartez biki digitalen bidezko jarraipena egin daiteke, arrisku posibleen aurreko prebentzioa areagotuz. Honela, sarean dauden ekipoen denboran zeharreko degradazioa aurreikusi eta mantentze-lanak garaiz aplika dakizkieke.

4.3. Onura sozialak

Arestian aipatutako aurrerapen tekniko eta ekonomikoen ondorioz, gizartean ere proiektuak eragin positiboa du. Zerbitzu elektrikoaren kalitatea hobetzean kontsumitzaile guztien asebetetzea areagotzen da. Era berean, trantsizio energetikoaren baitan ematen den aurrerapauso oro gizartearentzat mesedegarri da, azpiegitura jasangarri eta eraginkorrek bizi-kalitatea hobetzen baitute. Hona hemen proiektuaren onura sozial nagusiak:

- Hornidura elektrikoaren kalitatea hobetzean, sare elektrikoa fidagarriagoa, eraginkorragoa eta egonkorragoa bihurtzen da. Honela, kontsumitzaileen bizi-kalitatea hobetzea erdiesten da.
- Sare elektrikoan energia-galera minimoak dituzten ekipoa instalatzean eragin klimatikoa murriztea lortzen da. Gainera, energia berriztagarriak sustatzean berotegi-efektuko gasen emisioak murriztuko dira, karbono-aztarna murriztuz.

5 Artearen Egoera

Atal honetan, akatsen aurrean potentzia-transformadore ezberdinek duten portaera eta teknologiari dagokion artearen egoera aurkezten da. Horretarako, transformadorea eredutzeko existitzen diren modu ezberdinak aztertuko dira, baita hau simulatzeko erabiltzen diren metodo ezberdinak ere.

5.1. Akatsak sare elektrikoan

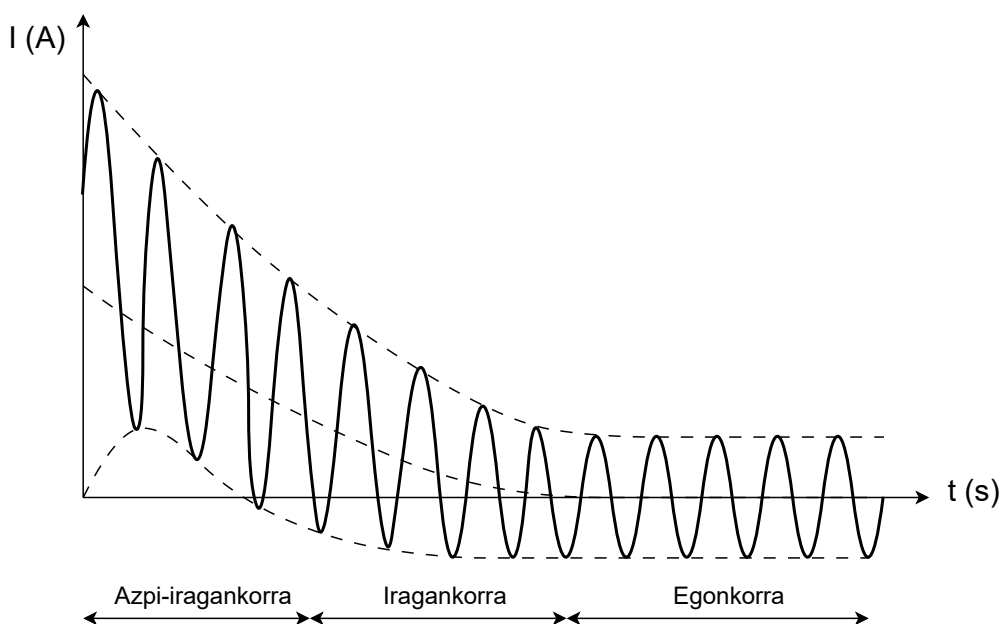
Banaketa-sarean, garrantzitsua da gerta daitezkeen akats elektriko mota ezberdinak kontuan hartzea, hauen araberako prebentzio-neurriak hartu eta arriskuak arintzeko. Sistema elektriko bateko akatsa egoera anormal bat da, eta sistemaren tentsio primarioetako batean funtzionatzen duten sistema elektriko ekipoen akats elektrikoa eragiten du. Oro har, bi akats mota gerta daitezke [12]:

- **Zirkuitulaburra:** Sistema elektriko baten falta gabeko egoeran tentsio ezberdinetara dauden bi puntu edo gehiago inpedantzia txikiz bat-batean konektatzen direnean gertatzen da. Bat-bateko gaintentsioen ondorioz zein denbora tarte jakin batean zeharreko gainkargen eta isolamenduaren degradazioaren ondorioz gerta daiteke. Korrante elektriko altuak garraiatzen dira, eta eroalearen gainberotzea eta sistema elektrikoan sutea eragin dezake.
- **Zirkuitu irekiak:** Zirkuitu elektriko baten etetean datza, korrante-fluxua eragozten duena. Apurturiko eroaleen, konexio solteen edo etengailu irekien bidez gerta daiteke.

Banaketa-sarean zirkuitulabur bat agertzen denean, ezohiko korrante bat sortzen da, sistemaren korrante elektrikoaren ohiko banaketari eraginez. Batzuetan tentsio-sistema ere desoreka dezakete. Oro har, zirkuitulabur batean zehar korranteak portaera aldakorra aurkezten du (5.1 irudia), eta akats elektrikoaren ondorioak ulertzeko hiru analisi erregimen erabiltzen dira: guneez azpiiragankorra, guneez iragankorra eta erregimen egonkorraren gunea [12]:

- **Erregimen azpiiragankorra:** Akatsaren ondorengo lehen zikloetako erantzunak aztertzeko erabiltzen da. Oso erantzun azkarreko gailuak baino ez dira kontuan hartzen; hots, transformadoreak eta sorgailu zein motorrak.

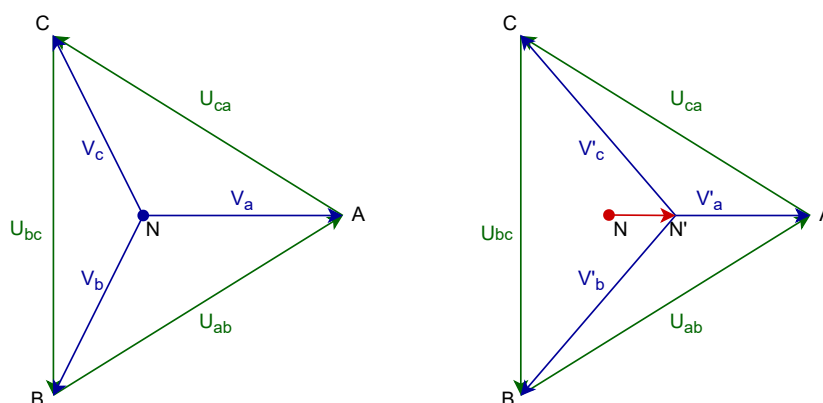
- **Erregimen iragankorra:** Akatsa gertatu eta milisegundo eta segundo batzuk bitarteko efektuak aztertzeko erabiltzen da. Kasu honetan gailu guztiak hartzen dira kontuan, bai erantzun oso azkarrekoak baita erantzun motelekoak ere.
- **Erregimen egonkorra:** Akatsaren ondoren epe luzerako ondorioak aztertzeko erabiltzen da, akatsa gertatu eta segundo batzuetatik zenbait minutura bitartekoak. Kasu honetan gailu guztiak hartzen dira kontuan, bai erantzun oso azkarrekoak, baita erantzun motelekoak ere.



5.1. irudia: Zirkuitulabur baten korrante uhina.

Beste alde batetik, funtsezkoa da eroale neutroak duen jokabidea ulertzea. Banaketa-sarean, sistema trifasiko baten eroale neutroa faseetako eroale aktiboekiko potentzial diferentzia sortzen duen eroalea da, eta hiru eroale aktiboetako korronteak orekatzeko erabiltzen da. Neutrotik dabilen korrontea eroale aktiboetatik dabilen korronteen baturaren berdina da, eta behe-tentsio mailan ohiko funtzionamendu egoera orekatuan balio ia nulua izango du.

Hala ere, sisteman akats elektriko bat ematen denean, kasu batzuetan tentsio-sistema desoreka liteke. Honela, sistema elektrikoaren neutroko erregimenaren arabera, eroale neutrotik dabilen korrante totala ez da zertan nulua izan, *neutroaren desplazamendua* deritzon fenomenoa eraginez (5.2 irudia). Fenomeno hau eroale aktiboetako batean akats-korrontea beste bietan baino handiagoa denean ematen da. Horrek eroale neutroan gainkarga eragiten du eta sistemak huts egiteko arriskua areagotzen da.

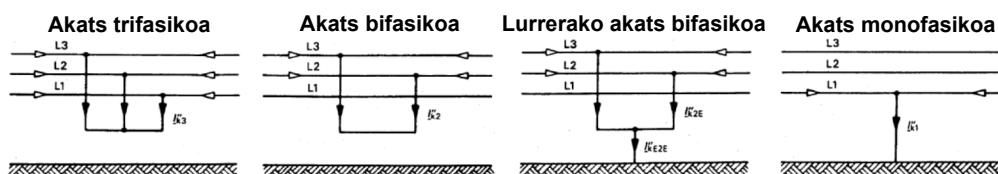


5.2. irudia: Neutro desplazatuaren eskema.

Sistema elektrikoetan tentsio egoera orekatua bermatzeko garrantzitsua da eroale aktiboetako kargen banaketa kontuan hartzea, honela neutroaren desplazamendua minimizatzeko. Beraz, sistemaren egoera egokia eta haren segurtasun-baldintzak betetzen direla ziurtatzeko, garrantzitsua da neutroaren desplazamendua kontrolatu eta monitorizatzea. Horretarako babes-sistemak erabiltzen dira.

Akats bat gertatzean, garrantzitsua da kalteak ahalik eta gehien murrizteko babes-sistemak zirkuitulaburreko kalkuluaren bidez diseinatu izana. Sistema trifasiko baten kasuan akats bat gertatzean baliteke fase bat baino gehiagorengan eragina izatea. Guztira lau zirkuitulabur-mota akats definitzen dira (5.3 irudia):

- **Akats trifasikoa:** Tentsio banaketa simetrikoa duenez baliokide monofasikoaren bidez aztertzen da. Gertatzen diren akatsen %5 suposatzen du, baina ondorio larrienak dakartza.
- **Akats bifasikoa eta lurrerako akats bifasikoa:** Tentsio banaketa asimetrikoa duenez Fortescue teorema aplikatuz aztertzen da. Gertatzen diren akatsen %20 suposatzen du.
- **Lurrerako akats monofasikoa:** Tentsio banaketa asimetrikoa duenez Fortescue teorema aplikatuz aztertzen da. Gertatzen diren akatsen %75 suposatzen du, baina kalte gutxien eragiten duena.



5.3. irudia: Zirkuitulabur mota ezberdinak [1].

5.2. Potentzia-transformadore trifasikoak

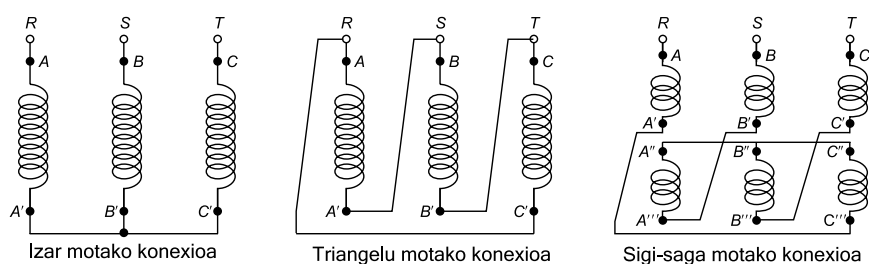
Aurretiaz aipatu bezala, potentzia-sistema elektrikoetan transformadoreek energiaren garraiorako funtsezkoa den tentsio aldaketa gauzatzen dute. Hala ere, sarean gertatzen diren akatsek ere haiengan eragin zuzena izaten dute, batez ere lurrerako zirkuitulaburreko akatsek.

Egoera egonkorretan, potentzia-sistemaren analisisian transformadorearen egoera aztertzeke nahikoa izaten da parametro izendatuak eta harilkatuen konfigurazioa ezagutzearekin. Hala ere, akatsaren aurreko erantzun iragankor eta azpiiragankorrek behar bezala aztertzeke ezinbestekoa da egitura fisikoari erreparatzea.

Era berean, lurrerako akats monofasikoak eta lurrerako akats bifasikoak gertatzen direnean, sarean egoera desorekatuak eta korrante homopolarrak agertzen dira. Oro har, egoera hauek ez dira desiragarriak, eta transformadore oro ez da korrante homopolarrarekin lan egiteko baliagarria. Transformadore trifasikoen kasuan bai konexio taldeak, bai nukleo ferromagnetikoaren egiturak, eragin zuzena dute osagai homopolarraren aurrean transformadoreak duen erantzunean. Beraz, funtsezkoa da bi kasu hauek aztertzea.

5.2.1. Konexio moten erantzuna osagai homopolarraren aurrean

Transformadore trifasikoen fase bakoitzaren harilkatuak elkarren artean hiru konfigurazio jarraituz elkar konekta daitezke: izarrean, triangeluan ala sigi-sagan (5.4 irudia).



5.4. irudia: Konexio motak transformadore trifasikoetan [2].

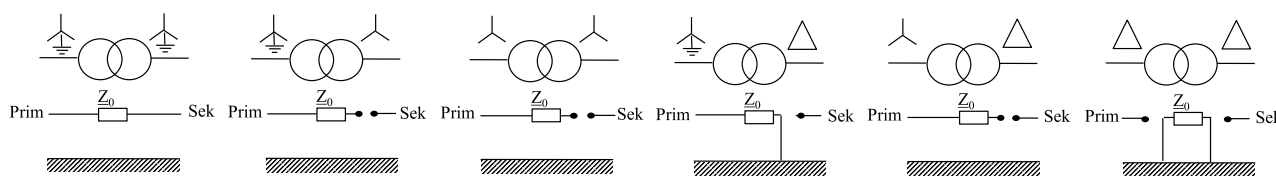
Aipatutako konexioak harilkatu primarioan eta sekundarioan egin beharrak daude, baina ez dira bietan berdinak izan behar. Primarioaren eta sekundarioaren artean dauden harilkatuen konexioaren arabera sekundarioaren tentsio konposatuak angelu jakin bat desfasatuta agertzen dira, eta fase aldaketa honek *Ordu Indize*-aren kontzeptuarekin zerikusia du.

Transformadoreek osagai simetrikoen aurrean portaera jakin bat aurkezten dute. Elementu estati-koak direnez, sekuentzia zuzen eta alderantzizkoaren aurrean portaera bera daukate. Sekuentzia homo-polarraren aurrean, aldiz, portaera harilkatuen konexioaren menpekoa da.

Sigi-saga motako konexioaren erabilera behe-tentsiora mugatuta dagoenez, garraio- eta banaketa-sareetan erabiltzen diren konexioak izarra eta triangelua izaten dira. Triangelu motako konexioaren aurrean korrante homopolarra gailuan bertan mugatuta geratzen da, ez baitio beste harilkatura pasatzen uzten, eta ondorioz sarean zehar ez da osagai homopolarririk hedatuko.

Izar motako konexioaren aurrean, oster, bi harilkatuak izar motakoak direnean osagai homopolarra indukzioz beste harilkatura pasatzen da. Hala ere, izar konexioak induzitutako aldean neutrorik izan ezean, ezin da gainerako sistema elektrikora hedatu (5.5 irudia).

Honela, transformadore trifasikoak elkarlotzen dituen bi sistemen artean sekuentzia homopolarra alde batetik bestera bi noranzkoetan pasatzea eragozten ez duen konfigurazio bakarra YNyn konexio mota dela ebatzi da.



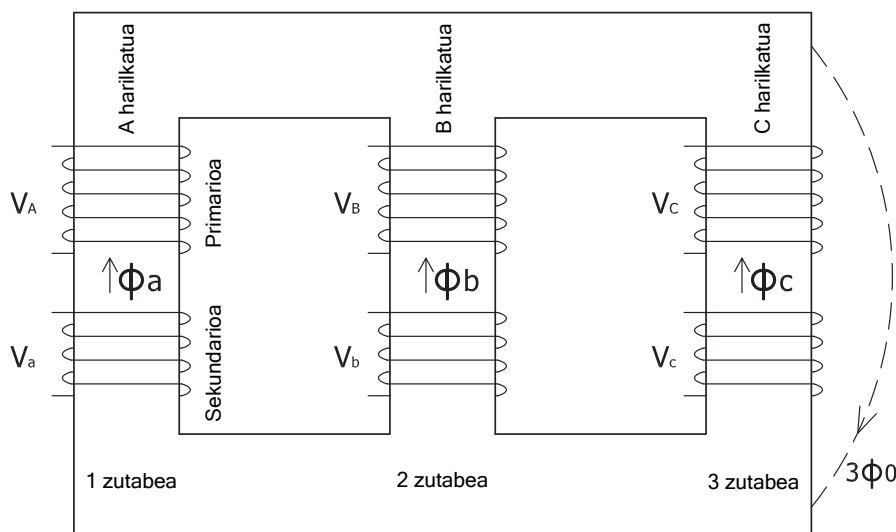
5.5. irudia: Sekuentzia homopolarraren portaera konexio motaren arabera [3].

5.2.2. Egoera desorekatuak YNyn motako transformadore trifasikoetan

Aurreko atalean aipatu den bezala, YNyn motako transformadore trifasikoetan primarioan eta sekundarioan neutroa eskuragarri dagoenean, korrante homopolarrak bidea du transformadorearen alde bate-tik bestera hedatzeko. Dena dela, garrantzitsua da homopolarraren bidea bai ikuspuntu elektrikitik, bai magnetikitik aztertzea.

Transformadore trifasikoa ikuspuntu elektrikitik behatuta, korrante desorekatuak neutrotik bidera-tuko dira. Hots, neutrotik sekuentzia homopolarraren batura pasatuko da. Honela, desoreka-korranteek haien osotasunean transformadorea primariotik sekundaria edota alderantziz zeharkatzea lortuko du-te. YNyn motatako transformadoreetan bide homopolarrak inpedantzia oso txikia izango du [13].

Bestetik, analisia ikuspuntu magnetikotik aztertu ahal izateko, funtsezkoa da transformadorearen nukleo magnetikoaren geometria ezagutzea. Bai banaketa-sareko YNyn transformadoreen, bai azaldu-tako plataforma esperimentaleko YNyn transformadorearen nukleoa 3 zutabekoa da (5.6 irudia).

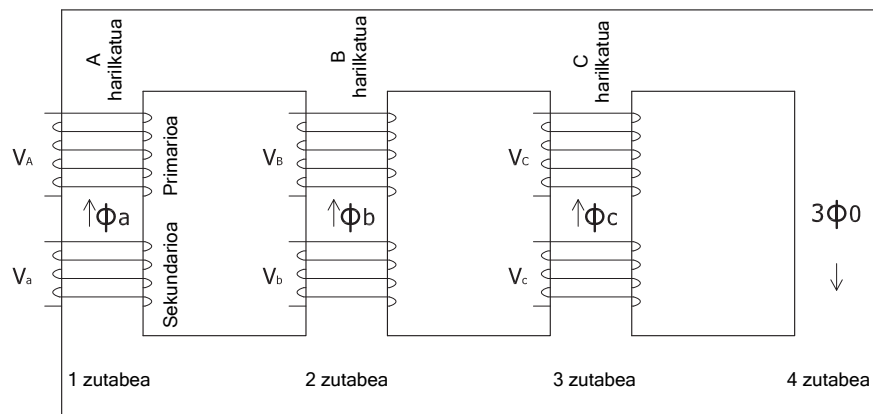


5.6. irudia: 3 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].

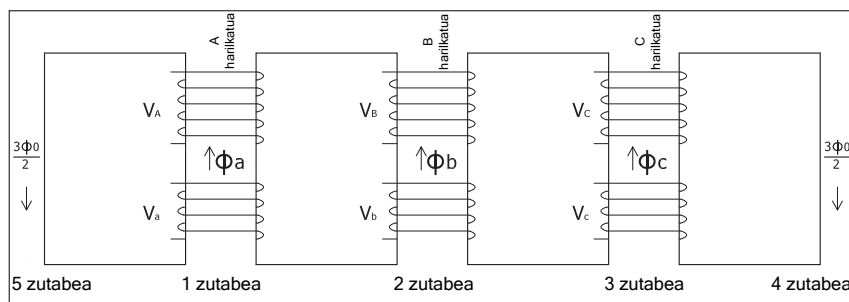
Egoera orekatuetan transformadorearen hiru faseetako fluxuen batura nulua izango da. Egoera desorekatuetan, aldiz, fluxu homopolarra agertuko da, eta fluxu homopolar totala hiru faseen artekoen batura izanik, fase bakoitzeko fluxu homopolarren hirukoitza izango da. Fluxua gidatzeko mediorik egokiena nukleo ferromagnetikoa da, erreluktantzia txikiko bidea baita. 3 zutabeko transformadorearen kasuan fluxu homopolarrik ezin izango du bide ferromagnetikorik aurkitu. Beraz, zirkuitu magnetikoa hozgarritik eta karkasatik itxiko luke, erreluktantzia handiagoa duen bidetik.

Sekuentzia homopolarren magnetizazio-korronte eskakizuna ohikoa baino handiagoa denean, hozgarriaren eta karkasaren erreluktantziari aurre egiteko fluxu homopolarra hozgarritik eta karkasatik bideratzen da. Egoera hau luzaroan mantenduz gero, transformadorearen gainberotzea eragiten du, eta honek ekipoaren degradazioa dakar [4].

Aldiz, nukleo ferromagnetikoak 3 zutabe beharrean 4 edo 5 zutabe baditu, fluxu homopolarrik zirkuitu magnetikoa ixteko bide ferromagnetikoa izango luke harilkaturik gabeko zutabeetatik (5.7 eta 5.8 irudiak). Analisi hauetan zirkuitu elektriko baliokidearen magnetizazio-adarra mesprezagarria ez dela azpimarratzekoa da.

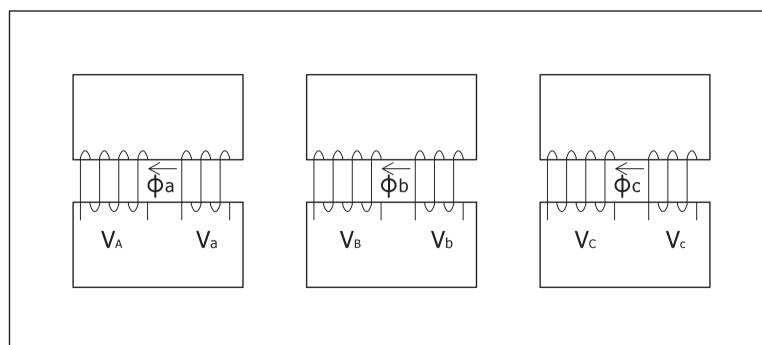


5.7. irudia: 4 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].



5.8. irudia: 5 zutabeko transformadorearen nukleo magnetikoaren egitura [4].

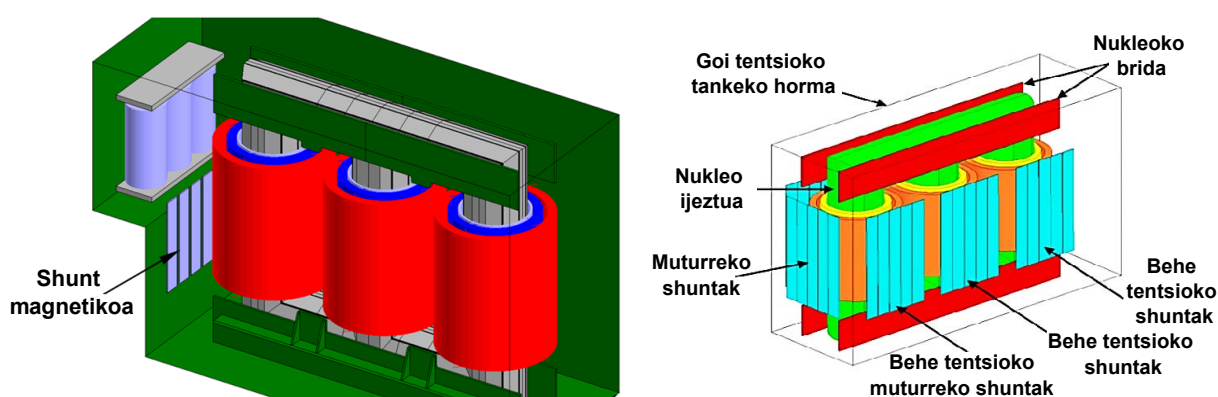
Nukleo inguratzaile motako transformadoreen funtzionamendua ere 4 edo 5 adarrekoen antzerakoa litzateke (5.9 irudia), hiru transformadore monofasiko bateratzearen moldaketa kontsideratzen baita. Egitura honen kasuan ere harilkaturik gabeko zutabeak daudenez, sekuentzia homopolarreko fluxua nukleo ferromagnetikotik bideratuko dute.



5.9. irudia: Nukleo inguratzaileko transformadorearen egitura [4].

YNyn motako transformadoreak egoera desorekatuetan haren funtzionamendua kaltetu gabe jarduteko fluxu homopolarrari bide ferromagnetikoa eman behar zaiola agerikoa da. 3 zutabeko egituraren kasuan bide hori eskuragarri ez dagoenez, zirkuitu magnetikoa hozgarritik eta karkasatik ixten da. Hala ere, 3 zutabeko transformadoreen portaera hobetzeko ordezkoi aukera bat *shunt magnetikoen* erabilera litzateke.

Shunt magnetikoak karkasaren eta harilkatuen artean jartzen diren xafla ferromagnetiko pilatuak dira, galera elektromagnetikoak murrizteko erabiliak. Era berean, fluxuarentzat hozgarriak eta karkasak baino eroale hobeak dira, honela, fluxu homopolarrak zirkuitu magnetikoa haien bitartez itxiko luke karkasatik beharrean (5.10 irudia).



5.10. irudia: *Shunt magnetikoen* aplikazio eredua [5], [6].

Bukatzeko, aipatzekoa da akatsen ondoriozko egoera desorekatuekin fase batean gainkorronteak sor daitezkeela. Honek, fase horretan nukleo ferromagnetikoa saturatzea suposa dezake. Beraz, gerta liteke kontrolaren bidez transformadorearen sekundarioko irteera handitzea bilatuz, primarioan korronea handitzeko agindua ematea baina agindu horrek irteeran lortu nahi den efektua sekula ez lortzea saturazioagatik. Honela, kontrol-begizta etengabe batean sartuko litzateke, ekipoen gaineko kontrola galduz.

5.3. Zirkuitu elektriko eta magnetiko baliokideen arteko dualtasuna

Potentzia-transformadoreetan eremu elektrikoak eremu magnetikoaren eraginpean jarduten duez, bi zirkuituak akoplaturik daudela ebatzen da. Beraz, ezinezkoa izango da zirkuitu elektrikoak zirkuitu magnetikoa aztertu gabe aztertzea. Zirkuitu dualen baliagarritasuna *Colin Cherry*-k [14] proposatu zuen hasiera batean, baina ondoren *Slemon*-ek [15] haren aplikazio praktikoa jorratu zuen.

Dualtasun-teorema aplikatuta [16] zirkuitu elektriko ororen zirkuitu magnetiko baliokidea defini daiteke, eta alderantziz. Parametro elektriko bakoitzak bere parametro magnetiko baliokidea du, 5.1 taulan adierazten den bezala. Halaber, nabarmendu beharra dago zirkuitu elektrikoan seriean dauden elementuak zirkuitu magnetikoan paraleloan adierazten direla, eta tentsio-iturri elektrikoak korrante iturri bezala adierazten dira zirkuitu magnetikoan. Gainera, zirkuitu elektrikoan nodoak zirkuitu magnetikoan sare bihurtzen dira eta zirkuitu elektrikoan zirkuitulaburra magnetikoki zirkuitu ireki bezala adierazten da.

5.1. taula: Elementuen baliokidetasun dualak.

Elektrizitatea	Magnetismoa
$V = R \cdot I$	$\mathcal{F} = \mathcal{R} \cdot \Phi$
Erresistentzia (R)	Erreluktantzia (\mathcal{R})
Korrontea (I)	Fluxua (Φ)
Indar elektroeragilea (V)	Indar magnetoeragilea (\mathcal{F})
Tentsio iturria	Korrante iturria
Eroankortasuna (σ)	Iragazkortasuna (μ)
Nodoa	Sarea
Zirkuitua seriean	Zirkuitua paraleloan
Zirkuitulaburra	Zirkuitu irekia

Zirkuitu magnetikotik abiatuz zirkuitu elektrikoa irudikatzeko, nodoen artean zuzenak marraztu behar dira ondorengo arauak jarraituz:

1. Linea batek ezin ditu zirkuitu magnetikoaren konexioak zeharkatu, elementuak bakarrik (iturriak eta erreluktantziak) zeharka ditzake.
2. Bi korapilo konektatu behar badira, konexioak elementu bakarra zeharkatu behar du.
3. Elementu bakoitza behin baino ez da lerro bakar batetik gurutzatzen.
4. Elementu guztiak lerro batek gurutzatu behar ditu.
5. Korapilo bakoitzak gutxienez bi konexio izan behar ditu.

6 Alternatiben analisia

Behin banaketa-sare elektrikoetako akats motak eta potentzia-transformadore trifasikoak identifikatu eta ezaugarrituta, atal honetan potentzia-transformadorearen modelizazioa gauzatzeko alternatiben analisia aurkeztuko da.

6.1 Simulazioak garatzeko *softwarea*

Proiektu honetan aurkezten den potentzia-transformadorearen modeloaren baliagarritasuna egiaztatzeko, lehenik eta behin simulazioak burutzeko *softwarea* definitu beharra dago. Honela, ingurune birtual batean proposatutako modelizazioak potentzia-transformadore fisikoaren portaera berbera duela frogatu daiteke.

Egun, sistema elektriko eta elektronikoak simulatzeko merkatuan *software* ezberdinak daude, jarraian erabilera hedatuena dutenak aipatzen dira:

- *ATPDraw-EMPT*: Izaera elektromagnetikoa eta elektromekanikoa duten fenomeno iragankorren simulazio digitala ahalbidetzen du. Ekipoak diseinatzeko, zehazteko edo parametro elektrikoak definitzeko erabiltzen da. Sistema elektriko osagaiak kasuan kasuko fenomenoaren arabera ezaugarritzen duten eredu matematikoen lan egiten du. Aipatzekoa da potentzia-transformadoreen ereduaren artean nukleoaren arabeko diseinuaren simulazioa gauza daitekela.
- ***MATLAB-Simulink*: bloke-diagramaz osatutako *softwarea* da, domeinu anitzeko simulazioak gauzatzeko eta modeloetan oinarritutako diseinuak garatzeko balio duena. Sistema dinamikoak modelatu eta simulatzeko editore grafiko bat, bloke pertsonalizagarrien liburutegiak eta *solver*-ak eskaintzen ditu. *MATLAB*ekin integratzen da, ereduaren *MATLAB*en sortutako algoritmoak inportatzeko eta simulazio-emaitzak *MATLAB*era esportatzeko aukera emanez.**
- *Power Factory*: transmisio, banaketa eta energia elektriko industrialeko sistemak aztertzen ditu. Energia berriztagarriak integratzen dituen sarearen simulazioaren ezaugarriak ere barneratzen ditu. Azpimarragarria da kontingentzien analisirako tresna, sistema haren osotasunean aztertzeko egokia.

Lan honen jatorria GSGIHak sustaturiko ikerkuntza proiektu zabalago bat izanik, haren eredu nagusia *MATLAB/Simulink software*-arekin diseinatuta dago. RECON-EP proiektuan uztartzen diren modeloen bateragarritasuna bermatze aldera, potentzia-transformadorearen modelizazioa *MATLAB-Simulink software* berarekin burutzea erabaki da ondorengo arrazoiengatik:

- UPV/EHUko ikasleontzat *MATLAB-Simulink software*a dohainik izatea.
- Transformadorearen modelo xehatuaren eta sarearen modelo osatuaren arteko bateragarritasuna bermatzea.
- Modeloa osatu eta editatzeko *software*aren plataforma eskaintzan malgutasuna *online*, *central* eta *drive* aldaeren bitartez.
- *Simscape Electrical - Specialized Power Systems toolbox*ari esker modeloa xehatuan fenomeno elektrikoak simulatzeko gaitasuna.
- Beste ingurune batzuetatik datuak inportatzea eta beste ingurune batzuetara datuak esportatzea ahalbidetzea, ondorengo analisiak erraztuz.

6.2. Akatsak sare elektrikoan

5.1 atalean aipatzen den bezala, banaketa-sarean hutsegiteak ematen direnean akats mota probabileena akats monofasikoa da. Akats hauetan zehar sistema elektrikoak tentsio egoera desorekatuan jardungo du, baina 2. atalean azaldu den bezala, potentzia-transformadoreak ez daude egoera desorekatuetan jarduteko diseinatuta. Beraz, ezin liteke zuzenean gailuak egoera desorekatuan izango lukeen erantzuna ondorioztatu, eta beharrezkoa da portaera honen ikasketa sakona egitea.

5.1 atalean azaldu izan den bezala, zirkuitulabur akatsak hiru multzotan sailkatzen dira:

- *Akats trifasikoa*: Tentsio banaketa simetrikoa du eta akatsen %5 suposatzen du.
- *Akats bifasikoa eta lurrerako akats bifasikoa*: Tentsio banaketa asimetrikoa du eta akatsen %20 suposatzen du.
- ***Lurrerako akats monofasikoa*: Tentsio banaketa asimetrikoa du eta akatsen %75 suposatzen du.**

Tentsio egoera desorekatuen aurrean transformadorearen zirkuitu elektriko monofasiko baliokidea ez da nahikoa, egoera orekatuetan baino ez baita aplikagarria. Zirkuitu baliokide trifasikoaren bidez, ostera, akatsean zehar ematen den egoera azpiiragankorra eta iragankorra aztertzeko aukera dago, baita egoera egonkorrean emango den egoera desorekatua ere.

MAL honetan bereziki aipatu berri den azken kasuistikan sakonduko da, hots, egoera egonkorrean ematen diren tentsio desorekatuen aurrean potentzia-transformadoreen erantzuna ezaugarritzea bilatuko da. Aztertuko den akatsa monofasikoa izango da, ondorengo arrazoiengatik:

- Gertatzen diren akats mota ugariak (%75) izanik, hornikuntza elektrikoaren jarraitutasuna baldintzatzen dute.
- Tentsio egoera desorekatuek gainerako sistema elektrikoaren egonkortasuna baldintza dezakete, sistema osatzen duten gailuak arriskuan jarritz.
- Akats monofasikoak mantenduz gero, akats bifasiko edo trifasiko bihurtu daitezke, kalte handiagoak eraginez.

6.3. Egoera desorekatuak jasateko konfigurazioa

5.2.2 atalean aipatutakoa kontuan izanda, YNyn motako transformadore trifasiko batek egoera desorekatuak jasateko oro har hiru alternatiba planteatu daitezke:

- *5 zutabeko transformadorea*: harilkaturik gabeko zutabeen bidez fluxu homopolarrak erreluktantzia txikiko bidea du. Kasu honetan, osagai homopolarraren muga balio izendatuaren hiru erdi litzateke, fasekoaren hirukoitza den osagai homopolar totala kanpoko bi zutabeetatik banatzen delako. Aukera honen ezagutza eta garapen maila oso altua da, 5 zutabeko transformadoreetan korrante homopolarrak ez du gailuaren fidagarritasuna konprometitzen. Gainera, inplementatzeko bideragarria da, baina kasu konkretuetan baino ez direnez ekoizten, materialen kostuaz haratagoko teknologiaren garestitzea dakar.
- *3 zutabeko transformadorea shunt magnetikoekin*: shunt magnetikoen bidez erreluktantzia txikiko bidea osatzean, fluxu homopolarra hozgarri eta karkasatik bideratzea ekiditen da. Hala ere, shunt magnetikoen erabilera ez dago oso hedatuta, ezagutza eta garapen maila mugatua du, eta teknologia hau ez da planteatzen ari den irtenbiderako aurretiaz frogatu.

- **3 zutabeko transformadorearen lan-baldintza mugatuekin:** material ferromagnetikoz osatutako bide homopolarraren presentziarik gabe, osagai homopolarrak bidea hozgarri eta karkasatik itxiko du. Transformadorearen lan-baldintzen arabera, gailuaren fidagarritasuna konprometi daiteke. 3 zutabeko transformadoreen ezagutza eta garapen maila oso altua da, transformadorerik erabilienak baitira garraio- zein banaketa- sarean. Honela, haien serieko ekoizpenak prezioa nabarmen murrizten du eskala ekonomien aplikazioarekin batera.

Alternatiben artean aukerarik egokiena hautatzeko haien indargune eta ahuleziak identifikatu eta aukerak alderatuko dira (6.1 irudia).

6.1. taula: Egoera desorekatuak jasateko konfigurazioen konparaketa.

	5 zutabe	3 zutabe eta shunt-ak	3 zutabekoaren muga
Ezagutza maila	✓✓✓	✓	✓✓✓
Garapen maila	✓✓✓	✓	✓✓✓
Fidagarritasuna	✓✓✓	✓	✓
Bideragarritasuna	✓✓	✓	✓✓
Prezioa	€€€	€€	€

Proiektuaren helburua teknologia berritzailea ahalik eta gehien hedatzea dela kontuan hartuta, 3 zutabeko transformadoreak egoera desorekatuekin gailua konprometituko ez dituen lan-baldintzak zehaztea erabaki da honako arrazoi hauek direla eta:

- Teknologia ezaguna eta oso garatua da, seriean ekoizteko bideragarria.
- Garraio- eta banaketa-sarean erabiltzen den transformadore mota da.
- Jada instalatutako teknologia etorkizuneko aplikazio posibleetarako bideragarria den aztertzeak baliabide material zein ekonomikoak aurrez litezke.

6.4. Inpedantzia homopolarraren modeloa

RECON-EP proiektuaren helburuetariko bat, plataforma esperimental batean akats monofasiko batek sorturiko efektua emulatzea denez, moduren batean *hardware* elementu bat erabili behar da potentzia-transformadorearen erantzuna aztertu ahal izateko.

Aukeretariko bat, proba esperimentalen bidez potentzia-transformadoreak duen portaera eredu litzateke. Dena dela, froga esperimentalek plataformarentzat eta esperimentazioa gauzatzen ari den pertsonarentzat arriskutsuak izan litezke. Ondorioz, honetikiko alternatiba **potentzia-transformadorearen portaera simulazio bidez aztertzea** liteke eredu baliokide zehatz batez baliatuz. Ordenagailu bidezko simulazio bidez ondorengo abantailak bermatzen dira:

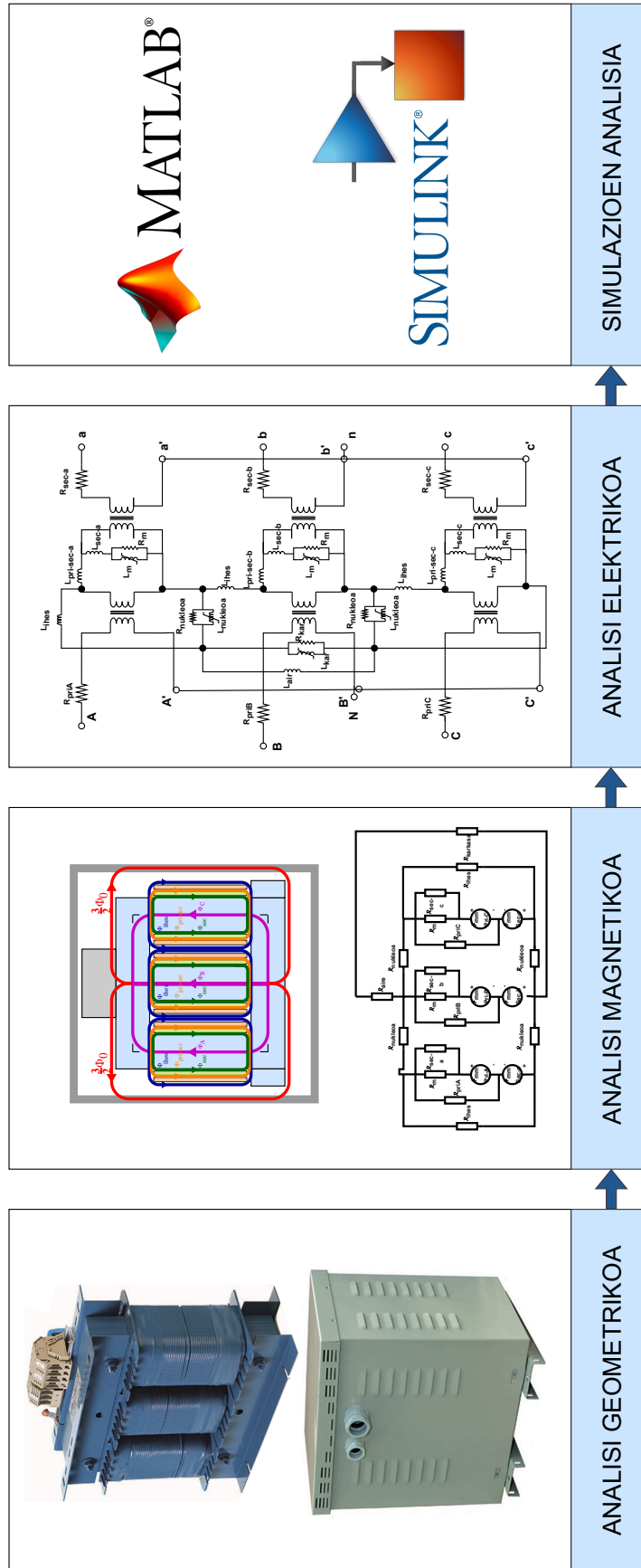
- *Segurtasuna*: Aipatu den bezala, arriskutsua izan daiteke laborategi batean egoera ezezagunetan saiakuntzak egitea, inguruko ekipoa eta pertsonak kaltetu baititzake. Beraz, simulazioak ordenagailu bidez egitea egoera desorekatuen efektuak aztertzeko modu seguru eta kontrolatua da.
- *Denbora eta baliabideak aurrezteak*: Potentzia-transformadoreak egoera jakin batzuetan saiakuntzak egitea garestia izan daiteke eta denbora asko xahutzen du. Ordenagailu bidezko simulazioak erabiltzen badira, hainbat baldintza eta parametroekin saiakuntzak egin daitezke egiazko *hardware* baten beharrik gabe, denbora eta baliabideak aurreztuz.
- *Kontrola eta doitasuna*: Ordenagailu bidezko simulazio ingurune batean, esperimentu baten baldintzen eta parametroen kontrol eta zehaztasun handiagoa lor daiteke. Horri esker, hobeto uler eta azter daitezke potentzia-transformadoreak egoera desberdinetan dituen erantzunak.
- *Malgutasuna*: Ordenagailu bidezko simulazioek hainbat egoera eta baldintzarekin saiakuntzak egiteko aukera ematen dute, *hardware* erreal bat erabiltzea baino malguago eta egokiago.

Potentzia-transformadorearen *software* bidezko modelizazioak simulazioan eskaintzen dituen abantailari esker, portaera kasu ezberdin asko ondoriozta litezke. Hala ere, azpimarragarria da aztertu nahi den kasu zehatza behin simulatuta, erantzunik zehatzena analisi esperimentalak emango duela.

7 Proposatutako irtenbidearen deskribapena

Aurreko atalean aukeratutako alternatibetatik abiatuta, lan honek YNyn motako 3 zutabeko transformadore trifasiko erreale baten modelizazio birtualaren bidez egoera desorekatuak jasateko lan-baldintzak ezaugarrituko ditu. Horretarako, APERTen laborategian dagoen transformadorea hartuko da eredutzat, eta ikasketa hurrengo lau atalak jarraituz burutuko da:

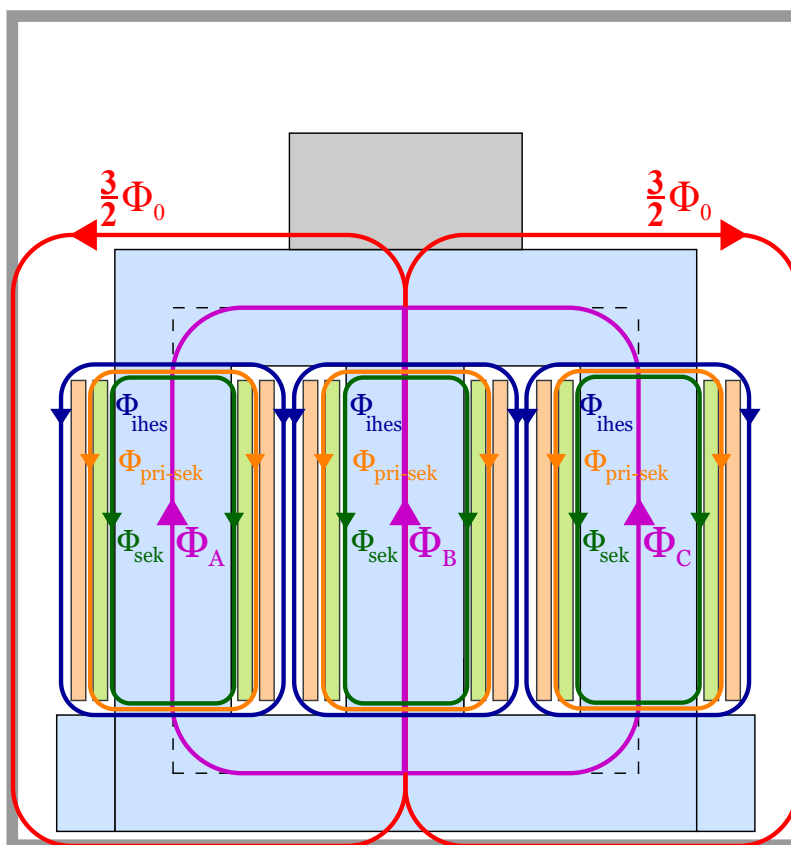
- 1. Analisi geometrikoa (7.1 irudia, ANALISI GEOMETRIKOA):** Transformadore errealearen analisi geometriko xehatua gauzatzeko *Tecnotrafok*, laborategiko transformadorearen ekoizleak, diseinu irizpideetan aplikatutako neurri geometrikoak zehaztu ditu, hala nola harilkatuen sekzio eta espira kopurua, goi eta behe-tentsioko harilkatuen arteko tartea, nukleo magnetikoaren neurriak eta materiala, zein karkasaren neurriak eta materiala.
- 2. Analisi magnetikoa (7.1 irudia, ANALISI MAGNETIKOA):** Transformadorean zeharreko eremu magnetikoaren indar lerroak identifikatuta, gailua osatzen duten osagai guztiak eta haien ezaugarriak zirkuitu magnetikoaren baitan islatuko dira erreluktantzien bidez. Erreluktantzia bakoitza material baten eta neurri geometriko jakin batzuen arabera ezaugarrituko da.
- 3. Analisi elektrikoa (7.1 irudia, ANALISI ELEKTRIKOA):** Zirkuitu magnetikoari dualtasun-printzipioa aplikatuta zirkuitu elektriko xehatua definituko da. Dualtasun-printzipioaren bitartez zirkuitu elektrikoa osatzen duten osagai pasiboak eta haien arteko konexioak ezagutuko dira. Zirkuitu elektrikotik abiatuta, parametro guztien balioak definituko dira transformadorea osatzen duten azpiatal guztien materialen eta ezaugarri geometrikoen arabera.
- 4. Simulazioen analisia (7.1 irudia, SIMULAZIOEN ANALISIA):** Definitutako zirkuitu elektrikoaren modeloa *MATLAB-Simulink* softwarearen bitartez inplementatuko da proposamenaren baliagarritasuna aztertzeko. Horretarako, laborategiko transformadore errealeari aplikatutako entseguen emaitzak simulazio emaitzekin alderatuko dira. Halaber, simulazioaren bidez egoera desorekatuen aurrean transformadoreak izango lukeen erantzuna aztertu eta gailua konprometitzen ez duen lan-baldintzen mugak zehaztuko dira.



7.1. irudia: Irtenbidearen deskribapena.

8.1. 3 zutabeko YNyn transformadorearen zirkuitu magnetikoa

Zirkuitu magnetikoa definitzeko, eremu magnetikoaren topologia eta indar magnetoeragileak identifikatu beharrak daude (8.2 irudia).



8.2. irudia: 3 fase eta 3 zutabeko YNyn eremu magnetikoa.

Harilkatu bakoitzean indar magnetoeragile bat agertuko da (F_{mm}), baina harilkatu sekundarioan indar magnetoeragilea induzitu egiten denez, harilkatu primarioaren kontrako noranzkoa izango du. Bai harilkatu primarioan, bai sekundarioan, agertuko diren indar magnetoeragileak harilkatuen espira kopurua eta korrontearen arabekoak izango dira:

$$\mathcal{F}_{mmi} = N_i \cdot I_i. \quad (8.1)$$

Non: \mathcal{F}_{mmi} = i harilkatuaren indar magnetoeragilea [A].

N_i = i harilkatuaren espira kopurua [-].

I_i = i harilkatutik doan korrontea [A].

Aipatzekoa da zutabe bakoitzean fase bakoitzari dagokion elikaduraren araberako fluxua egongo dela. Egoera orekatuetan, fluxuak moduluan berdinak eta 120° desfasatuak izango direnez, erdiko zutabearen goiko puntuan elkar deuseztatuko dira. Hala ere, egoera desorekatuetan faseetako fluxuari *Fortescue* teorema aplikatuta, fase bakoitzeko fluxua fluxu zuzenean, alderantzizko fluxuan eta fluxu homopolarrean deskonposatu ahal izango da. Honela, erdiko zutabearen goiko puntuan sekuentzia zuzeneko eta alderantzizko fluxuak deuseztatuko dira, eta fluxu homopolarrak batu egingo dira, nukleo kanpotik bideratu beharko den fluxuaren osagai homopolarra hirukoiztuz.

Nukleo magnetikoa osatzen duten atal bakoitzari erreluktantzia jakin bat dagokio, fluxuak zeharkatzen duen geometriaren (luzera eta zeharkako azalera) eta materialaren (iragazkortasuna) menpekoa izango dena:

$$\mathcal{R}_i = \frac{l_i}{\mu_r \mu_0 A_c}, \quad (8.2)$$

Non: \mathcal{R}_i = i elementuari dagokion erreluktantzia [H^{-1}].

l_i = i elementuaren luzera [m].

μ_r = i elementuaren materialaren iragazkortasun erlatiboa [-].

μ_0 = hutseko iragazkortasuna [H/m].

A_c = i elementuaren zeharkako azalera [m^2].

Zirkuitu magnetikoak ebazteko *Hopkinsonen* legea aplikatu beharra dago, eremu elektrikoetan aplikatzen den *Ohmen* legearen baliokide magnetikoa baita:

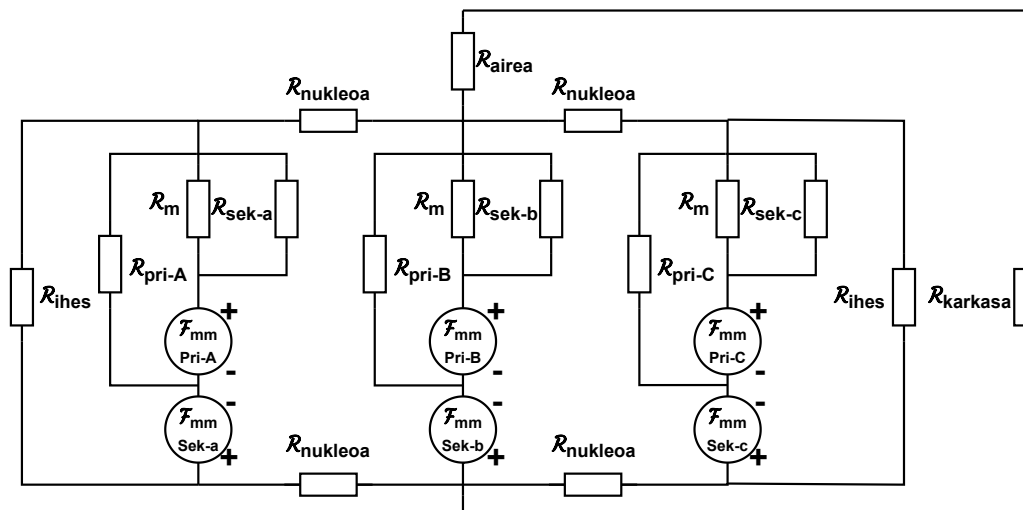
$$\mathcal{F}_{mm} = \mathcal{R} \cdot \Phi \quad (8.3)$$

Non: \mathcal{F}_{mm} = indar magnetoeragilea [A].

\mathcal{R} = erreluktantzia [H^{-1}].

Φ = fluxua [Wb].

Nukleo magnetikoak duen erreluktantziaz gain (\mathcal{R}_m), kontuan izan beharra dago bai nukleo magnetikoaren baitan, bai harilkatuetan, aire zuloak eta ihes-galerak daudela. Halaber, fluxuaren sekuentzia homopolarrak hozgarritik edo karkasatik duen bidea ere aintzat hartu behar da. Zirkuitu magnetiko baliokide osoa 8.3 irudian adierazten da.



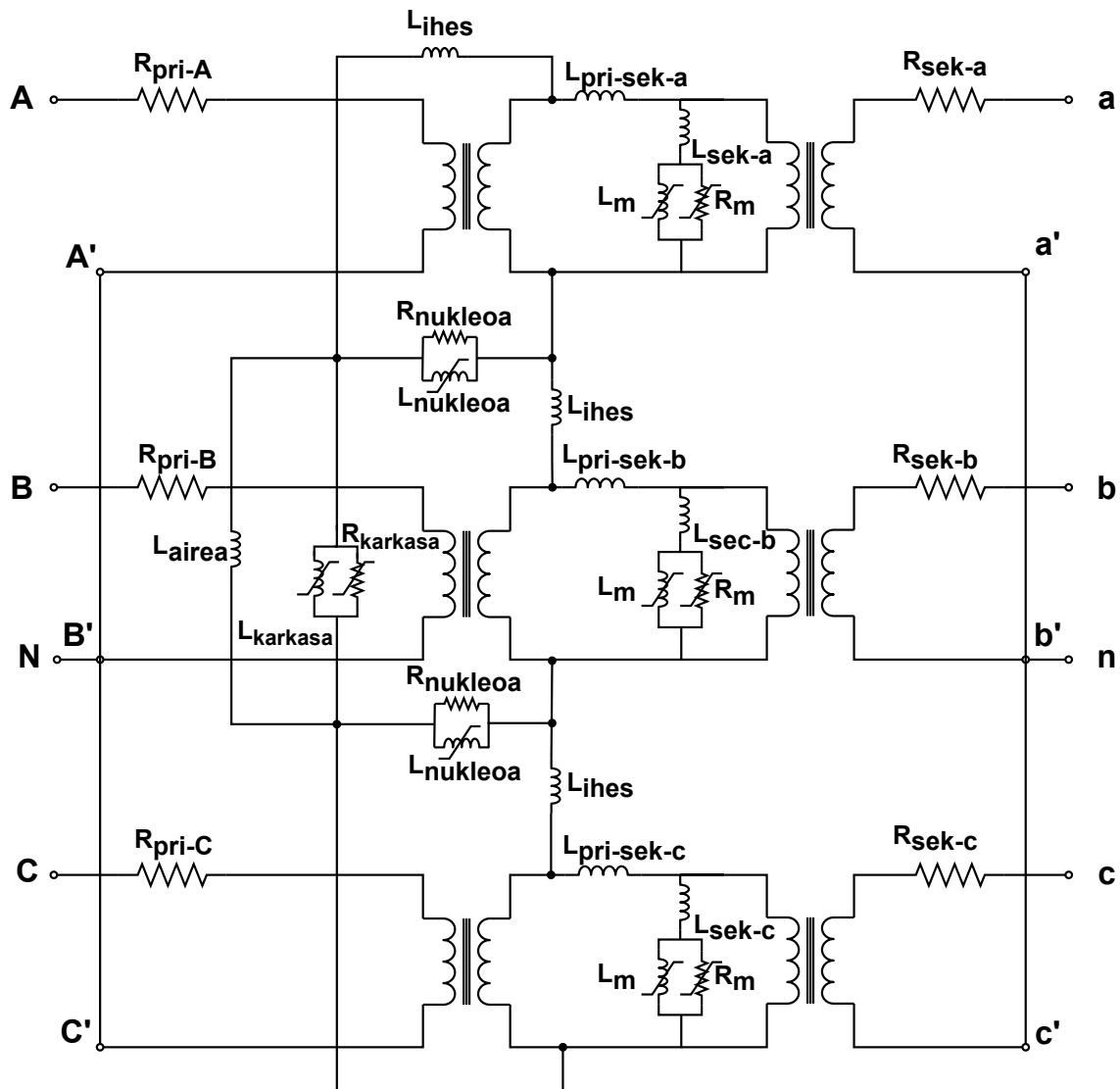
8.3. irudia: 3 fase eta 3 zutabeko YNyn zirkuitu magnetiko baliokidea.

8.2. 3 zutabeko YNyn transformadorearen zirkuitu elektrikoa

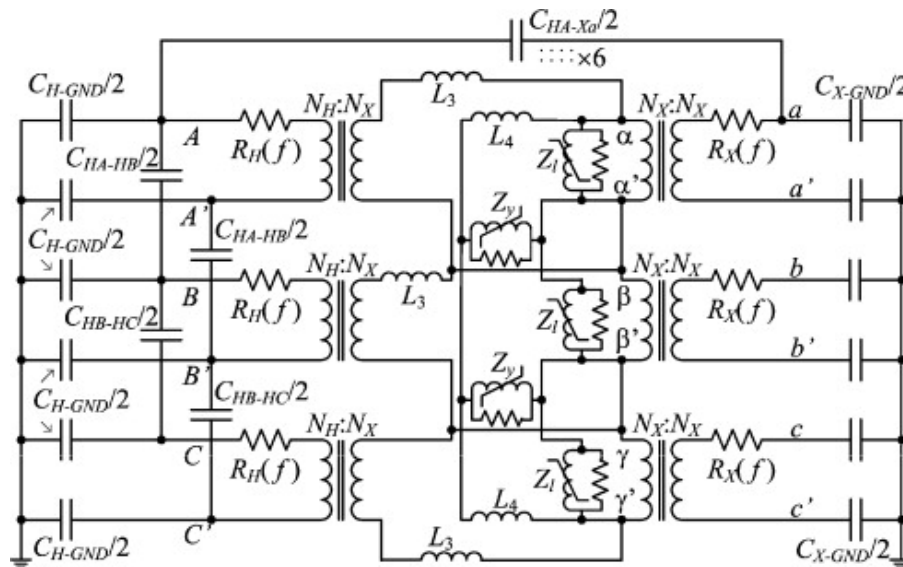
Azaldu berri den zirkuitu magnetiko baliokidean dualtasun magnetiko-elektikoaren printzipioa aplikatuz gero, 8.4 irudian adierazten den eskema elektrikoa lortzen da. Zirkuitu honetan harilkatu bakoitzeko erresistentzia bana, fase bereko bi harilkatuen arteko inductantzia eta fase bakoitzeko magnetizazio-adarra egongo da. Halaber, egoera desorekatuaren ondoriozko fluxu homopolarrak zeharkatzen duen bide magnetikoa elektrikoki adierazi da. Kasu honetan funtsezkoa da inductantzien baitan saturazioaren efektua eredutzea.

Lortu den zirkuitu baliokidearen baliagarritasuna agerian uzteko iragankor elektromagnetikoak simulatzeko *softwareek* inplementatuta dituzten ereduakin alderatu da. *ATP-Draw (ATP-EMTP) softwareak*, adibidez, egoera desorekatuak simulatzeko XMFR izeneko modelo hibridoa gomendatzen du [7] (8.5 irudia).

Aurreko zirkuitu baliokidearekin aurkezten duen ezberdintasuna kapazitate parasitoak kontuan hartzea dira (8.5 irudia, $C_{H-GND/2}$). Izan ere, aldiuneko tentsio aldaketa handiak daudenean kapazitate parasitoak kontuan hartu behar dira, baina maiztasun txikiekin tentsio aldaketak ez dira han esanguratsuak. Ikasiko den egoera desorekatua maiztasun izendatuan emango dela aintzat hartzen denez, maiztasun txikien aurrean kapazitate parasitoek duten eragina mesprezagarritzat jo daiteke.



8.4. irudia: 3 fase eta 3 zutabeko YNyn zirkuitu elektriko baliokidea.



8.5. irudia: ATP-Draw softwarearen XFMR modeloaren zirkuitu elektrikoa [7].

8.3. Erresistentziak ezaugarritzea

Transformadorearen eskema elektrikoan agertzen diren erresistentziak (8.4 irudia) bi multzo nagusitan sailkatzen dira:

- Harilkatu bakoitzak duen erresistibitatearen ondoriozko erresistentziak (R_{1A} , R_{1B} , R_{1C} , R_{2a} , R_{2b} , R_{2c}). Harilkatu bakoitzari dagokion erresistentzia definitzeko, transformadorea korrante zuzenean elikatzen da, eta tentsio jauskeran *Ohmen* legea aplikatzean harilkatu bakoitzari dagokion erresistentzia lortzen da. Oro har, transformadoreen *datasheet*etan ekoizleek informazio hau zehazten dute.
- Material ferromagnetikoen galerak ereduizten dituzten erresistentziak (R_m , $R_{karkasa}$). Saturazioaren efektua B-H kurbak ezaugarritzen duen bezala, kitzikapenaren arabera aldatzen den erresistentzia baliokidea ezaugarritzeko burdin-galerak kuantifikatzen dira. Galera hauek material ferromagnetikoaren menpekoak dira. Dena dela, simulaziorako erabili den *MATLAB-Simulink* softwareak dituen erresistentzia aldatzeko tentsio-korrante kurbak ezaugarritzen dituzenez, indukzio magnetikoa (B) kitzikapen-tentsioarekin (V_0) erlazionatu beharra dago (8.4 ekuazioa). Ondoren, kitzikapen-tentsiotik eta burdin-galeretatik abiatuz, hutseko erresistentzia definituko da (8.5 ekuazioa), eta bukatzeko, tentsio-korrante kurba *Ohmen* legeak ezaugarrituko du (8.6 ekuazioa).

$$V_0 = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot B \cdot A_c, \quad (8.4)$$

Non: V_0 = kitzikapen-tentsioa [V].

N = espira kopurua [-].

f = maiztasuna [Hz].

B = fluxu-dentsitatea [T].

A_c = elementu ferromagnetikoaren zeharkako azalera [m²].

$$R_m = \frac{V_0^2}{P_{Fe}}, \quad (8.5)$$

Non: R_m = hutseko erresistentzia [Ω].

V_0 = kitzikapen-tentsioa [V].

P_{Fe} = burdin-galerak [W].

$$I_0 = \frac{V_0}{R_m}, \quad (8.6)$$

Non: I_0 = kitzikapen-korrontea [A].

V_0 = kitzikapen-tentsioa [V].

R_m = hutseko erresistentzia [Ω].

8.4. Induktantziak ezaugarritzea

Transformadorearen eskema elektrikoan (8.4 irudia) agertzen diren inductantziak hiru motatakoak dira. Batetik, harilkatua duten material ferromagnetiko saturagarrien inductantziak (L_m); bestetik, harilkaturik gabeko material ferromagnetiko saturagarrien inductantziak (L_{nukleo} , $L_{karkasa}$); eta, azkenik, hozgarritik hedatzen diren magnetizazio galeren inductantziak ($L_{pri-sek-a}$, $L_{pri-sek-b}$, $L_{pri-sek-c}$, L_{sek-a} , L_{sek-b} , L_{sek-c} , L_{ihes} , L_{aire}).

8.4.1. Zutabeetako induktantziak

Saturazioaren efektua emulatu ahal izateko, materiala ezaugarritzen duen B-H kurbaren joera esponentziala matematikoki adierazi beharra dago. Normalean, nukleo ferromagnetikoen ekoizleek kurba esperimentalak osatzen duten puntuak xafla ferromagnetikoari dagokion *datasheet*ean adierazten dituzte. Hala ere, datu hauek ezagunak ez direnean, B-H kurbaren eredu matematikoa definitzeko materialaren arabeko *Frolich* ekuazioa aplikatu daioke (8.7 ekuazioa), ekuazio hori baita *ATP-Draw software*ak barnean inplementatuta duena:

$$B = \frac{H}{a + b \cdot |H|}, \quad (8.7)$$

Non: B = fluxu-dentsitatea [T].

H = eremu magnetikoaren intentsitatea [A/m].

a, b = materialaren ezaugarriei doitzeko koefizienteak.

Material ferromagnetikoaren ezaugarria B-H kurba bada ere, *MATLAB-Simulink*en simulatzeko ϕ -I kurba ezaugarritu behar da. Horretarako, fluxu magnetikoa eremu magnetikoaren dentsitatearekin (B) erlazionatu beharra dago, eta korrontea fluxu intentsitatearekin (H). Aipatutako parametro bikoteen definitziozko erlazioak 8.8 eta 8.9 ekuazioetan adierazten dira, hurrenez hurren:

$$\phi = \iint_S B \cdot dS, \quad (8.8)$$

Non: Φ = fluxu magnetikoa [Wb].

B = fluxu-dentsitatea [T].

dS = elementu ferromagnetikoaren zeharkako azalera diferentziala [m²].

$$N \cdot I = \int_l H \cdot dl. \quad (8.9)$$

Non: N = espira kopurua [-].

I = kitzikapen-korrontea [A].

H = eremu magnetikoaren intentsitatea [A/m].

dl = elementu ferromagnetikoaren luzera diferentziala [m].

Aztergai den transformadorearen kasuan, nukleo magnetikoaren zeharkako azalera lauki konstantea da, eta nukleoa osatzen duten atalen luzerak zuzenak direnez, 8.8 eta 8.9 ekuazioak garatuz, fluxu-korrante kurba kalkulatzeko 8.10 eta 8.11 adierazpenak jarraitu behar dira:

$$\phi = B \cdot A_c. \quad (8.10)$$

Non: Φ = fluxu magnetikoa [Wb].

B = fluxu-dentsitatea [T].

A_c = elementu ferromagnetikoaren zeharkako azalera [m²].

$$I = \frac{H \cdot l_i}{N}. \quad (8.11)$$

Non: I = kitzikapen-korrantea [A].

H = eremu magnetikoaren intentsitatea [A/m].

l_i = i elementu ferromagnetikoaren luzera [m].

N = kitzikatzen den harilkatuaren espira kopurua [-].

8.4.2. Harilkatu gabeko nukleo zatien induktantziak

*ATP-Draw software*ak zutabeko induktantziak eta nukleokoak (*yoke*) geometrikoki erlazionatzen ditu nukleo normalizatuaren kontzeptua aplikatuz (*Normalized Core Concept - NCC*) [17]. Azken finean, zutabetik eta harilkatu gabeko nukleoaren zati horizontaletik doan fluxua berdina denez, erlazio geometrikoaren bidez zutabe baliokidea definitzen da:

$$L_{nukleoa} = L_{zutabe} \cdot \frac{A_{cnukleoa} l_{zutabe}}{A_{czutabe} l_{nukleoa}}. \quad (8.12)$$

Non: $L_{nukleoa}$ = harilkatu gabeko nukleo zatiaren induktantzia [H].

L_{zutabe} = harilkatua duen zutabearen induktantzia [H].

$A_{cnukleoa}$ = harilkatu gabeko nukleo zatiaren zeharkako azalera [m²].

$A_{czutabe}$ = harilkatua duen zutabearen zeharkako azalera [m²].

$l_{nukleoa}$ = harilkatu gabeko nukleo zatiaren luzera [m].

l_{zutabe} = harilkatua duen zutabearen luzera [m].

Ondorioz, kanpoko zutabeek erdiko zutabeak baino erreluktantzia handiagoa izango dute harilkatu gabeko nukleo zati horizontalen ondorioz.

8.4.3. Karkasaren induktantzia

Karkasaren materiala ferromagnetikoa denean, burdina esaterako, hari dagokion induktantzia definitzeko nukleo ferromagnetikoari aplikatzen zaizkion printzipio berberak aplikatu behar dira. Ondorioz, 8.4.1 atalean aplikatzen den prozedura berbera jarraitu beharko litzateke.

Hala ere, baliteke karkasaren materiala paramagnetikoa izatea, aluminioa bezala. Kasu horietan, karkasa ezaugarrituko duen induktantzia baliokidea konstantea izango da, eta ondoren aipatzen den 8.4.4 ataleko prozedura aplikatu beharko litzateke.

8.4.4. Magnetizazio-galeren ondoriozko induktantziak

B-H magnetizazio kurbaren araberrako ezaugarritzea saturazioa duten induktantziak modelizatzen aplikatzen da. Hala ere, badaude magnetizazio-galerekin erlazionatuta dauden induktantzia konstanteak. Induktantzia konstanteak kalkulatzeko 8.13 ekuazioa aplikatu beharra dago:

$$L = N \frac{d\phi}{dI} = N \frac{d\left(\frac{NI}{\mathcal{R}}\right)}{dI} = \frac{N^2}{\mathcal{R}}. \quad (8.13)$$

Non: L = induktantzia [H].

N = espira kopurua [-].

Φ = fluxu magnetikoa [Wb].

I = kitzikapen-korrontea [A].

\mathcal{R} = elementuaren erreluktantzia [H^{-1}].

Izan ere, magnetizazio-galerek hozgarritik doaz, eta hozgarriek ez dute saturazio-ezaugarritik. Indar magnetoeragilea indukzioaren araberrakoa izango da betiere. Honela, hartu beharreko espira-kopurua primarioarena izan beharko litzatekeela ondorioztatzen da, elikatzen den harilkatua baita. Adierazpen honen zentzua hutseko saiakuntzetan egiaztatzen da.

Harilkatuen arteko induktantziak kalkulatzeko orduan, magnetizazio-galeren ondoriozko induktantzia galerek kalkulatzeko 8.13 ekuazioaren adierazpen partikularizatua erabili ohi da [16]. Era berean, funtsezkoa da harilkatuen arteko geometria ezagutzea (8.6 irudia) honako ekuazioa aplikatu ahal izateko:

8.5. Simulazio-emaitzak

Transformadorearen zirkuitu elektrikoak portaera zuzena duela egiaztatzeko planteamendu teorikoa *MATLAB-Simuliken* inplementatu da. Horretarako, lehenik eta behin, 8.3 eta 8.4 ataletan azaldutako oinarri teorikoa eredutzat hartu den laborategiko 3 zutabeko YNyn motako transformadore trifasikoari aplikatuko zaio. Honela, ezaugarri geometrikoetan oinarritutako modeloa osatu eta transformadoreak egoera ezberdinen aurrean duen erantzuna simulatu ahal izango da.

8.5.1. Sarrerako parametroak

Harilkatuak

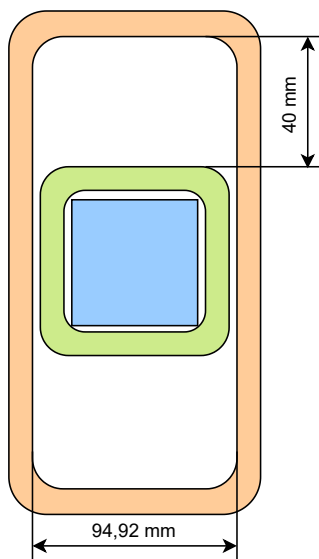
Bai goi-tentsioko harilkatuen, bai behe-tentsioko harilkatuen erresistentziak ekoizleak zehaztu ditu produktuaren *datasheetean* (ikusi II. Eranskina), eta 8.1 taulan laburbildu dira. Harilkatuei dagozkien inдукtantziak kalkulatzeko, aldiz, 8.14 ekuazioa aplikatu beharra dago, eta horretarako, harilkatuen geometria aztertu behar da.

8.1. taula: Harilkatuen erresistentzia balioak.

R_{priA}	318 m Ω	R_{sek-a}	190 m Ω
R_{priB}	321 m Ω	R_{sek-b}	192 m Ω
R_{priC}	322 m Ω	R_{sek-c}	192 m Ω

Aztergai den kasuan, bai harilkatu primarioaren, bai sekundarioaren lodiera 12,44 mm da, eta harilkatu sekundarioaren eta nukleo ferromagnetikoaren zutabearen artean dagoen distantzia isolatzaileari dagokio (10 μm). Beraz, zutabearen eta harilkatu sekundarioaren artean airerik ez dagoenez, magnetizazio-galerak mesprezagarriak direla eabazten da.

Zutabearen zeharkako sekzioaren bista 8.7 irudian adierazten da, eta 8.14 ekuazioan beharrezkoak diren parametroak eta ekuazioa aplikatu ondoren harilkatu artean lortzen diren inдукtantzien balioak 8.2 taulan laburbiltzen dira.



8.7. irudia: Harilkatuen antolaketa erakusten duen zeharkako azalera.

8.2. taula: Harilkatuen inдукtancia balioak.

$D_{sec} = 41,23 \text{ mm}$	$d_{sec} = 12,4 \text{ mm}$	$d_{z-sec} = 10 \mu\text{m}$	$L_{sek-a} = 0 \text{ mH}$	$L_{pri-sec-a} = 1,854 \text{ mH}$
$D_{pri-sec} = 67,45 \text{ mm}$	$d_{pri-sec} = 40 \text{ mm}$	$h_{eq} = 21 \text{ mm}$	$L_{sek-b} = 0 \text{ mH}$	$L_{pri-sec-b} = 1,854 \text{ mH}$
$D_{pri} = 93,67 \text{ mm}$	$d_{pri} = 12,4 \text{ mm}$	$N = 174 \text{ espira}$	$L_{sek-c} = 0 \text{ mH}$	$L_{pri-sec-c} = 1,854 \text{ mH}$

Bukatzeko, harilkatuen ihes-galerak kuantifikatzeko, zutabe ezberdinetako harilkatuen arteko aireari dagokion erreluktantzia kalkulatu beharra dago 8.2 ekuazioa jarraituz. Horretarako, kontuan hartuko den aire-bolumen inguratzailea zutabe biren kanpoko harilkatuen arteko aireari dagokiona izango da.

8.3. taula: Harilkatuen ihes-galeren inдукtancia balioak.

$A_{ihes} = 4.035,96 \text{ mm}^2$	$l_{ihes} = 280 \text{ mm}$	$\mu_r = 1$
$\mathcal{R}_{ihes} = 41,406 \text{ MH}^{-1}$	$N = 174 \text{ espira}$	$L_{ihes} = 0,731 \text{ mH}$

Nukleo ferromagnetikoa

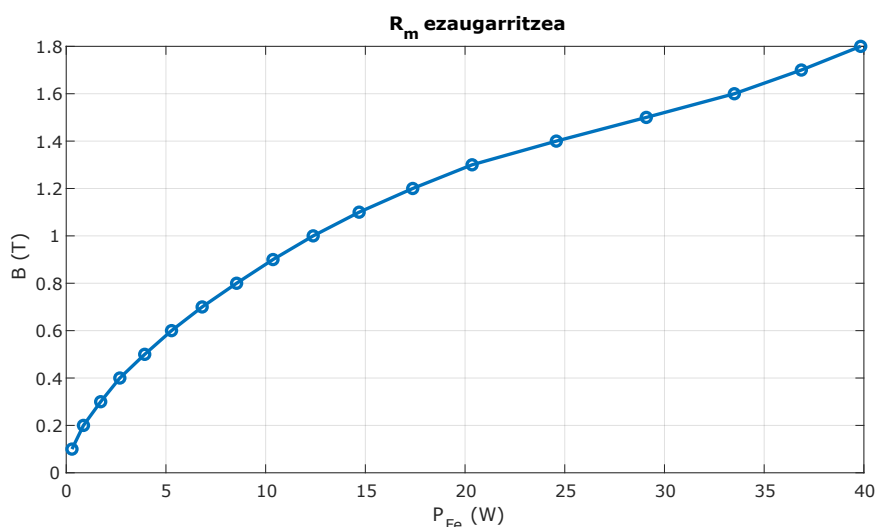
Aurretiaz zehaztu den bezala, nukleo ferromagnetikoa bi ataletan ezberdindu behar da: batetik, harilkatua duten zutabeetan; eta, bestetik, harilkaturik gabeko nukleo zati horizontaletan. Atal bakoitzaren saturazio ezaugarria inдукtancia aldakorraren bidez emulatuko da, eta burdin-galerak erresistentzia aldakorraren bidez. Horretarako, nukleoaren geometria eta materialaren ezaugarri magnetikoak ezagutu behar dira.

Aztergai den nukleo ferromagnetikoa M330-50A kalitatezko xaflez egina dago. Zeharkako azalera bai zutabeen, bai harilkaturik gabeko nukleoan, $70 \times 70 \text{ mm}^2$ -koa da, baina xafleen artean itsasgarria dagoenez, zeharkako azalera efektiboa definitu behar da. Horretarako, azalera erreala betegarri faktoreaz (F_r) biderkatzen da. Kalkuluak burutzeko datuak eta lortutako emaitzak 8.4 taulan laburbiltzen dira.

8.4. taula: Nukleo ferromagnetikoaren balio geometrikoak.

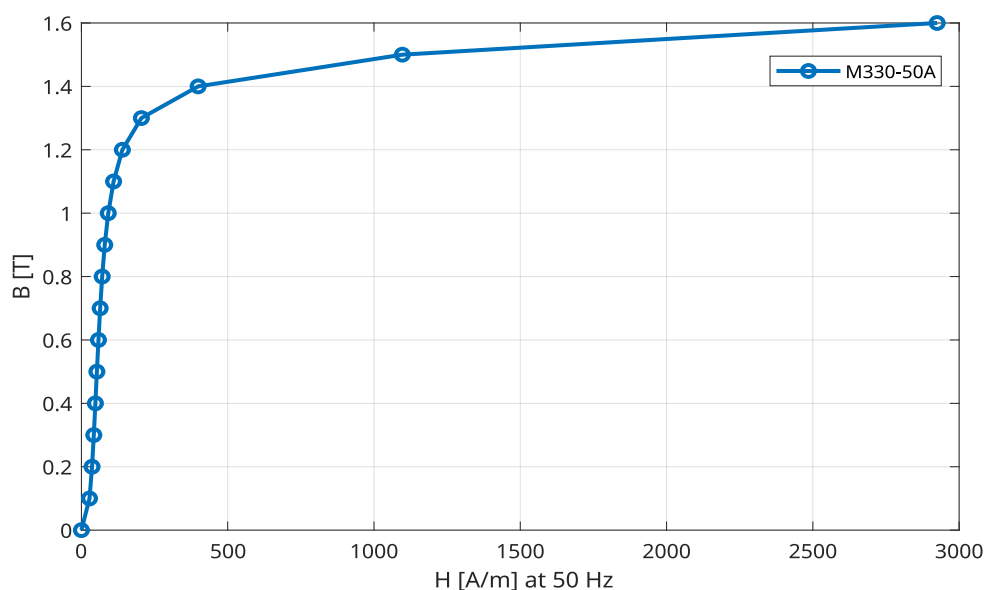
$F_r = 0,85 \text{ mm}$	$A_{zutabe} = 4.165 \text{ mm}^2$	$A_{nukleo} = 4.165 \text{ mm}^2$	$l_{zutabe} = 70 \text{ mm}$	$l_{nukleo} = 70 \text{ mm}$
-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	------------------------------

Nukleo ferromagnetikoan ematen diren burdin-galerak ere kuantifikatu behar dira. M330-50A xafla ferromagnetikoaren ekoizleak haren *datasheet*ean masa unitateko burdin-galerak adierazten ditu (ikusi II. Eranskina). Kasu honetan, laborategiko transformadorearen nukleoak duen masa totala 48 kg da (ikusi II. Eranskina), eta haren banaketa geometrikoa 3 zutabe eta 2 nukleo-zati horizontal berdinetan banatzen da. Ondorioz, atal ferromagnetiko bakoitzari dagokion burdin-galera ekoizleak emandako masa unitateko burdin-galeren eta masa totalaren bostenaren arteko biderkadura izango da (8.8 irudia).

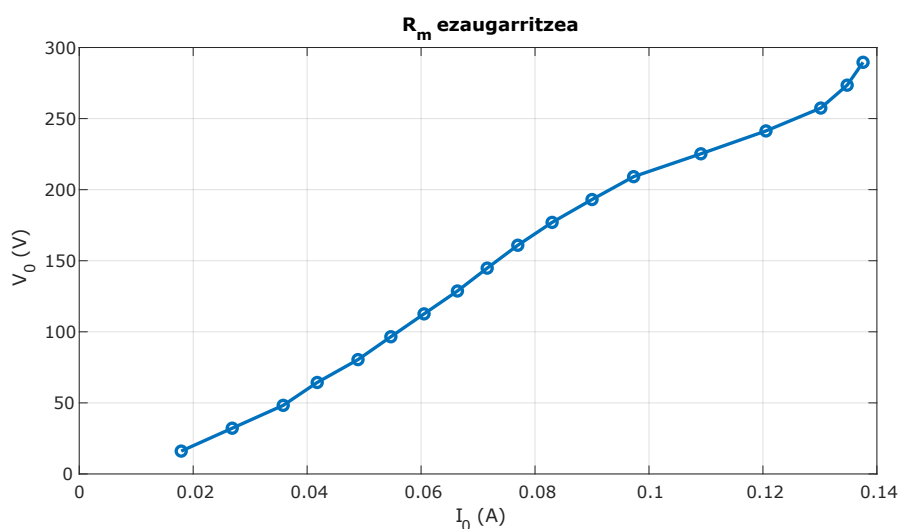


8.8. irudia: M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren B - P_{Fe} magnetizazio-galera kurba.

Hala ere, simulaziorako erabili den *MATLAB-Simulink software*ak implementatuta dituen erresistentzia aldakorrak tentsio-korronte kurbak ezaugarritzen dituenez, 8.3 atalean azaldutako prozedura jarraituta 8.11 irudiko tentsio-korronte ezaugarri kurba lortzen da bai zutabeko erresistentziarentzat, bai harilkaturik gabeko nukleoaren erresistentziarentzat.



8.10. irudia: M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren B-H magnetizazio kurba.

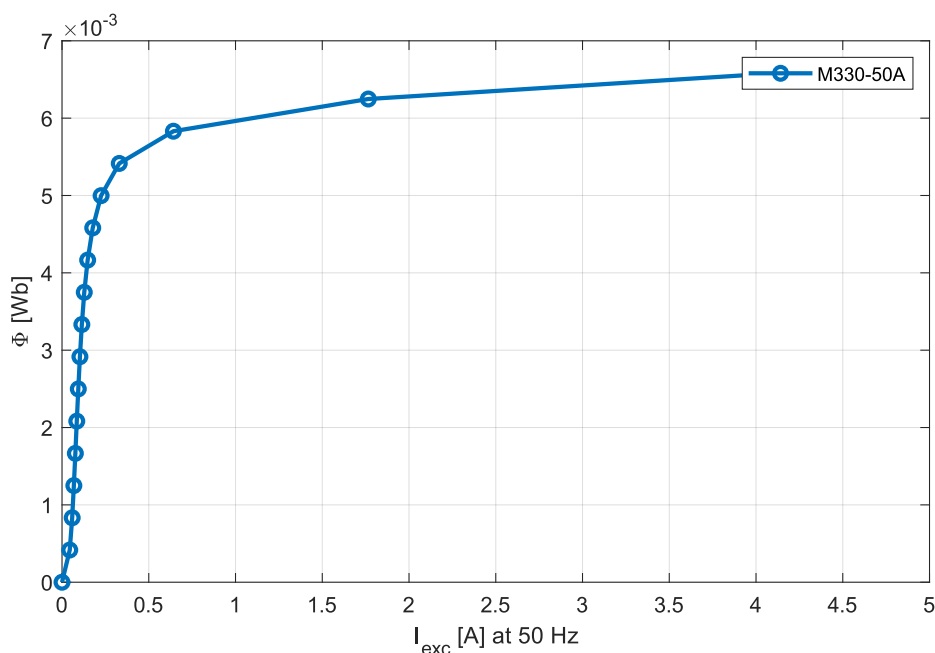


8.9. irudia: M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren V-I magnetizazio-galera kurba.

Era berean, nukleo ferromagnetikoaren osagaiei dagozkien inдукtantiak kalkulatzeko, lehenik eta behin material ferromagnetikoaren B-H magnetizazio kurba definitu beharra dago. M330-50A xaflari dagokion magnetizazio kurbaren datuak xaflaren ekoizleak ematen ditu *datasheet*ean (ikusi II. Eranskina), eta 8.10 irudian informazioa grafikoki adierazten da.

8.4.1 eta 8.4.2 ataletan azaldutako prozedura jarraituta, 8.11 irudian bai zutabeko inдукtanzia, bai harilkaturik gabeko nukleoaren inдукtanzia ezaugarritzen duen Φ -I kurba adierazten da. Inдукtanzia

hauei ezin zaie balio jakin bat esleitu, nukleo ferromagnetikoaren kitzikapen-baldintzen menpekoa baita. Horregatik, Φ -I kurban zehazten den portaera jarraituko du, kitzikapen-korrontearen araberako fluxu magnetikoa agertuz.



8.11. irudia: M330-50A kalitateko xafla ferromagnetikoaren Φ -I magnetizazio kurba.

Karkasa

Karkasa babes mekanikorako elementua da, makina elektrikoa osatzen duten osagaiak kanpoko agenteen eraginetik isolatzen ditu, baita inguruan egon daitezkeen pertsonen segurtasuna bermatu ere [2]. Behe-tentsioko transformadoreen karkasak, burdinazkoak izaten dira, eta hala da lan honetan aztergai den eredu zko transformadorearen kasuan ere.

Karkasak egiteko erabiltzen den txapa mota beroan ijeztutako altzairuzko xafla da, ijezketaren ondoren desugertze tratamendua jasotzen duena. Prozedura honen helburua produktuaren azaleko garbiketa lortzea da. Horrela, oxidoa, ezpurutasunak eta orbanak ezabatzea lortzen da, gainazal-itxura eta akabera hobetuz. Gainera, xafla-mota horiek malgutasun eta harikortasun propietate onak dituzte. Xafla desugertuaren aplikazio nagusiak mekanikaren industrian, gailu industrialetan eta ekipo elektronikoen babesak dira, besteak beste. Era berean, desugertze prozesuari esker, metala oxidazioaren kontra babesteko aplikatzen den epoxi margoa hobeto aplikatzen da.

Dena dela, nahiz eta xafla metalikoek ijezketa eta desugertze prozesu jakin bat jarraitu, metalaren aleazioaren osagaien arabera UNE-EN 10111 arauak xaflak sailkatzen ditu. Orokorrean transformadoreen karkasak egiteko erabili ohi den xaflak DD11 izendapena hartzen du, eta honek burdinaz aparteko osagaien ehunekoak 8.5 taulan adierazten diren balioetara mugatuta ditu. Halaber, xaflaren desugertze prozesuan ez da beharrezkoa ugerra erabat kentzea, UNE-EN 10111 arauan desoxidazio prozesuaren emaitza ekoizlearen irizpidearen araberakoa izan dadila ezartzen baita.

8.5. taula: DD11 xafla motaren konposizioa.

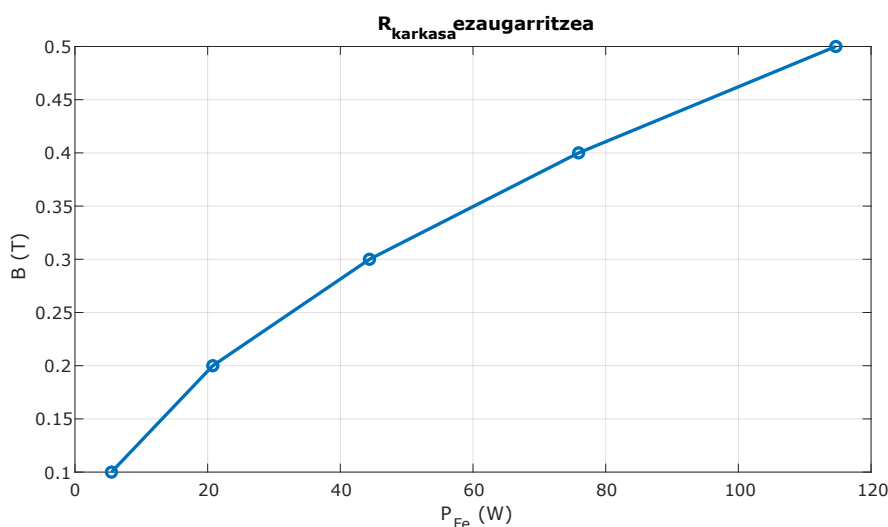
C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
≤ 0,12	≤ 0,60	≤ 0,045	≤ 0,045

Hala ere, erreferentziatzen hartzen den arauaren arabera, konposizio jakin bat duen burdinazko xaflak izendapen bat baino gehiago jasotzen ditu. Honela DD11 burdinazko xaflari dagokion beste izendapen baliokidea AISI-SEA 1010 steel liteke, izenean bertan adierazten duen AISI arauaren [18] arabera. Gainera, karkasa bezala beste burdinazko xafla batzuk ere erabil daitezke, betiere karbono-kantitatea %0,2 baino txikiagoa denean. Hortaz, AISI-SEA 1008 eta AISI-SEA 1020 burdinazko xaflak ere baliagarriak izan daitezke karkasaren funtzionalitatea betetzeko.

Karkasaren dimentsioei dagokienez, haren neurri nagusiak 8.1 irudian adierazten dira, eta xaflaren lodiera 1,5 mm-koa da. Karkasaren erresistentzia eta inductantzia baliokideak ezaugarritzerako orduan zeharkako azalera bezala fluxuak egiten duen bidearen elkartzuta hartu da. Hots, fluxuak beti zeharkatuko du karkasa xaflaren lodiera zeharkatuz, eta ibilbide hori 8.2 irudian adierazi izan da.

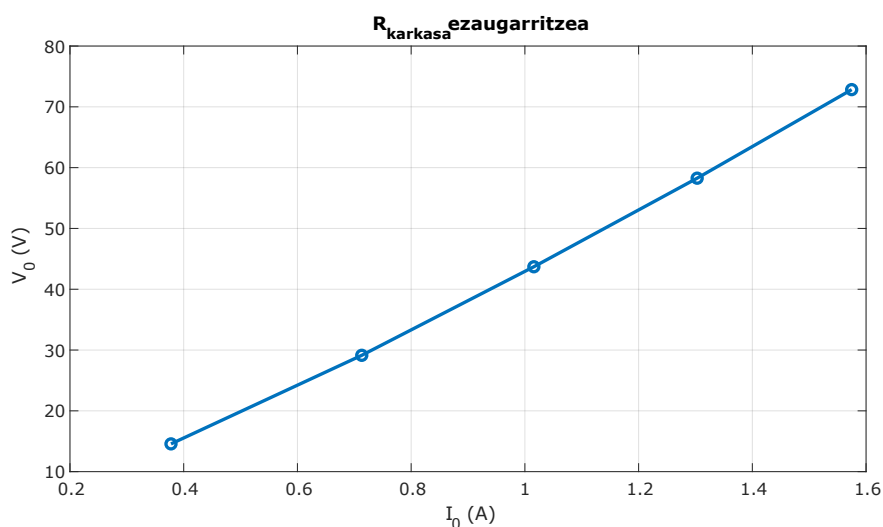
Karkasaren hutseko erresistentzia eta inductantzia ezaugarritzeko, burdinazko xaflan ematen diren burdin-galerak eta saturazio ezaugarria kuantifikatu behar dira. Karbono kantitate txikiko ekoizleek ez dute informazio hau eskaintzen, xafla mota hauek ez baitira material ferromagnetiko bezala erabiltzeko egokiak, eta *datasheeten* helburua ezaugarri mekanikoak definitzea da. Ondorioz, kasu esperimentaletan oinarritutako artikuluetako informazioa hartu da oinarritzat.

Burdinazko galerei dagokienez, A. N. Hussain-en artikuluan [19] AISI-SEA 1020 motako karbono kantitate baxuko burdinazko xaflaren masa unitateko burdin-galerak adierazten dira. Kasu honetan, laborategiko transformadorearen karkasak duen masa totala 14,63 kg da. Ondorioz, karkasari dagokion burdin-galera esperimentazio bidez zehaztutako [19] masa unitateko burdin-galeren eta masa totalaren arteko biderkadura izango da (8.12 irudia).



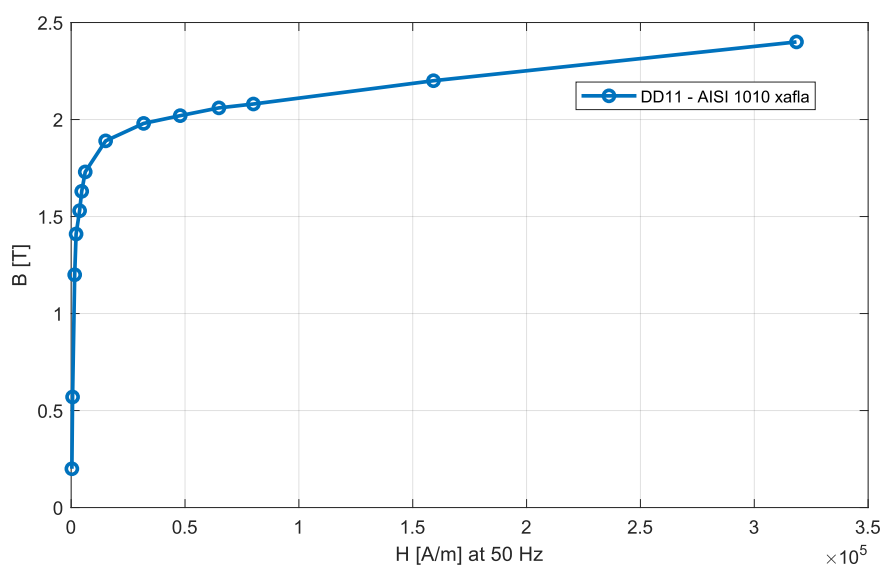
8.12. irudia: AISI-SEA 1020 burdinazko xaflaren B - P_{Fe} magnetizazio-galera kurba.

Hala ere, simulaziorako erabili den *MATLAB-Simulink software*aren erresistentzia aldakorrak tentsio-korronte kurbak ezaugarritzen dituenenez, 8.3 atalean azaldutako prozedura jarraituta 8.15 irudiko tentsio-korronte ezaugarri kurba kalkulatu da bai zutabeko erresistentziarentzat, bai harilkaturik gabeko nukleoaren erresistentziarentzat.



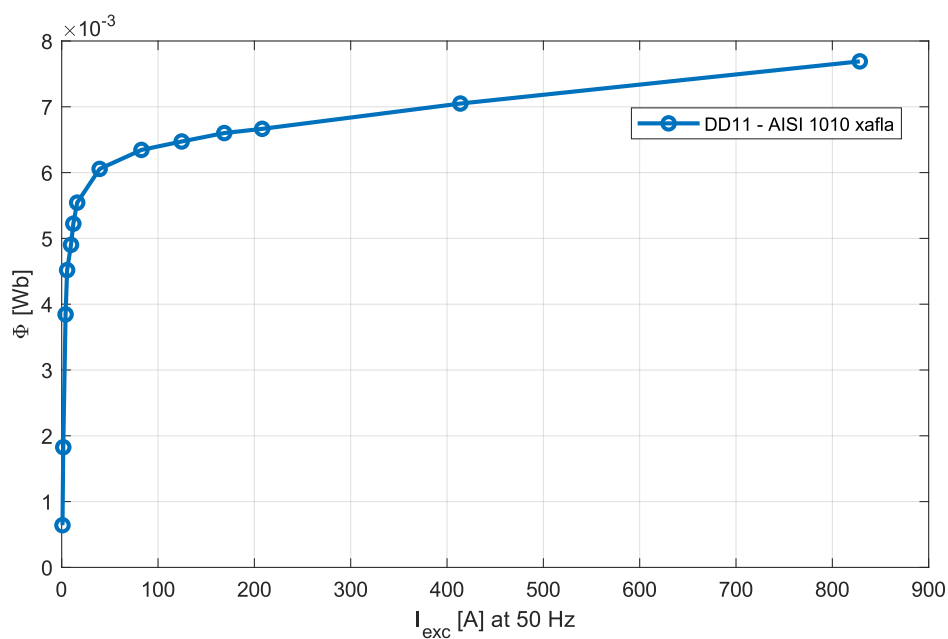
8.13. irudia: AISI-SEA 1020 burdinazko xaflaren V - I magnetizazio-galera kurba.

Karkasari dagozkion induktantzia kalkulatzeko, aldiz, materialaren B - H magnetizazio-kurba definitu beharra dago. AISI-SEA 1010 xaflari dagokion magnetizazio-kurbaren datuak *S. Maximov*-en artikuluan [20] esperimentazioz definitu izan dira, eta 8.14 irudian informazioa grafikoki adierazten da.



8.14. irudia: AISI-SEA 1010 burdinazko xaflaren B-H magnetizazio kurba.

8.4.3 atalean azaldutako prozedura jarraituta, 8.15 irudian karkasari dagokion inдукtantzia ezaugarritzen duen Φ -I kurba adierazten da. Induktantzia hauei ezin zaie balio jakin bat esleitu, nukleo ferromagnetikoaren kitzikapen-baldintzen menpekoa baita. Horregatik, Φ -I kurban zehazten den portaera jarraituko du, kitzikapen-korrontearen arabeko fluxu magnetikoa agertuz.



8.15. irudia: AISI-SEA 1010 burdinazko xaflaren Φ -I magnetizazio kurba.

Karkasak transformadorean duen eragina definitzen bukatzeko, funtsekoa da hozgarriak suposatzen duen inductantzia definitzea. Aztergai den transformadorearen kasuan hozgarria airea da, eta haren bolu-
mena transformadorearen osagai aktiboen (nukleo ferromagnetikoa eta goi- zein behe-tentsioko harilka-
tuak) eta karkasaren artekoa da. Honela, 8.4.4 ataleko prozedura aplikatua egindako kalkuluak 8.6 taulan
laburbiltzen dira.

8.6. taula: Hozgarriaren inductantzia balioak.

$A_{aire} = 0,186 \text{ m}^2$	$l_{aire} = 150 \text{ mm}$	$\mu_r = 1$
$\mathcal{R}_{aire} = 641,65 \text{ kH}^{-1}$	$N = 174 \text{ espira}$	$L_{aire} = 47,18 \text{ mH}$

Sarrerako parametro guztien laburpena

Behin zirkuitu elektriko elementu guztien kalkulua laborategiko transformadorearen analisisian oi-
narrituta burutu ostean, simulaizoak gauzatzeko erabiliko diren balioen laburpena 8.7 taulan ikus daiteke.
Nukleo ferromagnetikoari eta karkasari dagozkien erresistentzia eta inductantzia balioak 8.9, 8.11, 8.13 eta
8.15 irudietan ezaugarritu dira.

8.7. taula: Sarrerako parametroen balioak.

$U_{Nprim}/U_{Nsec} = 400\text{V}/400\text{V}$	$S_N = 10 \text{ kVA}$	$L_{ihes} = 0,731 \text{ mH}$	$L_{aire} = 47,18 \text{ mH}$
$R_{priA} = 318 \text{ m}\Omega$	$R_{sek-a} = 190 \text{ m}\Omega$	$L_{pri-sek-a} = 1,854 \text{ mH}$	$L_{sek-a} = 0 \text{ mH}$
$R_{priB} = 321 \text{ m}\Omega$	$R_{sek-b} = 192 \text{ m}\Omega$	$L_{pri-sek-b} = 1,854 \text{ mH}$	$L_{sek-b} = 0 \text{ mH}$
$R_{priC} = 322 \text{ m}\Omega$	$R_{sek-c} = 192 \text{ m}\Omega$	$L_{pri-sek-c} = 1,854 \text{ mH}$	$L_{sek-c} = 0 \text{ mH}$

8.5.2. Garatutako simulazioen emaitzak

MAL honetan aurkezten den proposamenaren zuzentasuna frogatzeko, potentzia-transformadorei
haien ezaugarri nagusiak definitzeko egiten zaizkien entseguak *MATLAB-Simulink*-en inplementatutako
modeloari aplikatu zaizkio. Izan ere, entsegu hauen bidez transformadorearen zirkuitu baliokidea eza-
garritzen duten parametroak definitzen dira.

Oro har, egiten diren saiakuntzak zirkuitulaburrekoa eta hutsekoa izaten dira. Hala ere, transforma-
doreak tentsio egoera desorekatuen aurrean duen portaera emulatzeko parametroak definitu ahal izateko
homopolarreko saiakuntza ere gauzatu beharra dago.

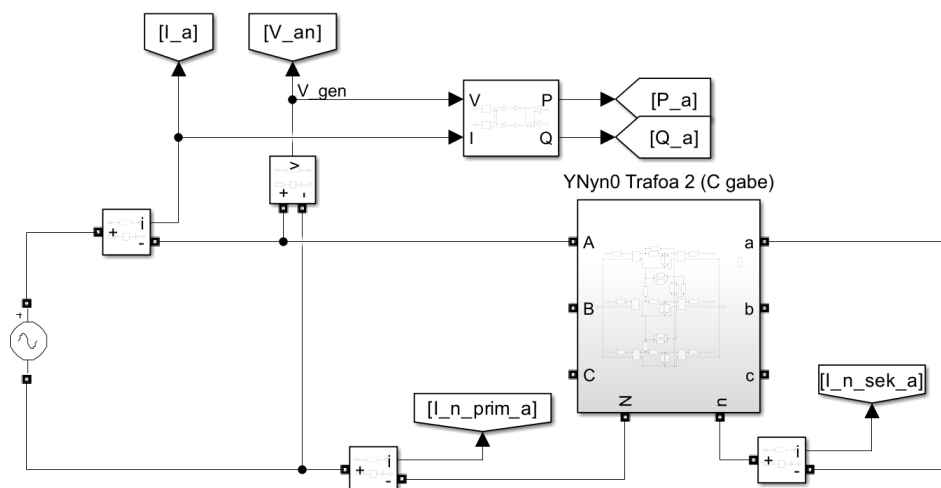
Zirkuitulaburreko saiakuntza

Zirkuitulaburreko saiakuntzaren bidez zirkuitu elektrikoan harilkatuekin erlazionatutako parametroak definitzen dira, hots, goi- zein behe-tentsioko harilkatuen erresistentziak eta haien arteko induktantzia. Saiakuntzak egiten zaizkion transformadorea trifasikoa denean, normalean zirkuitu monofasiko baliokidea ezaugarritu nahi denez, transformadorearen elikadura trifasiko orekatua izaten da, betiere korrontearen balio izendatua edo txikiagoa elikatuz [2].

Hala ere, kasu honetan transformadorearen zirkuitu elektriko trifasikoa da, ez da haren modelo monofasikoa erabiltzen. Beraz, fase ezberdinen elikaduraren aurrean transformadoreak duen erantzuna aztertzeko funtsezkoa da zirkuitulaburreko saiakuntza fase bakoitza bere kabuz elikatutako eta fase bera zirkuitulaburtutako simulazioak garatzea. Honela, hiru konexio ezberdinen arabera simulazioak gauzatuko dira:

- **Zirkuitulaburreko saiakuntza A fasean:** Transformadorearen primarioaren A fasea tentsio sinplearekin elikatuko da, eta sekundarioko A fasea sekundarioko neutroarekin zirkuitulaburtuko da. Neurritzen diren tentsio, korronte eta potentziaren balioekin A harilkatuko erresistentziak (R_{prim-A} eta R_{sek-a}) eta induktantziak ($L_{prim-sek-a}$) definitzen dira.
- **Zirkuitulaburreko saiakuntza B fasean:** Transformadorearen primarioaren B fasea tentsio sinplearekin elikatuko da, eta sekundarioko B fasea sekundarioko neutroarekin zirkuitulaburtuko da. Neurritzen diren tentsio, korronte eta potentziaren balioekin B harilkatuko erresistentziak (R_{prim-B} eta R_{sek-b}) eta induktantziak ($L_{prim-sek-b}$) definitzen dira.
- **Zirkuitulaburreko saiakuntza C fasean:** Transformadorearen primarioaren C fasea tentsio sinplearekin elikatuko da, eta sekundarioko C fasea sekundarioko neutroarekin zirkuitulaburtuko da. Neurritzen diren tentsio, korronte eta potentziaren balioekin C harilkatuko erresistentziak (R_{prim-C} eta R_{sek-c}) eta induktantziak ($L_{prim-sek-c}$) definitzen dira.

Hiru konfigurazio hauek *MATLAB-Simulink*en osatu dira (ikusi 8.16 irudia) eta korronte izendatuaren azpitiko balioetan simulatu da. Hiru faseetan garatutako simulazioen emaitzak 8.8 taulan adierazten dira.



8.16. irudia: A faseko zirkuitulaburreko saiakuntzaren simulazio-eskema.

8.8. taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren simulazio-emaitzak.

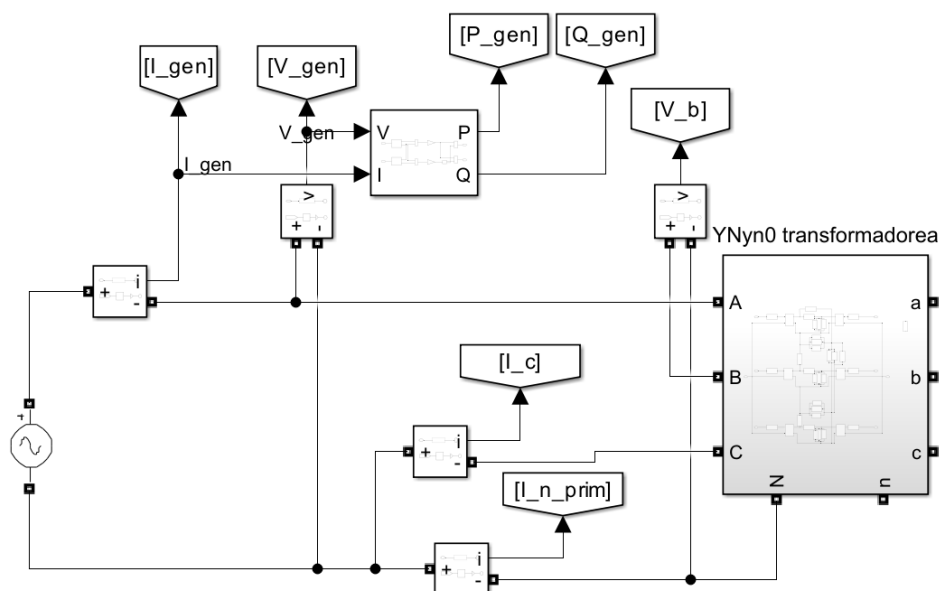
Elikatutako fasea	V_{an} (V)	I_a (A)	P_a (W)
A	3,04	2,818	7,212
	5,8804	5,451	26,44
	8,7244	8,088	58,2
	12,5023	11,590	122
	12,9599	12,010	131,1
B	3,0553	2,821	7,268
	5,9642	5,507	27,69
	8,8047	8,130	60,35
	11,5984	10,710	104,7
	13,0333	12,030	132,2
C	3,5093	3,238	9,584
	6,126	5,652	29,21
	8,8615	8,176	61,11
	11,61	10,710	104,9
	13,0393	12,030	132,3

Hutseko saiakuntza

Hutseko saiakuntzaren bidez zirkuitu elektrikoan nukleo ferromagnetikoarekin erlazionatutako parametroak definitzen dira, hots, zutabeetako zein harilkaturik gabeko nukleo zati horizontaletan portaera magnetikoa emulatzeko erresistentziak eta inдукtantiak. Transformadorearen sekundarioa hutsean egongo da, eta primarioan tentsio izendatua edo txikiagoa elikatzen da [2].

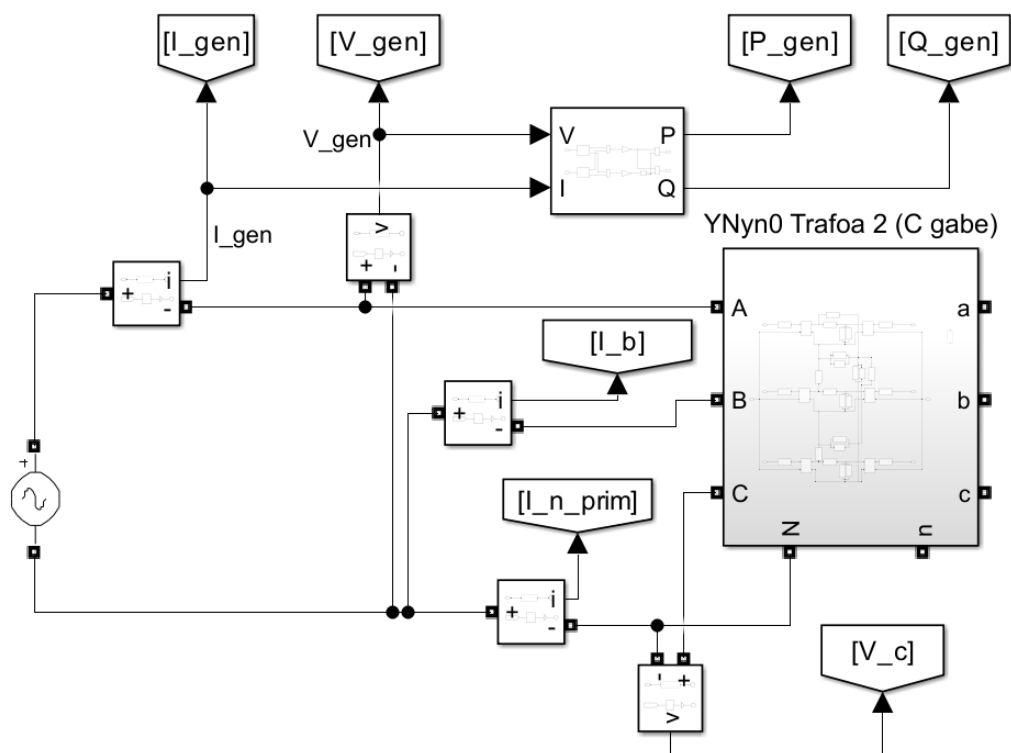
Oraingoan ere, aurreko kasuan bezala, kontuan hartzen den zirkuitu elektrikoa monofasiko baliokidea beharrezan trifasikoa denez, ez dira hiru faseak aldi berean orekatuta elikatuko. Lehenik eta behin zutabeko erresistentzia (R_{zutabe}) eta induktantzia (L_{zutabe}) ezaugarritzeko saiakuntza burutuko da, eta behin zutabeko nukleo ferromagnetikoaren jokoera aztertuta, harilkaturik gabeko nukleo zati horizontalen erresistentzia (R_{nukleo}) eta induktantzia (L_{nukleo}) definitu ahal izango dira.

Zutabeari dagozkien parametroak ezaugarritzeko transformadorearen primarioa A fasean elikatuko da eta primarioko C fasea primarioko neutroarekin zirkuitulaburtuko da. Saiakuntza honekin primarioko B faseko tentsio sinplea, zirkuitulaburtutako C faseko korronea eta bi seinale horien arabera kontsumitutako potentzia neurtzean, zutabeko parametroak definitu ahal izango lirateke. Saiakuntza honi dagokion simulazio-eskema 8.17 irudian behatzen da.



8.17. irudia: Hutseko saiakuntzarekin zutabeko parametroak ezaugarritzeko simulazio-eskema.

Ondoren, harilkaturik gabeko nukleo zati horizontal zatia ezaugarritzeko saiakuntzan transformadorearen primarioa A fasean elikatuko da eta primarioko B fasea primarioko neutroarekin zirkuitulaburtuko da. Saiakuntza honekin primarioko C faseko tentsio sinplea, zirkuitulaburtutako B faseko korronea eta bi seinale horien arabera kontsumitutako potentzia neurtzean, aipatutako parametroak definitu ahal izango lirateke. Saiakuntza honi dagokion simulazio eskema 8.18 irudian behatzen da.

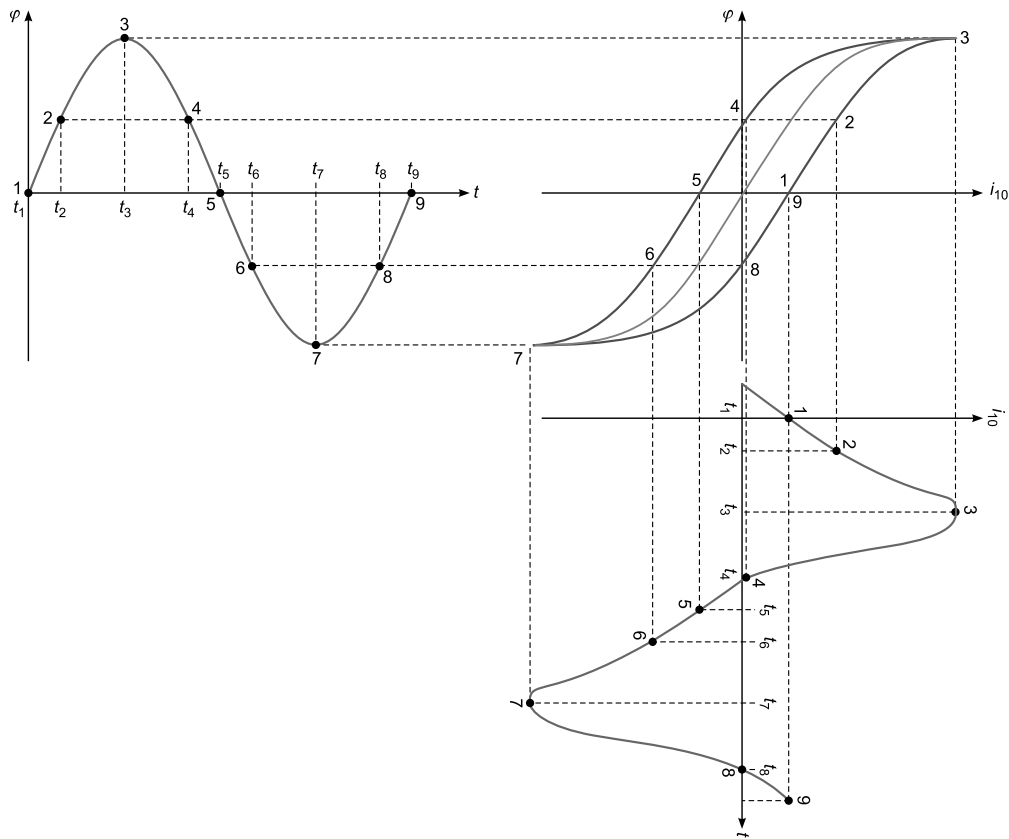


8.18. irudia: Hutseko saiakuntzarekin nukleoko zati horizontalaren parametroak ezaugarritzeko simulazio-eskema.

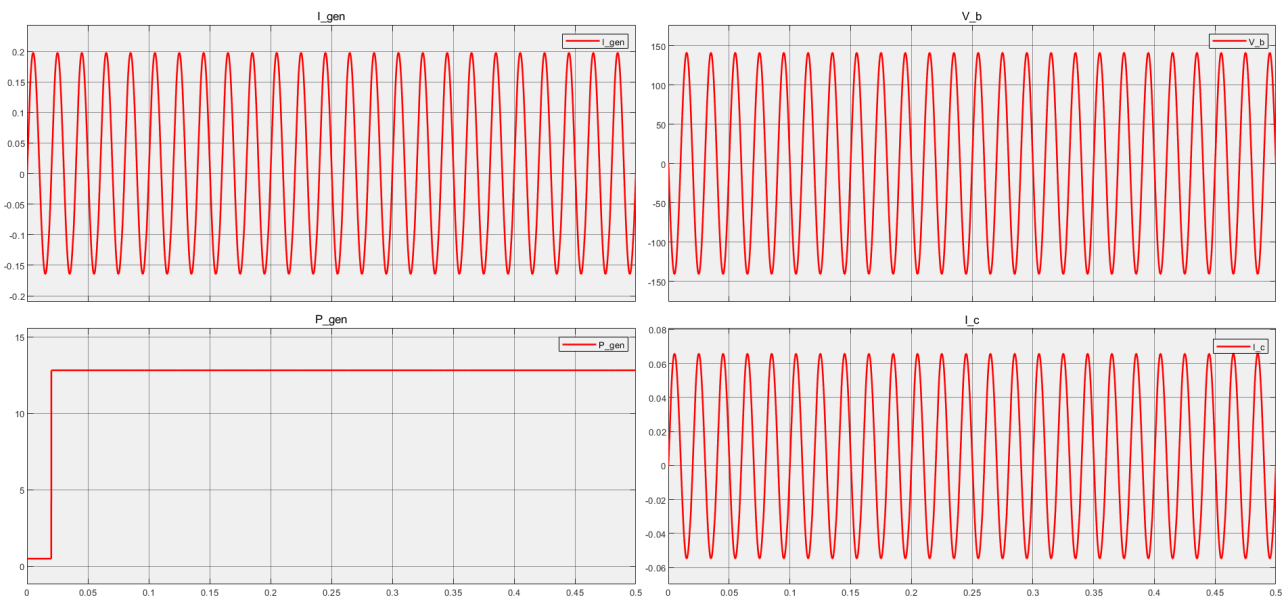
Dena dela, funtsezkoa da ondorengo fenomenoaz ohartaraztea: nukleo ferromagnetikoaren portaera kitzikapenaren arabera denez, erresistentzia eta induktantzien balioek portaera magnetikoa emulatzen dute, baina baliokidetasun bat baino ez da. Beraz, errealitatean espero diren korrante uhinak ez dira sinusoidalak izango (ikusi 8.19 irudia) [2].

MATLAB-Simulink bidez implementatu den zirkuitu elektrikoa *Simscape Electrical-Specialized Power Systems toolbox* eskaintzen dituen elementuekin osatu da. Ondorioz, sistemak duen portaera guztiz elektrikoa izango da. Hau da, osagaiak duten erantzuna fenomeno elektrikoaren aurrekoa baino ez da izango, transformadorea bezalako gailu elektrikoan gertatzen diren fenomeno magnetikoak kontuan hartu gabe.

Hau horrela izanik, *MATLAB-Simulink* en transformadorearen primarioan tentsio sinusoidalak elikatu eta sekundarioa hutsean izanda, magnetizazio adarretik doan korrante uhina guztiz sinusoidalak izango da (ikusi 8.20). Hortaz, nahiz eta *MATLAB-Simulink* en hutseko saiakuntza burutu, emaitzak ezin dira inondik inora ere zuzentzat jo, eta saiakuntza honen simulazioa alde batera uztea ebatzi da.



8.19. irudia: Hutseko saiakuntzan ematen diren korrante uhin errealak [2].

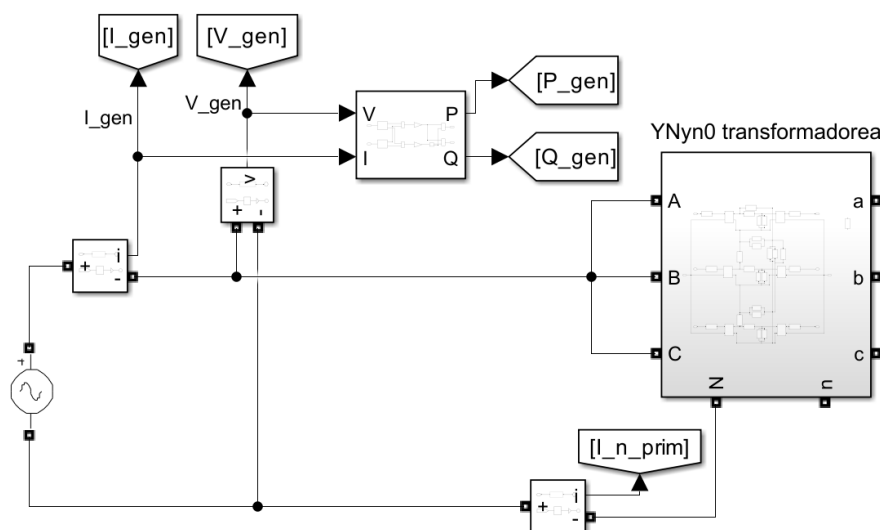


8.20. irudia: Hutseko saiakuntzaren simulazio emaitzak elikadura $V = 100$ V izanik.

Homopolarreko saiakuntza

Homopolarreko saiakuntza ez da transformadore trifasikoei normalean egiten zaien saiakuntza, oro har erregimen orekatuan lan egiteko diseinatuak baitaude eta ez baita egoera desorekatuekin jarduterik espero. Hala ere, kasu honetan aztergai den transformadorea YNyn motakoa denez, 5.2.1 atalean azaldu den moduan, funtsezkoa da transformadorearen inpedantzia homopolarra ezaugarritzea.

Horretarako, transformadorearen primarioko hiru faseak aldi berean tentsio iturri bakarraz elikatuko dira. Honela, hiru faseetan agertuko den tentsioa modulu eta fasean berdina izango da, elikadura bere osotasunean homopolarra izanik. Aztergai den transformadorearen nukleoa hiru zutabekoa denez, inpedantzia homopolarra karkasak eta hozgarriak osatuko dute, eta elikadura erabat homopolarra izanik saiakuntzan zehar transformadorearen sekundarioa hutsean mantenduta, elikatzen den potentzia guztia inpedantzia homopolarretik bideratuko da (ikusi 8.21).



8.21. irudia: Homopolarreko saiakuntzaren simulazio-eskema elektrikoa.

Aipatutako konfigurazioa (8.21 irudia) jarraituta eta saiakuntzako sarrerako parametroak neurtuta, inpedantzia homopolarra ezaugarritzeko aldagaiak definitzen dira. Kasu honetan neurtu beharrekoak sarrerako tentsio sinplea, elikatutako korronea eta potentzia aktiboa dira (8.9 taula). Hala ere, inpedantzia homopolarrak ikusiko duen tentsioa elikaduran dagoenaren hirukoitza dela azpimarratu behar da ikuspuntu elektrikitik hiru faseetako tentsio iturriak seriean daudelako, eta korronea herena dela hiru faseen artean banatzen delako.

8.9. taula: Homopolarreko saiakuntzaren simulazio emaitzak.

V_{gen} (V)	I_{gen} (A)	P_{gen} (W)
1,09	0,65	0,3
2,05	1,23	1,0
3,03	1,81	2,3
4,01	2,40	4,0
5,01	3,00	6,4
6,97	4,18	12,0
8,94	5,36	19,8
10,87	6,52	29,3
12,83	7,69	40,8
14,78	8,86	54,1
22,00	13,20	121,8
35,00	20,99	308,1
50,00	29,98	628,4
55,00	32,98	760,3
60,00	35,97	904,8
65,00	38,97	1.062,0
70,00	41,97	1.231,0
75,00	44,96	1.413,0
80,00	47,96	1.608,0
85,00	50,96	1.815,0
90,00	53,95	2.035,0

8.6. Emaitza esperimentalak

Atal honetan, 8.5.2 atalean lortutako simulazio emaitzak balioztatzeko egindako saiakuntza esperimentalen emaitzak aurkezten dira. Saiakuntza hauek BIEko APERTen laborategian dagoen transformadoreari egin zaizkio, hots, lan osoan zer eredutzat hartu den transformadoreari. Horretarako erabili den ekipamendua ondorengoa izan da:

- **Elikadura:** *CINERGIA GE&EL +15 vAC/DC.*
- **Transformadorea:** *TecnoTrafo 10 kVA 400/400 V - YNyn.*
- **Konexioak:** 4 mm²-ko sekzioa duten kobrezko kableak.
- **Neurketak:** voltmetroak, anperometroak eta osziloskopioa.
- **Kargak:** 18 Ω eta 4,5 kW-ko hiru karga.

Zirkuitulaburreko saiakuntza

Simulazioen eta emaitza esperimentalen arteko konparaketa ahalik eta zehatzena izan dadin, saiakuntzak eta simulazioak tentsio berdina elikatuz burutu dira. Zirkuitulaburreko saiakuntza esperimentaletan lortutako emaitzak eta simulazio emaitzek hauekiko dituzten erroreak 8.10 taulan adierazten dira.

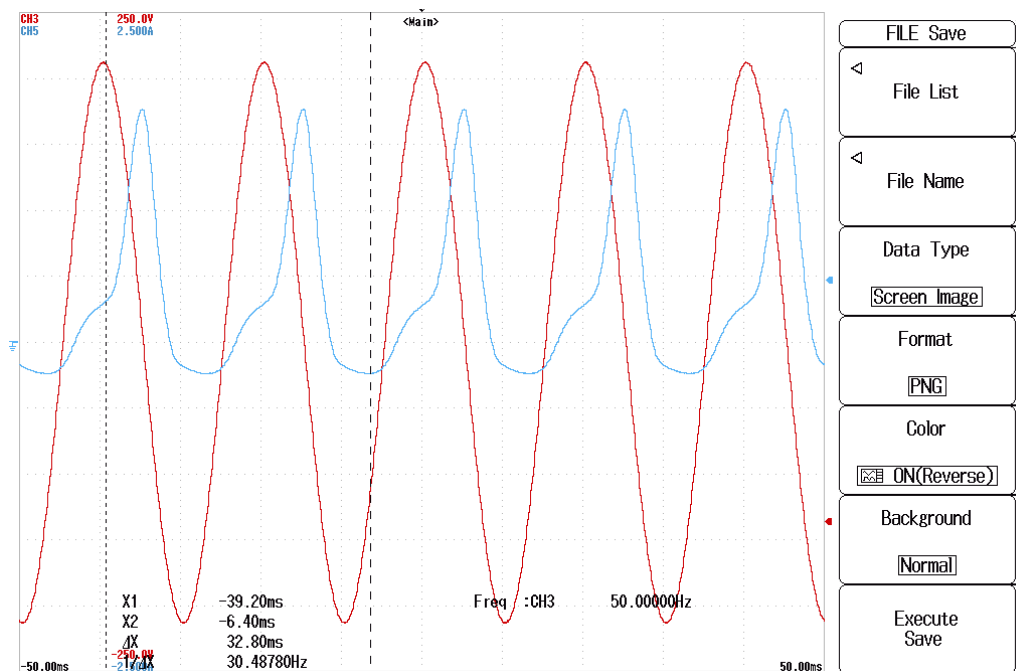
8.10. taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren emaitza esperimentalak eta simulazio emaitzen erroreak.

Elikatutako fasea	Neurketa esperimentalak			Errorea	
	V_{an} (V)	I_a (A)	P_a (W)	I_a (%)	P_a (%)
A	3,04	3,07	6,41	8,35	12,57
	5,88	6,14	22,60	11,28	16,99
	8,72	9,12	52,63	11,36	10,58
	12,50	13,15	110,63	11,84	10,27
	12,96	13,65	117,01	12,04	12,04
B	3,06	2,74	5,66	2,78	28,36
	5,96	5,44	23,30	1,18	18,82
	8,80	9,26	57,62	12,19	4,74
	11,60	12,38	94,98	13,48	10,24
	13,03	13,95	122,36	13,77	8,04
C	3,51	3,23	8,18	0,11	17,21
	6,13	6,47	28,48	12,66	2,57
	8,86	9,53	55,85	14,21	9,42
	11,61	12,65	98,95	15,35	6,01
	13,04	14,31	123,39	15,91	7,22

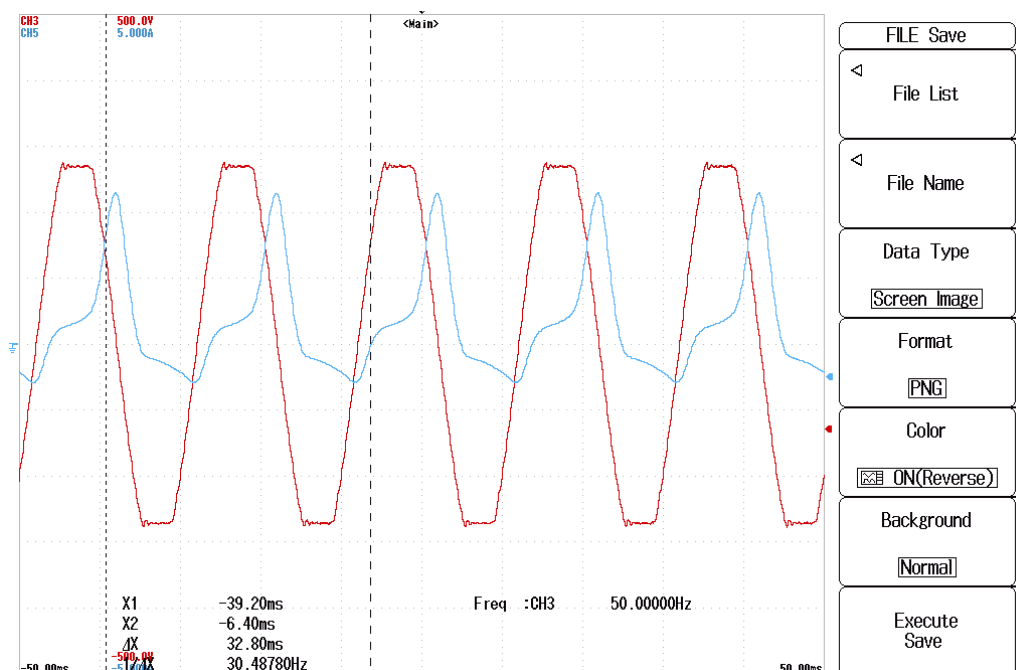
Hutseko saiakuntza

8.5.2 ataleko "Hutseko saiakuntza" azpiatalean aitatu den fenomenoaren arabera, saiakuntza esperimentaletan behatzen diren korrante-seinaleek ez dute itxura sinusoidalik izango. Ondorioz, garrantzitsua da neurketak osziloskopioarekin egitea. Honela, emaitzak interpretatzerakoan uhinen magnitudea aztertzeaz gain, haien forma ere kontuan hartuko da, saturazioaren efektua ezaugarritzeko ezinbestekoa.

Saiakuntzak tentsio izendatuan eta balio txikiagoekin egin dira. Osziloskopioaren bidez saturazioaren efektua agerikoa izan da tentsio izendatura hurbiltzerakoan. Horren adibide bezala, elikadura 150 V denean (8.22 irudia) tentsioari dagokion seinale gorria saturaziorik gabe ikusten da, eta korronteari dagokion seinale urdinaren itxura ez da sinusoidala. Elikadura tentsioa izendatua (230 V) denean (8.23 irudia), aldiz, agerikoa da tentsio-seinale gorriak saturazioaren efektua duela, ez baita guztiz sinusoidala, eta korrante-seinale urdinak oraingoan ere ez du itxura sinusoidalik.

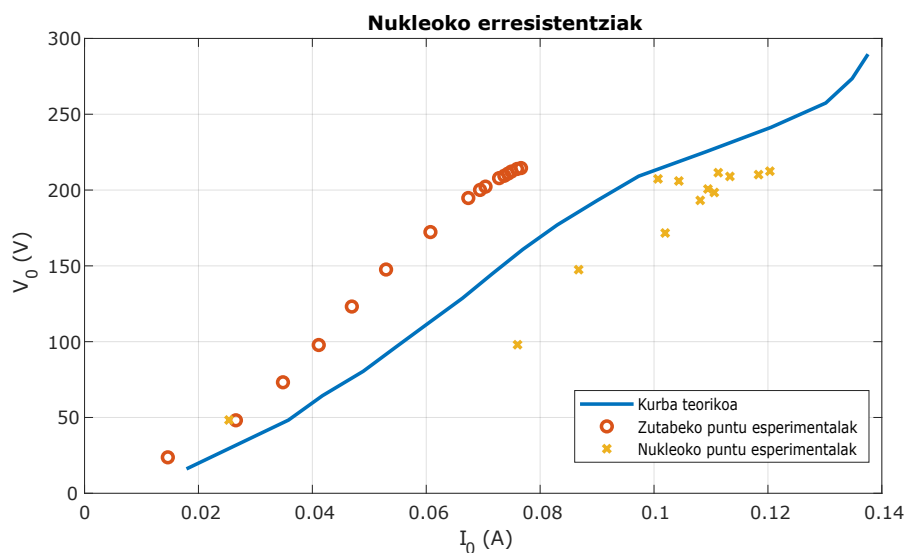


8.22. irudia: Hutseko saiakuntzaren bidez zutabeko parametroak ezaugarritzeko seinaleak osziloskopioan A faseko elikadura $V_{an} = 150$ V denean. B faseko tentsioa gorritz eta C faseko korrontea urdinez.

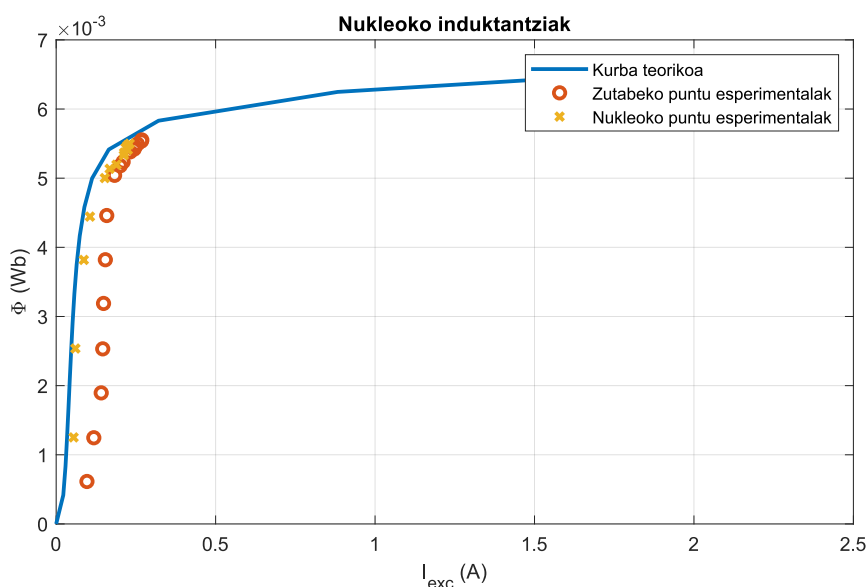


8.23. irudia: Hutseko saiakuntzaren bidez zutabeko parametroak ezaugarritzeko seinaleak osziloskopioan A faseko elikadura $V_{an} = 230$ V denean. B faseko tentsioa gorritz eta C faseko korrontea urdinez.

8.17 eta 8.18 irudietako eskemak jarraituta egindako saiakuntzetatik abiatuta nukleo ferromagnetikoa ezaugarritzen duten erresistentzia eta induktantziaren balioak kalkula daitezke. Lortutako emaitza esperimentalak teorikoki planteatutako kurbekin batera irudikatu dira konparaketa gauzatu ahal izateko (8.24 eta 8.25 irudiak).



8.24. irudia: Hutseko saiakuntzen bidez ezaugarritutako nukleo ferromagnetikoaren erresistentzia balio-kide teoriko eta esperimentalen arteko konparaketa.



8.25. irudia: Hutseko saiakuntzen bidez ezaugarritutako nukleo ferromagnetikoaren induktantzia balio-kide teoriko eta esperimentalen arteko konparaketa.

Homopolarreko saiakuntza

Zirkuitulaburreko saiakuntzan bezala, homopolarreko saiakuntzan ere simulazioen eta emaitza esperimentalen arteko konparaketa ahalik eta zehatzena izateko saiakuntzak eta simulazioak elikadurako tentsio berdina elikatuz burutu dira. Homopolarreko saiakuntza esperimentaletan lortutako emaitzak eta simulazio emaitzek hauekiko dituzten erroreak 8.11 taulan adierazten dira.

8.11. taula: Homopolarreko saiakuntzaren emaitza esperimentalak eta simulazio emaitzen erroreak.

Neurketa esperimentalak			Errorea	
V_{an} (V)	I_a (A)	P_a (W)	I_a (%)	P_a (%)
1,09	0,75	0,43	12,70	31,00
2,05	1,41	1,52	13,16	31,36
3,03	1,99	2,90	8,82	21,81
4,01	2,51	4,57	4,30	12,94
5,01	3,01	7,06	0,18	9,81
6,97	3,96	14,07	5,43	14,44
8,94	4,92	20,57	9,00	3,79
10,87	5,86	28,91	11,26	1,23
12,83	6,82	38,51	12,80	5,88
14,78	7,81	52,39	13,53	3,26
21,87	11,78	127,57	12,09	4,52
34,73	19,91	370,45	5,44	16,83
49,55	30,66	834,23	2,23	63,52
54,46	34,35	1051,67	4,00	27,71
59,47	38,04	1271,62	5,44	28,85
64,38	41,75	1475,57	6,65	28,03
69,36	45,23	1722,49	7,22	28,53

Emaitzen interpretazioa

Simulazio emaitzak, emaitza esperimentalak eta haien arteko erroreak kalkulatu, proposamenaren baliagarritasuna aztertuko da. Emaitzen zehaztasuna eta fidagarritasuna errore iturrien araberakoa izango da. Beraz, ezinbestekoa da kasuan kasuko errore iturri posibleak identifikatu eta, ahal izanez gero, kuantifikatzea.

Simulazio bidez gauzatu diren saiakuntzen (8.5.2 atala) errore iturri dagokienez, nabarmenenak ondorengo hauek dira:

- 1. Modeloaren garapena:** Transformadorearen zirkuitu elektriko trifasiko baliokidean fenomeno elektrikoak baino ez dira kontuan hartzen. Análisi teorikoaren abiapuntua portaera magnetikoaren azterketa izan bada ere, dualtasun-printzipioa aplikatu ondorengo emaitza zirkuitu elektriko purua da. Hots, fenomeno elektrikoaren aurrean baino ez du erantzungo, fenomeno magnetikoak alde batera utzita. Sinplifikazio honen eragin nagusia nukleo ferromagnetikoaren portaera modelatzen duten parametroen ezaugarritzean behatzen da. Izan ere, saturazio fenomenoak kontuan hartu bada ere, histeresiaren efektua erabat mespretxatu da. Era berean, baliokide elektrikoaren fenomeno magnetikoak mespretxatu, ezinezkoa da efektu magnetikoaren ondoriozko iragankortasunak simulazioetan behatzea. Gainera, iragankortasunen simulazioaren ildo beretik, kapazitate parasitoak sinplifikatzean harmonikoen eragina mespretxatzen da, eta honek egoera posibleen análisisia uhin-forma sinusoidal puruetara mugatzen du.
- 2. Sarrerako parametroen kalkulua:** Zirkuitu elektriko baliokidearen sarrerako parametroak kalkulatzeko formulatan, sinplifikazioak egin izan dira jatorrizko oinarri teorikoaren proposamenetan. Gainera, aipatzekoa da bide homopolarra osatzen duten hozgarri eta karkasa modelatzerako orduan fluxu homopolarren banaketa uniformetzat hartu dela, baina baliteke banaketa hori errealitatean erabat uniformea ez izatea.
- 3. Kalkulu prozesua:** Kalkulu eta simulazioak *MATLAB-Simulink* tresna matematikoa erabilia burutu dira. Zehaztasun handiko tresna bada ere, erabili izan diren kalkulu batzuetan integrazio metodoak aplikatu dira, eta honek erroreak metatzea areagotzen du. Era berean, simulazioetan zehar ekuazio konplexuak ebazteko diskretizazio eta hurbilketa teknikak aplikatzen ditu.

Laborategian gauzatu diren saiakuntzen errore iturriei dagokienez, jatorri zeharo ezberdina dute. Kasu honetan esanguratsuenak honakoak dira:

- 1. Neurketa-tresneriaren zehaztasuna:** Saiakuntzetan erabilitako neurketa-tresnen zehaztasunak, be-reizmenak eta doitasunak akatsak sor ditzakete. Hutseko saiakuntzan errore mota hau ahalik eta gehien murrizteko neurketak osziloskopioa erabiliz egin dira.
- 2. Kalkuluetan erroreak metatzea:** Hutseko saiakuntzetan kalkuluak egiteko beste emaitza esperimental batzuk hartu izan dira oinarritzat. Honela, datutzat hartu den emaitza esperimentalaren erabiltzean, kalkulatu nahi den parametroan errorea metatuz doa.

3. **Baldintza esperimentalen aldakortasuna:** Transformadorearen portaera tenperaturaren arabera aldakorra izango da. Saiakuntza bakoitzaren hasierako balioetan, hasiera batean transformadorea itzali-ta zegoenez, karkasa barruko tenperatura ingurugirokoa izan da. Hala ere, saiakuntzetan zehar denborak aurrera egin ahala karkasa barneko tenperatura igotzen joan da, homopolarreko saiakuntzan batez ere, eta tenperatura aldaketak nukleo ferromagnetikoaren funtzionamendua baldintzatzen du.
4. **Giza akatsak:** Esperimentuaren konfigurazioan, datu-bilketan edo emaitzen erregistroan konturatu gabe egindako giza akatsek errorea handitzen dute.
5. **Esperimentuaren muga fisikoak:** Segurtasun muga edota muga teknikoak direla eta, simulatu daitezkeen baldintza asko ezin dira esperimentazioz burutu.

Kuantifikatu diren errore guztiak sakonki aztertuta, posible liteke zirkuitu elektrikoaren parametroak saiakuntza esperimentalen neurketetatik abiatuta kalkulatzeko, MAL honen aldi berean garatu den "Hiru zutabeko transformadore baten modelizazio xehatua saiakuntza esperimentalen bidez" izeneko MALean zehazten den bezala. Planteamendu honen desabantaila nagusia modelatu nahi den transformadorea fisikoki eskuragarri izatearen beharrezan da. Ezaugarri geometrikoetan oinarritzen den prozesua jarraituta, aldiz, nahikoa da diseinu irizpideak ezagunak izatea, transformadorea fisikoki eskuragarri izateko inolako beharrezanik gabe.

Honela, proposatutako YNyn konexioko 3 zutabeko transformadorearen modeloa baliagarria dela ebazten da, baita modeloaren parametroak kalkulatzeko aurkeztutako planteamendua ere.

8.7. Tentsio desorekatuen aurreko lan-baldintzen definizioa

Behin proposamen teorikoa balioztatuta, proposatutako modeloarekin elikadurako tentsio-sistema desorekatua den kasuetarako eredutzat hartu den plataforma esperimentaleko transformadorearen mugako lan-baldintzak definitu dira. *RECON-EP* proiektuaren baitan, proposamenetako bat banaketa-sarean ematen diren akats elektrikoek eragindako egoera desorekatuen aurrean kargari elikatzen zaion tentsio konposatuaren sistema orekatuta mantentzean datza. Honela, hornidura elektrikoaren jarraitutasuna eta kalitatea bermatzea lortuko litzateke akatsen presentzian.

Horretarako, kalkulu prozesuan 5.2 irudian azaltzen den "*Neutro desplazatuaren fenomeno*" aplikatuko da. Tentsio konposatuak (U_{ab} , U_{bc} eta U_{ca}) egoera orekatuan duten balioetan konstante mantenduko dira,

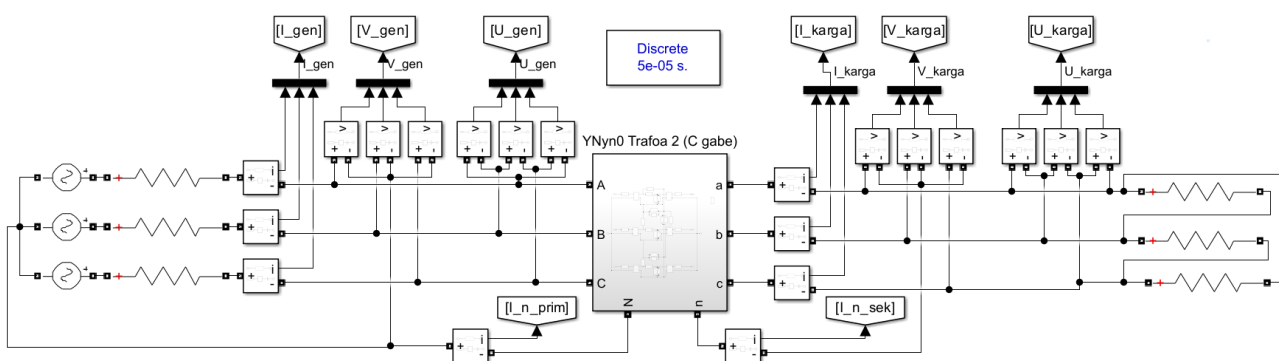
eta fasore hauek oinarri, neutroko tentsioak sortzen duen desplazamenduaren arabera tentsio sinpleen balioak (V'_a , V'_b eta V'_c) kalkulatu dira.

Gogoan izan behar da YNyn motako 3 zutabeko potentzia-transformadoreen kasuan inpedantzia homopolarrak duen balioa txikia dela. Inpedantzia balio txikiek korrante balio handiak eramateko joera du, zirkuitulabur efektua sortuz. Honen ondorioz, baliteke transformadorea tentsio sistema desorekatuaz elikatzean zirkuitulabur fenomenoak sortzea eta gailuaren fidagarritasuna eta segurtasuna konprometitzea.

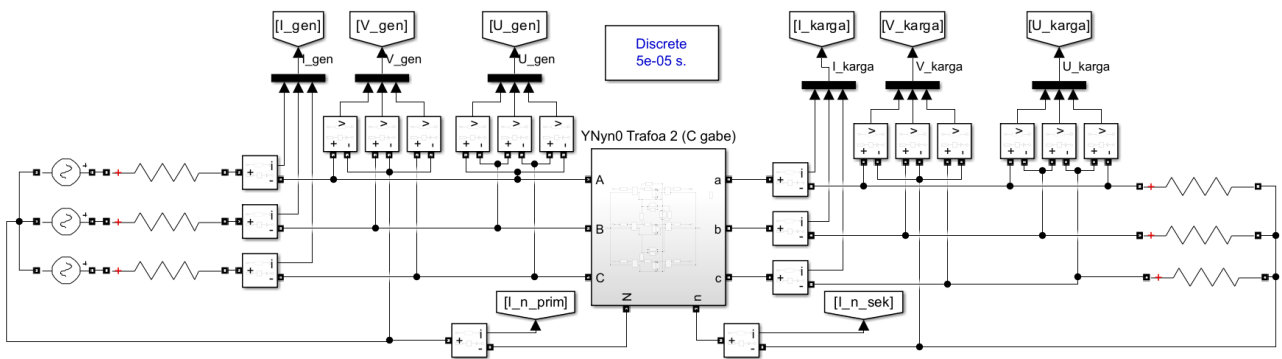
Segurtasuna eta fidagarritasuna bermatze aldera, saiakuntza esperimentalen aurretik simulazio bidezko analisia garatzea ezinbestekoa da. Horretarako, potentzia-transformadorearen egoera egonkorreko lan-baldintzen mugak simulazio bidez ezaugarritu ondoren, muga horien azpitiko balioak esperimentalki entseगतुo dira.

Neutro desplazatuaren fenomenoak transformadorean duen eragina aztertzeko, karga-maila ezberdinen aurrean (% 0-10 artean) elikadura tentsioa aldatuz joango da. Hasiera batean tentsio izendatu orekatua elikatuko da, eta ondoren sisteman fase batekin bat egiten duen desoreka tentsioa (V_n) txertatuko da apurka-apurka 0-230 V artean.

Transformadoreak elikatuko duen kargari dagokionez, bi kasu aztertuko dira: batetik, kargak triangeluan konektatuta (8.26 irudia); eta, bestetik, kargak izarrean (8.27 irudia) konektatuta. Karga bakoitzaren izaeran bi azpikasua aztertuko dira, potentzia-faktorea (PF) 0,8 eta 1 diren kasuak. Izan ere, hauek dira errealitatean sarean aurki daitezkeen mugako potentzia-faktoreak, hots, karga erabat erresistiboa den kasua (PF=1) edota banaketa-enpresek potentzia erreaktiboa ekonomikoki zigortzen duten karga inдукtiboak (PF=0,8).



8.26. irudia: Tentsio desorekatuen aurrean lan-baldintzak definitzeko simulazio-eskema karga triangeluan konektatzen denean.



8.27. irudia: Tentsio desorekatuen aurrean lan-baldintzak definitzeko simulazio-eskema karga izarrean konektatzen denean.

Aurretiaz aipatutako konbinazio guztiak uztartuta, guztira 120 kasuren aurreko erantzuna simulatu da. Emaitza horietatik abiatuta, kasu bakoitzerako transformadoreak modu egokian lan egiteko onartzen duen tentsio desoreka maximoa 8.12 eta 8.13 tauletan laburbildu dira.

Oro har, desoreka A fasean txertatzen denean, transformadoreak C faseetik korrante handiagoa eskatzen du; desoreka B fasean txertatzean, korrantea A fasean handitzen da; eta, desoreka C fasean txertatzean, korrantea B fasean handitzen da. Ondorioz, arestian aipatu bezala kanpoko zutabeek erdikoak baino erreluktantzia handiagoa aurkezten dutenez, tentsio desoreka txikiagoak onartzen dituzte. Kasurik kritikoena karga izarrean konektatuta dagoenean eta potentzia-faktorea 1 denean ematen dela behatu da. I. Eranskinean simulazio-emaitzen lagin bat adierazi da, karga erresistibo purua karga-maila erdian eta osoan duten aldaeren azpikasu kritikoenei dagozkienak hain zuzen.

8.12. taula: Tentsio desorekatuen mugako lan-baldintzak karga triangeluan konektatzen denean.

Karga-maila	Karga PF=1			Karga PF=0,8			Muga guztira (V)
	A fasea (V)	B fasea (V)	C fasea (V)	A fasea (V)	B fasea (V)	C fasea (V)	
% 0	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55
% 10	64,40	64,43	64,96	65,23	65,26	65,78	64,40
% 20	57,29	57,31	57,84	58,81	58,83	59,33	57,29
% 30	50,22	50,23	50,76	52,28	52,30	52,78	50,22
% 40	43,19	43,20	43,72	45,64	45,66	46,14	43,19
% 50	36,21	36,21	36,73	38,91	38,92	39,39	36,21
% 60	29,27	29,27	29,78	32,06	32,07	32,53	29,27
% 70	22,38	22,38	22,88	25,11	25,12	25,56	22,38
% 80	15,54	15,53	16,03	18,04	18,04	18,48	15,53
% 90	8,74	8,74	9,22	10,85	10,85	11,28	8,74
% 100	2,00	1,99	2,47	3,52	3,52	3,95	1,99

8.13. taula: Tentsio desorekatuen mugako lan-baldintzak karga izarrean konektatzen denean.

Karga-maila	Karga PF=1			Karga PF=0,8			Muga guztira (V)
	A fasea (V)	B fasea (V)	C fasea (V)	A fasea (V)	B fasea (V)	C fasea (V)	
% 0	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55	71,55
% 10	63,90	63,92	64,45	63,82	63,85	64,36	63,82
% 20	56,33	56,35	56,87	56,42	56,44	56,92	56,33
% 30	48,88	48,90	49,41	49,28	49,30	49,76	48,88
% 40	41,60	41,61	42,11	42,37	42,39	42,83	41,60
% 50	34,50	34,51	35,00	35,64	35,66	36,08	34,50
% 60	27,59	27,59	28,07	29,05	29,06	29,47	27,59
% 70	20,87	20,87	21,34	22,55	22,56	22,96	20,87
% 80	14,35	14,34	14,80	16,10	16,10	16,49	14,34
% 90	8,00	7,99	8,43	9,65	9,64	10,03	7,99
% 100	1,82	1,80	2,24	3,13	3,13	3,50	1,80

Era berean, I. Eranskinean aurkitzen diren kasuetan behatzen den bezala, kargak duen tentsio konposatua orekatua bada ere, izendatuaren azpitik txikitzen doa. Izan ere, transformadoreak karga induktiboen bidez modelatzen dira sarearen baitan, eta hornidura elektrikoaren kalitatea mantentzeko garrantzitsua da tentsio jauskeren efektua edozein egoeratan kontuan hartzea.

Fenomeno honi aurre egiteko soluzio posible bat *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24)* kongresuan aurkeztuko den *Optimizing voltage references in a 3-leg power VSC under single-phase-to-ground faults* artikuluan [21] proposatzen da. Sarea osatzen duten elementuetan zeharreko tentsio-jauskerak kontuan hartuta, lurrerako akats monofasikoetan zeharreko egoera desorekatuekin jauskera nola zuzendu aurkeztzen da kargak jasotzen duen hornikuntza kalitatea akatsean zehar ere mantenduz.

Artikuluan [21] azaltzen dena laburbilduz, banaketa-sareak egun dituen erronken aurrean (ibilgailu elektrikoaren integrazioa, energia berriztagarriko baliabideen konexioa, biltegiatze-sistemen kudeaketa, etab), akats elektrikoak bezalako egoera ez-desiragarriak sor daitezke, hornidura elektrikoaren kalitatea kalte dezaketena. Akats elektrikoetan zehar elikaduraren kalitatea hobetzeko, potentzia-bihurgailuak kontrol-algoritmo espezifikoekin konekta daitezke. Algoritmo horiek sarearekin konektatutako kargen tentsioa aldatzen dute akatsak dirauen artean, eta kargak behar duen tentsioa behar bezala aztertuta, kontrol optimoa berma daiteke. Artikuluan potentzia-bihurgailuko tentsioaren erreferentziak optimizatzekeko potentzia-bihurgailuaren irteeraren eta akats-puntuaren arteko tentsio-erorketa kalkulatu da.

Simulazio bidez ateratako lan-baldintzen muga teorikoa ezaguna izanik, plataforma esperimentaleko transformadorean balio horien azpitik dauden desorekak entsegatzea erabaki da. Horretarako, 18Ω eta 4,5 kW-ko hiru karga izarrean konektatu dira transformadorearen sekundarioan. Lehenik eta behin, transformadorea tentsio-sistema orekatuarekin elikatu da. Egoera berdina MATLAB-Simulink-eko modeloan simulatu da, eta emaitzak 8.14 taulan alderatzen dira.

Errorei erreparatuz, transformadorearen sekundarioko neutroaren balioa ($I_{karga-n}$) izan ezik, gainerrako balioak onargarritzat har daitezke, % 5 baino errore txikiagoak baitituzte. Emaitzak interpretatzerako orduan funtsezkoa da 8.6 atalean azaldutakoa gogoan izatea, analisi honetan aurretiaz aipatutako guztia kasu honetan ere aintzat hartu behar baita.

8.14. taula: Kargapeko entsegua elikadura orekatuan, karga izarrean konektatuta (18Ω eta 4,5 kW).

Aldagaia	Emaitza esperimentalak	Simulaziozko emaitzak	Errorea (%)
I_{gen-A} (A)	12,86	12,54	2,5
I_{gen-B} (A)	12,84	12,45	3,0
I_{gen-C} (A)	12,96	12,54	3,2
I_{gen-N} (A)	0,09	0,087	3,3
$I_{karga-a}$ (A)	12,96	12,35	4,7
$I_{karga-b}$ (A)	12,97	12,35	4,8
$I_{karga-c}$ (A)	12,96	12,35	4,7
$I_{karga-n}$ (A)	0,08	0,037	53,8
$V_{karga-an}$ (V)	228,6	223,2	2,4
$V_{karga-bn}$ (V)	228,8	223,2	2,4
$V_{karga-cn}$ (V)	228,8	223,2	2,4
$U_{karga-ab}$ (V)	396,4	386,5	2,5
$U_{karga-bc}$ (V)	396,6	386,5	2,5
$U_{karga-ca}$ (V)	396,4	386,5	2,5

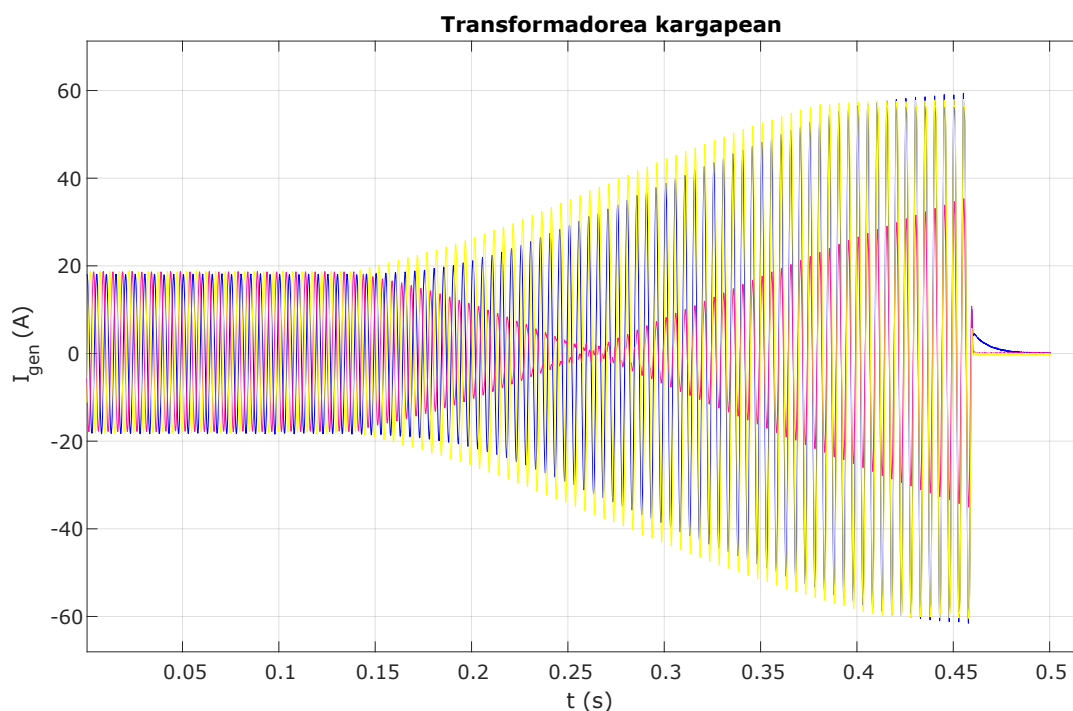
Behin transformadorea kargapean eta tentsio-sistema izendatu orekatuaz elikatuta, eta simulaziorako proposatutako modeloak egoera egonkorretan portaera egokia duela ebatzita, saiakuntza esperimentalean tentsio desoreken aurrean laborategiko transformadoreak duen portaera aztertuko da, betiere mugako lan-baldintzen azpitiko balioekin elikatuta.

Horretarako, aurreko saiakuntzaren konfigurazio berdina mantendu izan da, eta oraingoan A fasean 1 V-eko desoreka txertatu da. Transformadorea elikadura egoera berriarekin martxan jarri bezain pronto, bibrazio zarata ateratzen hasi da eta elikadura bezala erabili den CINERGIA G&E L +15 vAC/DC gailuan elikadura automatikoki eten da neutroan gainkorronteak behatu dituelako.

Osziloskopioarekin transformadorearen primarioko korronteak (I_{gen-A} , I_{gen-B} eta I_{gen-C}) neurtu dira eta elikadura aldatu den unean korronteek duten itxura 8.28 irudian adierazten dira. Hiru faseetako korronteek izan duten igoera nabarmena da, eta elikadura automatikoki eten aurreko aldiunean ezin da mugako balioen batera heldu direla ondorioztatu. Honela, makina elektrikoan akats egoera bat eman dela deduzi daiteke, ziurrenik YNyn konfigurazioko transformadorea ezaugarritzen duen sekuentzia homopolarreko inpedantzia balio txikiagatik.

Nahiz eta simulazio bidez egoera egonkorrean YNyn motako transformadoreak tentsio desorekatu tarte bat jasan dezakeela aurreikusi den, aurrera eramandako saiakuntza esperimentalek aukera honen ezintasuna agerian utzi dute. Ondorioz, YNyn motako transformadorea tentsio desorekatuekin elikatze-ko nukleoak 3 zutabe baino gehiago eduki behar ditu, eta horretarako aukera bideragarriena 5 zutabeko transformadorea dela ebatzi da.

5 zutabeko transformadore baten zirkuitu elektriko baliokidea garatzeko 8. atalean azaldu den prozedura berdina aplikatu beharko litzateke, eta horrela, tentsio desorekatuekin elikatze-ko lan-baldintzen muga simulazio bidez aurreikus liteke.



8.28. irudia: Elikadurako korronteen eboluzioa 1 V-eko desoreka A fasean txertatzean eta izarrean konektatutako karga-maila %86 denean.

8.8. Proiektuaren plangintza

Dokumentuaren atal honetan, proiektuaren plangintza azaltzen da. Proiektuan zeharreko atazen antolaketa egokiari esker efizientzia hobetzea eta emaitza arrakastatsuak lortzea ahalbidetuko da, baliabiderik xahutu gabe. Plangintzak lanaren garapenaren inguruko kontrol zehatza gauzatzea ahalbidetzen du.

Horretarako, proiektuan zehar burutu diren atazak fase ezberdinetan multzokatu dira, eta mugarriek proiektuaren programan puntu garrantzitsuenak nabarmentzen dituzte. Honela, lortutako plangintza xehatua eta betebeharren arteko denborazko erlazioa *Gantt* diagraman erakusten da (ikusi 8.29 irudia).

Lan-baldintzei dagokienez, eguneroko jarduna 4 h-koa izan da, eta jaiegun ofizialez aparte, opor egunak Gabonetan (2023/12/25-2027/01/07 artean), azterketa garaian (2024/01/15-2024/01/31 artean) eta Aste Santuan (2024/03/28-2024/04/07 artean) izan dira.

1. fasea: Formakuntza eta dokumentazioa

- **1. ataza:** Jatorrizko *RECON-EP* proiektuari buruzko ezagutza.

Proiektuaren abiapuntua aurretiazko lanei esker sakondutako ezagutza barneratzea da. Orokorrean, proiektuaren oinarria akatsak desagerrarazteko FPL bihurtgailuaren kontrol-sistemaren garapena da, eta proposamen honetatik abiatuta saiakuntzak egiteko laborategirako plataforma esperimentalaren eta lurrerako akats elektrikoa arku elektriko baten ereduaz emulatzeko txartel elektronikoaren diseinuak garatu izan dira aurretiaz. Honela, transformadoreak egoera horietan duen portaera ulertzeko azterketaren beharra aurkezten da. Ezagutza guztia barneratzeko hasierako formakuntza-bilerak egin dira oinarritzko proiektuaren zuzendariekin.

Giza baliabideak: Ikaslea, MAL zuzendaria eta ikertzaileak.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink* softwarea.

Iraupena: 3 aste (60 h).

Aurrekariak: Ez dago.

- **2. ataza:** Dokumentazioa.

Hasierako prestakuntzan oinarritzko ezagutza barneratu ondoren, proiektuan aplikagarria den teknologiak egun dituen ezaugarri eta garapena aztertu behar da. Horretarako, datu-base bibliografiko eta teknikoak erabiliko dira, *ScienceDirect*, *IEEE Xplore* eta BIEko liburutegian eskuragarri dauden baliabideak batik bat. Eskuratutako informazio guztia dokumentuaren idazketan erabiliko da.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink* softwarea.

Iraupena: 4 aste (80 h).

Aurrekariak: 1. ataza.

2. fasea: Transformadorearen konfigurazio-aukeren analisisa.

- **3. ataza:** Konfigurazio ezberdinen dokumentazio sakona.

Lehenik eta behin akats elektriko ohikoenak identifikatuko dira. Ondoren, akats hauek transformadore konfigurazio ezberdinetan eragiten duten erantzun teorikoa ikertuko da. Horretarako, bai harilkatuen arteko konexioak, bai nukleo ferromagnetikoaren egitura aintzat hartuko dira.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta liburu teknikoak.

Iraupena: 5 aste (100 h).

Aurrekariak: 2. ataza.

- **4. Ataza:** Konfigurazio ezberdinen simulaziozko erantzunen analisisa.

Aurreko atazan lortutako dokumentazioaren arabera, *MATLAB-Simulink*-ek inplementatuta dituen transformadore ezberdinek elikadura tentsio-sistema desorekatuen aurrean duten erantzuna simulatu da. Modelo hauetatik abiatuta, aukeren arteko indargune eta gabeziak ebatziko dira.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink* softwarea.

Iraupena: 2 aste (40 h).

Aurrekariak: 3. ataza.

3. fasea: Transformadorearen modelizazioa eta parametroen doiketa.

- **5. ataza:** 3 zutabeko transformadorearen modelizazioa.

Lehenik eta behin fluxu-lerroen analisi magnetikoa garatuko da. Ondoren, dualtasun elektromagnetikoaren printzipioa aplikatuta, modelo elektriko trifasiko baliokidea lortuko da.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink softwarea*.

Iraupena: 5 aste (100 h).

Aurrekariak: 4. ataza.

- **6. ataza:** Modelo elektriko baliokidearen parametroen definizioa.

Transformadorearen portaera emulatzen duten osagai pasiboak ezaugarri geometrikoetatik abiatuz eta materialen portaera magnetikoa aztertuta definituko dira. Horretarako, plataforma esperimentaleko transformadorea hartuko da eredutzat.

Giza baliabideak: Ikaslea, MAL zuzendaria eta ikertzaileak.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink softwarea*.

Iraupena: 4 aste (80 h).

Aurrekariak: 5. ataza.

4. fasea: Proposatutako modeloa balioztatzea.

- **7. ataza:** Saiakuntzen simulazio-emaitzak.

Transformadoreen zirkuitu baliokideak ezaugarritzeko egiten diren saiakuntzak modeloari simulazioz egingo zaizkio.

Giza baliabideak: Ikaslea.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta *MATLAB-Simulink softwarea*.

Iraupena: 3 aste (30 h).

Aurrekariak: 6. ataza.

- **8. ataza:** Saiakuntzen emaitza esperimentalak.

Aurretiaz simulatu diren saiakuntzen baldintzak esperimentalki entsegatuko dira. Lortutako emaitzak simulaziozkoekin alderatuko dira proposatutako modeloaren baliagarritasuna ebazteko.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta plataforma esperimentalak.

Iraupena: 3 aste (30 h).

Aurrekariak: 6. ataza.

5. fasea: Egoera desorekatuekin lan-baldintza muga zehaztea.

- **9. ataza:** Saiakuntzen simulazio-emaitzak.

Simulazio bidez modelizatu den transformadoreari tentsio-sistema desorekatua elikatzen zaionean aurkezten duen erantzuna aztertuko da. Honela, lurrerako akats monofasikoen presentzian segurtasun eta fidagarritasun baldintzak bermatzen dituen transformadorearen lan-baldintzen mugak definituko dira.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua.

Iraupena: 3 aste (40 h).

Aurrekariak: 8. ataza.

- **10. Ataza:** Saiakuntzen emaitza esperimentalak.

Aurretiaz simulatu diren saiakuntzen baldintzak esperimentalki entsegatuko dira. Lortutako emaitzak simulaziozkoekin alderatuko dira proposatutako modeloaren baliagarritasuna ebazteko.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua eta plataforma esperimentalak.

Iraupena: 1 aste (10 h).

Aurrekariak: 8. ataza.

6. Fasea: Idazketa.

- **11. Ataza:** Memoriaren idazketa.

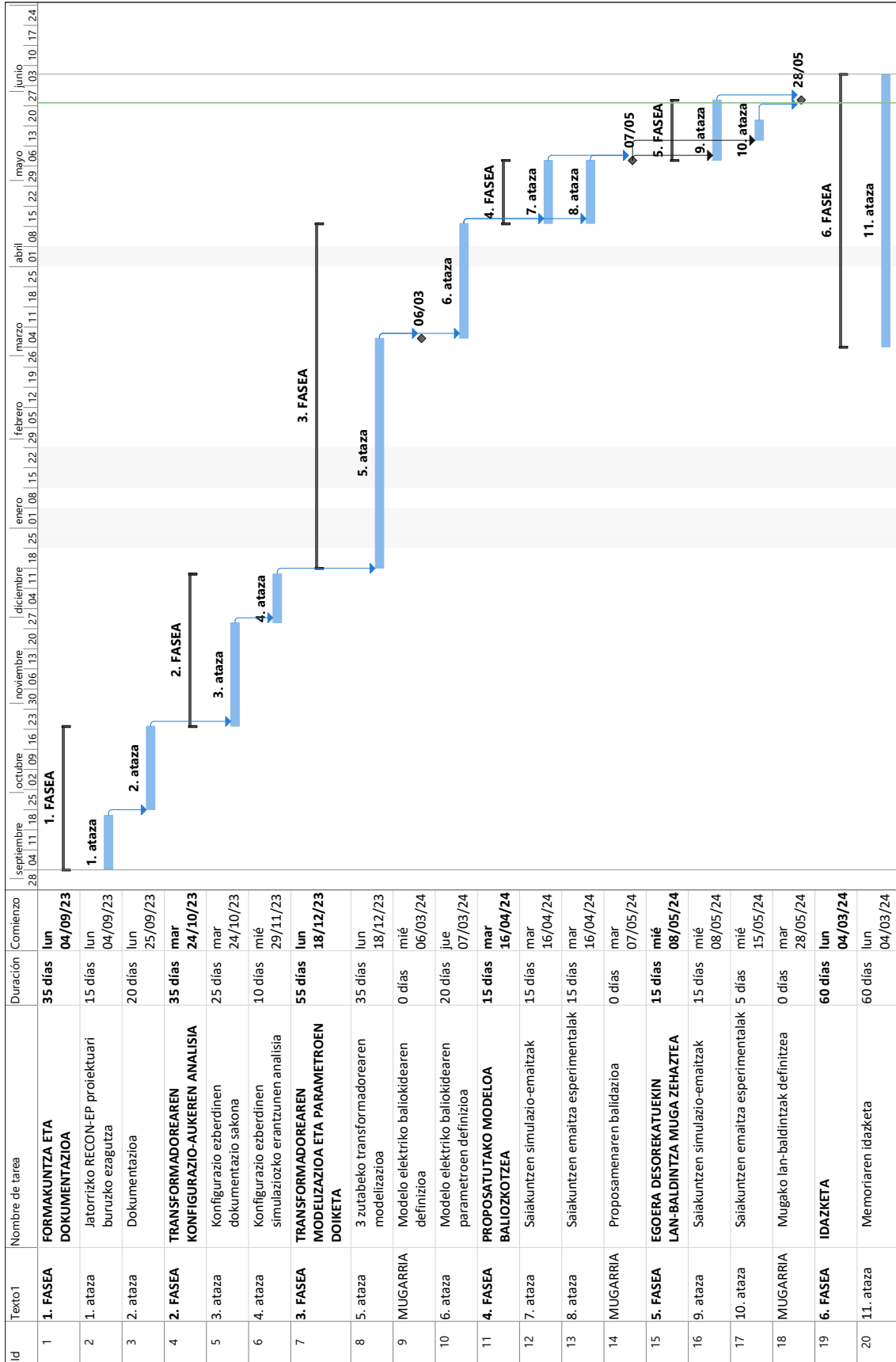
Proiektuaren garapen osoan zehar lortutako informazio guztia batzen duen azken dokumentua idatziko da.

Giza baliabideak: Ikaslea eta MAL zuzendaria.

Baliabide teknikoak: Ordenagailua.

Iraupena: 12 aste (140 h).

Aurrekariak: Ez dago.



8.29. irudia: Proiektuaren Gantt diagrama.

9 Proiektuaren alderdi ekonomikoak

MAL honetan egindako lanari lotutako kostuak identifikatu eta kuantifikatu ondoren, atal honetan proiektuaren alderdi ekonomikoak aurkezten dira. Erabilitako giza baliabideen, baliabide materialen eta ekipamenduko baliabideen kostuak zehaztu dira, eta hauekin proiektuaren kostu totala zenbatetsi da.

9.1. Barne orduak

Proiektuan MAL egiten ari den ikaslea eta haren lana gidatzen duen zuzendaria dabilta lanean. Giza baliabideei dagozkien kostuen laburpena 9.1 taulan adierazten da.

- **Zuzendaria:** Inplikaturiko 140 ordu estimatzen dira, 50 €/h orduko kostuarekin.
- **Ikaslea:** Inplikaturiko 650 ordu estimatu egiten dira, 6,25 €/h orduko kostuarekin.

9.1. taula: Barne orduak.

Kontzeptua	Orduko kostua (€/h)	Orduak (h)	Guztira (€)
Zuzendaria	50	140	7.000
Ikaslea	6,25	650	4.062,5
	Guztira		11.062,5

9.2. Amortizazioak

Amortizazioek ondasunek haien bizitza erabilgarrian kostuaren banaketa kuantifikatzen dute. Kasu honetan, *software* lizentzien eta ekipoen kostua aintzat hartzen dira, eta kostuen laburpena 9.2 taulan ikus daiteke.

- **Ordenagailua:** Proiektu osoan zehar ikasleak baino ez du erabili. 900€-ko balioa du, eta 5 urtetan amortizatzen da.
- **MATLAB Student lizentzia:** Proiektu osoan zehar erabilia, 69 € balio du.

- **Simscape toolbox:** Proiektu osoan zehar erabilia, 7 € balio du.
- **Simscape Electrical toolbox:** Proiektu osoan zehar erabilia, 7 € balio du.
- **Laborategiko gailuak:** Saiakuntza esperimentalak egiteko *CINERGIA GE&EL +15 vAC/DC*, *TecnoTrafo 10 kVA 400/400 V* eta 4,5 kW-ko erresistentziak erabili izan dira. Halaber, neurketak egiteko voltmetroaz, anperometroaz eta osziloskopioaz baliatu da. Elementu guztiak 10 urtetan amortizatzen dira.

9.2. taula: Amortizazioak.

Kontzeptua	Kostua (€)	Bizi erabilgarria (h)	Erabilera (h)	Guztira (€)
Ordenagailua	900	8.500	600	63,53
MATLAB lizentzia	69	1.700	500	20,29
Simscape	7	1.700	500	2,05
Simscape Electrical	7	1.700	500	2,05
CINERGIA GE&EL +15 vAC/DC	40.400	17.000	40	95,06
TecnoTrafo 10 kVA 400/400 V	976,18	17.000	40	2,30
3x R (4,5 kW)	185,1	17.000	10	0,11
Fluke 117 voltmetroa	349	17.000	40	0,82
PCE-LCT 1 pintza anperimetrikoa	306,90	17.000	40	0,72
YOKOGAWA DL850E osziloskopioa	12.000	17.000	40	28,24
	Guztira			215,17

9.3. Gastuak

Proiektu honetan egin den gastu bakarra bulegoko material izan da, 9.3 taulan laburbiltzen den bezala.

- **Bulegoko materiala:** Kostu totala 40 €-koa izan da.

9.3. taula: Gastuak.

Kontzeptua	Kostua (€/unitate)	Kopurua	Guztira (€)
Bulegoko materiala	40	1	40
	Guztira		40

9.4. Kostu totala

Atalean zehar zenbatetsitako kostuak batuta, guztizko partziala lortzen da. Hala ere, kostu ez-zuzenak ere kuantifikatu beharrak daude, eta guztizko partzialaren % 7 suposatuko dute. Kostu totalen laburpena 9.4 taulan adierazten da.

9.4. taula: Proiektuaren kostu totala.

Kontzeptua	Total (€)
Barne orduak	11.062,50
Amortizazioak	215,17
Gastuak	40,00
Guztizko partziala	11.317,67
Kostu ez-zuzenak (7 %)	792,24
Guztira	12.109,91

Honela, proiektuaren kostu totala **12.109,91 €**-koa dela ebatzi da.

10 Ondorioak

MAL honetan ezaugarri geometrikoetan oinarrituta definitzen den hiru zutabeko transformadore trifasiko baten modelo elektriko baliokide xehatua garatu da. Horretarako, bai portaera magnetikoaren, bai portaera elektrikoaren azterketa sakona burutu da. Halaber, dualtasun-printzipioa aplikatuta lortzen den zirkuitu elektriko baliokidearen parametroak ezaugarri geometriko zehatzetatik abiatuta erdietsi dira, hots, transformadorearen diseinu eta eraikuntza prozesuan definituriko ezaugarrietatik.

Eredutzat hartu den BIEko plataforma esperimentaleko transformadoreari egindako saiakuntzekin, proposamen teorikoaren baliagarritasuna agerian geratu da. Honela, prozedura berdina edozein transformadoreri aplika dakioke haren modelo elektriko baliokide trifasikoa definitu eta egoera egonkor hipotetikoetan edukiko lukeen erantzuna simulatu ahal izateko.

Dena dela, modelo elektriko baliokidea lortzeko prozesuan, transformadoreak jardungo duen egoera partikularrean oinarrituta zenbait sinplifikazio egin izan dira. Egindako sinplifikazioek ez dute proposatutako modeloaren baliagarritasuna zalantzan jartzen, baina gogoan eduki behar da egindako sinplifikazioek proposamenaren aplikazio-eremua definituriko egoeretara mugatzen dutela.

Egindako sinplifikazio nabarmenenak kapazitate parasitoak mespretxatzea eta modelo elektriko puruak fenomeno magnetikoak alde batera uztea izan dira. Kapazitate parasitoak mespretxatzean, modeloak ezin ditu iragankortasunak dituzten fenomenoen aurreko erantzuna auresan. Era berean, proposatutako zirkuitu baliokide elektrikoarekin transformadorearen barne-galerak kitzikapen-mailaren arabera kuantifikatzen badira ere, modelo elektriko puruak ezin ditu fenomeno magnetikoen aurreko erantzuna aurreikusi. Gainera, histeresi fenomenoaren eragina ez da modeloa kontuan hartu.

Laburbilduz, proiektu honen baitan, egoera egonkorrean hiru zutabeko transformadore batek egoera ezberdinen aurrean duen erantzuna aurreikusteko proposamena garatu da. Iragankortasunak simulatzeko ezintasuna muga esanguratsua bada ere, proposatutako modeloa oso tresna erabilgarria da potentzia-sistemen egoera egonkorreko analisirako.

Akatsen presentzian hornikuntzaren egonkortasuna eta jarraitutasuna bermatzen duten ekipoen egokitasunari dagokionez, potentzia-transformadoreen kasuan nukleoaren topologiarik egokiena 5 zutabekoa dela ebatzi da. Izan ere, tentsio desorekatuen presentzian osagai homopolarrari transformadorean alde batetik bestera bidea emateko harilkatuen konexio mota YNyn izan behar da. Esperimentazio bidez

aditzera eman denez, YNyn motako 3 zutabeko transformadoreek ezin dituzte tentsio desorekatuak jasan, inpedantzia homopolarrak balio txikiak dituenz makinan akats egoera sortarazten delako.

MAL honetan azaldu den proposamenak informazio baliotsua eman dezake sistema elektrikoak baldintza normal eta egonkorretan planifikatzeko, operatzeko zein optimizatzeko. Era berean, modelo elektriko baliokide xehatuak transformadorearen galeren azterketa sakona burutzea ahalbidetzen du, baita ekipamenduen diseinu eta dimentsionamenduak modu efiziente eta optimoan egitea ere.

10.1. Etorkizuneko lan-ildo posibleak

Ondorioetan azaldu izan den bezala, proiektu honetan proposatzen den modeloak bi muga nagusi ditu: batetik, iragankortasunen simulazio ezintasuna; eta, bestetik, fenomeno magnetikoen simulazio ezintasuna. Etorkizunerako lan-ildo posibleen artean bi muga hauek jorratzea ezinbestekoa litzateke.

Jada aipatu izan den bezala, lehenengo muga gainditzeko modelo elektriko baliokide trifasikoan kapazitate parasitoak aintzat hartu beharko lirateke. Horretarako eredu egokia iragankortasun elektromagnetikoak simulatzeko *EMTP-ATP Draw software*ak barneratuta duen eskema liteke, 8.5 irudian adierazten dena hain zuzen. Dena dela, kapazitate horien balioa definitzeko ezaugarri geometrikoetan oinarritzen den kalkulu-prozedura ere proposatu beharko litzateke.

Bigarren muga gainditzeko lan-ildoak, aldiz, zirkuitu elektriko baliokidea inplementatzeko *software*aren lan aukerak birdefinitzea liteke. Izan ere, MAL honetan egin diren simulazioak *MATLAB-Simulink*-en *Simscape-Electrical-Specialized Power Systems toolbox*-ak lan esparrua fenomeno elektriko puruen simulaziora mugaturik dago. Hala ere, *Simscape-Electrical toolbox*-a erabilia baliteke fenomeno elektriko eta magnetikoen arteko akoplamendua moduren baten modelatzeko aukera izatea. Gainera, elementu ferromagnetikoak eredutzen dituzten inдукtancia aldakorretan histeresiaren efektua ere sartu beharko litzateke.

Bestalde, akatsen presentzian hornikuntzaren kalitatea bermatzen duten ekipoen analisia garatzen jarraitzeko, potentzia-transformadoreen alorrean YNyn konexioa duen 5 zutabeko transformadorearen diseinua eta azterketa garatu beharko litzateke. Horretarako, transformadorea eraiki aurretik diseinu parametroak definiturik daudenean, makina elektrikoaren egoera egonkorreko erantzuna aurrerako MAL honetan aurkeztu den prozedura berbera 5 zutabeko transformadoreari aplikatzea interesgarria litzateke.

Bibliografía

- [1] UNE-EN 60909, *Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna*.
- [2] J. Mazón, J. F. Miñambres, M. A. Zorrozuza, G. Buigues, and V. Valverde, *Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas*. Pearson Educación, S.A., 2008.
- [3] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. McGraw-Hill, 1986.
- [4] A. Norouzi, “Open phase conditions in transformers analysis and protection algorithm,” *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA*, 2013.
- [5] A. Milagre, M. Luz, G. Cangane, A. Komar, and P. Avelino, “3d calculation and modeling of eddy current losses in a large power transformer,” in *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*, 2012.
- [6] S. Magdaleno-Adame, T. D. Kefalas, A. Fakhrafar, and J. C. Olivares-Galvan, “Comparative study of grain oriented and non-oriented electrical steels in magnetic shunts of power transformers,” in *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2018.
- [7] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, and N. Chiesa, “Implementation and verification of the hybrid transformer model in atpdraw,” *Electric Power Systems Research* 79, 2009.
- [8] G. Dileep, “A survey on smart grid technologies and applications,” *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2589–2625, 2020.
- [9] Iberdrola, “Global smart grids innovation hub: Cambiemos el presente para liderar el futuro en redes inteligentes.” [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/global-smart-grids-innovation-hub>
- [10] C. Fjellstedt, J. Forslund, and K. Thomas, “Experimental investigation of the frequency response of an lc-filter and power transformer for grid connection,” *Energies*, vol. 16, p. 5784, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711222002090>.
- [11] M.I.T. - E.E. Staff, *Circuitos magnéticos y transformadores*. Editorial Reverté Argentina S.C.A., 1965.

- [12] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*, ser. Newnes Power Engineering Series. Elsevier Science, 2007. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=1wv9V1fbaJoC>
- [13] M. A. Tsili and S. A. Papathanassiou, "Analysis of a three-limb core power transformer under earth fault," in *16th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2004.
- [14] E. C. Cherry, "The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits," *Proceedings of the Physical Society. Section B*, vol. 62, p. 101–111, Feb. 1949.
- [15] G. R. Slemon, "Equivalent circuits for transformers and machines including non-linear effects," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 100, p. 129–143, Jul. 1953.
- [16] N. Chiesa, *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*. NTNU Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [17] M. Shafieipour, W. Ziomek, R. T. Jayasinghe, J. C. G. Alonso, and A. M. Gole, "Application of duality-based equivalent circuits for modeling multilimb transformers using alternative input parameters," *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [18] AISI Standard, *American Iron and Steel Institute*. [Online]. Available: <https://www.buildusingsteel.org/aisi-design-resources/design-standards/>
- [19] Y. A. Yassin, A. N. Hussain, and N. Y. Ahmed, "Comparison and assessment of a different steel materials based on core losses reduction for three-phase induction motor," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, no. 1, 2021.
- [20] S. Maximov, R. Escarela-Perez, S. Magdaleno-Adame, J. C. Olivares-Galvan, and E. Campero-Littlewood, "Calculation of nonlinear electromagnetic fields in the steel wall vicinity of transformer bushings," *IEEE Transactions on Magnetics*, no. 6, 2015.
- [21] A. Dávila, U. garcía, U. González, J. X. Rementeria, A. San Andres, and E. Planas, "Optimizing voltage references in a 3-leg power vsc under single-phase-to-ground faults," in *International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ 2024) - Proceedings of ICREPQ 2024*, 2024.

Eranskinak

I. Eranskina

Desorekak B fasean, karga izarrean konektatuta, PF=1, karga-maila % 50.										
Transformadorearen primarioko parametroak										
V_n	I_{gen-A}	I_{gen-B}	I_{gen-C}	I_{gen-N}	V_{gen-AN}	V_{gen-BN}	V_{gen-CN}	U_{gen-AB}	U_{gen-BC}	U_{gen-CA}
0	7,25	7,16	7,25	0,1	229,3	229,3	229,3	397,1	397,1	397,1
5	8,29	6,67	6,82	3,2	231,7	224,3	231,9	397,1	397,1	397,1
10	9,33	6,32	6,53	6,3	234,2	219,4	234,5	397,1	397,1	397,1
15	10,37	6,13	6,39	9,4	236,8	214,4	237,3	397,1	397,1	397,1
20	11,41	6,11	6,42	12,5	239,5	209,5	240,1	397,1	397,1	397,1
25	12,45	6,27	6,62	15,6	242,2	204,6	243,0	397,1	397,1	397,1
30	13,49	6,59	6,97	18,8	245,0	199,6	245,9	397,1	397,1	397,1
35	14,53	7,05	7,44	21,9	247,9	194,7	248,9	397,1	397,1	397,1
40	15,57	7,62	8,03	25,0	250,8	189,7	252,0	397,1	397,1	397,1
45	16,61	8,29	8,70	28,1	253,8	184,8	255,1	397,1	397,1	397,1
50	17,65	9,02	9,44	31,2	256,9	179,8	258,3	397,1	397,1	397,1
55	18,69	9,81	10,23	34,4	260,0	174,9	261,5	397,1	397,1	397,1
60	19,73	10,65	11,06	37,5	263,2	169,9	264,8	397,1	397,1	397,1
65	20,77	11,51	11,92	40,6	266,4	165,0	268,2	397,1	397,1	397,1
70	21,81	12,41	12,81	43,7	269,7	160,0	271,6	397,1	397,1	397,1
75	22,85	13,32	13,72	46,8	273,0	155,1	275,0	397,1	397,1	397,1
80	23,89	14,25	14,65	50,0	276,4	150,1	278,5	397,1	397,1	397,1
85	24,93	15,20	15,60	53,1	279,8	145,2	282,0	397,1	397,1	397,1
90	25,97	16,16	16,55	56,2	283,3	140,2	285,6	397,1	397,1	397,1
95	27,01	17,12	17,51	59,3	286,8	135,3	289,2	397,1	397,1	397,1
100	28,05	18,10	18,49	62,4	290,4	130,4	292,9	397,1	397,1	397,1
105	29,09	19,08	19,47	65,5	294,0	125,4	296,5	397,1	397,1	397,1
110	30,13	20,07	20,45	68,7	297,6	120,5	300,3	397,1	397,1	397,1
115	31,17	21,06	21,44	71,8	301,3	115,5	304,0	397,1	397,1	397,1
120	32,21	22,05	22,44	74,9	305,0	110,6	307,8	397,1	397,1	397,1
125	33,25	23,05	23,44	78,0	308,8	105,6	311,6	397,1	397,1	397,1
130	34,29	24,06	24,44	81,1	312,5	100,7	315,5	397,1	397,1	397,1
135	35,33	25,06	25,44	84,3	316,3	95,7	319,4	397,1	397,1	397,1
140	36,37	26,07	26,45	87,4	320,2	90,8	323,3	397,1	397,1	397,1
145	37,41	27,08	27,46	90,5	324,1	85,9	327,2	397,1	397,1	397,1
150	38,45	28,10	28,47	93,6	328,0	80,9	331,2	397,1	397,1	397,1
155	39,49	29,11	29,49	96,7	331,9	76,0	335,2	397,1	397,1	397,1
160	40,53	30,13	30,50	99,9	335,8	71,0	339,2	397,1	397,1	397,1
165	41,57	31,15	31,52	103,0	339,8	66,1	343,3	397,1	397,1	397,1
170	42,61	32,17	32,54	106,1	343,8	61,2	347,3	397,1	397,1	397,1
175	43,65	33,19	33,56	109,2	347,9	56,2	351,4	397,1	397,1	397,1
180	44,69	34,21	34,58	112,3	351,9	51,3	355,6	397,1	397,1	397,1
185	45,73	35,23	35,60	115,5	356,0	46,4	359,7	397,1	397,1	397,1
190	46,77	36,26	36,63	118,6	360,1	41,4	363,8	397,1	397,1	397,1
195	47,81	37,28	37,65	121,7	364,2	36,5	368,0	397,1	397,1	397,1
200	48,85	38,31	38,68	124,8	368,4	31,6	372,2	397,1	397,1	397,1
205	49,89	39,33	39,70	127,9	372,5	26,7	376,4	397,1	397,1	397,1
210	50,93	40,36	40,73	131,0	376,7	21,8	380,7	397,1	397,1	397,1
215	51,97	41,39	41,76	134,2	380,9	17,0	384,9	397,1	397,1	397,1
220	53,01	42,42	42,79	137,3	385,1	12,2	389,2	397,1	397,1	397,1
225	54,05	43,44	43,81	140,4	389,3	7,8	393,4	397,1	397,1	397,1
230	55,09	44,47	44,84	143,5	393,6	4,4	397,7	397,1	397,1	397,1

Desorekak B fasean, karga izarrean konektatuta, PF=1, karga-maila % 50.										
Transformadorearen sekundarioko parametroak										
V _n	I _{karga-a}	I _{karga-b}	I _{karga-c}	I _{karga-n}	V _{karga-an}	V _{karga-bn}	V _{karga-cn}	U _{karga-ab}	U _{karga-bc}	U _{karga-ca}
0	7,05	7,05	7,05	0,00	225,6	225,6	225,6	390,7	390,7	390,7
5	7,11	6,90	7,13	0,45	227,7	220,8	228,3	390,7	390,7	390,7
10	7,18	6,75	7,22	0,89	229,8	216,1	231,1	390,7	390,7	390,7
15	7,25	6,60	7,31	1,34	232,1	211,4	233,9	390,7	390,7	390,7
20	7,33	6,46	7,40	1,79	234,4	206,6	236,9	390,7	390,7	390,7
25	7,40	6,31	7,50	2,23	236,8	201,9	239,8	390,7	390,7	390,7
30	7,48	6,16	7,59	2,68	239,3	197,1	242,9	390,7	390,7	390,7
35	7,56	6,01	7,69	3,13	241,8	192,4	246,0	390,7	390,7	390,7
40	7,64	5,86	7,79	3,57	244,4	187,6	249,1	390,7	390,7	390,7
45	7,72	5,72	7,89	4,02	247,1	182,9	252,3	390,7	390,7	390,7
50	7,81	5,57	7,99	4,47	249,8	178,1	255,6	390,7	390,7	390,7
55	7,89	5,42	8,09	4,91	252,6	173,4	258,9	390,7	390,7	390,7
60	7,98	5,27	8,19	5,36	255,5	168,7	262,2	390,8	390,7	390,7
65	8,07	5,12	8,30	5,80	258,4	163,9	265,6	390,8	390,7	390,7
70	8,17	4,97	8,41	6,25	261,4	159,2	269,0	390,8	390,7	390,7
75	8,26	4,83	8,51	6,70	264,4	154,5	272,5	390,8	390,7	390,7
80	8,36	4,68	8,62	7,14	267,4	149,7	276,0	390,8	390,7	390,7
85	8,45	4,53	8,73	7,59	270,6	145,0	279,5	390,8	390,7	390,7
90	8,55	4,38	8,85	8,04	273,7	140,3	283,1	390,8	390,7	390,7
95	8,65	4,24	8,96	8,48	276,9	135,5	286,7	390,8	390,7	390,8
100	8,76	4,09	9,07	8,93	280,2	130,8	290,3	390,8	390,7	390,8
105	8,86	3,94	9,19	9,38	283,5	126,1	294,0	390,8	390,7	390,8
110	8,96	3,79	9,30	9,82	286,8	121,4	297,7	390,8	390,7	390,8
115	9,07	3,65	9,42	10,27	290,2	116,7	301,4	390,8	390,7	390,8
120	9,17	3,50	9,54	10,72	293,6	112,0	305,2	390,8	390,7	390,8
125	9,28	3,35	9,66	11,16	297,0	107,3	309,0	390,8	390,7	390,8
130	9,39	3,21	9,78	11,61	300,5	102,6	312,8	390,8	390,7	390,8
135	9,50	3,06	9,90	12,06	304,1	97,9	316,7	390,8	390,7	390,8
140	9,61	2,91	10,02	12,50	307,6	93,2	320,5	390,8	390,7	390,8
145	9,73	2,77	10,14	12,95	311,2	88,5	324,4	390,8	390,7	390,8
150	9,84	2,62	10,26	13,40	314,8	83,9	328,3	390,8	390,7	390,8
155	9,95	2,48	10,38	13,84	318,5	79,2	332,3	390,8	390,7	390,8
160	10,07	2,33	10,51	14,29	322,2	74,6	336,2	390,8	390,7	390,8
165	10,18	2,19	10,63	14,74	325,9	70,0	340,2	390,8	390,7	390,8
170	10,30	2,04	10,76	15,18	329,6	65,4	344,2	390,8	390,7	390,8
175	10,42	1,90	10,88	15,63	333,4	60,8	348,2	390,8	390,7	390,8
180	10,54	1,76	11,01	16,08	337,1	56,3	352,3	390,8	390,7	390,8
185	10,65	1,62	11,14	16,52	341,0	51,8	356,3	390,8	390,7	390,8
190	10,77	1,48	11,26	16,97	344,8	47,3	360,4	390,8	390,7	390,8
195	10,90	1,34	11,39	17,42	348,6	42,9	364,5	390,8	390,7	390,8
200	11,02	1,21	11,52	17,86	352,5	38,6	368,6	390,8	390,7	390,8
205	11,14	1,08	11,65	18,31	356,4	34,5	372,7	390,8	390,7	390,8
210	11,26	0,95	11,78	18,76	360,3	30,5	376,8	390,8	390,7	390,8
215	11,38	0,84	11,91	19,20	364,3	26,7	381,0	390,8	390,7	390,8
220	11,51	0,73	12,04	19,65	368,2	23,4	385,2	390,8	390,7	390,8
225	11,63	0,64	12,17	20,10	372,2	20,6	389,3	390,8	390,7	390,8
230	11,76	0,58	12,30	20,54	376,2	18,6	393,5	390,8	390,7	390,8

Desorekak B fasean, karga izarrean konektatuta, PF=1, karga-maila % 100.										
Transformadorearen primarioko parametroak										
V _n	I _{gen-A}	I _{gen-B}	I _{gen-C}	I _{gen-N}	V _{gen-AN}	V _{gen-BN}	V _{gen-CN}	U _{gen-AB}	U _{gen-BC}	U _{gen-CA}
0	14,04	13,94	14,03	0,1	228,6	228,6	228,6	395,9	396,0	395,9
5	15,13	13,27	13,68	3,4	231,0	223,7	231,2	395,9	396,0	395,9
10	16,22	12,67	13,40	6,7	233,5	218,7	233,8	395,9	396,0	395,9
15	17,32	12,13	13,22	10,0	236,1	213,8	236,6	395,9	396,0	395,9
20	18,41	11,67	13,12	13,3	238,8	208,9	239,4	395,9	396,0	395,9
25	19,51	11,30	13,12	16,6	241,5	203,9	242,2	395,9	396,0	395,9
30	20,61	11,04	13,21	19,9	244,3	199,0	245,2	395,9	396,0	395,9
35	21,71	10,87	13,40	23,3	247,2	194,1	248,2	395,9	396,0	395,9
40	22,81	10,82	13,66	26,6	250,1	189,1	251,2	395,9	396,0	395,9
45	23,91	10,88	14,02	29,9	253,1	184,2	254,3	395,9	396,0	395,9
50	25,01	11,06	14,44	33,2	256,2	179,3	257,5	395,9	396,0	395,9
55	26,11	11,33	14,94	36,5	259,3	174,3	260,8	395,9	396,0	395,9
60	27,21	11,71	15,50	39,8	262,4	169,4	264,0	395,9	396,0	395,9
65	28,32	12,17	16,12	43,2	265,7	164,5	267,4	395,9	396,0	395,9
70	29,42	12,71	16,78	46,5	268,9	159,5	270,8	395,9	396,0	395,9
75	30,52	13,33	17,50	49,8	272,3	154,6	274,2	395,9	396,0	395,9
80	31,62	14,00	18,25	53,1	275,6	149,7	277,7	395,9	396,0	395,9
85	32,73	14,73	19,03	56,4	279,1	144,7	281,2	395,9	396,0	395,9
90	33,83	15,50	19,85	59,7	282,5	139,8	284,7	395,9	396,0	395,9
95	34,93	16,30	20,69	63,0	286,0	134,9	288,3	395,9	396,0	395,9
100	36,04	17,14	21,56	66,4	289,6	130,0	292,0	395,9	396,0	395,9
105	37,14	18,01	22,44	69,7	293,2	125,0	295,6	395,9	396,0	395,9
110	38,24	18,91	23,35	73,0	296,8	120,1	299,4	395,9	396,0	395,9
115	39,35	19,82	24,27	76,3	300,5	115,2	303,1	395,9	396,0	395,9
120	40,45	20,76	25,21	79,6	304,2	110,2	306,9	395,9	396,0	395,9
125	41,55	21,71	26,16	82,9	307,9	105,3	310,7	395,9	396,0	395,9
130	42,66	22,67	27,12	86,2	311,7	100,4	314,5	395,9	396,0	395,9
135	43,76	23,65	28,09	89,6	315,5	95,4	318,4	395,9	396,0	395,9
140	44,87	24,64	29,08	92,9	319,3	90,5	322,3	395,9	396,0	395,9
145	45,97	25,63	30,07	96,2	323,2	85,6	326,3	395,9	396,0	395,9
150	47,07	26,64	31,06	99,5	327,0	80,6	330,2	395,9	396,0	395,9
155	48,18	27,65	32,07	102,8	331,0	75,7	334,2	395,9	396,0	395,9
160	49,28	28,67	33,08	106,1	334,9	70,8	338,2	395,9	396,0	395,9
165	50,39	29,69	34,10	109,5	338,9	65,9	342,2	395,9	396,0	395,9
170	51,49	30,73	35,12	112,8	342,9	60,9	346,3	395,9	396,0	395,9
175	52,60	31,76	36,15	116,1	346,9	56,0	350,4	395,9	396,0	395,9
180	53,70	32,80	37,18	119,4	350,9	51,1	354,5	395,9	396,0	395,9
185	54,81	33,85	38,22	122,7	355,0	46,2	358,6	395,9	396,0	395,9
190	55,91	34,89	39,26	126,0	359,1	41,3	362,8	395,9	396,0	395,9
195	57,02	35,95	40,30	129,3	363,2	36,4	366,9	395,9	396,0	395,9
200	58,12	37,00	41,35	132,7	367,3	31,5	371,1	395,9	396,0	395,9
205	59,22	38,06	42,40	136,0	371,5	26,6	375,3	395,9	396,0	395,9
210	60,33	39,12	43,45	139,3	375,6	21,7	379,5	395,9	396,0	395,9
215	61,43	40,18	44,50	142,6	379,8	16,9	383,7	395,9	396,0	395,9
220	62,54	41,24	45,56	145,9	384,0	12,2	388,0	395,9	396,0	395,9
225	63,64	42,31	46,62	149,2	388,3	7,7	392,3	395,9	396,0	395,9
230	64,75	43,38	47,68	152,5	392,5	4,3	396,5	395,9	396,0	395,9

Desorekak B fasean, karga izarrean konektatuta, PF=1, karga-maila % 100.										
Transformadorearen sekundarioko parametroak										
V _n	I _{karga-a}	I _{karga-b}	I _{karga-c}	I _{karga-n}	V _{karga-an}	V _{karga-bn}	V _{karga-cn}	U _{karga-ab}	U _{karga-bc}	U _{karga-ca}
0	13,83	13,83	13,83	0,00	221,3	221,3	221,3	383,4	383,3	383,3
5	13,96	13,54	14,00	0,88	223,4	216,7	224,0	383,4	383,3	383,3
10	14,10	13,25	14,17	1,75	225,5	212,0	226,7	383,4	383,3	383,3
15	14,24	12,96	14,34	2,63	227,8	207,4	229,5	383,4	383,3	383,3
20	14,38	12,67	14,52	3,51	230,0	202,7	232,4	383,4	383,3	383,3
25	14,53	12,38	14,71	4,38	232,4	198,0	235,3	383,4	383,3	383,3
30	14,68	12,09	14,89	5,26	234,8	193,4	238,3	383,4	383,3	383,3
35	14,83	11,80	15,08	6,14	237,3	188,7	241,3	383,4	383,3	383,4
40	14,99	11,50	15,27	7,01	239,9	184,1	244,4	383,4	383,3	383,4
45	15,16	11,21	15,47	7,89	242,5	179,4	247,5	383,4	383,3	383,4
50	15,33	10,92	15,67	8,77	245,2	174,8	250,7	383,4	383,3	383,4
55	15,50	10,63	15,87	9,64	247,9	170,1	253,9	383,4	383,3	383,4
60	15,67	10,34	16,08	10,52	250,8	165,5	257,2	383,4	383,3	383,4
65	15,85	10,05	16,28	11,40	253,6	160,8	260,5	383,4	383,3	383,4
70	16,03	9,76	16,49	12,27	256,5	156,2	263,9	383,4	383,3	383,4
75	16,22	9,47	16,71	13,15	259,5	151,5	267,3	383,4	383,3	383,4
80	16,41	9,18	16,92	14,03	262,5	146,9	270,7	383,4	383,3	383,4
85	16,60	8,89	17,14	14,90	265,6	142,2	274,2	383,4	383,3	383,4
90	16,79	8,60	17,36	15,78	268,7	137,6	277,7	383,4	383,3	383,4
95	16,99	8,31	17,58	16,66	271,8	132,9	281,2	383,4	383,3	383,4
100	17,19	8,02	17,80	17,53	275,0	128,3	284,8	383,4	383,3	383,4
105	17,39	7,73	18,03	18,41	278,2	123,7	288,4	383,4	383,3	383,4
110	17,60	7,44	18,25	19,29	281,5	119,0	292,0	383,4	383,3	383,4
115	17,80	7,15	18,48	20,16	284,8	114,4	295,7	383,4	383,3	383,4
120	18,01	6,86	18,71	21,04	288,2	109,8	299,4	383,4	383,3	383,4
125	18,22	6,57	18,95	21,92	291,6	105,2	303,1	383,4	383,3	383,4
130	18,44	6,29	19,18	22,79	295,0	100,6	306,9	383,4	383,3	383,4
135	18,65	6,00	19,41	23,67	298,5	96,0	310,6	383,4	383,3	383,4
140	18,87	5,71	19,65	24,55	302,0	91,4	314,4	383,4	383,3	383,4
145	19,09	5,42	19,89	25,42	305,5	86,8	318,2	383,4	383,3	383,4
150	19,32	5,14	20,13	26,30	309,0	82,2	322,1	383,5	383,3	383,4
155	19,54	4,85	20,37	27,18	312,6	77,6	326,0	383,5	383,3	383,4
160	19,77	4,57	20,61	28,05	316,2	73,1	329,8	383,5	383,3	383,4
165	19,99	4,28	20,86	28,93	319,9	68,6	333,7	383,5	383,3	383,4
170	20,22	4,00	21,10	29,81	323,6	64,0	337,7	383,5	383,3	383,4
175	20,45	3,72	21,35	30,68	327,2	59,5	341,6	383,5	383,3	383,4
180	20,69	3,44	21,60	31,56	331,0	55,1	345,6	383,5	383,3	383,5
185	20,92	3,17	21,85	32,44	334,7	50,7	349,5	383,5	383,3	383,5
190	21,15	2,89	22,10	33,31	338,5	46,3	353,5	383,5	383,3	383,5
195	21,39	2,62	22,35	34,19	342,3	42,0	357,6	383,5	383,3	383,5
200	21,63	2,36	22,60	35,07	346,1	37,8	361,6	383,5	383,3	383,5
205	21,87	2,10	22,85	35,94	349,9	33,7	365,6	383,5	383,3	383,5
210	22,11	1,86	23,11	36,82	353,7	29,7	369,7	383,5	383,3	383,5
215	22,35	1,63	23,36	37,70	357,6	26,1	373,8	383,5	383,3	383,5
220	22,59	1,42	23,61	38,57	361,5	22,7	377,8	383,5	383,3	383,5
225	22,84	1,25	23,87	39,45	365,4	20,0	381,9	383,5	383,3	383,5
230	23,08	1,13	24,13	40,33	369,3	18,0	386,1	383,5	383,3	383,5

Desorekak B fasean, karga triangeluan konektatuta, PF=1, karga-maila % 50.									
Transformadorearen primarioko parametroak									
V _n	I _{gen-A}	I _{gen-B}	I _{gen-C}	V _{gen-AN}	V _{gen-BN}	V _{gen-CN}	U _{gen-AB}	U _{gen-BC}	U _{gen-CA}
0	5,86	5,77	5,87	229,3	229,3	229,3	397,1	397,1	397,1
5	6,85	5,45	5,34	231,7	224,3	231,9	397,1	397,1	397,1
10	7,84	5,30	4,96	234,2	219,4	234,6	397,1	397,1	397,1
15	8,83	5,33	4,75	236,8	214,4	237,3	397,1	397,1	397,1
20	9,83	5,54	4,75	239,5	209,4	240,1	397,1	397,1	397,1
25	10,82	5,91	4,96	242,3	204,5	243,0	397,1	397,1	397,1
30	11,81	6,42	5,34	245,1	199,5	246,0	397,1	397,1	397,1
35	12,80	7,03	5,87	248,0	194,6	249,0	397,1	397,1	397,1
40	13,79	7,72	6,51	250,9	189,6	252,1	397,1	397,1	397,1
45	14,79	8,48	7,23	253,9	184,6	255,2	397,1	397,1	397,1
50	15,78	9,27	8,01	257,0	179,7	258,4	397,1	397,1	397,1
55	16,77	10,10	8,83	260,1	174,7	261,7	397,1	397,1	397,1
60	17,76	10,96	9,68	263,3	169,8	265,0	397,1	397,1	397,1
65	18,76	11,84	10,56	266,5	164,8	268,3	397,1	397,1	397,1
70	19,75	12,74	11,46	269,8	159,8	271,7	397,1	397,1	397,1
75	20,74	13,65	12,37	273,2	154,9	275,2	397,1	397,1	397,1
80	21,74	14,57	13,29	276,6	149,9	278,7	397,1	397,1	397,1
85	22,73	15,50	14,23	280,0	144,9	282,2	397,1	397,1	397,1
90	23,72	16,43	15,17	283,5	140,0	285,8	397,1	397,1	397,1
95	24,72	17,38	16,11	287,0	135,0	289,4	397,1	397,1	397,1
100	25,71	18,32	17,07	290,6	130,1	293,1	397,1	397,1	397,1
105	26,70	19,28	18,02	294,2	125,1	296,8	397,1	397,1	397,1
110	27,70	20,23	18,98	297,8	120,1	300,5	397,1	397,1	397,1
115	28,69	21,19	19,95	301,5	115,2	304,3	397,1	397,1	397,1
120	29,68	22,16	20,91	305,3	110,2	308,1	397,1	397,1	397,1
125	30,68	23,12	21,88	309,0	105,3	311,9	397,1	397,1	397,1
130	31,67	24,09	22,85	312,8	100,3	315,8	397,1	397,1	397,1
135	32,66	25,06	23,83	316,6	95,4	319,7	397,1	397,1	397,1
140	33,66	26,03	24,80	320,5	90,4	323,6	397,1	397,1	397,1
145	34,65	27,00	25,78	324,4	85,4	327,6	397,1	397,1	397,1
150	35,64	27,98	26,75	328,3	80,5	331,6	397,1	397,1	397,1
155	36,64	28,95	27,73	332,2	75,5	335,6	397,1	397,1	397,1
160	37,63	29,93	28,71	336,2	70,6	339,6	397,1	397,1	397,1
165	38,62	30,91	29,69	340,2	65,6	343,7	397,1	397,1	397,1
170	39,62	31,89	30,67	344,2	60,7	347,8	397,1	397,1	397,1
175	40,61	32,87	31,66	348,2	55,7	351,9	397,1	397,1	397,1
180	41,60	33,85	32,64	352,3	50,8	356,0	397,1	397,1	397,1
185	42,60	34,83	33,62	356,4	45,8	360,2	397,1	397,1	397,1
190	43,59	35,81	34,61	360,5	40,9	364,3	397,1	397,1	397,1
195	44,59	36,79	35,59	364,6	36,0	368,5	397,1	397,1	397,1
200	45,58	37,78	36,58	368,8	31,0	372,7	397,1	397,1	397,1
205	46,57	38,76	37,56	373,0	26,1	377,0	397,1	397,1	397,1
210	47,57	39,74	38,55	377,2	21,2	381,2	397,1	397,1	397,1
215	48,56	40,73	39,53	381,4	16,4	385,5	397,1	397,1	397,1
220	49,55	41,71	40,52	385,6	11,7	389,7	397,1	397,1	397,1
225	50,55	42,70	41,51	389,9	7,3	394,0	397,1	397,1	397,1
230	51,54	43,68	42,49	394,1	4,3	398,3	397,1	397,1	397,1

Desorekak B fasean, karga triangeluan konektatuta, PF=1, karga-maila % 50.									
Transformadorearen sekundarioko parametroak									
V _n	I _{karga-a}	I _{karga-b}	I _{karga-c}	V _{karga-an}	V _{karga-bn}	V _{karga-cn}	U _{karga-ab}	U _{karga-bc}	U _{karga-ca}
0	7,05	7,05	7,05	225,6	225,6	225,5	390,7	390,7	390,7
5	7,05	7,05	7,05	227,6	220,8	228,4	390,7	390,7	390,7
10	7,05	7,05	7,05	229,8	215,9	231,3	390,7	390,7	390,7
15	7,05	7,05	7,05	232,0	211,1	234,3	390,7	390,7	390,7
20	7,05	7,05	7,05	234,3	206,3	237,4	390,7	390,7	390,7
25	7,05	7,05	7,05	236,7	201,5	240,5	390,7	390,7	390,7
30	7,05	7,05	7,05	239,1	196,6	243,6	390,7	390,7	390,7
35	7,05	7,05	7,05	241,6	191,8	246,9	390,7	390,7	390,7
40	7,05	7,05	7,05	244,2	187,0	250,1	390,7	390,7	390,7
45	7,05	7,05	7,05	246,9	182,2	253,5	390,7	390,7	390,7
50	7,05	7,05	7,05	249,6	177,3	256,8	390,7	390,7	390,7
55	7,05	7,05	7,05	252,4	172,5	260,3	390,7	390,7	390,7
60	7,05	7,05	7,05	255,3	167,7	263,7	390,7	390,7	390,7
65	7,05	7,05	7,05	258,2	162,9	267,2	390,8	390,7	390,7
70	7,05	7,05	7,05	261,1	158,1	270,8	390,8	390,7	390,7
75	7,05	7,05	7,05	264,2	153,3	274,4	390,8	390,7	390,7
80	7,05	7,05	7,05	267,3	148,5	278,0	390,8	390,7	390,7
85	7,05	7,05	7,05	270,4	143,7	281,7	390,8	390,7	390,8
90	7,05	7,05	7,05	273,6	138,9	285,4	390,8	390,7	390,8
95	7,05	7,05	7,05	276,8	134,1	289,1	390,8	390,7	390,8
100	7,05	7,05	7,05	280,1	129,3	292,9	390,8	390,7	390,8
105	7,05	7,05	7,05	283,4	124,5	296,7	390,8	390,7	390,8
110	7,05	7,05	7,05	286,8	119,8	300,5	390,8	390,7	390,8
115	7,05	7,05	7,05	290,2	115,0	304,4	390,8	390,7	390,8
120	7,05	7,05	7,05	293,6	110,2	308,2	390,8	390,7	390,8
125	7,05	7,05	7,05	297,1	105,5	312,2	390,8	390,7	390,8
130	7,05	7,05	7,05	300,6	100,7	316,1	390,8	390,7	390,8
135	7,05	7,05	7,05	304,2	96,0	320,1	390,8	390,7	390,8
140	7,05	7,05	7,05	307,8	91,3	324,1	390,8	390,7	390,8
145	7,05	7,05	7,05	311,4	86,6	328,1	390,8	390,7	390,8
150	7,05	7,05	7,05	315,1	81,9	332,1	390,8	390,7	390,8
155	7,05	7,05	7,05	318,8	77,2	336,2	390,8	390,7	390,8
160	7,05	7,05	7,05	322,5	72,6	340,2	390,8	390,7	390,8
165	7,05	7,05	7,05	326,3	68,0	344,3	390,8	390,7	390,8
170	7,05	7,05	7,05	330,1	63,4	348,4	390,8	390,7	390,8
175	7,05	7,05	7,05	333,9	58,9	352,6	390,8	390,7	390,8
180	7,05	7,05	7,05	337,7	54,4	356,7	390,8	390,7	390,8
185	7,05	7,05	7,05	341,6	50,0	360,9	390,8	390,7	390,8
190	7,05	7,05	7,05	345,5	45,7	365,1	390,8	390,7	390,8
195	7,05	7,05	7,05	349,4	41,5	369,3	390,8	390,7	390,8
200	7,05	7,05	7,05	353,3	37,5	373,5	390,8	390,7	390,8
205	7,05	7,05	7,05	357,3	33,6	377,8	390,8	390,7	390,8
210	7,05	7,05	7,05	361,3	30,1	382,0	390,8	390,7	390,8
215	7,05	7,05	7,05	365,3	27,0	386,3	390,8	390,7	390,8
220	7,05	7,05	7,05	369,3	24,5	390,5	390,8	390,7	390,8
225	7,05	7,05	7,05	373,4	22,8	394,8	390,8	390,7	390,9
230	7,05	7,05	7,05	377,4	22,0	399,1	390,8	390,7	390,9

Desorekak B fasean, karga triangeluan konektatuta, PF=1, karga-maila % 100.									
Transformadorearen primarioako parametroak									
V _n	I _{gen-A}	I _{gen-B}	I _{gen-C}	V _{gen-AN}	V _{gen-BN}	V _{gen-CN}	U _{gen-AB}	U _{gen-BC}	U _{gen-CA}
0	14,03	13,94	14,03	228,6	228,6	228,6	395,9	396,0	395,9
5	15,02	13,55	13,49	231,0	223,6	231,2	395,9	396,0	395,9
10	16,02	13,23	12,99	233,6	218,7	233,9	395,9	396,0	395,9
15	17,01	12,98	12,56	236,2	213,7	236,6	395,9	396,0	395,9
20	18,00	12,80	12,19	238,8	208,8	239,4	395,9	396,0	395,9
25	18,99	12,69	11,89	241,6	203,8	242,3	395,9	396,0	395,9
30	19,98	12,66	11,67	244,4	198,8	245,3	395,9	396,0	395,9
35	20,97	12,71	11,53	247,3	193,9	248,3	395,9	396,0	395,9
40	21,96	12,83	11,47	250,2	188,9	251,4	395,9	396,0	395,9
45	22,96	13,03	11,51	253,2	184,0	254,5	395,9	396,0	395,9
50	23,95	13,30	11,62	256,3	179,0	257,7	395,9	396,0	395,9
55	24,94	13,64	11,82	259,5	174,0	261,0	395,9	396,0	395,9
60	25,93	14,04	12,10	262,6	169,1	264,3	395,9	396,0	395,9
65	26,93	14,50	12,45	265,9	164,1	267,6	395,9	396,0	395,9
70	27,92	15,01	12,87	269,2	159,2	271,0	395,9	396,0	395,9
75	28,91	15,56	13,35	272,5	154,2	274,5	395,9	396,0	395,9
80	29,90	16,16	13,88	275,9	149,2	278,0	395,9	396,0	395,9
85	30,90	16,80	14,47	279,4	144,3	281,5	395,9	396,0	395,9
90	31,89	17,46	15,09	282,8	139,3	285,1	395,9	396,0	395,9
95	32,88	18,16	15,76	286,4	134,3	288,8	395,9	396,0	395,9
100	33,88	18,89	16,45	289,9	129,4	292,4	395,9	396,0	395,9
105	34,87	19,64	17,18	293,6	124,4	296,1	395,9	396,0	395,9
110	35,86	20,40	17,93	297,2	119,5	299,9	395,9	396,0	395,9
115	36,85	21,19	18,70	300,9	114,5	303,6	395,9	396,0	395,9
120	37,85	22,00	19,50	304,6	109,5	307,4	395,9	396,0	395,9
125	38,84	22,82	20,31	308,4	104,6	311,3	395,9	396,0	395,9
130	39,83	23,65	21,14	312,2	99,6	315,2	395,9	396,0	395,9
135	40,83	24,49	21,98	316,0	94,7	319,1	395,9	396,0	395,9
140	41,82	25,35	22,83	319,9	89,7	323,0	395,9	396,0	395,9
145	42,81	26,21	23,70	323,8	84,8	327,0	395,9	396,0	395,9
150	43,81	27,09	24,57	327,7	79,8	330,9	395,9	396,0	395,9
155	44,80	27,97	25,45	331,6	74,8	335,0	395,9	396,0	395,9
160	45,79	28,86	26,34	335,6	69,9	339,0	395,9	396,0	395,9
165	46,79	29,75	27,24	339,6	64,9	343,1	395,9	396,0	395,9
170	47,78	30,65	28,14	343,6	60,0	347,1	395,9	396,0	395,9
175	48,77	31,56	29,05	347,6	55,0	351,3	395,9	396,0	395,9
180	49,77	32,47	29,97	351,7	50,1	355,4	395,9	396,0	395,9
185	50,76	33,39	30,89	355,8	45,1	359,5	395,9	396,0	395,9
190	51,75	34,31	31,81	359,9	40,2	363,7	395,9	396,0	395,9
195	52,75	35,23	32,74	364,1	35,3	367,9	395,9	396,0	395,9
200	53,74	36,16	33,68	368,2	30,4	372,1	395,9	396,0	395,9
205	54,73	37,09	34,61	372,4	25,5	376,3	395,9	396,0	395,9
210	55,73	38,03	35,55	376,6	20,6	380,6	395,9	396,0	395,9
215	56,72	38,97	36,49	380,8	15,7	384,8	395,9	396,0	395,9
220	57,71	39,91	37,44	385,0	11,0	389,1	395,9	396,0	395,9
225	58,71	40,85	38,38	389,3	6,7	393,4	395,9	396,0	395,9
230	59,70	41,80	39,33	393,6	4,2	397,7	395,9	396,0	395,9

Desorekak B fasean, karga triangeluan konektatuta, PF=1, karga-maila % 100.									
Transformadorearen sekundarioko parametroak									
V _n	I _{karga-a}	I _{karga-b}	I _{karga-c}	V _{karga-an}	V _{karga-bn}	V _{karga-cn}	U _{karga-ab}	U _{karga-bc}	U _{karga-ca}
0	13,83	13,83	13,83	221,4	221,3	221,3	383,4	383,3	383,3
5	13,83	13,83	13,83	223,3	216,5	224,2	383,4	383,3	383,3
10	13,83	13,83	13,83	225,4	211,7	227,2	383,4	383,3	383,3
15	13,83	13,83	13,83	227,5	206,9	230,3	383,4	383,3	383,3
20	13,83	13,83	13,83	229,8	202,1	233,4	383,4	383,3	383,3
25	13,83	13,83	13,83	232,1	197,2	236,5	383,4	383,3	383,4
30	13,83	13,83	13,83	234,5	192,4	239,8	383,4	383,3	383,4
35	13,83	13,83	13,83	236,9	187,6	243,1	383,4	383,3	383,4
40	13,83	13,83	13,83	239,5	182,8	246,4	383,4	383,3	383,4
45	13,83	13,83	13,83	242,1	178,0	249,8	383,4	383,3	383,4
50	13,83	13,83	13,83	244,8	173,2	253,2	383,4	383,3	383,4
55	13,83	13,83	13,83	247,5	168,4	256,7	383,4	383,3	383,4
60	13,84	13,83	13,83	250,3	163,6	260,2	383,4	383,3	383,4
65	13,84	13,83	13,83	253,2	158,8	263,8	383,4	383,3	383,4
70	13,84	13,83	13,83	256,1	154,0	267,4	383,4	383,3	383,4
75	13,84	13,83	13,83	259,1	149,2	271,0	383,4	383,3	383,4
80	13,84	13,83	13,83	262,1	144,4	274,7	383,4	383,3	383,4
85	13,84	13,83	13,83	265,2	139,7	278,4	383,4	383,3	383,4
90	13,84	13,83	13,83	268,4	134,9	282,2	383,4	383,3	383,4
95	13,84	13,83	13,83	271,6	130,1	286,0	383,4	383,3	383,4
100	13,84	13,83	13,83	274,8	125,4	289,8	383,4	383,3	383,4
105	13,84	13,83	13,83	278,1	120,6	293,6	383,4	383,3	383,4
110	13,84	13,83	13,83	281,5	115,9	297,5	383,4	383,3	383,4
115	13,84	13,83	13,83	284,9	111,2	301,4	383,4	383,3	383,4
120	13,84	13,83	13,83	288,3	106,4	305,4	383,4	383,3	383,4
125	13,84	13,83	13,83	291,8	101,7	309,3	383,4	383,3	383,4
130	13,84	13,83	13,83	295,3	97,0	313,3	383,4	383,3	383,4
135	13,84	13,83	13,83	298,8	92,4	317,3	383,4	383,3	383,4
140	13,84	13,83	13,83	302,4	87,7	321,3	383,4	383,3	383,4
145	13,84	13,83	13,83	306,0	83,1	325,4	383,4	383,3	383,4
150	13,84	13,83	13,83	309,6	78,5	329,5	383,4	383,3	383,4
155	13,84	13,83	13,83	313,3	73,9	333,6	383,4	383,3	383,4
160	13,84	13,83	13,83	317,0	69,3	337,7	383,4	383,3	383,4
165	13,84	13,83	13,83	320,8	64,8	341,8	383,4	383,3	383,4
170	13,84	13,83	13,83	324,5	60,4	346,0	383,4	383,3	383,5
175	13,84	13,83	13,83	328,3	56,0	350,2	383,4	383,3	383,5
180	13,84	13,83	13,83	332,2	51,7	354,3	383,4	383,3	383,5
185	13,84	13,83	13,83	336,0	47,6	358,6	383,4	383,3	383,5
190	13,84	13,83	13,83	339,9	43,5	362,8	383,4	383,3	383,5
195	13,84	13,83	13,83	343,8	39,7	367,0	383,4	383,3	383,5
200	13,84	13,83	13,83	347,7	36,1	371,3	383,4	383,3	383,5
205	13,84	13,83	13,83	351,7	32,8	375,5	383,4	383,3	383,5
210	13,84	13,83	13,83	355,7	29,9	379,8	383,4	383,3	383,5
215	13,84	13,83	13,83	359,7	27,6	384,1	383,4	383,3	383,5
220	13,84	13,83	13,83	363,7	26,1	388,4	383,4	383,3	383,5
225	13,84	13,83	13,83	367,7	25,3	392,7	383,4	383,3	383,5
230	13,84	13,83	13,83	371,8	25,5	397,1	383,4	383,3	383,5

II. Eranskina

TecnoTrafo 10 kVA 400/400 V - YNyn transformadorearen datasheet-a



TRANSFORMADOR TRIFÁSICO
10 kVA 400V-N / 400V-N ± 5% YNyn0
Ucc = 6,5% IP-23 rev 01

TT

APLICACIONES

- Transformador separador de circuitos.
Servicio continuo, instalación interior.
No apto para cortocircuitos por construcción.



NORMATIVA DE APLICACIÓN

- Normativa:

IEC 60076-11, Directiva 2014/35/UE

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

- Código de artículo:
- Tipo:
- Acabado:
- Potencia:
- Entrada de red:
- Tomas de regulación:
- Salida:

ESPECIAL
Seco.
Impregnación con barniz y tropicalizado contra humedad.
10 kVA

- Tomas de regulación:
- Intensidad nominal del secundario:
- Factor K:
- Grupo de conexión:
- Refrigeración:
- Frecuencia
- Clase de temperatura:
- Clase de aislamiento:
- Clase de bobinados:
- Nivel de aislamiento:
- Altitud máxima:
- Grado de protección:

3x400V+N (entre fases) con neutro accesible.
Sin tomas
3x400V+N (entre fases) con neutro accesible.
(en vacío 408,76 V y al 100% carga 389,29V)
± 5% (380V y 420 V).
15,19 A (380V); 14,43 A (400V); 13,75 A (420V)
(Thdl no tenido en cuenta)
YNyn0

- Protección contra choques eléctricos:
- Rendimiento a temp de funcionamiento:
- Corriente de magnetización [en k*In]:

ANAN (Air natural – air natural)
50/60 Hz.
H (I25K) y Ta=40°C.
H (I25K)
HC (200°C)
1.1kV tensión de prueba 4,5kV (1 min 50Hz)
1000 msnm
Envolvente IP-23 pintura epoxi (RAL 7035);
pasacables de poliamida, según UNE-60529.
Tratamiento para entorno C3H según ISO-12944
Clase I
94.07%
**<6.38xIn (Magneto mínimo entrada 32 A
Curva C o 16 A curva D).**
6.5 – 7.5

- Tensión de cortocircuito [%]:
- Accesorios:

- Cáncamos de elevación en el interior de la envolvente
477 x 390 x 500 x 280 x 350 (A x B x C x e x d).
77

- Medidas [mm]:
- Peso aprox. [kg]:

Garantía de dos años contra todo defecto de material y de fabricación. Esta garantía no incluye cualquier desperfecto o deterioro producido en el transformador por la inapropiada manipulación del mismo o por su uso en condiciones para las cuales no ha sido diseñado.

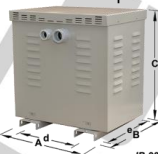


Figura similar

TECNOTRAFO
TECNOLÓGICA INDUSTRIAL, S.A.

José María Ariño
Departamento Técnico

VALORES DE DISEÑO:

Potencia (kVA)	Ip (A)	I _{s1} (a 400V-5%) (A)	I _{s2} (a 400V)(A)	I _{s3} (a 400V+5%)(A)
10	14,43	26,31	14,43	13,74

Temperatura: (en caliente)	ta (°C)	dTp(°C)	dTs(°C)
(40°C + 77,75°)	40	76,6	78,9

OTROS DATOS	
Calidad de la Chapa	M330-50A
Medidas del núcleo:	70x70x3RC
Peso del núcleo:	48 Kgr.
Peso Aluminio:	11,2 Kgr.
Inducción de trabajo en carga	1,25 T
Inducción de trabajo en vacío	1,289T
Intensidad pico en la energización:	5,96xIn
Regulación:	4,9%
Usec (100% carga):	391,61 V
Ucc (%) teórico cálculo	7,84%
Uccr (%) activa en 115°C	5,167%
Uccx (%) reactiva	-7,00%
Icc (kA)	0,20
Iccr(kA)	0,09
Iccx(kA)	-0,18
In vacío/ Inom	3,76 %
In vacío/ Inom activa	0,7 %
In vacío/ Inom reactiva	3,7 %

PRIMARIO	U	Espiras	N° Hilos en paralelo	Diámetro Hilo (mm)	Densidad corriente (A/mm ²)	Resistencia (por bobina)
	400 V	174	2	2,36	1,70	318 mΩ 321 mΩ 322 mΩ

SECUNDARIO	U	Espiras	N° Hilos en paralelo	Diámetro Hilo (mm)	Densidad corriente (A/mm ²)	Resistencia (por bobina)
	380 V	171	2	2,36		178 mΩ 178,5mΩ 177 mΩ
	400 V	180 (acumulado)	2	2,36	1,62	190 mΩ 192 mΩ 192 mΩ
	420 V	189 (acumulado)	2	2,36		203 mΩ 203,5 mΩ 201,5 mΩ

M330-50A nukleo ferromagnetikoaren *datasheet*-a

Typical data for SURA® M330-50A

1 (2)

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,07	27,7	0,05	0,13	0,34	1,64	6,55
0,2	0,09	0,19	36,4	0,20	0,49	1,36	5,71	22,7
0,3	0,18	0,34	42,4	0,43	1,06	2,84	11,7	47,8
0,4	0,28	0,51	47,8	0,71	1,78	4,77	19,7	82,9
0,5	0,41	0,70	52,9	1,04	2,65	7,18	30,1	130
0,6	0,55	0,93	58,3	1,42	3,66	10,1	43,1	194
0,7	0,71	1,20	64,1	1,84	4,83	13,6	59,2	281
0,8	0,89	1,50	71,0	2,32	6,17	17,7	78,2	392
0,9	1,08	1,86	79,7	2,85	7,69	22,5	103	529
1,0	1,29	2,30	91,8	3,43	9,42	28,1	132	697
1,1	1,53	2,86	110	4,08	11,4	34,6	166	
1,2	1,81	3,65	140	4,81	13,6	42,0		
1,3	2,12	5,00	205	5,63	16,0	50,2		
1,4	2,56	8,27	399	6,60	18,7	59,3		
1,5	3,03	19,9	1097	7,71	21,8	69,6		
1,6	3,49	54,7	2925					
1,7	3,84	124	6118					
1,8	4,15	239	10828					

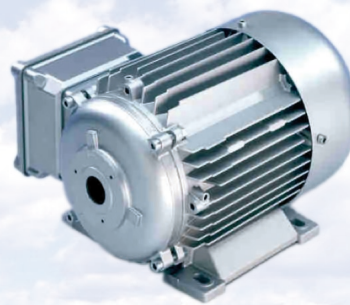
Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg 3,03
 Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg 1,29
 Anisotropy of loss, % 10

Magnetic polarization at 50 Hz
 H = 2500 A/m, T 1,57
 H = 5000 A/m, T 1,66
 H = 10000 A/m, T 1,77

Coercivity (DC), A/m 40
 Relative permeability at 1.5 T 1050
 Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$ 42

Yield strength, N/mm² 315
 Tensile strength, N/mm² 455
 Young's modulus, RD, N/mm² 200 000
 Young's modulus, TD, N/mm² 210 000
 Hardness HV5 (VPN) 155

*RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher*



Dec 2009

T	W/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	A/m at 100 Hz	A/m at 200 Hz	A/m at 400 Hz	A/m at 1000 Hz	A/m at 2500 Hz
0,1	0,03	27,7	27,9	28,8	34,0	54,7	83
0,2	0,09	36,4	39,0	43,7	54,7	89,3	139
0,3	0,18	42,4	47,4	55,4	71,4	118	194
0,4	0,28	47,8	54,7	66,0	86,8	149	258
0,5	0,41	52,9	61,6	76,2	103	184	336
0,6	0,55	58,3	68,6	86,8	121	225	427
0,7	0,71	64,1	75,8	98,3	141	270	536
0,8	0,89	71,0	83,4	111	163	322	663
0,9	1,08	79,7	91,8	124	187	380	808
1,0	1,29	91,8	101	139	215	447	969
1,1	1,53	110	115	155	246	522	1147
1,2	1,81	140	145	173	280		
1,3	2,12	205	209	210	319		
1,4	2,56	399	404	397	398		
1,5	3,03	1097	1093	1066	1070		
1,6	3,49	2925					
1,7	3,84	6118					
1,8	4,15	10828					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,03
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,29
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,77

Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	315
Tensile strength, N/mm ²	455
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	155

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher

