



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

**SiC erdieroaleak energia eolikoan
LCoEa hobetzeko**

*Antxon Arrizabalaga, Mikel Mazuela,
June Urkizu eta Jon Aztiria*

17-24 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.02>



SiC erdieroaleak energia eolikoan LCoEa hobetzeko

Arrizabakaga, A., Mazuela, M., Urkizu, J., Aztiria, J.
Mondragon Unibertsitatea
aarrizabalaga@mondragon.edu

Laburpena

Ikerketa honetan energia eolikia energia berriztagarri nagusi bezala identifikatzen da. Beraren LCoEa (Levelized Cost of Energy ingelesez) hobetzeko, SiC erdieroaleak proposatzen dira, baita tentsio maila eta topologia berriak ere. Konfigurazio ezberdinak aztertzen dira, LCoEa hobetzen duten bi aurkituz. Lehenengoak, gaur egungo SiC-en kostua kontuan izanik bi mailako topologia erabiltzen du, hobekuntza txikia lortuz. Bigarreanean, teknologiaren heldutasunagatik iritsiko den kostu jaitsiera aurre ikusten da, eta hiru mailako NPC (Neutral Point Clamped ingelesez) topologia erabiltzea dela onena ikusten da, LCoE hobekuntza handia lortuz.

Hitz gakoak: SiC, Energia eolikia, LCoE, NPC.

Abstract

This research identifies the wind energy as the main renewable source. In order to improve its LCoE, SiC semiconductors are proposed, together with different voltage levels and topologies. After analyzing various configurations, two that improve current LCoE are found. The first considers current cost of SiC, and uses a two level topology, achieving little improvement. The second considers the expected cost reduction of SiC due to technological maturity, and it is shown that a three level NPC is the best topology, with higher LCoE improvement.

Keywords: SiC, Wind Energy, LCoE, NPC.

1. Sarrera eta motibazioa

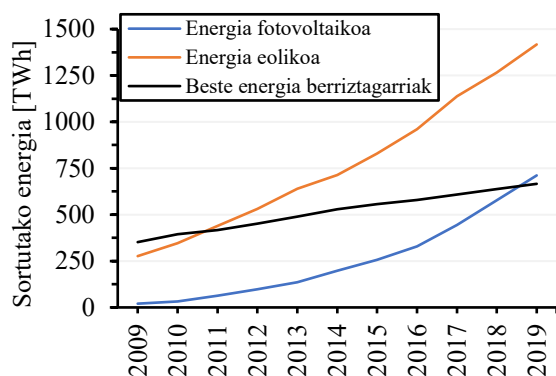
Azken hamarkada hau lurra bizi izan duen hamarkadarik beroena izan da¹, aldaketa klimatikoaren eraginak agerian utziz. Gainera, mundu mailako energia kontsumoa geroz eta handiagoa da (BP, 2020). Arazo honi aurre egiteko, erakunde ezberdinak plan eta ekintza bereziak aurrera eramaten ari dira²⁻³. Plan hauetan energia berriztagarriak bultzatzen dira, gaur egun beharrezkoa den trantsizio energetikoa bideratuz.

Erakundeen bultzadaren ondorioz, mundu mailan modu berriztagarrian sortzen den energia kopurua handituz joan da azken hamarkada honetan, munduko energia elektrikoaren % 27.3 iturri berriztagarritik datorrena izatera iritsi arte (REN21, 2020). Zehatzago adieraziz, eta energia hidraulikoa alde batera utziz, era berriztagarrian sortu den energiaren % 21.6 energia eolikia dela ikusi da, eguzkiaren energia fotovoltaikoa % 10.2 delarik. 1. irudian ikusi daitekeen bezala, bi energia mota hauek beste energia berriztagarri guztiak baino energia gehiago sortu dute mundu mailan 2019. urtean. Gainera, beraien hazkundeak dinamika esponentziala adierazten du⁴. Analisi hau burutu ostean, energia eolikoak etorkizuneko gizartean izango duen garrantzia argi ikusten da.

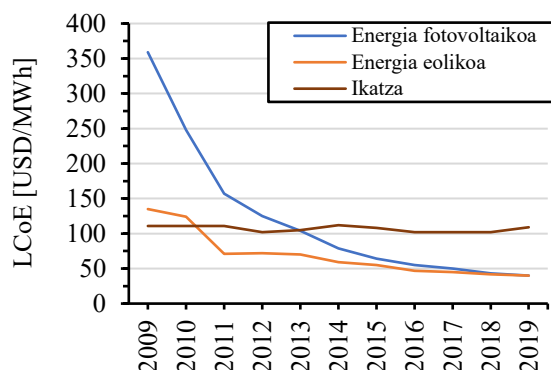
Energia iturrien merkatu lehiakortasuna aztertzen duen metrika Energiaren Kostu Normalizatua da, LCoE ingeleseko siglak erabiliz (Patel *et al.*, 2019). Kalkulu honen estimazioak datu ekonomiko zein teknikoak uztartzen ditu, datu ugariaren balioespena egitera behartuz. Erakundeen laguntzei esker, eta baita teknologiak izan duen bilakaera eta hobekuntzen ondorioz, gaur egun energia berriztagarriak ohiko energia iturriekin lehiatzeko moduan aurkitzen dira. Energia eolikia eta eguzki energia fotovoltaikoa dira gainera gaur egun LCOE hoberena duten energia iturriak (Lazard, 2019). Horrez gain, hobekuntza teknologikoen dakartzaten onurak erabiliz, bi energia

- 1 [The New York Times: 2019 Was the Second-Hottest Year Ever](#)
- 2 [United Nations: the 2030 Agenda for Sustainable Development](#)
- 3 [European commission: Horizon Europe mission area](#)
- 4 [Our World in Data: Renewable energy](#)

1. irudia: Energia berriztagarrien sorkuntzaren eboluzioa⁴.



2. irudia: LCoEaren eboluzioa energia iturri ezberdinetzat (Lazard, 2019).



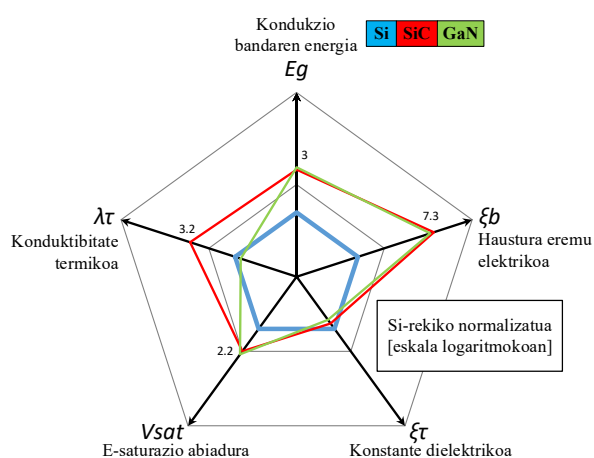
iturri hauek etengabe hobetu dute beraien LCoEa azken hamarkadan, 2. irudian ikusi daitekeen bezala. Ohiko energia iturriek ordea, garapen biderik ezin dute egin, beraz beraien LCoEa hobetu ezinik aurkitzen dira. Fenomeno hau ikatzak adierazten du 2. irudian.

Aurrez aipatutako LCoE hobekuntzaren bila, gaur egun arte energia eoliko fabrikatzaileek beraien produktuaren potentzia handitzearen alde egin dute. Haize turbina komertzialen potentzia laukoiztu egin da 2005 eta 2020 urteen tartean (Yamasu *et al.*, 2015). Beste bide bat turbinek sorturiko energia sarera bidaltzeko beharrezkoa diren potentzia bihurtgailuak hobetzea da. Hori lortzeko orain arte erabili diren siliziozko (Si) erdieroaleak gaur egun garatzen ari diren silizio karburoz (SiC) osaturikoek ordezkatzeko proposatu da ikerketa honetan, energia eolikoa bezalako aplikazioentzat egokiak direla ikusi baita, konmutazio frekuentzia baxuetan eta potentzia altuetan (Wilson *et al.*, 2018). Azkenik, tentsio maila berriak, baita topologia eta konfigurazio berriak ikertzea ere proposatzen da, energia eolikorako potentzia bihurtgailu lehiakorrena aurkitzeko helburuarekin.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ondorengo atalean, SiC teknologian oinarrituriko potentzia altuko erdieroaleen egungo egoera azalduko da, beraien ezaugarri fisikoak eta konponente komertzialak aipatuz. Gainera, beraien erabilera industrial nagusiak erreparatuko dira, energia eolikoa azpimarratuz. Erdieroale hauen erronka nagusiak eta ikerketa honen azken helburuak azalduz amaituko da atala.

3. irudia: Silizioaren (Si), silizio karburoaren (SiC) eta galio nitruoaren (GaN) ezaugarri fisikoak (Williams, 2006).



Ezaugarria	Si	SiC	GaN
E_g [eV]	1.12	3.26	3.45
ξ_b [kV/cm]	300	2200	2000
ξ_τ	11.9	10.1	9.0
V_{sat} [10^7 cm/s]	1	2	2.2
λ_τ [W/cm K]	1.5	4.9	1.3

2.1. SiC-aren ezaugarri fisikoak eta SiC erdieroaleak

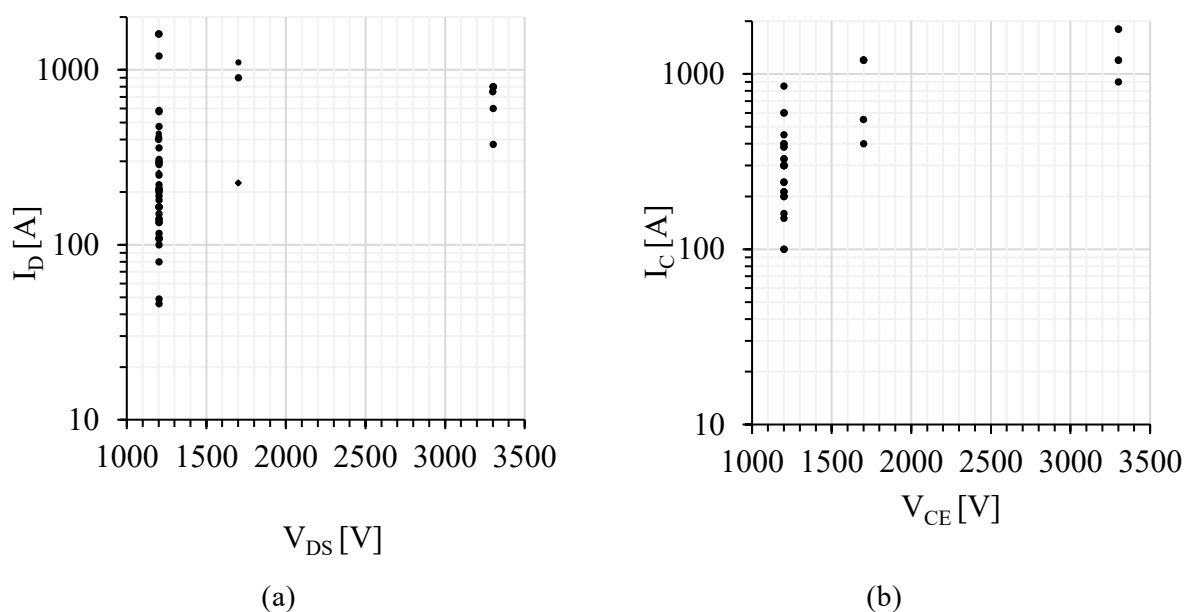
3. irudiak SiC-aren ezaugarri fisikoak Si-arenekin konparatzen ditu. Lehenik, SiC-ak Si-ek baino zazpi aldiz haustura eremu elektriko handiagoa duela ikusi daiteke. Ezaugarri honek erdieroaleen deriba geruza proportzio berean laburtzea ahalbidetzen du, oraindik ere tentsio maila berean lan eginez. Deriba geruza laburragoak kondukzio erresistentzia gutxitzea dakar gainera (Kimoto, 2015).

Bestetik, SiC-ak Si-ek baino hiru aldiz kondukzio bandaren energia gehiago du. Honek, balentzia bandan dagoen elektroiei batek elektroiei aske bilakatzeko behar duen energia adierazten du (Garrido, 2019). Energia handiagoa izanik, bere ezaugarriak aldatu gabe tenperatura altuagoan lan egin dezake SiC-ak. 3.2 aldiz konduktibitate termiko altuagoa ere badu SiC-ak, nahiz eta oraingoz erdieroaleen kanpo egitura Siliziozkoenaren berdina denez ezaugarri honek ez duen benetako aplikaziorik. Azkenik, SiC-aren elektroien saturazio abiadura Si-arena baino 2.2 aldiz altuagoa da, kondukzio egoera batetik bestera aldatzeko behar duen denbora murriztuz. Azken ezaugarri honek konmutazio galerak gutxitzen laguntzen du.

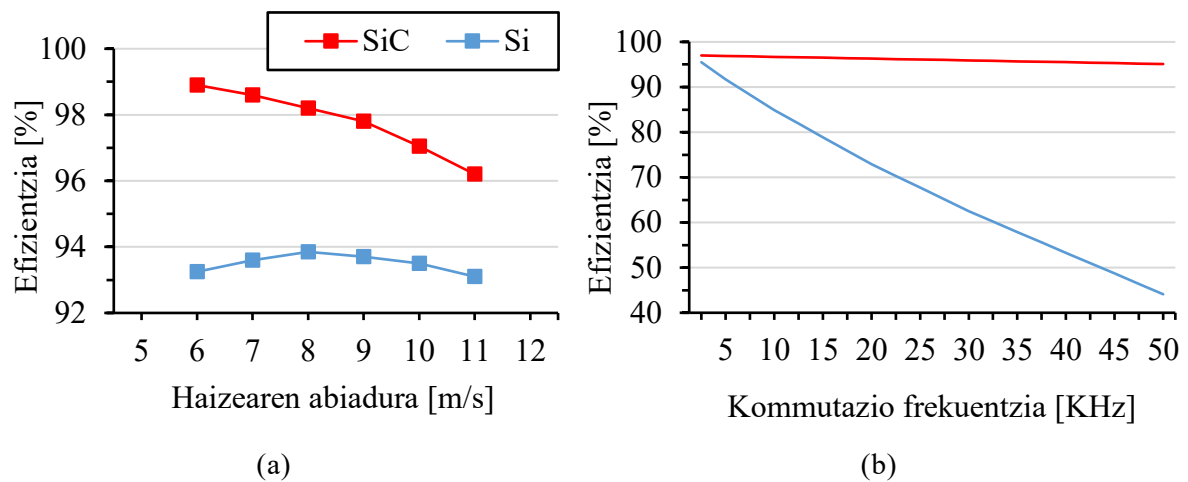
Ezaugarri hauek bi modu ezberdinetan baliatu dira potentzia altuko erdieroaleak sortzeko. Batetik, SiC MOSFETak (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ingelesez) garatu dira. Bestetik, Siliziozko IGBTek (Insulated Gate Bipolar Transistor ingelesez) SiC diodo bat gehitu zaie paraleloan, konmutazioan dituzten arazoei aurre egiteko. Modulu hauek SiC hibrido bezala ezagutzen dira, eta Si IGBTek baino itzaltze ezaugarri hobekak dituzte, SiC-aren konmutazio ezaugarriak baliatzen dituztelako. 4. irudiak gaur egun merkatuan dauden, edo industria garatzen ari den SiC erdieroaleak erakusten ditu, beraien tentsio maila eta korrontearen arabera.

4. irudian argi ikusten den bezala, merkatuan gehien dagoen produktua 1200 V ko SiC MOSFETa da. Tentsio maila horretako modulu ugari aurki daitezke, hainbat korronte mailarekin, baita fabrikatzaile ezberdinekin ere. SiC hibridoetan ordea, produktuen eskaintza murriztagoa da, eta asko oraindik garapen fasean aurkitzen dira. SiC hibridoa trakzioan soilik erabiltzen den bitartean, 1200 V ko SiC MOSFETak industria askotan erabiltzen hasi dira, hala nola elikadura iturrien potentzia faktore zuzentzailean, ibilgailu elektrikoek karga estazio eta bihurtailuetan, motore elektrikoek elikadura bihurtailuetan, etxe tresna ugarietan, batez ere aire egokitzan, eta energia fotovoltaiakoan besteak beste. 2020 eta 2022 urteen artean SiC erdieroaleen merkatua % 40 haziko dela estimatzen da, eta merkatu horretako zati handi bat 1200 V ko SiC MOSFETena izango da (Li, 2017).

4. irudia: Merkatuan dauden potentzia altuko SiC erdieroaleak, (a) SiC MOSFETak, (b) SiC hibridoak.



5. irudia: Haize turbinaren potentzia bihurgailuaren efizientzia konparaketa, Si IGBTekin eta SiC MOSFETekin, (a) Haizearen abiadura ezberdinetan eta (b) konmutazio frekuentzia ezberdinetan (Zhang eta Tolbert, 2011).



2.2. SiC-aren erabilera energia eolikoan

Gaur egun, ez da potentzia altuko energia eolikoan SiC-a erabiltzen duen produkturik. Gainera, arlo horretan eginiko ikerketak ere mugatuak dira, denak simulazio bidez eginak izanik. Potentzia osoko bihurgailua erabili ezker, 5. irudian ikus daitekeen bezala, haizearen abiadura guztietarako efizientzia hobea lortzen da SiC MOSFETak erabiliz, gainera, konmutazio frekuentzia handitzean SiC bihurgailuaren galerak ez dira hainbeste handitzen (Zhang eta Tolbert, 2011). Horrek filtroak txikitzeko aukera zabaltzen du bai potentzia baxuko aplikazioetan (Hussein, 2018; Castellazzi *et al.*, 2019), baita potentzia altuetan ere, % 50 hain zuzen ere, bihurgailu osoaren bolumena % 16 gutxituz (Kortazar *et al.*, 2016), SiC hibridoa erabiliz kasu honetan.

Bihurgailu partzialak erabiltzen dituzten konfigurazioak aztertu ezker, elikadura bikoitzeko indukzio sorgailua (Doubly Fed Induction Generator, DFIG, ingeleseko siglak erabiliz), gaia hare eta gutxiago tratatu dela ikus daiteke. SiC hibridoarekin efizientzia hobea lor daitekela ikusi da, ikerketa potentzia baxuko aplikaziora mugatu bada ere (He *et al.*, 2014). Azkenik, SiC MOSFETak erabiltzen dituen egoera solidoko transformadorea (Solid State Transformer, SST, ingeleseko siglak erabiliz), garatu da energia eolikorako. Potentzia baxukoa bada ere, hau da aurkitu den SiC teknologia erabiltzen duen, eta energia eolikora bideraturik dagoen prototipo bakarra (She *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2017).

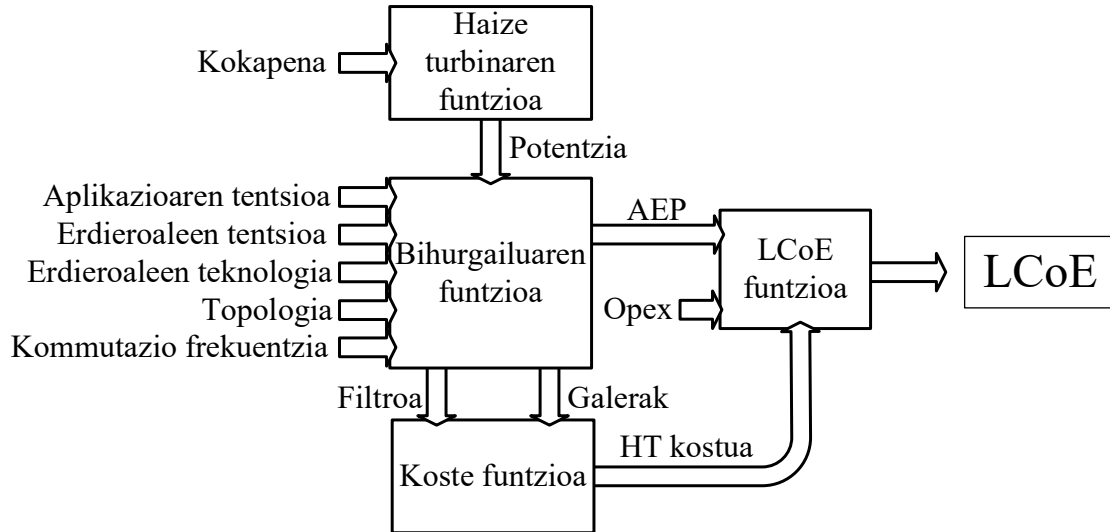
2.3. SiC-aren erronkak

SiC erdieroaleak energia eolikoan erabiliak izateko, erronka nagusi batzuk gainditu behar ditu. Lehen, eta garrantzitsuena, Si erdieroaleekin duen koste diferentzia da. Bihurgailuaren kostuak LCoEan duen inpaktu handia kontsideratuz, SiC erdieroaleen kostua Si-koena baina hiru aldiz handiagoa soilik izan beharko litzateke (Dincan, *et al.*, 2020). Gaur egun, erlazio hori 1200 V-ko moduluetan soilik ematen da, 1700 V koa ia seia aldiz handiagoa izanik. Gainera, SiC erdieroaleen dV/dt handiek sor ditzaketen arazoak ere kontuan izan behar dira, sor ditzaketen interferentzia elektromagnetikoengatik (Kim, *et al.*, 2018; Bröcker *et al.*, 2020), nahiz eta arazo horiek frekuentzia oso altuetan soilik agertu (Han *et al.*, 2017).

2.4. Ikerketaren helburuak

Ikerketa honen helburu nagusia, energia eolikoaren LCoEa hobetuko duen potentzia bihurgailu baten topologia, erdieroale eta tentsio maila konbinazio egokia aurkitzea da. Horretarako, SiC erdieroaleak erabiltzea proposatzen da, Si-a baina ezaugarri hobeak dituztelako, baita etorkizunean merkaturatze zabala izango dutelako ere. Gainera, etorkizunean konbinazio hori frogatuko duen prototipo bat ere eraikiko da.

6. irudia: LCoE kalkulatzeko programatu den aplikazio berritzailearen eskema.



3. Ikerketaren muina

Aurrez adierazitako helburua lortzeko, energia eolikoaren industria aztertu da, gehien erabiltzen den tentsio maila identifikatzeko. Ondoren, LCoEa kalkulatu duen aplikazio berritzaile bat programatu da, 6. irudia. Azkenik energia eolikoa hobetzeko aukera gehien dituzten konfigurazioak identifikatu dira, 1. taula.

3.1. SiC-aren beharrezko tentsio maila

Merkatuan dauden produktuak aztertuz, fabrikante gehienek, hala nola GE, Nordex, Senvion, SGRE, Sinovel eta Golwind-ek adibidez, 690 V_{ac} erabiltzen dituztela ikusi da, tentsio altua (12 KV_{ac}) erabiltzen duen bakarria Acciona izanik. Tentsio maila horretarako, segurtasun tarte bat mantenduz, eta 0.9 modulazio indizea erabiliz, 1085 V_{dc} behar dira. Bi mailako inbertsorea aukeratu ezker, 1700 V ko erdieroaleak beharko lirarteke. Hiru mailako topologia bat aukeratu ezker, 1200 V ko moduluekin nahikoa litzateke (Staudt, 2015). Aurkikuntza hau garrantzitsua da, 4. irudian ikus daitekeen bezala, 1200 V SiC MOSFETen merkaturatua 1700 V koena baina askoz ere zabalagoa baita, beraien kostua murriztuz.

3.2. LCoE kalkulu aplikazioa

LCoEa kalkulatzeko funtzio ezberdinak elkar konektatzen dituen aplikazio berritzaile bat programatu da, 6. irudian ikus daitekeen bezala. Haize turbinaren kokapena finkatu ostean, haizearen abiadura potentzia elektriko bilakatzen du haize turbinaren funtzioak. Aplikazioaren tentsioa, erdieroaleen tentsioa eta teknologia, bihurgailuaren topologia eta kommutazio frekuentzia definitu, eta bihurgailuaren funtzioak, potentzia galerak eta filtroaren ezaugarriak kalkulatu egun ezagunak diren ekuazio analitikoak erabiliz. Galerak haizeak emandako potentziari kenduz urteko energia produkzioa (AEP) lortzen da. Ondoren, koste funtzioak haize turbinaren kostea kalkulatu du, operazio gastuei batu eta AEPa kontuan izanik LCoE funtzioak aztertutako konfigurazioaren LCoEa eskuratu du.

3.3. LCoE kalkulua

1. atalean azaldu da LCoEaren garrantzia eta 2. atalean ikerketa honen helburuak azaldu dira. Energia eolikoaren LCoEa hobetzeko, aztertutako diren konfigurazioena kalkulatu behar da. Horretarako (1) eta (2) ekuazioak erabili dira:

$$LCoE = \frac{HT_{kostua} + Opex}{AEP} \quad (1)$$

$$HT_{kostua} = Mekanika_{kostua} + \dots + Bihurgailua_{kostua} \quad (2)$$

Ondorengo aldagaiak, *Opex* funtzionamendu gastu iraunkorrek, *AEP* urteko energia sorkuntza (Annual Energy Production ingelesezko siglekin), eta HT_{kostua} Haize Turbinaren kostua izanik. HT_{kostua} -ak koste totalak kontsideratzen ditu, baina ikerketa honetan aztertzen diren konfigurazioekin $Bihurgailua_{kostua}$ soilik alda daiteke. Honek, konfigurazio berriek LCoEan duten inpaktua mugatzen du.

3.4. Azterturiko konfigurazioak

Aurrekoa atalean adierazi den bezala, bi eta hiru mailako topologiak kontsideratu dira. Lehengoan abantaila faseko bi modulu soilik behar direla da, baina modulu bakoitzak V_{dc} osoa blokeatu behar du. Hiru mailakoetan ordea, sei modulu behar dira, baina bakoitzak $V_{dc}/2$ blokeatu behar du, beraz 1200 V koak izan daitezke (Staudt, 2015). Hiru mailan kontsideratu diren bi topologiak NPCa eta ANPCa izan dira (Active Neutral Point Clamped ingelesez). Kommutazio frekuentzia eta tentsio maila igotzearen aukera ere aztertu da, 6. irudian ikusi daitekeen bezala.

Azaldutako aldagaiekin, 3, 5 eta 10 KHz ko kommutazio frekuentziak, 1700 V eta 1200 V ko SiC MOSFETak, 2 maila, 3 maila NPC, 3 maila ANPC topologia, 690 V_{ac} eta 900 V_{ac} tentsio mailen konbinazioak aztertu dira, 6. irudiko aplikazioan programatuz. 900 V_{ac} tentsio maila 1200 V ko moduluak hiru mailako topologian limitera eramanez lorturiko tentsio maila da, bihurgailuaren efizientzia, konponente kopurua eta kableen galera hobetuz (Arrizabalaga *et al.*, 2020).

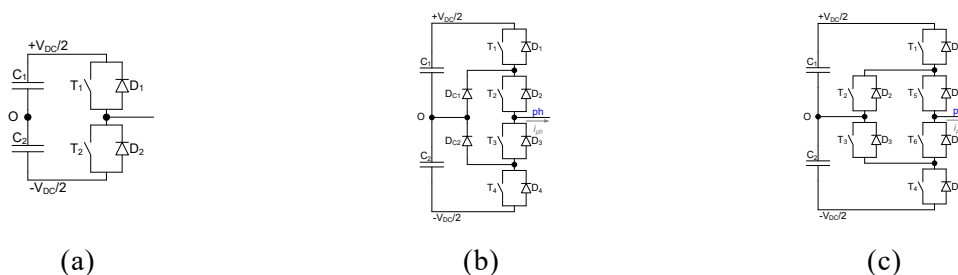
4. Ondorioak

SiC-aren kommutazio ezaugarri hobek frekuentzia igotzea ahalbidetzen dute. Honek, era berean, irteerako filtroetan eragin positiboa dauka, kostua murriztuz. Hori dela eta azterturiko konbinazio guztiek kommutazio frekuentzia handitzea gomendatzen dute, 10 KHz tara. 1. taulan ikusi daitekeen bezala, gaur egungo SiC MOSFETen kostua handia denez, konponente gutxien erabiltzen dituen konfigurazioa da LCoE hoberena lortzen duena, 690 V_{ac} tentsio mailarekin eta 1700 V ko moduluak erabiliz, egungo turbina eolikoena % 0.07 hobetuz.

SiC MOSFETen kostua % 50 gutxitu zen 2012 eta 2015 urteen tartean eta joera horrek jarraipena izatea espero da (Eden, 2013; Kyriakidis, *et al.*, 2018). Hori dela eta, etorkizuneko egoera ere aztertu da, SiC MOSFETen kostua % 50 gutxituz. Kasu honetan, 3 mailako NPC topologia, 1200 V ko moduluekin, 900 V_{ac} tentsio mailan eta 10 kHz ko frekuentzian da LCoE onena lortzen duen konfigurazioa, egungo balioa % 0.51 hobetuz.

Azpimarragarria da koste gutxitze hau arinago gertatuko dela 1200 V ko SiC MOSFETentzat, merkatu zabalagoa bai dute. Gainera, konfigurazio honek izango lukeen LCoE hobekuntza kontuan hartzeko modukoa da, energia eolikoan inpaktu esanguratsua izanez. Ondorioz, etorkizunean SiC teknologiak energia eolikoan izan dezakeen garrantzia ikusi da, batez ere hiru mailako topologiak erabiliz, eta 900 V_{ac} tentsio mailan; erdieroaleen tentsio maila osoa egoki erabili ahal izateko, 1. taulako bigarren aukerak adierazten duen bezala. Gaur egun horrelako produkturik ez dagoenez, sektoreko industriak norabide honetan lan egin behar duela argi geratu da. 1. taulan bi konfigurazio egokienak laburbiltzen dira.

7. irudia: Aztertu diren topologiak, (a) bi maila, (b) 3 maila NPC eta (c) 3 maila ANPC.



1. taula: LCoE onena lortu duten konfigurazioen laburpena.

SiC-en kostea [%]	Frekuentzia [KHz]	Tentsio maila [V_{ac}]	Topologia	Moduluen tentsioa [V]	Δ LCOE [%]
100	10	690	2 maila	1700	-0.07
50	10	900	3 maila NPC	1200	-0.51

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ondorioetan azaldu da etorkizunean SiC teknologiak energia eolikoan izan dezakeen eragina. Baina ikerketa honetan ikusi denez, orain arte ez dago aplikazio honetarako teknologia hau erabiltzen duen prototiporik. Gainera, potentzia altuan hiru mailako topologiarik ere ez da orain arte erabiltzen energia eolikoan. Hori dela eta, eta ikerketa honen ondorioak jarraituz, prototipo ezberdinak eraikitzea erabaki da. Prototipo hauek Si eta SiC teknologiak konparatuko dituzte, baita 2 mailako eta hiru mailako topologiak ere, beraien potentzia maximoa 125 kVA koa izanik. Neurketa ezberdinak eginez, galerak bezalako parametroak konparatuko dira 6. irudian erakutsi den programaturiko aplikazioak eman dituen emaitzekin, bertan erabiltzen diren funtzioen zuzentasuna aztertu ahal izateko.

Gainera, prototipo hauekin SiC teknologiak energia eolikoan aplikaturik izan ditzakeen abantailak eta arazoak identifikatzea espero da. Aurreikusitako funtzionamendua izan ezker, ikerketa hau frogatua geratuko litzateke, etorkizuneko energia eolikorako bihurtzeko jarraitu behar duten bidea erakutsiz.

6. Erreferentziak

Arrizabalaga, A. *et al.* (2020) 'System Level Optimization of 5 MW Wind Converter using 3L-NPC Topology in Medium Voltage with 1.7 kV IGBT', in *46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES), IECON*.

BP (2020) *Statistical Review of World Energy 2020*. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.

Bröcker, F. *et al.* (2020) 'Analysis of power losses within a sic-mosfet-inverter with passive dv=dt-damping network for reduced voltage slopes at inductive loads', *PCIM Europe Conference Proceedings*, 1(July), pp. 1753–1758.

Castellazzi, A. *et al.* (2019) 'Impact of wide-bandgap technology on renewable energy and smart-grid power conversion applications including storage', *Energies*, 12(23), pp. 1–14. doi: 10.3390/en12234462.

Dincan, C., Kjær, P. and Helle, L. (2020) 'Cost of energy assessment of wind turbine configurations', in, pp. 1–8.

Eden, R. (2013) 'Market forecasts for silicon carbide & gallium nitride power semiconductors. The World Market for Silicon Carbide & Gallium Nitride Power Semiconductors'.

Gao, R. *et al.* (2017) 'Solid-State-Transformer-Interfaced Permanent Magnet Wind Turbine Distributed Generation System with Power Management Functions', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), pp. 3849–3861. doi: 10.1109/TIA.2017.2679679.

Garrido, D. (2019) *Impacto de los semiconductores de banda ancha prohibida en el diseño de convertidores de potencia*. Mondragon Unibertsitatea.

Han, D. *et al.* (2017) 'Comparative Analysis on Conducted CM EMI Emission of Motor Drives: WBG Versus Si Devices', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), pp. 8353–8363. doi: 10.1109/TIE.2017.2681968.

He, J. *et al.* (2014) 'Application of wide bandgap devices in renewable energy systems - Benefits and challenges', in *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2014*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 749–754. doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016485.

Hussein, A. S. (2018) *SiC-Based Power Electronics for Wind Energy Applications*. University of Nottingham.

- Kim, J., Shin, D. and Sul, S. K. (2018) 'A Damping Scheme for Switching Ringing of Full SiC MOSFET by Air Core PCB Circuit', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), pp. 4605–4615. doi: 10.1109/TPEL.2017.2731861.
- Kimoto, T. (2015) 'Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices', *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(4). doi: 10.7567/JJAP.54.040103.
- Kortazar, I., Larrazabal, I. and Friedrichs, P. (2016) 'Analysis of hybrid modules with Silicon Carbide diodes, comparison with full silicon devices and the impact in Wind applications', in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/EPE.2016.7695491.
- Kyriakidis, A., Miracle, D. M. and Shisha, S. (2018) *Performance Evaluation of SiC Power MOSFETs for Hybrid & Electric Vehicle DC-DC Converters*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Lazard (2019) 'Lazard'S Levelized Cost of Energy Analysis Version 13.0', *Lazard.com*, 11(November), pp. 1–21.
- Li, H. (2017) *SiC technologies adoption is going to accelerate with a tipping point in 2019 - power SiC 2017: materials, Devices, Modules, and Applications report, Tech. rep.*
- Patel, M. T. *et al.* (2019) 'LCOE*: Re-thinking LCOE for Photovoltaic Systems', *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1711–1713. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980486.
- REN21 (2020) *Renewables 2020 Global status report*. Available at: [https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21\(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e\).html](https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e).html).
- She, X. *et al.* (2013) 'Wind energy system with integrated functions of active power transfer, reactive power compensation, and voltage conversion', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), pp. 4512–4524. doi: 10.1109/TIE.2012.2216245.
- Staudt, I. (2015) *3L NPC & TNPC Topology*, *Semikron*. doi: 10.1049/iet-pel.
- Williams, B. W. (2006) *Principles of Power electronics*. Glasgow: Barry W. Williams.
- Wilson, P. R. *et al.* (2018) *IEEE ITRW: International Technology Roadmap for Wide-Bandgap Power Semiconductors: An Overview*, *IEEE Power Electronics Magazine*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/MPEL.2018.2821938.
- Yaramasu, V. *et al.* (2015) 'High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies', *Proceedings of the IEEE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 740–788. doi: 10.1109/JPROC.2014.2378692.
- Zhang, H. and Tolbert, L. M. (2011) 'Efficiency Impact of Silicon Carbide Power Electronics for Modern Wind Turbine Full Scale Frequency Converter', *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 58(1). doi: 10.1109/TIE.2010.2048292.