



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Elementu pasiboen eragina
frekuentzia altuko bihurtailuetan,**

*Asier Arruti, Jon Anzola,
Iosu Aizpuru eta Mikel Mazuela*

33-39 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.04>



Elementu pasiboen eragina frekuentzia altuko bihurgailuetan

Arruti, A., Anzola, J., Aizpuru, I., Mazuela, M.

Mondragon Unibertsitatea, Elektronika Departamendua. Loramendi Kalea 4, 20500
Arrasate-Mondragón(Gipuzkoa)
aarruti@mondragon.edu

Laburpena

Azkeneko urteetan hainbat aurrerapen nabarmen egin dira potentzia elektronikaren eremuan, adibidez SiC-en eta GaN-en oinarritutako transistoreak. Halere, teknologia berri hauetan oinarritutako potentzia bihurgailuak ezin ditugu beren mugetaraino eraman, frekuentzia altuetan elementu pasiboak sistemaren botila-lepoa bihurtzen direlako. Lan honetan, elementu pasiboek frekuentzia altuko bihurgailuetan duten eragina aztertzen dugu, bereziki elementu magnetikoak. Diseinu klasikoetan kontsideratzen ez diren hainbat efektu azaltzen dira, eta frekuentzia alturako egokitua dagoen diseinu estrategia baten beharra adierazten da. Aldi berean, diseinurako estrategia mota ezberdinak era laburrean azaldu ditugu. Azkenik, bihurgailuen helburu anitzeko diseinu metodologiaren garrantzia azaldu dugu.

Hitz gakoak: Potentzia elektronika, Frekuentzia altuko induktoreak, Frekuentzia altuko transformadoreak, Ihes induktantzia, Helburu anitzeko optimizazioa

Abstract

Notable technological advancements in power electronics have been made in the last years, such as SiC and GaN based transistors. Still, power converters based on these technologies cannot be fully exploited due to passive elements becoming the design bottlenecks at high frequencies. This work analyses the impact of passive components in high frequency power converters, mostly focused in magnetic elements. The necessity of an adequate high frequency design methodology is proved by demonstrating various high frequency effects that are not considered in classical design methodologies. At the same time, a short explanation of different design strategies is made. Lastly, the authors explain the importance of adopting a multi-objective based design methodology for power converters.

Keywords: Power electronics, High-frequency inductors, High-frequency transformers, Leakage inductance, Multi-objective optimization

1. Sarrera eta motibazioa

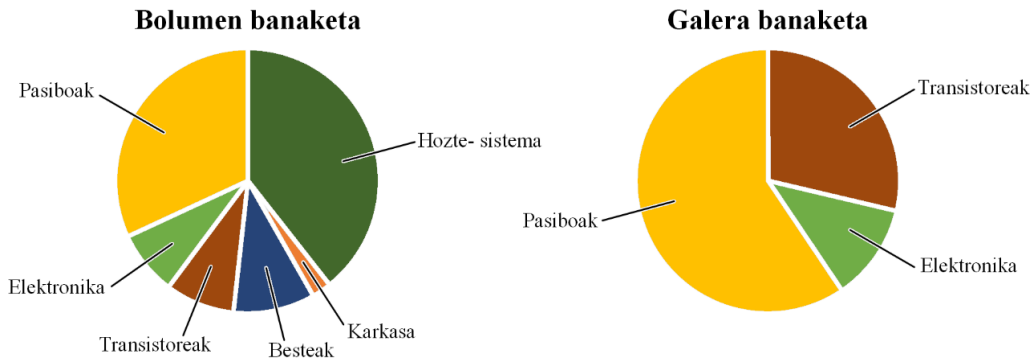
Gaur egungo gizarteak hainbat arazori aurre egin behar dio, eta horietako bat karbono dioxido (CO₂) gasek sortutako kutsadura da. Hainbat aurrerapauso egin dira CO₂ emisioak murrizteko, adibidez energia iturri berriztagarrien alde apustua egitea, baina horretaz gain energia kontsumoa murriztea beharrezkoa da. Energia elektrikoaren sareak hainbat potentzia galera sortzen ditu, izan ere hainbat potentzia bihurgailu behar dira tentsio maila egokitzeko. Etxetresna elektriko gehienek bihurgailu bat edo gehiagoren beharra dute ondo funtzionatzeko, eta elektrizitatea sortu eta kontsumitu tartean hainbat potentzia bihurgailutik pasa behar du, potentzia galerak sortuz. Honi aurre egiteko bihurgailuen efizientzia hobetu behar da, sortutako potentzia galerak murrizteko.

Horrekin batera, industriak berezko beharrak ditu, hauen artean bihurgailuen efizientzia hobetzea eta tamaina murriztea. Ibilgailu elektrikoa eredu garbi bat da, non argi dagoen efizientzia altua beharrezkoa dela autonomia maila ona izateko, eta aldi berean bihurgailuen tamaina murrizteak hauen produkzio kosteak murrizten ditu. Beste eredu bat ordenagailu eramangarriak dira, non kargagailua geroz eta txikiagoa eta arinagoa izan hobeto (puntu batean ordenagailu barnean integratu ahalko dira, hainbat monitoreekin egiten den bezala).

Aldi berean, azken urteetan elektronika mailan hainbat aurrerapen egin dira. Aurrerapen nagusietako bat potentzia transistoreen arloan etorri da. Silizio karburoan (SiC) eta galio nitruroan (GaN) oinarrituriko transistoreek abantaila handiak ekarri dituzte siliziozko (Si) gailuen aldean. Hauen artean, deigarrienak beraien konmutazioarako propietateak dira; askoz ere bizkorrago eta galera gutxiagorekin aldatu dezaketelako konmutazio egoera.

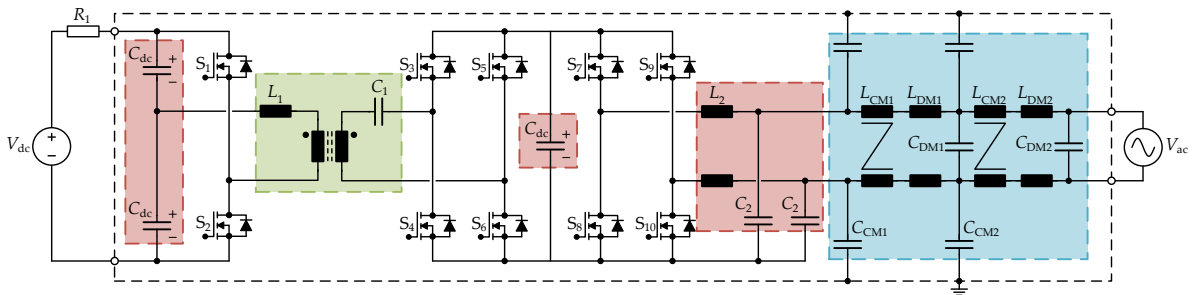
Teknologia berri honen potentziala dagoeneko egiaztatu da. Hainbat bihurgailuren diseinuetan Si-n oinarrituriko bihurgailuak baino efizientzia eta potentzia dentsitate altuagoak lortu baitira. Eredu nabarienen artean, GaN-ean oinarritutako ordenagailuetarako potentzia elikadura sistemak (CORSAIR AX1600i) edota Googlek antolatutako ‘Little Box Challenge’ txapelketa dira. Lehiaketa honetan ikerketa talde ezberdinek egungo inbertsoreak baino 10 aldiz txikiagoa zen bihurgailu bat diseinatu behar zuten. Kasu guztietan bihurgailuaren hobekuntzak lan frekuentziaren igoera nabarmen baten bitartez eskuratu ziren.

1. irudia. ‘Little Box Challenge’ inbertsore baten galera eta bolumen banaketa. (Kolar et al., 2016) datuetan oinarritua.



Hala ere, frekuentzia igotzea ez da gauza simplea, izan ere lehen aipatutako ‘Little Box Challenge’ txapelketaren diseinu karga handiena elementu pasiboetan (induktoreak, transformadoreak eta kapazitateak) eta hozte-sisteman zeuden. Gainera, 1. irudia ikusita, antzeman daiteke (Kolar et al., 2016) autoreek diseinatutako bihurgailuko elementu pasiboak galeren erdia baino gehiago eta bolumenaren herena direla. Elementu pasiboak transistoreak bezain garrantzitsuak dira edozein potentzia bihurgailuan, 2. irudian ikusi daitekeen bezala bihurgailuaren funtzionamendua ahalbidetzeko elementu magnetiko eta kapazitibo asko behar dira; filtroak, busak, transformadoreak eta abar. Baina transistoreak ez bezala, elementu pasiboek ez dute aurrerapen teknologiko nabarmen handirik izan azkeneko mendean, eta gaur egun frekuentzia altuko bihurgailuen diseinuan oztopo nagusienetako bat dira.

2. irudia. Bihurgailu bateko elementu pasiboak.



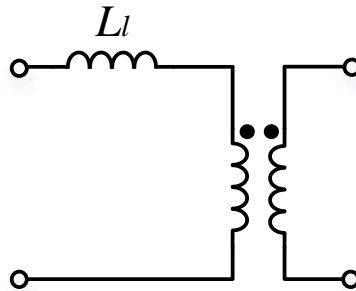
2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Azkeneko urteetan ikerketa asko bultzatu dira gai honen inguruan, batez ere elementu magnetikoen inguruan. Argi dago etorkizuneko bihurgailuek frekuentzia eremu altuetara joko dutela SiC eta GaN transistoreen abantailak aprobetxatzeko, eta ikerlari askok 20 kHz baino gehiagori frekuentzia altua deitzen dioten arren, beste batzuk hasi dira 100 kHz eremua frekuentzia ertaina kontsideratzen (Guillod et al., 2018).

Ikerketa esparru gehiena transformadoreetara zuzenduta dago, bereziki ihes induktantziaren kalkuluan eta diseinuan. Frekuentzia baxuetan, ihes induktantzia (ikusita 3. irudia) transformadorearen elementu parasito bezala kontsideratu da, non honen efektua desegokia da bihurgailuaren funtzionamendu egokirako. Halere, frekuentzia altuetan ihes induktantziak onurak ekarri ditzake, hala nola induktoreak transformadorean integratu ahal izatea. (Ouyang et al., 2019) publikazioan autoreek transformadore planarren ihes induktantzia kalkulatzeko modelo zehatzago bat proposatzen dute, eta

(Schlesinger eta Biela, 2021) publikazioan ihes inдукtantzia kalkulatzeko metodoen zehaztasunaren eta koste konputazionalaren alderaketa egiten da.

3. irudia. Transformadorearen ihes inдукtantzia parasittoa (L_l).



Bestalde, ikertutako beste puntu nagusienetako bat elementu magnetikoen diseinua da. Frekuentzia baxuetan elementu hauen diseinua prozesu sinplea da, baina frekuentzia altuetara jotzean beste hainbat fenomeno eraginak kontuan hartu behar dira, eta lan oso konplexua bilakatzen da. Horregatik, diseinurako estrategia ezberdinak garatzen hasi dira; (Garcia-Bediaga et al., 2017) eta (Zhang et al., 2018) autoreek algoritmo genetikoetan oinarritutako estrategiak garatzen dituzte, (Guillod et al., 2018) publikazioan diseinuko metodologia ezberdinen eragina alderatzen dute, (Zhengzhihong et al., 2018) autoreek isolamenduak diseinuan duen eragina aztertzen dute, (Mogorovic eta Dujic, 2019) publikazioan parametro ezberdinek diseinuan duten eragina aztertzen dute, eta (Langlois et al., 2020) autoreek material berrietan oinarritutako diseinua aurkezten dute.

Testuinguru honetan, frekuentzia altuko elementu pasiboek bihurtuak duten eraginaren analisi sakon bat egitea proposatzen dugu, azterketa SiC eta GaN transistoreetako frekuentzia altuko bihurtuak zuzenduz. Horretaz gain, aplikazio hauentzat helburu anitzeko diseinu estrategia bat proposatzen dugu, sistemaren optimizazio globala eskuratzeko optimo lokaletan oinarritu beharrean.

3. Ikerketaren muina

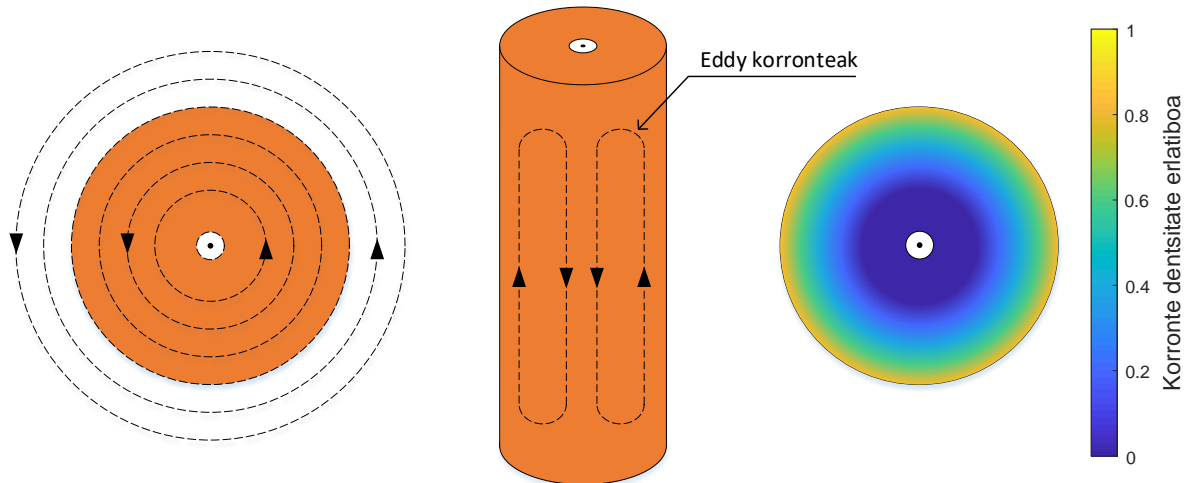
Atal honetan ikerketako ideia nagusiak era laburrean adierazten ditugu. Lehenik, frekuentzia altuak elementu magnetiko pasiboetan duen eragina aztertuko dugu. Ondoren, lehen puntuko kontzeptuetan oinarritutako elementu magnetiko pasiboak diseinatzeko estrategia ezberdinak aurkeztuko ditugu. Azkenik, frekuentzia altuko bihurtuak zuzenduz helburu anitzeko diseinua jorratuko dugu.

3.1. Frekuentzia altuen eragina elementu magnetikoetan

Frekuentzia altuan frekuentzia baxuan nabarmenak ez diren hainbat fenomeno agertzen dira, eta hauek eragin zuzena dute konponente pasibo magnetikoen funtzionamenduan. Artikulu honetan bi fenomeno nabarmen aipatuko ditugu, frekuentzia altuko harilkatuaren galerak eta elementu parasitoetan duen eragina.

Edozein elementu magnetikok harilkatuaren beharra du indar magnetiko eragilea sortzeko. Harilkatua egiteko eroale bat erabiltzea beharrezkoa da, eta frekuentzia baxuetan eroalearen barneko korrante distribuzioa guztiz erregularra den arren, frekuentzia altuetan Eddy korranteak indutzen direla eta, korrantearen distribuzioa nabarmenki aldatzen da. 4. irudian ikusi daitekeen bezala, Eddy korranteek eroalearen erdigunea okupatzen dute, eta beraz elektrizitate gehiena ertzetara desplazatzen da, eroalearen azalera erabilgarria txikituz eta potentzia galerak handituz. Distribuzio hau bi fenomenok eragiten dute, gainazal efektuak (eroaleak berak daraman korranteak sortutako eremu magnetikoak eraginda, 'skin effect') eta hurbiltasun efektuak (inguruko beste eroaleek daramatzaten korranteek sortutako eremu magnetikoek eraginda, 'proximity effect').

4. irudia. Gainazal efektuaren eragina eroale baten korronte distribuzioan.

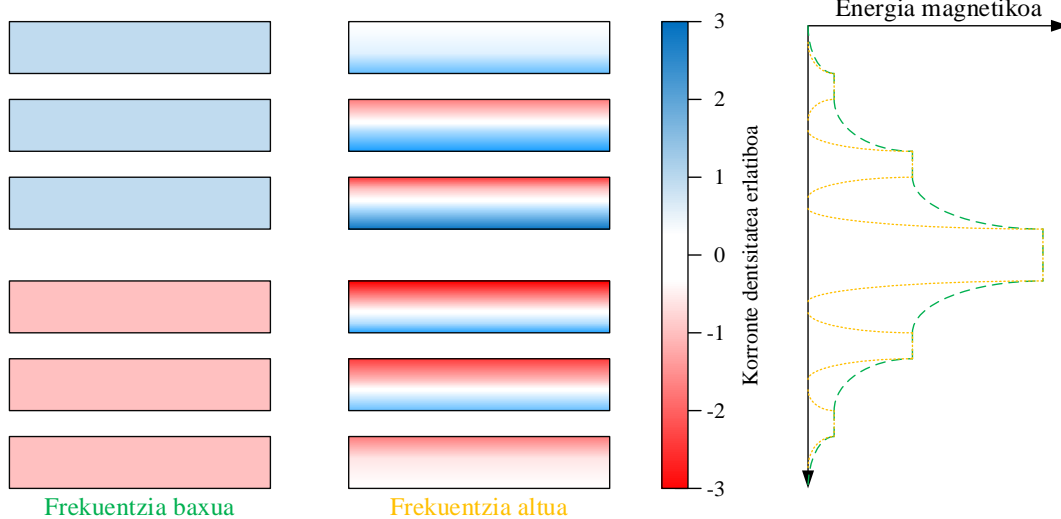


(Dowell, 1966) artikuluan korronte distribuzioaren ebazpen analitikoak aurkezten da Maxwellen ekuazioetan oinarrituta, baina ebazpen honetan hainbat hipotesi eta sinplifikazio erabiltzen dira, eta hauek ez dira aplikagarriak hainbat diseinutan; adibidez ‘foil’ edo ‘litz’ hariak erabiltzen direnean. Kasu hauetan korrontearen distribuzioa ebazteko modelo analitikoak erabili beharrean elementu finitoetan oinarritutako metodologiak aproposagoak dira. Hala ere, metodologia hauek ez dira erabat aplikagarriak diseinuko faseetan (non modelo sinpleagoak eta kalkulu bizkorragoak nahiago diren), eta balidazio bezala erabiltzen dira gehienetan.

Bestalde, frekuentzia altuak eragin zuzena izan dezake elementu parasitoetan, non eredu garbiena lehen aipaturiko ihes inductantzia den. Induktantzia hau harilkatuan zehar gordetako energia magnetikoan oinarritzen da, eta beraz harilkatuko korrontearekin zuzenki lotua dago. Frekuentzia altuetan, harilkatuko korronte distribuzioa aldatzen denez, metatutako energia magnetikoa murriztu egiten da eta horrek ihes inductantziaren balioa jaisten du, (Ouyang et al., 2019) artikulua frogatzen duen bezala. Adibide bezala, ikusi 5. irudia, non goiko eta beheko laukizuzenek (urdinak eta gorriak) transformadore baten lehen eta bigarren harilkatuak irudikatzen dituzte. Frekuentzia baxuan eroaleen barneko korrontearen distribuzioa guztiz erregularra da, baina frekuentzia altuan hurbiltasun efektuak korrontearen distribuzioa guztiz aldatzen du, metatutako energia magnetikoa murriztuz.

5. irudia. Frekuentziaren eragina harilkatuko energia magnetikoan.

Harilkatuko korronte distribuzioa



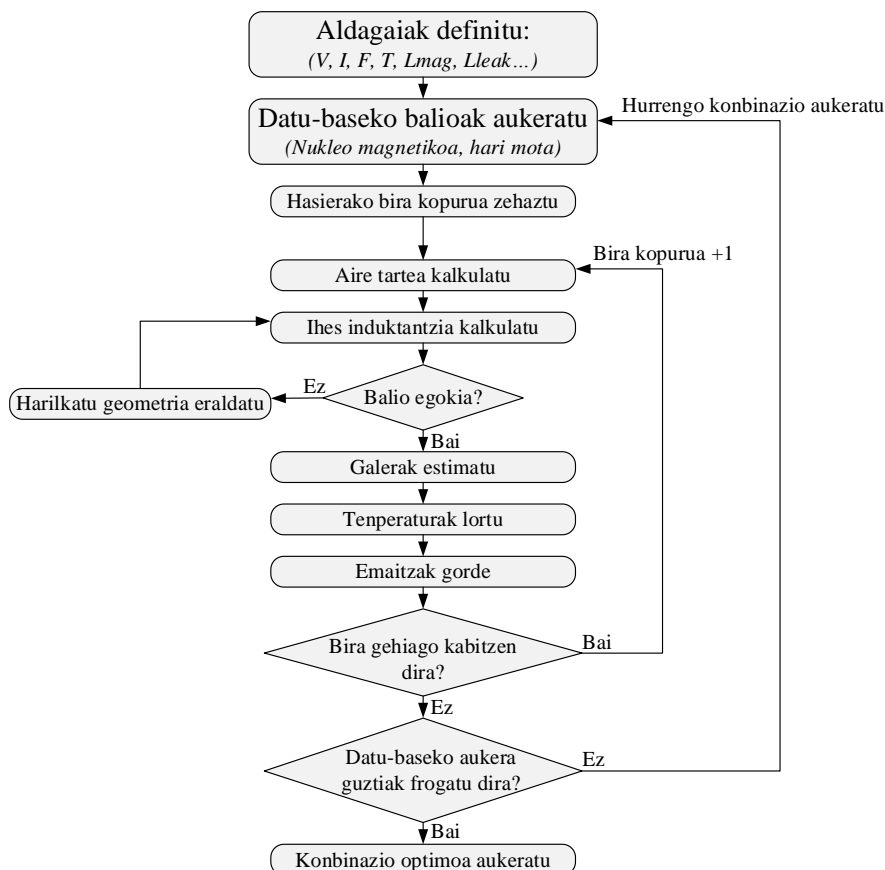
3.2. Frekuentzia altuko elementu magnetikoen diseinua

Elementu magnetiko baten diseinua, lan frekuentziaren igoerarekin konplikatzen da eta sarreran aipatu den bezala, frekuentzia altuetara jotzeak bihurgailuarentzat onura asko ekar ditzake. Horregatik frekuentzia altuetarako aproposak diren elementu magnetikoen diseinuan arreta handia jarri da, 3 estrategia bereiziz:

- 1) **Optimizazio analitikoan oinarrituak:** minimoen eta maximoen optimizazio metodo klasikoan oinarritzen dira diseinuko parametro aproposak aurkitzeko. Optimizazio hau era analitikoan eta koste konputazional baxuarekin egin daiteke. Sinplea eta bizkorra izan daiteke, baina arazoak izan ditzake arazo konplexuagoak ebazteko.
- 2) **Ikasketa automatikoan oinarrituak:** algoritmo berezi batzuk entrenatzen dira arazo konplexuak ebazteko. Algoritmoak aldagai ezberdinen arteko erlazio ezberdinak frogatzen ditu, erlazio egokiak aurkitu arte. Sistema hauek hasiera batean aztertzen ez diren efektuak kontsideratu ditzakete, eta automatikoki egokitu daitezke arazo ezberdinetara. Hala ere, algoritmoek aurkitzen dituzten erlazioak ez dira beti baliagarriak hasierako arazoa hobeto ulertzeko, eta horregatik algoritmo hauek kaja beltz bezala kontsideratu behar dira.
- 3) **Bilaketa sakonean oinarrituak:** ekuazio analitikoetan oinarritzen dira, eta konbinazio asko banaka frogatzen dituzte egokienak aurkitzeko. Horregatik koste konputazional oso altua dute, baina aukera hobereana aurkitzeaz gain, begi-bistaz antzeman ez daitekeen informazio interesgarri gehiago eman dezakete. Aldi berean, baliabide asko xahutzen dituzte soluzio egokiak ez diren konbinazioak aztertzen, eta horregatik soluzio egokia aurkitzeko beste metodoak baino denbora askoz gehiago behar dute.

Artikulu honetan azkeneko taldean zentratuko gara, izan ere 1) estrategia ez da oso egokia azertu nahi dugun kasuen konplexutasuna eta malgutasuna dela eta, eta 2) strategiako kaja beltz metodoak jakintza garatzeko aukera murrizten digu.

6. irudia. Bilaketa sakonean oinarritutako diseinu algoritmoa.



Bilaketa sakonean oinarritutako estrategia ezberdinak aurkitu daitezkeen arren, gehiengoan 6. irudian erakusten den algoritmo estruktura jarraitzen da, non datu-base bateko aukera ezberdinentzako harilkatuko bira kopuru ezberdinak frogatzen diren, eta aukera guztien arteko aproposena hautatzen den. Gainera, algoritmo hauek oso flexibleak dira eta era errazean alderatu ditzakegu etorkizunean beste efektu batzuk kontsideratu nahi baditugu.

3.3. Helburu anitzeko diseinua

Azkenik, lan honen helburuetako bat helburu anitzetan oinarritutako SiC edo GaN transistoreko bihurtuuntzako diseinu prozedura bat garatzea da. Bihurgailu bat diseinatzean garrantzia gehiena transistoreei ematen zaie, eta elementu pasiboak diseinuko bigarren fase batean aukeratu dira. Artikuluaren sarreran aipatu dugun bezala, elementu pasiboak frekuentzia altuko bihurtuuntetan transistoreak baino kritikoagoak izan daitezke, eta horregatik transistoreekin batera diseinuko lehenengo fasean kontuan hartu beharko genituzke.

Horregatik, frekuentzia alturako egokiak diren elementu pasiboak diseinatzeaz gain, garrantzitsua da bihurtuuntaren diseinua helburu anitzetan oinarritzea. Transistoreak eta elementu pasiboen diseinuak fase ezberdinetan eginda, sistemaren optimizazioa elementu ezberdinak banaka optimizatuz egiten da, baina ez dugu zertan sistemaren optimo globala eskuratuko. Helburu anitzen bitartez, diseinu optimo lokalak saihestu daitezke eta sistemaren optimo globala eskuratu.

4. Ondorioak

Artikulu zehar frekuentzia altuko potentzia bihurtuuntetarako elementu pasiboak kritikoak direla azaldu dugu. Argi dago elementu pasiboen frekuentzia altuko funtzionamendu eta diseinu teknikak hobetu behar direla SiC eta GaN transistoreak ahalbidetzen duten aurrerapauso teknologikoa gauzatzeko. Frekuentzia baxuko diseinu teknikak ez dira baliagarriak frekuentzia altuko efektuak direla eta, eta efektu hauek modelatzen dituzten metodo analitikoak aztertu behar ditugu diseinu metodologia apropos bat sortzeko.

Horretaz gain, frekuentzia altuko bihurtuuntaren diseinuan elementu pasiboei garrantzia gehiago ematea beharrezkoa da, diseinuko lehenengo fasean kontsideratuz transistoreekin batera. Ez bada honela, bihurtuuntaren diseinua optimo lokaletan tratatuko da, eta ez dira teknologia berriek aurkeztu dituzten abantaila guztiak aprobetxatuko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Artikulu honetan frekuentzia altuko elementu pasibo magnetikoen gaur egungo arazo nagusiak aurkeztu ditugu eta helburu anitzeko diseinu metodologia bat garatzearen garrantzia zehaztu dugu. Hala ere, oraindik frekuentzia altuko beste hainbat efektu kontsideratu behar ditugu diseinu estrategia sendo bat garatzeko, eta horretaz gain elementu pasibo kapazitiboen analisi sakon bat ere egin behar dugu. Horregatik, etorkizunerako beste efektu hauek aztertuko ditugu eta prototipo ezberdinen bitartez diseinurako erabilgarriak diren modelo analitikoak balioztatuko ditugu. Ondoren, azterketa hauetatik eskuratzen diren aurkipenak helburu anitzeko frekuentzia altuko bihurtuunt diseinu estrategia batean integratuko ditugu. Amaitzeko, diseinu strategiaren bitartez bihurtuunt prototipo bat egingo dugu egokia dela ziurtatzeko.

6. Erreferentziak

Dowell, P. L. (1966) 'Effects of eddy currents in transformer windings', *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(8), p. 1387. doi: 10.1049/piee.1966.0236.

Garcia-Bediaga, A. et al. (2017) 'Multiobjective optimization of medium-frequency transformers for isolated soft-switching converters using a genetic algorithm', *IEEE Transactions on Power Electronics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2995–3006. doi: 10.1109/TPEL.2016.2574499.

Guillod, T. et al. (2018) 'Magnetic equivalent circuit of MF transformers: modeling and parameter uncertainties', *Electrical Engineering*, 100(4). doi: 10.1007/s00202-018-0701-0.

Kolar, J. W. et al. (2016) 'GOOGLE/IEEE Little-Box Challenge', Eskuragarri: www.pes.ee.ethz.ch.

- Langlois, E. et al. (2020) 'Design and Evaluation of Nano-Composite Core Inductors for Efficiency Improvement in High-Frequency Power Converters', *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2020-March, pp. 2676–2679. doi: 10.1109/APEC39645.2020.9123995.
- Mogorovic, M. eta Dujic, D. (2019) 'Sensitivity Analysis of Medium-Frequency Transformer Designs for Solid-State Transformers', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), pp. 8356–8367. doi: 10.1109/TPEL.2018.2883390.
- Ouyang, Z. et al. (2019) 'Improved Analysis and Modeling of Leakage Inductance for Planar Transformers', *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(4). doi: 10.1109/JESTPE.2018.2871968.
- Schlesinger, R. eta Biela, J. (2021) 'Comparison of Analytical Models of Transformer Leakage Inductance: Accuracy Versus Computational Effort', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(1), pp. 146–156. doi: 10.1109/TPEL.2020.3001056.
- Zhang, K. et al. (2018) 'Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm', *Proceedings - 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, PEAC 2018*, (1), pp. 1–5. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371.
- Zhengzhihong et al. (2018) 'Study on Insulation Design of High Power High Frequency High Voltage Transformer', *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2018 - Proceedings*. doi: 10.1109/EI2.2018.8582317.