



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

**Interferentzia
elektromagnetikoaren azterketa
potentzia-elektronikako
sistemetan Si-WBG trantsizio
teknologikoaren testuinguruan**

Javier Oyarzun eta losu Aizpuru

73-80 or.

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



Interferentzia elektromagnetikoaren azterketa potentzia-elektronikako sistemetan Si-WBG trantsizio teknologikoaren testuinguruan

Oyarzun, J.¹, Aizpuru, I.¹

Mondragón Unibertsitatea, Loramendi kalea 4, 20500, Arrasate-Mondragón (Gipuzkoa)
joyarzun@mondragon.edu

Laburpena

Ikerketa honek potentzia-elektronikako sistemetan sortzen den interferentzia elektromagnetikoa (EMI, *Electromagnetic Interference*) aztertu du, baita silizioan oinarritutako gailuetatik banda zabaleko erdieroaleetan (WBG, *Wide Band Gap*) oinarritutako gailuetara igarotzeak duen eragina ere. Helburua EMIaren sorkuntzan eta hedapenean eragiten duten parametroak identifikatzea izan da. Saiakuntza-banku bat diseinatu da parametro hauen aldakortasunak denbora- zein maiztasun-eremuko seinaleetan duen efektua aztertu ahal izateko. Lortutako emaitzekin elektronika-diseinatzaileei potentzia-bihurgailuen diseinurako tresna bat eman nahi zaie; horren bitartez, energia-efizientzia maximoa lortzen saiatzeaz gain, EMI-sorkuntzaren eta bateragarritasun elektromagnetikoko (EMC, *Electromagnetic Compatibility*) araudiaren betekizunei erreparatu ahal izango diete.

Hitz gakoak: potentzia-bihurgailua, banda zabaleko erdieroaleak (WBG), interferentzia elektromagnetikoa (EMI), bateragarritasun elektromagnetikoa (EMC), gidatutako EMIA, erradiatutako EMIA.

Abstract

This research project has analysed the effect of electromagnetic interference (EMI) on power electronics systems, as well as the effect of the transition from silicon-based devices to WBG-based devices. The main goal has been to identify the parameters that have an impact on EMI generation and propagation. A test bench has been designed to analyse the effect of varying these parameters on the main signals (currents and voltages) in the time and frequency domain. The results obtained are intended to provide the electronic designers with a tool to ensure that their designs comply with EMC regulations, as well as maximising energy efficiency.

Keywords: power converter, WBG, electromagnetic interference (EMI), electromagnetic compatibility (EMC), conducted EMI, radiated EMI.

1. Sarrera eta motibazioa

Elektronika gure inguruko enpresentzat giltzarri bihurtu da hainbat arlo estrategikotan, hala nola energia, trenbide-arloa edota mugikortasun elektrikoa. Elektronikaren lan-esparruaren barruan potentzia-elektronikako sistemen erabilera ugaria da etxeetako kontsumo-elektronikan zein industria-aplikazioetan. Sistema hauek konmutazioan lan egiten duten erdieroaleak dituzte, aplikazioaren ezaugarrien arabera aukeratzen direnak. Energia-efizientzia maximizatzea aplikazio hauen guztien helburu komuna da.

Silizioan oinarritutako sistemak nagusi izan dira azken hamarkadetan, baina bere lan-ezaugarrien goi-mugara iristear daude aplikazioen konplexutasuna eta efizientzia-maila handitzearekin batera. Horren ondorioz, behar berriei aurre egin ahal dieten materialen inguruko ikerketa eta garapena etorri da. Behar hauen artean daude, besteak beste, tenperatura, konmutazio-maiztasuna edota tentsio-maila altuagoan lan egiteko aukera. WBG (*Wide Band Gap*) multzoaren barruan dauden konposatuak, karburo-silizioa (SiC) edota galio-nitruroa (GaN) kasu, silizioaren ezaugarriak hobetzen dituzte; erdieroaleen ekoizleek teknologia honen aldeko apustua egin dute (Friedrichs *et al.*, 2016).

Potentzia-elektronikako diseinatzaileek, ordea, aldaketa hauek ekar ditzaketen beste ondorio batzuei ere begiratu behar diete. Hauen artean dago, esaterako, EMIaren eragina. Erradiatutako edo gidatutako seinale moduan azaltzen da, eta inguruko gailu elektronikoen funtzionamenduari edo interferentziaren iturri izan den gailuari berari eragin ahal dio.

Ikertzaileek azken hamarkadetan landutako gaia izan arren, barneratutako eta industria-arlora transferitutako ezagutza mugatua da. Honengatik, potentzia-sistemen diseinuak gutxitan hartzen ditu kontuan aldez aurretik EMIa murrizteko irizpideak eta ohitura onak. Askotan, aldiz, sistemak gauzatu eta eraiki ostean bilatzen eta ezartzen dira interferentzia gutxitzeko neurriak. Arlo honetan enpresek erronka bati aurre egiten diote: bere produktuetako asko saiakuntza eta akats ziklo amaiezinen ondoren merkaturatzen dira, kasurik onenean, bateragarritasun elektromagnetikoko probak lehen saiakeran gainditzen ez dituztelako.

Beraz, diseinuak era egokian egin ahal izateko ezinbestekoa da ezagutzea EMIaren iturriak zeintzuk diren eta EMIa zirkuitu eta sistemetan barrena nola hedatzen den. Elementu horiek zeintzuk diren jakin besterik ez, funtsezkoa da interferentzia maila kuantifikatzea eta EMIaren ereduak egitea, sistemaren portaera simulatzeko eta aurreikusi ahal izateko.

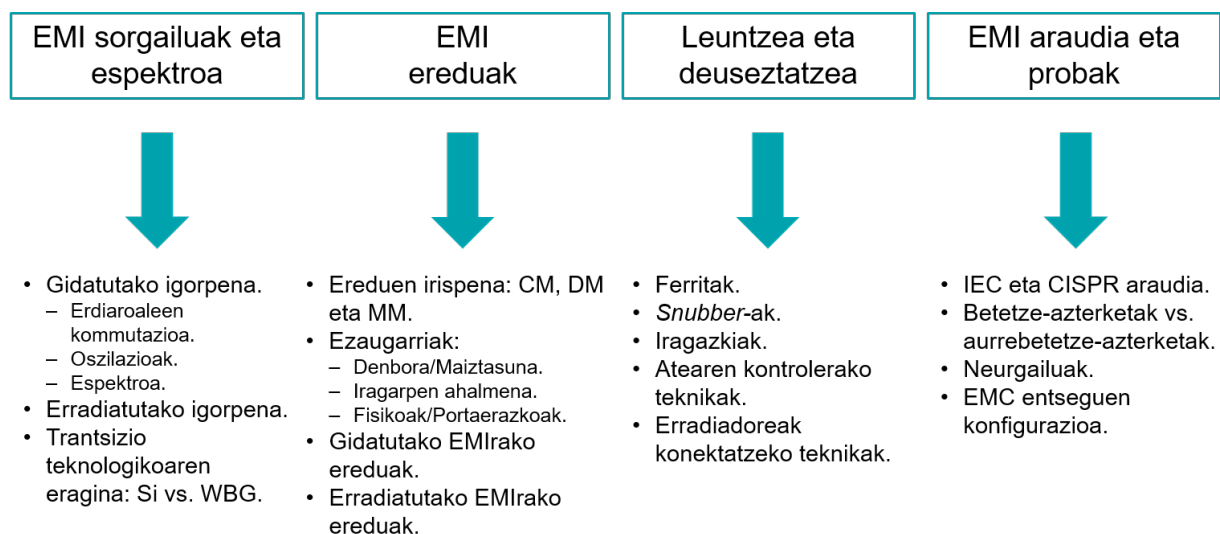
Gainera, siliziozko erdieroaleetatik WBG-etan oinarritutakoetara pasatzeak EMIn duen efektuen inguruko ikerketa abian da oraindik ere (Lemmon *et al.*, 2020). Hortaz, lan hau EMIa kuantifikatzeko beharra eta WBG-eko trantsizioak dakartzan ondorioen gaineko lanetan dauden hutsuneak kontuan hartuta planteatzen da, non landu gabe edo gutxi landuta dauden zenbait alderdi jorratu nahi diren, hala nola parametroen sentikortasuna aztertzea eta horien aldakortasuna ereductara eramatea.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gaiaren egungo egoeraren azterketari ekiterakoan arestian aipatutako bi ideia nagusiak hartu dira: batetik, potentzia-elektronikako gailuek sortzen eta hedatzen/igortzen duten interferentzia elektromagnetikoaren karakterizazioa; bestetik, silizioan oinarritutako elektronikatik WBG materialetan oinarritutakora igarotzeak EMIaren ikuspuntutik izan ditzakeen ondorioak.

Azterketa hau hainbat multzotan sailkatu da: EMIaren iturriak, hedapen-bideak, EMI-ereduak egiteko teknikak, EMIa leuntzeko/deusezteko teknikak eta EMI/EMC araudia. 1. irudiak laburbiltzen ditu multzo bakoitzean aztertutako gaiak, zeinetan arreta berezia jarri zaion WBG materialak erabiltzeak dituen efektuei.

1. irudia – Arloko egoeraren analisiaren multzo nagusiak.



2.1. EMI iturriak

Azken urteotako ikerketa-lanei begiratuta argi geratzen da EMIaren iturri nagusitzat jo daitezkeela erdieroaleen konmutazioan (transistoreak piztean zein itzaltzean) tentsioak eta intentsitateak duten aldakuntza azkarra batetik (dv/dt eta di/dt), eta elementu parasitoen kitzikapenak sortutako oszilazioek edo *ringing*-ak bestetik, *RLC* zirkuituen erantzunen parekoak direnak (Wang *et al.*, 2012).

Konmutazioaren eta parasitoen kitzikapenaren eraginez sortzen diren denbora-eremuko tentsio- eta intentsitate-seinaleak maiztasun-eremuan adieraz daitezke, eta maiztasun-tarte desberdinetako potentzia-dentsitatea kalkula daiteke.

Espeketroaren maila eta banda-zabalera lerro-lerro lotuta daude konmutazio-seinalearen ezaugarriekin. Trapezio itxurako konmutazio-seinale idealaren kasuan, esaterako, lortutako espektra (1) ekuazioaren bitartez adieraz daiteke:

$$V(f) = \frac{2A\tau}{T} \left| \frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f\tau} \right| \left| \frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f t_r} \right| \quad (1)$$

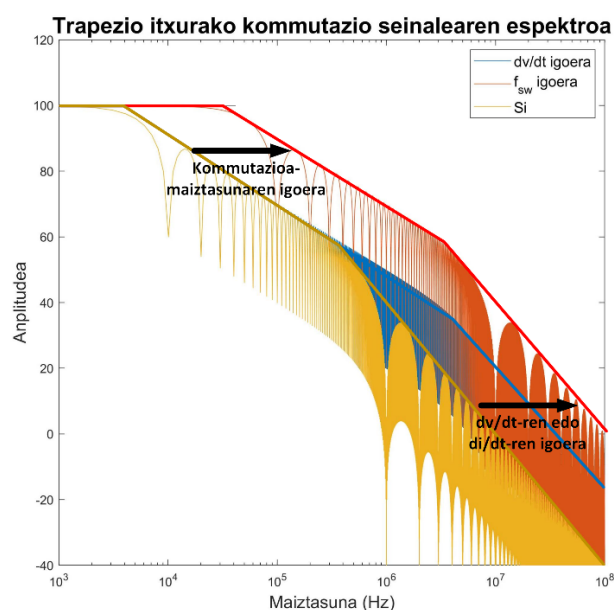
non seinalearen anplitudeak (A), igoera- edo jaitsiera-denborak (t_r), periodoak (T) eta pultsuaren zabalerak (τ) zehazten duten espeketroaren magnitudea eta ebaketa-maiztasunen kokapena (inguratzailearen malda aldatzen den puntua).

Silizioan oinarritutako gailuak eta WBG erdieroaleetan oinarritutakoak konparatuz gero ikus daiteke trantsizio teknologikoak alde garbiak ekarri dituela (Zhang eta Wang, 2020), esate baterako:

- Kapazitate parasitoak (sarrerako kapazitatea, irteerako kapazitatea eta ate-drainatzaile kapazitatea) magnitude-ordena batean jaitsi dira.
- Konmutazioko igoera- eta jaitsiera-denborak % 50 baino gehiago jaitsi dira.

Honek espeketroaren inguratzailearen erpinak maiztasun altuagoetara mugiarazi ditu (Oswald *et al.*, 2013); beste era batera esanda, EMIaren eraginaren esparrua zabaldu da, 2. irudian ikusten den moduan.

2. irudia – Espeketroaren aldakuntza konmutazio-maiztasunaren eta tentsio-aldakuntzaren arabera.



2.2. EMIaren hedapena eta igorpena

Bestalde, kontuan hartu behar da interferentzia-seinaleak zirkuituen puntu zehatzetan sortzen diren arren, sistema osoan zehar hedatzeko aukera izango dutela. Ikerketek jasotzen duten moduan, hedapen hau bi modu nagusitan eman daiteke: modu komunean (CM) eta modu diferentzialean (DM).

Biak ala biak izan daitezke EMC araudia ez pasatzearen arduradun. Izan ere, sarera lotutako gailu elektrikoek/elektronikoek eta erradiazio elektromagnetikoaren iturri izan daitezkeen gailu elektrikoek/elektronikoek bateragarritasun elektromagnetikoko probak gainditu behar dituzte: lineak gidatutako igorpenak, 9 kHz – 30 MHz tartean; erradiatutako igorpenak, 30 MHz – 18 GHz tartean; erradiazio-immunitatea (gailuek erradiazio elektromagnetikoa jasateko duten gaitasuna edo sentikortasuna); lineak gidatutako immunitatea (gailuek elikaduratik edo datu-busetatik datozen perturbazio elektromagnetikoak jasateko duten gaitasuna edo sentikortasuna).

2.3. EMI ereduak

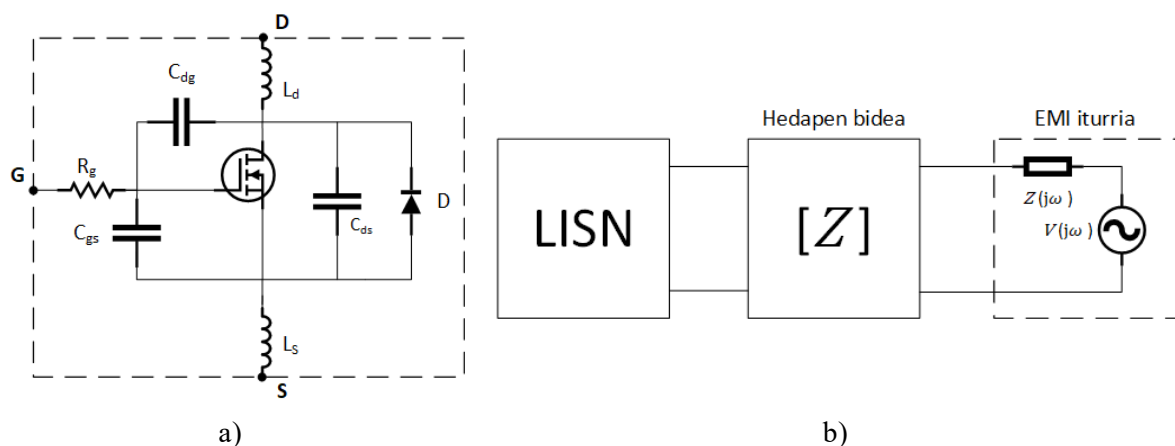
Erdieroaleen konmutazioa aztertu eta gero, sortutako EMI-eredua zein modutan egin ahal den aztertzea da hurrengo urratsa. Ezaugarri desberdinak eta kontrajarriak dituzten ereduak aurki daitezke: denbora-eremukoak / maiztasun-eremukoak, prediktiboak / ez-prediktiboak, fisikoak / portaerazkoak, modu komuneakoak / modu diferentzialekoak...

Bi multzo handitan sailka daitezke gaur egun erabiltzen diren ereduak (Liu *et al.*, 2016; Bishnoi, 2013):

- Osagaien fisikan oinarritutako ereduak (*physical models*), metodo analitikoaren, numerikoen edo enpirikoen bitartez konmutatzen duten transistoreen eta zirkuituko gainerako elementuen portaera zehatza adierazten dutenak osagai trinkoen bitartez eta beraien ekuazio elektrikoaren bitartez.
- Portaerazko ereduak (*behavioral models*), non konmutazio elementuak zarata-iturri eta berari lotutako inpedantzia/admitantzia moduan hartzen diren, eta zarata-seinaleen hedapen-bideak kuadripolo moduan definitzen diren.

Eredu fisikoak errealitatean gertatzen denetik gertuago daude eta, beraz, EMIaren jatorria identifikatzetik gertuago. Portaerazko ereduak, aitzitik, abstrakzio maila handiagoa dute eta sistema konplexuen simulaziorako erabil daitezke.

3. irudia – EMI-eredua egiteko moduak: a) osagaien fisikan oinarrituta; b) portaerazko ereduak.



2.4. EMIa leuntzeko teknikak

Aldez aurretik EMIaren sorkuntza ahalik eta txikiena izateko teknikak aplikatu arren, ezinezkoa da *zero-EMI* sistemarik lortzea. Hori dela eta, EMIa leuntzeko eta deuseztatzeko hainbat elementu eta teknika erabiltzen dira, besteak beste:

- Ferritak. Laneko maiztasun-tartean duten erresistentzia lagungarri da konmutazioan sortutako oszilazioak moteltzeko.
- *Snubber*-ak. RC serie-zirkuituan edo RL paralelo-zirkuituan erabiltzen dira eta elementuen balioa moteltze kritikoa lortzeko helburuarekin aukeratzen da.
- Iragazkiak. Aurreko bi osagaiak ez bezala, iragazkien funtzionamendua inpedantzien desegokipenean oinarritzen da.
- Atearen kontrol aktiboa. Interferentzien iturria intentsitatearen edo tentsioaren aldakuntza azkarrean dagoenez, hauek kontrolatzeko teknikak aplikatzen dira.

2.5. EMI/EMC araudia

Estatu mailako eta nazioarteko arauak EMIaren eragina kontrolatzeko esparru bateratua ematen diete erabiltzaileei eta industriari (Ott, 2011). Arau sorta honek bi helburu nagusi ditu:

- Lineak gidatutako eta erradiatutako igorpenen maila mugatu aplikazioa bakoitzaren kasurako.
- Aplikazio batek hutsik egin gabe izan behar duen immunitate maila minimoa ezarri.

Era honetan, merkaturatzen diren produktuek bateragarritasun elektromagnetikoko estandarrekin bat egin dezaten ziurtatu nahi da. IEC (*International Electrotechnical Commission*) eta CISPR (*Comité international spécial des perturbations radioélectriques*) arduratzen dira EMI arloko arauak jasotzeaz. IEC 61000, CISPR 1X eta CISPR 2X multzoetan bildu dituzte jarraibide horiek, non ondorengoak zehazten diren: xedapen orokorrak (igorpeneko eta immunitareko mugak, neurketa teknikak eta probak, gomendioak eta txosten teknikoak); produktu-familia eta produktuen gainerako estandarrak (audio/bideo gailuak, etxetresnak, argiteria, informatika-aparailuak, lurreko eta itsasoko ibilgailuetako ekipamendua...).

Arloaren egungo egoera aztertu eta gero helburu nagusia finkatu da etorkizunean potentzia-bihurgailu batentzako maiztasun altuko ereduak garatu ahal izateko. Lehenik eta behin elementu parasitoek maiztasun-eta denbora-eremuan duten eragina aztertu behar da; horretarako, saiakuntza-banku bat diseinatu non denbora- eta maiztasun eremuko seinaleak neurtu ahal izango diren eta parametroen sentikortasuna kuantifikatu ahal izango den. Horrekin, aurrerago eta simulazio-erreminta bat aukeratu eta gero, potentzia-bihurgailuaren ereduak garatu behar dira, ahalik eta parasito kopururik handiena kontuan hartuko duena.

3. Ikerketaren muina

Egindako analisitik zenbait puntu nagusi ondorioztatu ahal dira. Garrantzitsuenetako batek, EMI iturriei dagokionez, argi uzten du elementu parasitoak giltzarri direla. Gainera, WBG erdieroaleen agerpenak beharrezkoa egiten du efektu berriak aztertzea, hala nola konmutazioko seinalean ageri diren oszilazioek edo *ringing*-ak espektroan duten eragina. Hauxe igorpen erradiatuen maiztasun tartean (30 MHz-etik gora) nabarmenagoa dela aurreikusten da, orain arte oso gutxi landu den atala. Beraz, horixe da ikerketa-lan honen muinetako bat, WBG erdieroaleen erabilerak EMIen gainean duen inpaktoa kuantifikatzea.

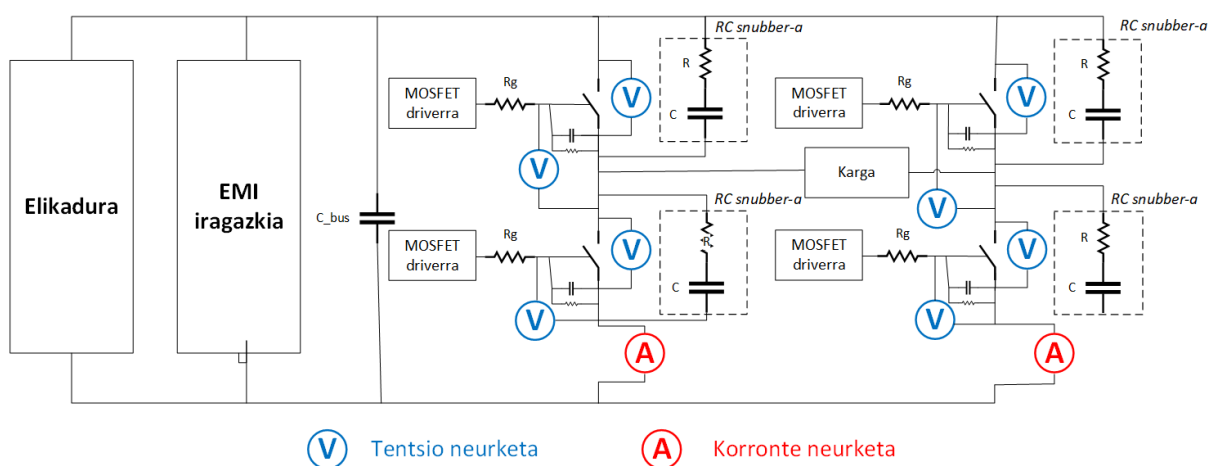
Gauzak horrela, ikasketa horretatik ateratako ezagutzarekin saiakuntza-banku bat diseinatzeari ekin zaio, zeinaren bloke-diagrama sinplifikatua 4. irudian ikus daitekeen eta hiru ezaugarritan arreta jartzen duena: zirkuitu inprimatuaren diseinua, parametroen sentikortasuna eta EMIa neurtzeko behar diren neurgailu eta neurketa-teknikak.

H-zubia osatzen duten hainbat osagaien aldakortasunarekin jokatzuz, parametroen sentikortasuna aztertu nahi izan da:

- Drainatzaile-hornitzaile kapazitatea (C_{ds}).
- Ate-hornitzaile kapazitatea (C_{gs}) eta erresistentzia (R_{gs}).
- Buseko kondentsadoreak.
- Kommutazio begitzaren inдукtancia parasitua.
- *RC snubber*-ak.
- EMI iragazkien eragina (modu komunean eta modu diferentzian).
- Erradiadoreen konexio motak.

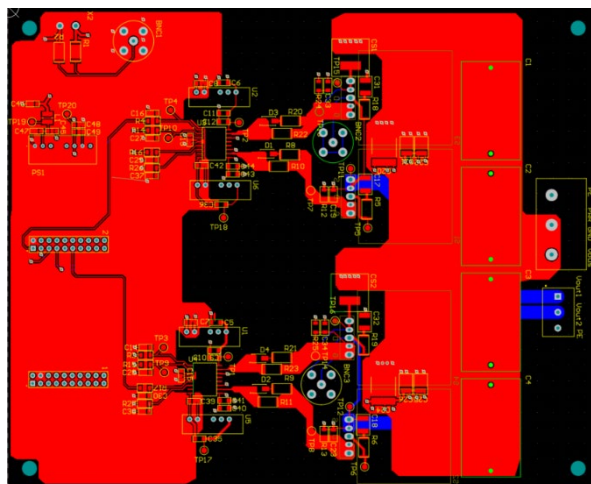
Zirkuituaren zenbait osagaien aukeraketarako EMIa gutxitzeko irizpideak jarraitu dira. Esate baterako, buseko kondentsadoreen kasurako kommutazio-abiadura handietan lan egin dezaketen osagaiak aukeratu dira. Beste elementu batzuen kasuan, hala nola *RC snubber*-ak edo EMI iragazkia, erabili / ez erabili efektua edota balio desberdinetako osagaiak erabiltzearen eragina da aztertu nahi dena, denbora- (oszilazioen anplitudea eta maiztasuna, igoera- eta jaitsiera-denbora...) zein maiztasun-eremuan (erresonantzia pikoaren agerpena).

4. irudia – Saiakuntza-bankuaren diagrama sinplifikatua.



Zirkuitu inprimituaren *layout*-a edo diseinua egiteko garaian (ikus 5. irudia), jarraibide orokorrak kontuan hartzeaz gain, EMIaren sorkuntza gutxitzeko irizpideak aplikatu dira: seinale-bideen aukeraketa, korrante-begitzak ahalik eta txikiak izatea, ahalik eta inдукtancia txikieneko pistak erabiltzea (kommutazioko nodoetatik gertu batik bat), elikadurako eta lurreko planoak eratzea, zirrikituak eta planoen etendurak saihestea...

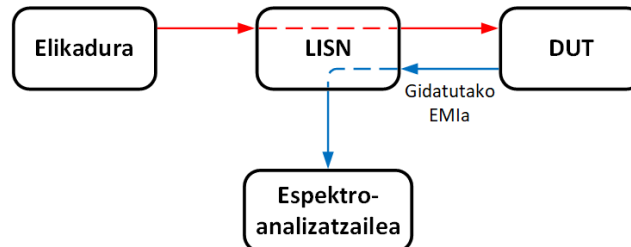
5. irudia – Zirkuitu inprimituaren *layout*-a.



Honekin batera, neurketa-laborategia martxan jarri da, egin beharreko neurketa desberdinen kasurako neurgailuak biltzen dituena:

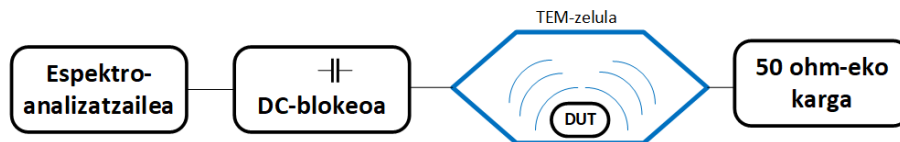
- Zirkuituetan EMI iturriak zehaztasunez lokalizatzeko, **H** eta **E** eremuko gertuko zundak.
- Gidatutako EMIa neurtu ahal izateko, LISN-a (*Line Impedance Stabilization Network*) eta espektro-analizatzailea, 5. irudiak erakusten duen konfigurazioarekin.

6. irudia – Gidatutako EMIaren neurketarako konfigurazioa.



- Erradiatutako EMIa neurtu ahal izateko, TEM-zelula eta espektro-analizatzailea, 6. irudiak erakusten duen konfigurazioarekin.

7. irudia – Erradiatutako EMIaren neurketarako konfigurazioa.



4. Ondorioak

Egindako azterketarekin ondorioztatzen da aplikazio eta produktu askok eta baita horiek diseinatzen eta ekoizten dituzten enpresek ere erronka bera dutela: lehenik, potentzia-elektronikako gailuetan gerta daitezkeen interferentzia fenomenoak identifikatzea eta kuantifikatzea; ondoren, fenomeno horiek kontrolatzeko gai izatea, aldez aurretik (diseinu-fasean) edo gauzatu eta gero (interferentziaren eraginak leunduz edo deuseztatuz). Era honetan gutxituko da bateragarritasun elektromagnetikoko probak gaingitu arteko garapeneko eta balidazioko faseetan emandako denbora.

WBG erdieroaleekin lan egiten hasi izanak transistoreen berezko parasitoen eta zirkuituetako loturekin zerikusia dutenen eragina berriro ere aztertzea behartu du; orain arte ikerketetan toki gutxi hartu duten zenbait arlo aintzat hartu behar dira, oszilazioek maiztasun-espektroran duten efektua kasu.

Ikerketa berriek denbora- eta maiztasun-eremuko erantzuna aztertu behar dute, portaera-eredu bat aurkitzeko eta EMIaren sorkuntza eta hedapena murrizteko, era gidatuan zein erradiatuan. Gainera, erradiatutako EMIrako erduekin lan egin nahi izanez gero, antenekin edo eremu gertuko zundekin egindako neurketak denbora-eremuko seinaleekin erlazionatu behar dira, erradiazioaren jatorria antzeman ahal izateko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa lan hau hasi berri den bidearen abiapuntua besterik ez da, non bi lan-ildo nagusiri heldu nahi zaion:

- 1) Potentzia-bihurgailu batentzako maiztasun altuko eredua garatzea, ahalik eta elementu parasito gehiagoren efektua barnetatzen duena, eta eredua simulazio-erreminta batean txertatzea. Honen bitartez diseinuaren portaera aldez aurretik simulatu ahal izango da.

- 2) Entseguak eta EMC arauen betetze-saiakuntzak egiteko laborategia definitu eta muntatu. Araudian eta neurketa-tekniketan sakontzeak saiakuntza errepikagarriak egitea ahalbidetuko du, eta horrek EMI-iturria eta hedapen- eta erradiazio-bideak antzemateko jarraibide fidagarriak ezartzea ekarriko du. Era horretan, potentzia-elektronikako diseinatzaileek bateragarritasun elektromagnetikoko probei arrakasta-probabilitate handiagoarekin aurre ahal izango diete.

6. Erreferentziak

- Bishnoi, H. (2013). *“Behavioral EMI-Models of Switched Power Converters.”* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Friedrichs, P., Harder, J. M. T., Kaminski, N., Lindemann, A., Lorenz, L., Schindele, L., eta Ward, P. (2016). *“ECPE position paper on next generation power electronics based on wide bandgap devices”*. Jul-2016.
- Lemmon, A. N., Brovont, A. D., New, C. D., Nelson, B. W., eta DeBoi, B. T. (2020). *“Modeling and validation of common-mode emissions in wide bandgap-based converter structures.”* IEEE Transactions on Power Electronics, 35(8), 8034-8049.
- Liu, T., Ning, R., Wong, T. T. eta Shen, Z. J. (2016). *“Modeling and analysis of SiC MOSFET switching oscillations.”* IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 4(3), 747-756.
- Oswald, N., Anthony, P., McNeill, N. eta Stark, B. H. (2013). *“An experimental investigation of the tradeoff between switching losses and EMI generation with hard-switched all-Si, Si-SiC, and all-SiC device combinations.”* IEEE Transactions on Power Electronics, 29(5), 2393-2407.
- Ott, H. W. (2011). *“Electromagnetic compatibility engineering. John Wiley & Sons.”*
- Wang, J., Chung, H. S. H. eta Li, R. T. H. (2012). *“Characterization and experimental assessment of the effects of parasitic elements on the MOSFET switching performance.”* IEEE Transactions on Power Electronics, 28(1), 573-590.
- Zhang, B. eta Wang, S. (2019). *“A survey of EMI research in power electronics systems with wide-bandgap semiconductor devices.”* IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(1), 626-643.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan hau Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoaren laguntzaz egin da.