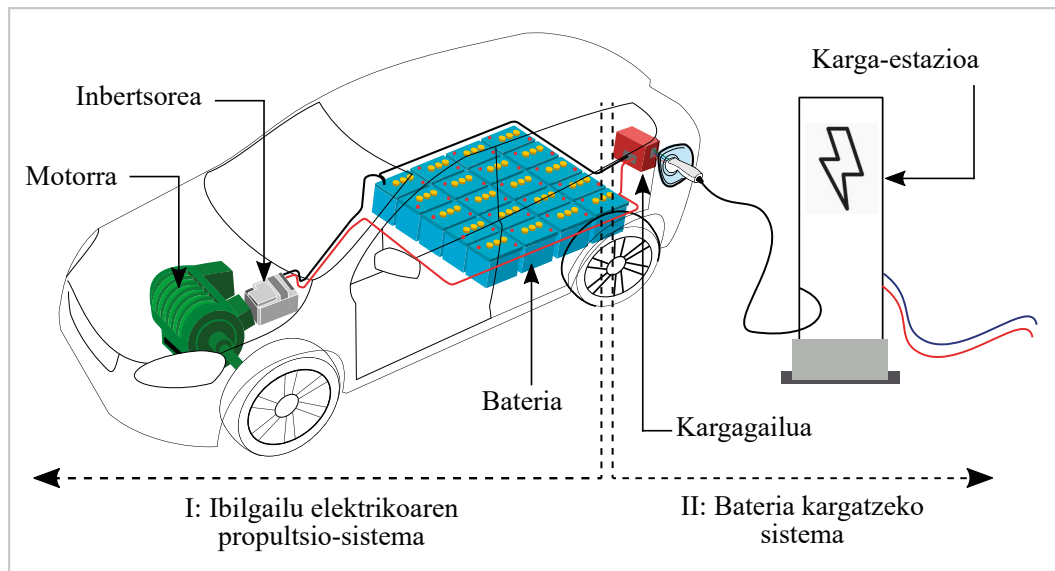


Ibilgailu elektrikoaren inbertsore trifasikoa: betiereko ezezaguna

Ibilgailu elektrikoaren mundu zirrargarrian, non bateriei eta motorrei buruz maiz hitz egiten baita, atzeko plano batean geratzen da potentzia-inbertsorea askotan, funtsezko eragilea izan arren. Normalean, elementu hori alde batera geratzen da ibilgailu elektrikoaren autonomiaz eta errendimenduz hitz egiten denean; hala ere, inbertsorea funtsezko gailu bat da. Esan liteke etorkizuneko propulzio elektrikoaren sinfonia-zuzendaria dela: melodia bat sortzen du baterietatik datorren korronea ibilgailua bultzatzeko korrone alferno bihurtzeko.

Ibilgailu elektriko baten propulzio-sistemak, nagusi, hiru osagai ditu: bateria, potentzia-inbertsorea eta motor elektrikoak. Ibilgailu batzuek hidrogenopilak erabil ditzakete baterien ordez, edo, entxufagarriak ez diren ibilgailu hibridoetan, kargagailu

elektrikoa alde batera gera daiteke. Hala ere, funtsezkoa da nabarmentzea trakzio elektrikoak duten ibilgailu guztiek eragingailu bat dutela (*drive* ingelesez), motor elektrikoak eta potentzia-inbertsoreak osatua.



Ibilgailu elektrikoaren propulzio-sistema osatzen duten eta ibilgailua kargatzen duten elementuak.

Bateriak biltegitratzen du ibilgailuak funtzionatzeko behar duen energia; egun litio-ioizko (Li-Ion) eta litio-ferrofosfatozko (LFP) bateriak dira nagusi. Bestalde, motor elektrikoak trakzio-elementu gisa funtzionatzen du, energia elektrikoak energia mekaniko bihurtzeko. Motor-teknologia nagusiak iman iraunkorren makina sinkronoak (PMSM) eta indukzio-makinak (IM) dira [1, 2].

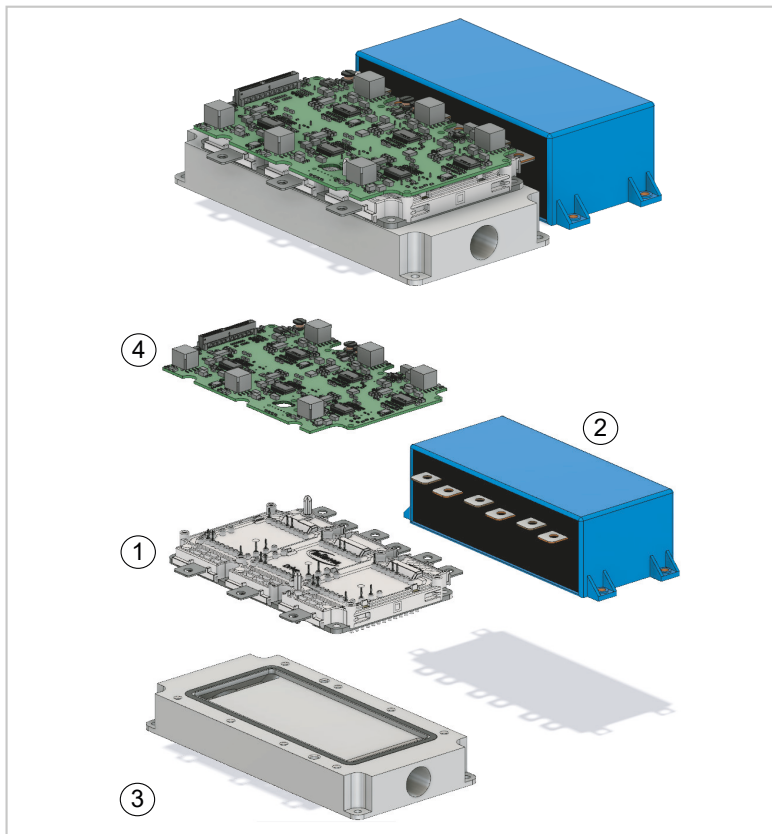
Inbertsoreari dagokionez, funtsezko eginkizun bat betetzen du bateriatik datorren korrante zuzena (DC) korrante alterno (AC) bihurtzean, hori baita motor elektrikoak erabiltzen duen energia-forma. Propulzio-sistemaren osagai bakoitzak ezinbesteko funtzio bat betetzen badu ere, inbertsorearen garrantzia gutxiesteko joera dago, baina haren

ekarpena ere erabakigarria da. Hura gabe ezinezkoa litzateke baterietan biltegitratutako energia motor elektrikoak erabil dezakeen forma batera eraldatzea.

Potentzia-inbertsorea

Inbertsorea propulzio-sistemaren elementu zentralizat har daiteke; izan ere, bateriaren eta motor elektrikoaren arteko bi norabideko energia-fluxua kontrolatzeaz arduratzen da, eta bitarteko gisa jarduten du. Inbertsoreak zenbait zati ditu:

1. Potentzia-modulua. Ibilgailuaren “bihotz elektrikoa” esaten zaio. Modulu honen barruan, potentzia-erdieroaleak daude, hala nola MOSFETak eta IGBTak. Horiek korrante elektrikoaren fluxua kontrolatzen duten etengailu elektronikoen rola



Infineon fabrikatzailearen potentzia-inbertsorearen prototipo komertziala.

betetzen dute. Kommutazio azkarrak (10-20 kHz I/Eetan) sistemaren errendimendua optimizatzea ahalbidetzen du. Robles *et al.* 2022 lanean [3] potentzia-moduluen eta gailu erdieroaleen hautabideen eta teknologien azterketa sakona egin genuen.

2. DC busaren kondentsadorea. Potentzia-inbertsoreak tentsio zuzeneko konexioa du; "DC bus" izenez ezagutzen da, eta kondentsadore bat edo gehiago izan ditzake. Nolabait esateko, kondentsadoreek inbertsorea bateriatik desakoplatzea lortzen dute, eta, hala, potentzia-erdieroaleen kommutazioak eragindako uhin-formak (korrontea eta tentsioa) leuntzen dituzte. Teknologien artean, polipropilenoazko film metalizatuko kondentsadoreak hobesten dira ibilgailu elektrikoe-tan, segurtasuna eta sendotasuna direla eta. Elementu errektibo horien teknologia xehetasunez aztertu genuen Matallana *et al.* 2019 lanean [4].
3. Hozte-sistema. Kudeaketa termikoa funtsezkoa da ibilgailu elektrikoetako potentzia-erdieroaleen errendimendua eta bizi-iraupena bermatzeko. Inbertsoreen kasuan, denbora-une berean korrontea eta tentsioak egoteak beroa sortzen du, potentzia-galerak gertatzen baitira, eta horrek eragina du erdieroaleen balio-bizitzan. Aire bidezko hozte-sistemak erraz inplementa daitezke, baina batzuetan ez dituzte asetzen automobilgintza-sektorearen eskaerak. Fabrikatzaile gehienek nahiago dituzte hozte likidoko soluzioak, bero-disipazio handiagoa eskaintzen baitute. Beroa ateratzeko metodo horien berri-kuspen zehatza egin genuen Robles *et al.* 2022 lanean [3].
4. *Driver* txartela. Elementu hau zirkuitu digitzalez osatuta dago gehienbat, eta sistemaren "garuna" balitz bezala jokatzen du, potentzia-erdieroaleen kommutazioak kontrolatuz. Erdieroaleen piztea

eta itzaltzea sinkronizatzen du, eta horregatik da garrantzitsua. Gainera, potentzia-moduluen tenperatura eta korrontea etengabe gainbegiratzen du, eta, hala, sistemaren segurtasuna bermatzen du.

Potentzia-inbertsorearen funtzionamendua

Inbertsorearen funtzionamendua ulertzeko, lagungarri da itzultzaile gisa deskribatzea. Imaginatu bateria eta motorra hizkuntza desberdinak hitz egiten dituzten bi pertsona direla. Inbertsoreak bien arteko itzultzaile gisa jokatzen du, bateriak eta motorrak hizkuntza berean ari balira bezala elkar uler dezaten. Baina, teknikoki, nola funtzionatzen du inbertsore batek?

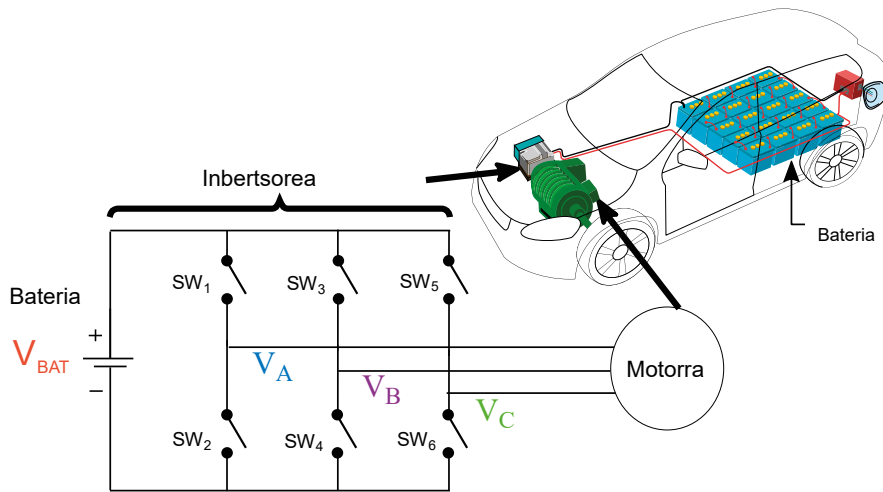
Motor elektriko baten abiadura kontrolatzeko, teknika hau erabiltzen da inbertsoreetan: pulstuzabaleraren modulazioa (PWM) [5]. Teknika horrek motorrera bidaltzen diren tentsio-pulstuen iraupena aldatuz funtzionatzen duena. Kommutazio-abiadura handiak motorrari aukera ematen dio seinale hori iragazteko; hala, korronte sinusoidalak lortzen dira, eta motorra birarazten da "zarata elektrikorik" sortu gabe. Abiadura txikiagoa nahi denean, tentsio-pulstuen laburragoak dira, eta abiadura altuagoa izateko, aldiz, luzeagoak dira. Horrek anplitude txikiagoko korronte sinusoidalak sortzen ditu.

Ingeniaritza-erronkak eta aurrerapenak

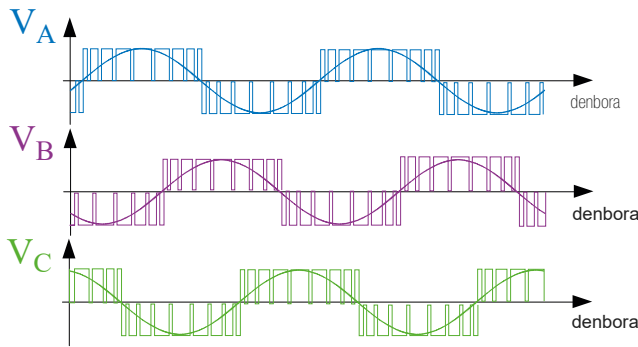
Denboran zehar, inbertsoreen ingeniaritzak aurrerapen esanguratsuak bultzatu ditu azaldu izan diren erronkei aurre egiteko. Hasiera batean, juntura-transistore bipolarrek (BJT) korrontearen kommutazioa ahalbidetu zuten, baina abiadura eta efizientzia aldetik prestazioak ez ziren hobere-nak. Aurrerago, MOSFET (1959an) eta IGBT (1979) transistoreen sorrerak erronka horiek gainditu zituen, eta eraginkortasun, abiadura eta energia



Bateriaren tentsioa seinale jarraitua da (DC) eta, beraz, konstantea denboran



Inbertsorearen etengailuak SW_1 - SW_6 ireki eta itxi egiten dira " $-V_{BAT}$ ", "0 V" edo " V_{BAT} " tentsio-mailak sortzeko eta, horrela, motorraren faseetan seinale alternoa (AC) lortzen da.



Tentsio-pultsuen zabalera inbertsorearen etengailuak irekita edo itxita dauden denboraren araberakoa da. Kontrol hori PWM modulazioari esker lortzen da.

Inbertsore baten funtzionamendua PWM modulazio-teknika erabiliz.

eraldatzeko ahalmen handiagoa lortu zen. Pulsuzabaleraren modulazioaren (PWM) implementazioak inbertsorearen irteeraren kontrola hobetu zuen, eta energia-galerak murriztea lortu zuen. Bestalde, kontrol digitalak, 70eko hamarkadan asmatutako lehen prozesadoreak hobetzea lortuta, erantzun dinamikoa hobetu zuen, azken belaunaldiko DPS eta FPGA txipetara pasatzean. Aurrerapen horiek energia elektrikoaren kudeaketa eraldatu dute, eta era guztietako aplikazioek (eolikoa, makina-erreminta, trenen trakzioa) inbertsorearen erabilera masiboa ahalbidetu dute aplikazio modernoetan, baita ibilgailu elektrikoetan ere.

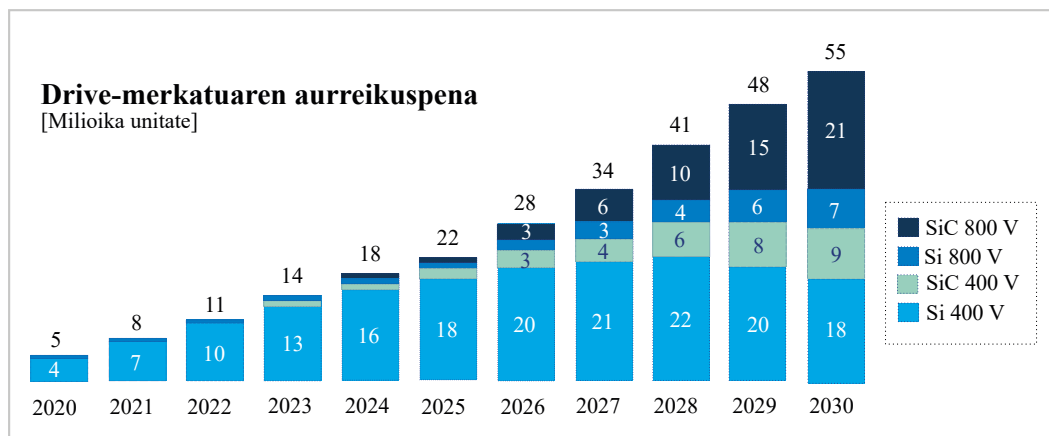
Potentzia-inbertsoreen etorkizuneko joerak eta berrikuntzak

Ibilgailu elektrikoaren joera nagusietako bat potentzia-dentsitatea optimizatzea da. Ingeniariak gogor ari dira lanean inbertsoreak sendoagoak eta pisuz arinagoak izan daitezen, horri esker ibilgailu elektriko eraginkorrago eta dinamikoagoak lortzeko. Horrek zuzenean eragiten du autonomian; hala, autonomia-maila handiagoa lortzen da, erabiltzaileei gidatzeko askatasun handiagoa eskaintzeaz ia eta bateriak birkargatzearekin lotutako kezkak murrizten dira.

Prestazio horiek lortzeko begira, funtsezkoa da silizio karburoan (SiC) oinarritutako erdieroale berriak inbertsoreetan sartzea, siliziozkoak (Si) baino eraginkorragoak baitira. SiC erdieroaleak sartzek inbertsoreen iraunkortasunari eta fidagarritasunari laguntzen die, sendoagoak baitira.

Gainera, karga-sistema azkarragoak eta eraginkorragoak lortzeko bilakaerak ibilgailu elektriko birkargaren pertzepzioa eraldatzen du. Azkar kargatzeko gaitasunari esker, eta inbertsoreen aurrerapen berriei esker, gidariei azkarrago kargatu ahal izango dituzte beren ibilgailuak; hala, kargatzeko denborarekin lotutako oztopoak desagertuko dira, eta ibilgailu elektrikoaren eguneroko praktikotasuna hobetuko da.

Zentzu horretan, 800 V-eko baterien etorrera karga azkarra iraultzen eta inbertsoreen eraginkortasuna hobetzen ari da. Tentsio-maila horiek karga azkarragoa ahalbidetzen dute, eta, horrez gain, motor eraginkorragoak eta sendoagoak lortzea ahalbidetzen dute, eta gidariei autonomia handiagoa eta gidatze-esperientzia hobea ematen diete.



Inbertsoreen merkatuaren aurreikuspena teknologiaren arabera, automobilgintza sektoreko datuetan oinarrituta [6].

Gainera, Vehicle-to-Everything (V2X) teknologia, ibilgailu elektrikoaren baterian gordetako energia gailu guztietara transmititzea ahalbidetzen duena, berrikuntza eraldatzaile gisa nabarmentzen da inbertsoreei dagokienez. Teknologia horrek gidariei aukera ematen die beren ibilgailuen energia modu malguan erabiltzeko, gailu elektronikoak kargatu edo elikatu ahal izango baituzte etxetik kanpo.

Ondorio gisa, esan daiteke ibilgailu elektrikoaren eta potentzia-inbertsoreen etorkizuneko joerak elkarri lotuta daudela, eta etorkizunean mugikortasun elektrikoak, jasagarria izateaz gain, guztiontzat irisgarriagoa ere izango dela. Autonomia handiagotik hasi eta kargatzeko denbora azkarragoetaraino, teknologia berritzaileen integrazioa etorkizun handiko egoera ari da eratzen, eta horrek mugikortasun elektrikoak eraldatuko ditu.

EAEko industria-sektorearen ekarpena

EAEko industria erreferente bihurtu da berrikuntzan eta teknologian; bereziki, ibilgailu elektrikoetarako propulzio-sistemen garapenean. CIE Automotive, JEMA Energy, Irizar/Creatioa, GKN Driveline, CAF eta ACICAE enpresen klusterrak, besteak beste, berebiziko garrantzia izan dute, fabrikatzaileekin (OEM) eta hornitzaile globalekin lankidetzan estuan jardun dutelako propulzio elektrikoaren sistematan aurrerapenak bultzatzeko.

Ingeteam edo JEMA enpresak erdieroale aurreratuaren teknologietan eta kontrol adimenduneko estrategietan espezializatzeak sendotu egin du euskal industria sektore horretako lider gisa. Halaber, Tecalia, Tekniker eta Ikerlan zentro teknologikoen nabarmen lagundu dute aurrera egiten, bateriak kudeatzeko sistematan ikerketa berritzaileak eginez. Horiek ezinbestekoak dira propulzio-sistemen errendimendua eta iraunkortasuna optimizatzeko.

Gure aldetik, EHUko APERT ikerketa-taldeko kideok bikaintasunarekin konprometitu jarraitzen dugu, energia-bihurgailuetarako eta kontroleko zirkuituetan aktiboki lan eginez. Euskal industriako enpresa liderrekin batera, hobekuntzak lantzen ditugu zenbait elementu garrantzitsutan, hala nola ibilgailu elektrikoaren potentzia-inbertsorean, eta ekarpenak egiten dizkiogu etorkizuneko jasagarritasunari, maila globalean. ●

Bibliografia

- [1] Lopez, I., *et al* (2019). Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: Technology, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, pp. 1-23.
- [2] Aretxabaleta, I., *et al* (2021). High-voltage stations for electric vehicle fast-charging: trends, standards, charging modes and comparison of unity power-factor rectifiers. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102177-102194.
- [3] Robles, E., *et al* (2022). The role of power device technology in the electric vehicle powertrain. *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 15, pp. 22222-22265.
- [4] Matallana, A., *et al* (2019). Power module electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, pp. 1-33.
- [5] Fernandez, M., *et al* (2023). Proposal of discontinuous PWM technique for five-phase inverters under open-phase fault operation, *Machines*, vol. 11, no. 3, pp. 1-13.
- [6] Robles, E. (2022). Nuevo convertidor de potencia para la reducción de los problemas derivados de la tensión de modo común en el tren de tracción de los vehículos eléctricos. *Tesis Doctoral UPV/EHU*.