

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE MONDRAGON
UNIBERTSITATEA**
MONDRAGON UNIBERTSITATEKO GOI ESKOLA POLITEKNIKOA

Trabajo fin de máster presentado para la obtención del título de
Titulua eskuratzeko master bukaerako lana

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍA Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA
ENERGIA ETA POTENTZIA ELEKTRONIKAKO UNIBERTSITATE MASTERRA

Título del Trabajo *Lanaren izenburua*

BIHURGAILU MULTIFASE BATEN DISEINUA ETA GARAPENA

Autor *Egilea*

ANDER JAUREGI GOÑI

Curso *Ikasturtea*

2016/2017

Título del Trabajo *Lanaren izenburua*

BIHURGAILU MULTIFASE BATEN DISEINUA ETA GARAPENA

Nombre y apellidos del autor

Egilearen izen-abizenak

JAUREGI GOÑI, ANDER

Nombre y apellidos del/los director/es del trabajo

Zuzendariaren/zuzendarien izen-abizenak

LUIS MIR

UGALDE, GAIZKA

Lugar donde se realiza el trabajo

Lana egin deneko lekua

IKERLAN, S.COOP.

Curso académico

Ikasturtea

2016/2017



El autor/la autora del Trabajo Fin de Máster, autoriza a la Escuela Politécnica Superior de Mondragón Unibertsitatea, con carácter gratuito y con fines exclusivamente de investigación y docencia, los derechos de reproducción y comunicación pública de este documento siempre que: se cite el autor/la autora original, el uso que se haga de la obra no sea comercial y no se cree una obra derivada a partir del original.

Master Bukaerako Lanaren egileak, baimena ematen dio Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoari Master Bukaerako Lanari jendeaurrean zabalkundea emateko eta erreproduzitzeko; soilik ikerketan eta hezkuntzan erabiltzeko eta doakoa izateko baldintzarekin. Baimendutako erabilera honetan, egilea nor den azaldu beharko da beti, eragotzita egongo da erabilera komertziala baita lan originaletatik lan berriak eratorzea ere.

1. LABURPENA

Dokumentu honetan **“BIHURGAILU MULTIFASE BATEN DISEINUA ETA GARAPENA”** MBL-aren (Master Bukaerako Lana) jarraipen zehaztua azalduko da. Lehenik eta behin teknologiaren gaur egungo egoera aztertuko da ikerketa publikazioetan oinarriturik, diseinu egoki bat burutu ahal izateko. Simulazio bitartez aurkeztuko dira diseinurako irizpideak eta beraien egokitasuna, bihurgailua osatuko duten elementu guztien aukeraketa justifikatzeko. Jarraian, hautatutako osagaien disposizioa definituko da diseinu mekaniko egoki bat lortzeko. Bihurgailuaren diseinu orokorra kontutan harturik kontrol egoki bat eta berau inplementatzeko interfazeak definituko dira ere. Azkenik proiektuaren emaitzak aurkeztu eta etorkizunerako ildoak proposatuko dira.

2. AURKIBIDEA

2. AURKIBIDEA

1. LABURPENA	3
2. AURKIBIDEA	4
3. SARRERA	6
3.1 AURREKARIAK	6
3.2 GAUR ARTE EGINDAKOA	6
3.3 SISTEMAREN TOPOLOGIAK	8
3.3.1 <i>Fase kopuru bereko inbertsore eta makina</i>	<i>8</i>
3.3.2 <i>Hainbat makina inbertsore bakarrekin</i>	<i>8</i>
3.3.3 <i>Hainbat inbertsore makina bakarrerako</i>	<i>9</i>
3.4 INBERTSORE MULTIFASIKOEN KONTROL MOTAK.....	10
3.4.1 <i>Kontrol bektoriala</i>	<i>10</i>
3.4.2 <i>DTC kontrola (Direct Torque Control)</i>	<i>12</i>
3.4.3 <i>Modulazioa</i>	<i>13</i>
3.5 ERREFERENTZIADUN IKERKETAK, UNIBERTSITATEAK, ZENTROAK EDO EGILEAK	14
3.6 MERKATUAN DAUDEN SOLUZIOAK.....	15
3.7 HELBURUAK.....	15
4. PROIEKTUAREN GARAPENA	16
4.1 ESPEZIFIKAZIOAK	16
4.1.1 <i>Bederatzi faseko eragintza</i>	<i>16</i>
4.1.2 <i>Hiru faseko eragintza.....</i>	<i>16</i>
4.2 DISEINU ELEKTRIKOA	17
4.2.1 <i>Topologia</i>	<i>17</i>
4.2.2 <i>IGBT-ak</i>	<i>18</i>
4.2.3 <i>Driver-ak</i>	<i>28</i>
4.2.4 <i>Heatsink-ak.....</i>	<i>29</i>
4.2.5 <i>DC buseko kondentsadoreak</i>	<i>34</i>
4.2.6 <i>Sentsoreak</i>	<i>36</i>
4.2.7 <i>Crowbar-a.....</i>	<i>37</i>
4.2.8 <i>Prekarga</i>	<i>39</i>
4.2.9 <i>Elementuen laburpena.....</i>	<i>41</i>
4.2.10 <i>Potentiako eskema.....</i>	<i>42</i>
4.3 DISEINU MEKANIKOA.....	43
4.4 KONTROLAREN DISEINUA.....	46
4.4.1 <i>Kontrol plataforma</i>	<i>46</i>
4.4.2 <i>Interfazeak.....</i>	<i>48</i>
4.4.3 <i>Kontrol estrategia</i>	<i>58</i>
4.4.4 <i>Inplementazioa</i>	<i>62</i>
5. EMAITZAK	74
6. ONDORIOAK ETA AURRERA BEGIRAKOAK	81
6.1 ETORKIZUNERAKO ILDOAK	81
7. ERREFERENTZIAK.....	82
8. IRUDIEN AURKIBIDEA	84
9. TAULEN AURKIBIDEA.....	87

2. AURKIBIDEA

10. ERANSKINA: IGBT PARALELIZAZIOA	88
10.1 DESOREKA ESTATIKOAK	88
10.1.1 <i>Erdieroaleen ezaugarriak</i>	88
10.1.2 <i>Konexio erresistentziak</i>	89
10.1.3 <i>Junction tenperatura</i>	89
10.1.4 <i>Ateko tentsioa</i>	90
10.2 DESOREKA DINAMIKOAK	90
10.2.1 <i>Driver komuna</i>	90
10.2.2 <i>Driver diskretua</i>	91
10.2.3 <i>Junction tenperatura</i>	91
10.3 OREKARAKO NEURRIAK	91
10.3.1 <i>Gomendioak</i>	92
10.4 IRTENBIDE ZEHATZAK	93

3. SARRERA

3.1 Aurrekariak

Urte asko dira korrante alternoko sare elektriko trifasikoa gizarte modernoaren muinean dagoen azpiegitura bat bihurtu zela. Horren ondorioz elektrizitate sorkuntza, garraio eta kontsumo prozesuetan potentzia sistema trifasikoak dira nagusi gaur egun. Kontsumoari dagokionez, mundu mailako energia elektrikoaren ia erdia makina elektrikoek bitartez energia mekaniko bihurtzen da, makina horien %80tik gora trifasikoa izanik [1].

Azken hamarkadetako potentzia elektronikaren garapenari esker, makina elektrikoak zuzenean sarera konektatu ordez inbertsore baten bitartez egiteko joera handitu da. Konfigurazio honek, abiadura aldakorrekiko kontrola ahalbidetzeaz gain, sare elektrikoaren eta kargaren fase kopuruen arteko menpekotasuna hausten du, eragintza multifasikoei ateak irekiz.

3.2 Gaur arte egindakoa

Hainbat iturriren arabera [2]–[4] eragintza edo akzionamendu multifasikoen lehendabiziko kontzeptu eta inplementazioak 60ko hamarkadan ematen hasi ziren. Horren adibide da 1969an argitaratutako artikulu zientifikoa [5], zeinetan 5 faseko indukzio motor bat kontrolatzen den VSI inbertsore baten bitartez. Hala ere, garai horretan potentzia elektronika garatzen hasi berria zegoenez, ikerketa gaia ez aurrera ez atzera geratu zen muga teknologikoen ondorioz. Makinak sortutako momentuak frekuentzia baxuko kizkurdura handiegia izatea eta maila baxuko korrante harmonikoak sareratzea ziren arazoietako batzuk.

Aurrerapen teknologikoekin batera akzionamendu multifasikoen berpizte bat eman zen 90ko hamarkadan, eta mende berriaren hasierarekin batera aplikazio jakin batzuetan erreferentzialtasuna hartzen hasi zen. Gehien bat potentzia altuko eta fidagarritasun handiko erabileretarako aztertu izan da, hala nola trenen trakzioa, itsas garraioa, ibilgailu elektriko zein hibridoekiko trakzioa eta hegazkinen arloa ere bai (More Electric Aircraft). Kalkulu teorikoetan oinarritutako ikerketa baten arabera [6], efizientzia aldetik eraginkorrak dira inbertsore multifasikoak 200/300 kW-ko potentzietatik gora. Aplikazio hauetarako duen bideragarritasuna trifasikoekiko hurrengo abantailetan oinarrituta dago:

- **Akatsen tolerantzia handiagoa:** Egitura erredundantea izanik makina elektriko zein inbertsorearen fase baten edo gehiagotan akatsa emanda ere sistemak funtzionamenduan jarraitu dezake. Sistemaren fase kopurua eta fase akastunen arabera prestazioen murrizketa maila desberdina izango da; 15 faseko sistema baten fase batek huts eginez gero ondorioak minimoak izango lirateke, sistema trifasiko batek aldiz martxan ozta-ozta jarraituko luke eta abiarazteko sistema gehigarri bat beharko luke. Orokorrean potentzia eta momentua txikitu behar dira, prestazioak mantentzekotan faseko korrantea handitu eta sistemaren muga termikoa gainditzeko arriskua baitago. Horrez gain korrante desorekak ematen dira eta momentuan kizkurdura maila asko handitzen da. Hori dela eta akatsen aurrean kontrol aldaketa bat ematea proposatzen da hainbat ikerketetan. [2], [3], [6], [7].

- **Faseko korrante txikiagoa:** Potentzia berdineko sistema lortzeko faseko korrante txikiagoa behar da, maila baxuagoko erdieroaleekin nahikoa izanik. Izan daiteke potentzia altuko kasuetan erdieroaleen paralelizazioa ekiditea ere. Era berean, erdieroale berdinekin potentzia altuagoko sistema lortu daiteke [2], [3], [6].
- **Makinaren momentu hobea:** Garatutako momentuaren kizkurduraren anplitudea txikitu eta bere maiztasuna handitu egiten da [2], [3], [6], [7].
- **Kontrolerako aldagai gehiago:** Makinaren fluxua eta momentua kontrolatzeko bi korrante dira beharrezkoak. Aldagai gehiago eskuragarri izanda beste zenbait funtzio burutu daitezke, hala nola inbertsore bakar batekin hainbat makina kontrolatzea edota momentu gehiago garatzea harmoniko jakin batzuk gehituz [2], [3], [6].
- **Harmoniko gutxiago:** Korranteetan eta sortutako fluxuan harmonikoen maila murriztagoa izateak galerak txikitzea eta errendimendu handiagoa izatea ahalbidetzen du. Era berean DC buseko korrantearen harmoniko maila ere baxuagoa da [2], [3], [7].

Abantaila hauek kontuan hartzekoak dira aipatutako aplikazio zehatzetarako, espezifikazio bereziki zorrotzak bete behar direnean. Kasu horietan, aukera komertzialik ez dagoenean edota espezifikazioak bete ezin direnean, eragintza multifasikoak aukera on bat izango dira, erabilera orokorra izango duten akzionamenduetan normalena hiru faseko ohiko sistema delarik egokiena gaur egun. Hala ere, sistema multifasikoek ere badituzte hainbat desabantaila:

- **Modulazio konplexua:** Sistemaren fase kopuruarekin batera kontrolatu beharreko erdieroale kopurua handitu egiten da. Sistema trifasikoekin konparatuz modulazio estrategia jakin batzuen konplexutasun matematikoa eta horrek dakarren kostu konputazionala areagotu egiten da [8]–[10].
- **Akatsak:** Elementu gehiago edukitzeak akatserako probabilitate handiagoa suposatzen du. Honek eragintzaren fidagarritasunean eragina negatiboa eduki dezake [10].
- **Kostua:** Elementu gehiago dituen sistema izanik eta, gehien bat, masa produktorik ez duten produktuak izanik, ohiko sistema trifasikoak baino garestiagoak dira. [2], [10]

Gaiaren gaineko ikerketa lan asko egin den arren, maila komertzialean ez du islarik eduki. Eragintza trifasikoen masa produkzioak haien kostua oso baxua izatea ahalbidetzen du, eta horren aurrean sistema multifasikoek ez dute prezio aldetik lehiatzerik. Era berean, urte luzeetako estandarizazioari esker makina elektriko trifasikoak ia edozein ekoizleren inbertsoreekin elikatzea posible da, erraztasun eta erosotasun horrek ere trifasikoekiko joera bultzatzen du.

3.3 Sistemaren topologiak

Askotan merkatuak eta bezeroek definitzen dute zein den sistemaren topologiarik egokiena, eta kasu honetan ez da sailkapen hori eman oraindik. Hori dela eta, akzionamendu multifasiko mota asko topatu daitezke ikerkuntza lanetan, bata bestearengandik oso desberdinak izan daitezkeenak.

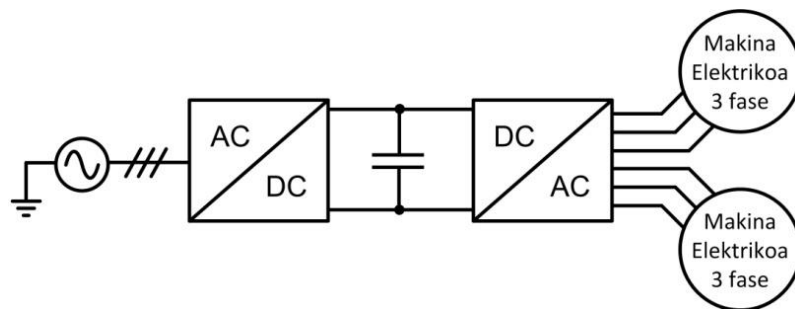
3.3.1 Fase kopuru bereko inbertsore eta makina

Sistema trifasiko arruntetan gertatzen den bezala, n faseko makina bat kontrolatzeko n fasekun inbertsore bat erabiltzean datza sistema mota hau. Talde honen barruan hainbat inbertsore topologia aurkezten dira literatura zientifikoan.

- **VSI multifasikoak:** Bi nibelesko inbertsoreari adarrak gehituz eraikitako bihurgailuak dira hauek. Topologia hau sistema trifasikoetan orokortuena da eta fase anitzeko sistementzat moldatutako modulazioen gaineko ikerketa ugari daude [4], [9], [11]. Aztertutako artikuluetan ikusi ahal izan den eta [2], [12] artikuluetan berresten den bezala, bi nibelesko n faseko inbertsorearekin fase kopuru bereko makina kontrolatzea da ohikoena akzionamendu multifasikoetan.
- **Inbertsore multinibel multifasikoak:** Bihurgailu trifasikoetan existitzen diren topologia multinibelei paraleloan adarrak gehitzean datza inbertsore mota hau ere. Multifasiko izateagatik duen korrontearen banaketaz gain, multinibel izanda erdieroale bakoitzak jasan beharreko tentsio maila ere txikiagoa da aplikazio jakin baterako. Bi mailakoekin konparatuta seinaleen eduki harmoniko txikiagoa eta konmutazio maiztasun baxuagoa dira beste ezaugarrietako batzuk [13], [14].
- **Bihurgailu matrizialak:** Bihurgailu mota hauek n faseko sarrerako korronte alternoa m faseko irteera korronte alterno bihurtzen dute erdibideko DC etaparik gabe. Bihurgailu matrizialen defendatzaileek bolumen murrizketa esanguratsuz gain bizitza luzeagoa ere aldarrikatzen dute buseko kondentsadore handia behar ez izateagatik [15].

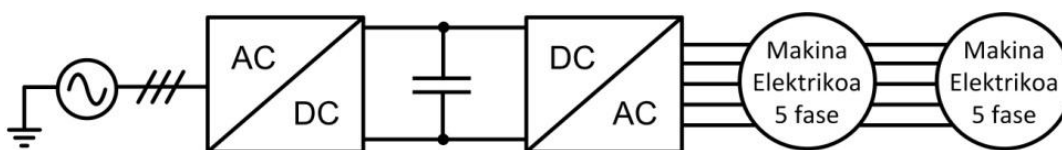
3.3.2 Hainbat makina inbertsore bakarrarekin

Fase anitzeko inbertsorea edukitzeak fase kopuru txikiagoko makina bat baino gehiago kontrolatzea ahalbidetzen du, $n * m$ fase kopuruko inbertsore baten bitartez m faseko n makina kontrolatzea hain zuzen ere. Adibidez 6 faseko inbertsore batekin bi makina trifasiko kontrolatu daitezke.



Irudia 1. Bi makina trifasiko 6 faseko inbertsore baten bitartez kontrolatuak.

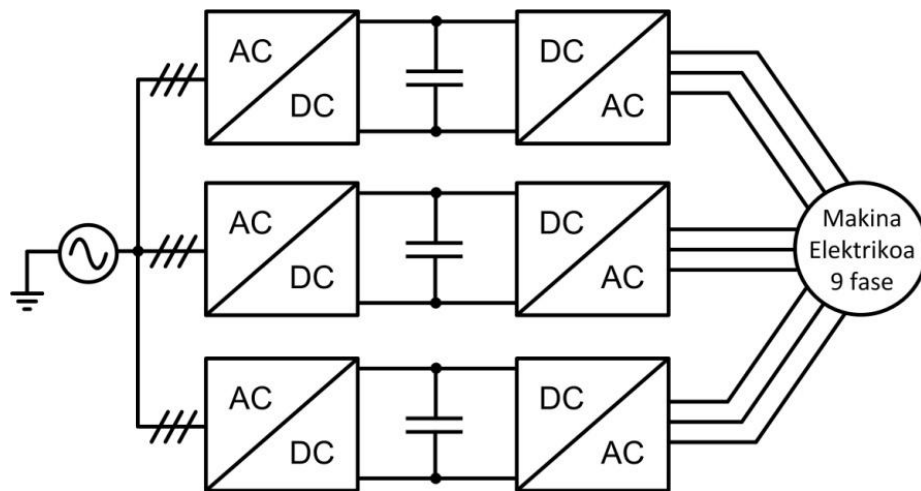
Beste alde batetik, makina bat kontrolatzeko 2 korrante kontrolatzearekin nahikoa dela kontuan hartuta, n faseko inbertsore baten dauzkagun gainontzeko aldagaien bitartez seriean konektatutako n faseko makina bat baino gehiago kontrolatzeko aukera dago. Adibidez, 5 faseko inbertsore baten bitartez 2 fasetako korronteekin 5 faseko makina bat kontrolatuko daiteke eta beste bi fasetako korronteekin 5 faseko bigarren makina bat [2]. Kontutan hartu beharra dago erdiko makina hariikatu irekikoa (open-end winding) izan behar dela serieko konexioa ahalbidetzeko.



Irudia 2. Seriean jarritako bi makina inbertsore bakarrarekin kontrolatuak.

3.3.3 Hainbat inbertsore makina bakarrerako

Ikerketa lan batzuetan ageri den bezala makina multifasiko jakin baten akzionamendua ohiko bihurgailu trifasikoen bitartez egin daiteke. Adibidez, 9 faseko makina bat kontrolatzeko hiru bihurgailu trifasiko komertzial erabili daitezke [16] artikuluan egin bezala. Topologia honek hainbat abantaila ditu: ohiko bihurgailu komertzialak erabiltzearen merketasuna, ezaguna den teoria zein teknologia erabiltzea eta erredundantzia handiagoa akatsen aurrean, banatutako DC busak edukitzekotan. Hala ere, potentziako bloke modularren arteko desberdintasun txikiak funtzionamendu okerra sortu dezakete. Esate baterako, DC busetako tentsioak desberdinak direnean korrante desorekak sortzeko arriskua dago. Busetako tentsio maila erregulatzea izan daiteke irtenbide bat, nahiz eta desberdintasunak txikiak direnean kontrolak efektu hau konpentsatu egiten duten. Beste alde batetik, inbertsoreen arteko sinkronizazioa kontuan hartzekoa da. Kontroladoreen diskretizazioak arazoak suposa ditzake sinkronizazio aldetik, hori dela eta [16], [17]-n egin bezala maila desberdinetako kontrolak aurkezten dira. Goiko maila baten sistema osoaren abiadura eta momentu kontrola ematen da, inbertsore bakoitzarentzat diskretuki maila baxuko korrante kontrola eta PWM-a burutzen delarik.



Irdia 3. 9 faseko makina bat hiru inbertsore trifasikoekin kontrolatuta.

3.4 Inbertsore multifasikoen kontrol motak

Gainontzeko akzionamenduetan bezala, kontrolerako estrategia anitzak erabili izan dira eragintza multifasikoen arloan. Hasiera batean V/f kontrol egitura sinpleak implementatzen hasi ziren arren, gaur egun kontrol bektorialek eta DTC kontrolek bereganatu dute garrantzia.

3.4.1 Kontrol bektoriala

Hiru faseko kontrol bektorialean egiten den bezala, makinaren korrontek bektorialki adierazi eta kontrolatu egiten dira bi dimentsioko sistema baten. Eskuarki errotoreko fluxuari lotutako zeharkako kontrola burutzen da, makina mota bakoitzaren kasuan moldaketa txikiak beharko dituen.

Horretarako, lehenik eta behin aldagaien arteko menpekotasuna hausten da deskoplamendu transformazioaren bitartez. Clarke-ren transformatu bezala ere ezaguna den erreminta matematiko honek Irdia 4-ko itxura du n dimentsioko sistema generiko batentzat, $\alpha = 2\pi/n$ izanik.

$$\underline{C} = \sqrt{\frac{2}{n}} \begin{bmatrix}
 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \dots & \cos 3\alpha & \cos 2\alpha & \cos \alpha \\
 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \dots & -\sin 3\alpha & -\sin 2\alpha & -\sin \alpha \\
 x_1 & 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \dots & \cos 6\alpha & \cos 4\alpha & \cos 2\alpha \\
 y_1 & 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & \dots & -\sin 6\alpha & -\sin 4\alpha & -\sin 2\alpha \\
 x_2 & 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \dots & \cos 9\alpha & \cos 6\alpha & \cos 3\alpha \\
 y_2 & 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \dots & -\sin 9\alpha & -\sin 6\alpha & -\sin 3\alpha \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 x_{(n-4)/2} & 1 & \cos \left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \dots & \cos 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos \left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) \\
 y_{(n-4)/2} & 0 & \sin \left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \sin 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \dots & -\sin 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & -\sin 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & -\sin \left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) \\
 0_+ & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \dots & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\
 0_- & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \dots & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2}
 \end{bmatrix}$$

Irdia 4. Clarke-ren transformazio matrizea n faseko sistementzat [2].

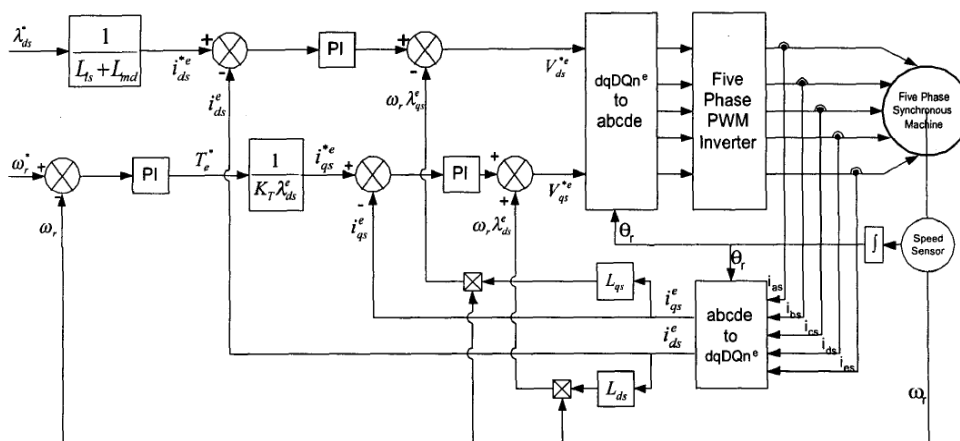
Ikus daitekeen bezala, binaka parekatuta dauden hainbat azpisistema desakoplatu sortzen dira transformazioaren ondorioz. $\alpha - \beta$ aldagaiak izango dira makinaren fluxua eta momentua era independentean kontrolatuko dituztenak, eragintza trifasikoetan bezala.

Bestalde, eragintzaren fase kopuruaren arabera hainbat $x - y$ azpisistema sortuko dira, zeinetan ez den estatore eta errotorearen arteko akoplamendua ematen, eta beraz, ez den momentuaren osagai nagusiari ekarpenik egiten. Dena den, $x - y$ plano bakoitzak kontrolatutako aldagaiaren harmoniko jakin baten gaineko eragin zuzena dauka. Adibide bezala, 5 faseko sistema baten osagai fundamentalak eta hirugarren harmonikoa kontrolatzea posible izango da eta 9 faseko sistema baten hirugarren, bosgarren eta zazpigarren harmonikoak osagai nagusiaz gain.

Azkenik, fase kopuru bakoitiko sistemetan zero sekuentziako aldagai bat ageri da eta sistema bikoitietan aldiz bi. Izar konexioa duten sistemetan aldagai honek ez dauka zirkulatzeko gaitasunik.

Clarke-ren transformazio honen ondoren transformazio errotazionala erabili ohi da, aldagaien kontrola PI erreguladoreen bitartez egin ahal izateko ohiko kontrol bektorial trifasikoetan egiten den bezala. Kontrol begiztei dagokienez, abiadura kontrola burutzeko kontsigna jakin batzuk sortzen dira makina motaren arabera, korrante kontsigna bilakatuko direnak erregulatu ahal izateko. Azkenik, korrante jakin horiek lortzeko sortutako tentsio erreferentziak berriz ere n faseko sistemara pasatzen dira alderantzizko transformazioen bitartez. Tentsio erreferentzia hauetan oinarrituta inbertsorearen konmutazio aginduak sortuko dira modulazio estratigiari jarraituz, makinarengan tentsio bat sintetizatu eta kontrol begizta itxiz.

Irudia 5-en kontrol bektorialaren eredu bat ikus daiteke. Eskema hori kontrolatuko den makinaren arabera moldatu behar da, erreluktantzia sinkronoko makina baten kontrola ageri da kasu honetan. Iman iraunkorreko makina baten kasuan adibidez d ardatzeko kontsignak ez luke fluxua sortzeko funtzioa edukiko, eta makinaren ereduarekin zerikusia duten parametroak aldatu beharko lirateke, indukzio makinaren kasurako bezala. Hala ere, kontrolaren filosofia berdina da edozein kasutan.

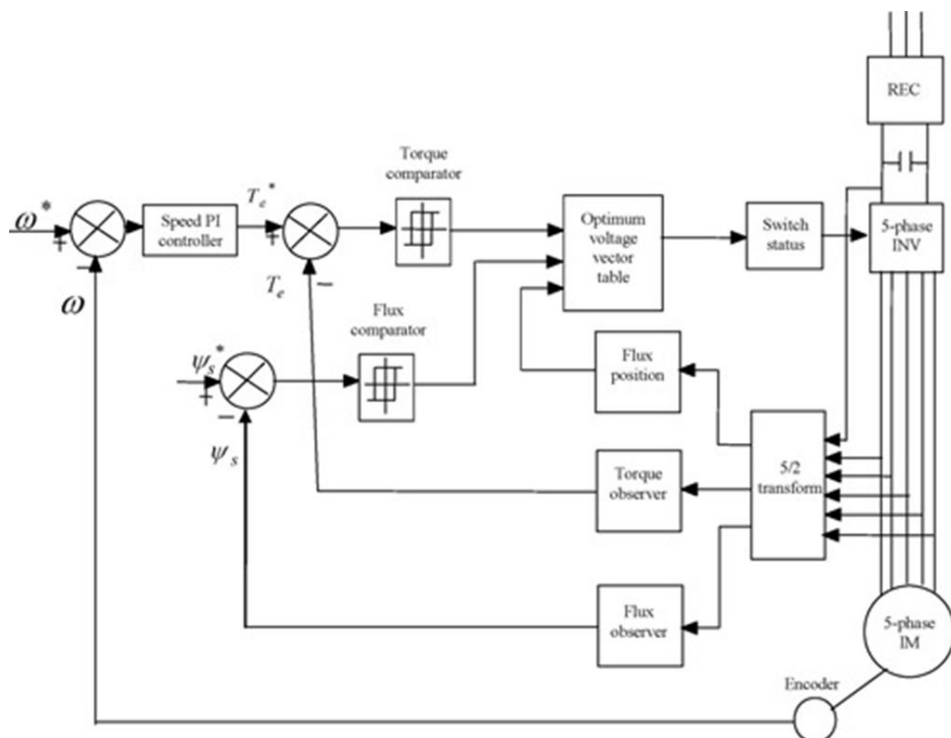


Irudia 5. Kontrol bektoriala 5 faseko erreluktantzia sinkronoko makina batentzat[18].

Bestalde, soilik bi korrante kontrolatzea nahikoa den arren, makinaren edo elikaduraren ez-idealtasunen ondorioz eduki harmoniko altua duen tentsioa sortzeko arriskua dago. Hori dela eta [2], [3] artikuluetan aipatzen den bezala $x - y$ planoetako aldagaiak erregulatu daitezke harmoniko jakin batzuen gaineko kontrol osoa edukitzeko. Aldagai gehigarri hauek sortutako tentsioaren eduki harmonikoaren gaineko kontrol zehatzagoa ahalbidetzen dute, alde batetik haien balioa zerora eramanda THD ahalik eta txikiena bilatu ahal izateko edo, kontrakoak eginez, zero sekuentziako harmonikoak txertatuz garatutako momentua handitzeko.

3.4.2 DTC kontrola (Direct Torque Control)

Kontrol estrategia hau tentsio eta korranteetatik eratorritako makinaren fluxu eta momentuaren estimazioetan dago oinarrituta. Bi aldagai hauek (fluxua eta momentua) histeresi kontrolaren bitartez erregulatzen dira eta taula baten oinarriturik tentsio bektorerik optimoena aplikatzen da kasu bakoitzean. Teknika honek konmutazio frekuentzia aldakorra dakar berarekin eta maila baxuko eduki harmonikodun tentsioak sortzen dira. DTC kontrolaren beste aldaera batek PWM modulazioak aplikatzen ditu konmutazio frekuentzia finkoa mantendu eta eduki harmonikoaren kontrola ahalbidetzeko.



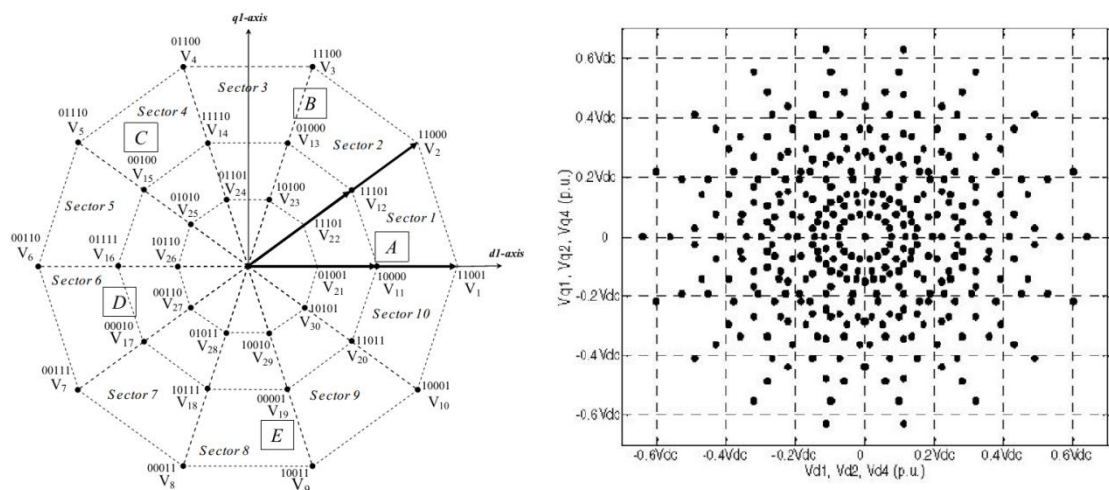
Irudia 6. Histeresian oinarritutako DTC kontrola 5 faseko indukzio makina batentzat [2].

Kontrol mota hauetan kontrol bektorialean aipatutako transformazio konplexuak behar ez diren arren, makinaren eredu zehatza behar da fluxu eta momentuaren estimazioa egiteko eta tentsio bektore optimoen taularen diseinua kritikoa da.

3.4.3 Modulazioa

Akzionamendu trifasikoetan aplikatzen diren modulazio ezagun berdinak erabiltzen dira fase anitzeko sistemetan. Jarraian bakoitzaren ezaugarri nagusiak aurkeztuko dira:

- **Carrier based PWM:** Modulazio honetan tentsio erreferentzia seinale trianguluar batekin konparatzen da fase bakoitzeko konmutazio aginduak sortzeko. Abantaila nagusia implementazio erraztasuna da, fase kopurua handitzearekin batera geroz eta abantaila nabarmenagoa dena. Hiru faseko modulazioan bezala DC busari ateratako etekina handitu daiteke zero sekuentziako harmonikoak txertatuz tentsio erreferentzia seinaleei.
- **Space Vector PWM:** Modulazio estrategia honetan inbertsoreak sortu ditzakeen tentsio bektoreak konbinatuz erreferentzia bektorea sintetizatzen da. Sistema trifasikoaren kasuan ez bezala, tentsio bektoreak hainbat planotan ageri dira hiru dimentsioko sistema bat osatuz. Era berean, bektore kopurua 2^n dela kontuan hartuta, konplexutasun handiko bektore espazioak ageri dira sistema multifasikoetan.



Irudia 7. 5 faseko bektore espazioa [9] eta 9 faseko bektore espazioa [19].

Modulazioaren konplexutasuna dela eta ikerketa lan ugarran [2], [3], [9], [18], [19] soilik bektorerik luzeenak erabiltzea proposatzen da, nahiz eta horrek harmonikoak sortzea dakarren. n faseko sistema baten $n - 1$ bektore aktibo erabili behar dira kalkulu bakoitzean harmonikoen gaineko kontrola bermatzeko. Modu horretan bektore erresultantea kontrol bektorialaren atalean (3.4.1) aipatutako $\alpha - \beta$ planoan geratuko da $x - y$ planoetako balorea nulua izanik.

- **Selective harmonic elimination:** Modulazio estrategia honetan aurretik kalkulaturako konmutazio gutxi batzuk gehitzen zaizkio seinale karratuko modulazioari. [4] artikuluan 500 Hz-tan lan egiten duen modulazio honekin sistemaren potentzia %30 handitu daitekeela defendatzen dute elementuen tenperatura maximo berdina lortuz 4 kHz-ko PWM sinusoidalarekin alderatuz.

- **Beste modulazio batzuk:** Ikerketan lanetan hain ohikoak ez diren sistementzat ere modulazio estrategiak aztertuak izan dira. Alde batetik, sistema multifasiko multinibeletan, kasu trifasikoetatik ezagunak diren Carrier Based PWM-ren moldaketak proposatzen dira: LS-PWM (Level Shifted PWM), PD-PWM (Phase Disposition PWM) eta APOD-PWM (Alternating Phase Opposition PWM). Bestetik, bihurtu matrizialen arloan definitutako estrategiarik ez dagoen arren, Carrier Based PWM-an oinarritutako soluzioak ikertu izan dira Space Vector estrategiekin batera [8].

3.5 Erreferentziadun ikerketak, unibertsitateak, zentroak edo egileak

Eragintza multifasikoen arloko ikerketa lanetan erreferentzialtasun handieneko zentroak eta egileak bilatu dira argitaratutako artikuluen bolumen eta kalitatearen arabera. Egileen argitalpenek duten irismena neurtzeko Scopus bilatzaileak eskaintzen duen h indizea baloratu da.

Lehenik eta behin Liverpool-eko John Moores unibertsitatea aipatu behar da, Emil Levi ($h41$) egile erreferentziaren presentziarekin. Ikerlari honek 250 argitalpenetik gora ditu eta horien gehiengoa eragintza multifasikoen ingurukoak dira. Berarena da [3] artikulua, 700 aipamenetik gora dituena, edota [2] artikulua ia 600 aipamenekin. Ondoren aurkeztuko diren gainontzeko erreferentziadun unibertsitate eta egile gehienekin elkarlanean egindako argitalpenak dauzka. Unibertsitate bereko Martin Jones ($h39$) ikerlariak ere presentzia garrantzitsua dauka arlo honetako argitalpenetan, 70 artikuluk bere sinadura daramate.

Beste unibertsitate batzuek ere artikuluko kopuru esanguratsuak argitaratu dituzte gai honen inguruan. Haien artean Bolognako unibertsitateak 40 artikuluko baino gehiago dauzka Luca Zarri ($h18$), Angelo Tani ($h27$), Giovanni Serra ($h28$) eta Domenico Casadeiren ($h32$) eskutik. Bestetik Qatar unibertsitateak ere 40-tik gora lanekin kontaktatzen du Hamid A. Toliyat ($h49$) eta Atif Iqbalen ($h16$) presentziarekin. Sevillako unibertsitateak ia 60 ikerketa lan dauzka Federico Barrero ($h26$) eta Sergio Toral ($h22$) ikerlarien izenean.

Eremu akademikoko ikerketa lanez haratago, garrantzia handiko lanak burutu dira ere. Haien artean European Green Vehicles Initiative aliantza publiko-privatuak burututako Castor proiektua dago. 2013an amaitutako lan honen emaitza 6 faseko eta $60kW$ -ko trakzio akzionamendua izan zen ibilgailu elektrikoentzat. Proiektu honen lekukoa hartuz MotorBrain proiektuak Irudia 8-n ageri den 9 faseko bihurtu eta makina elektriko integratua garatu zuen.

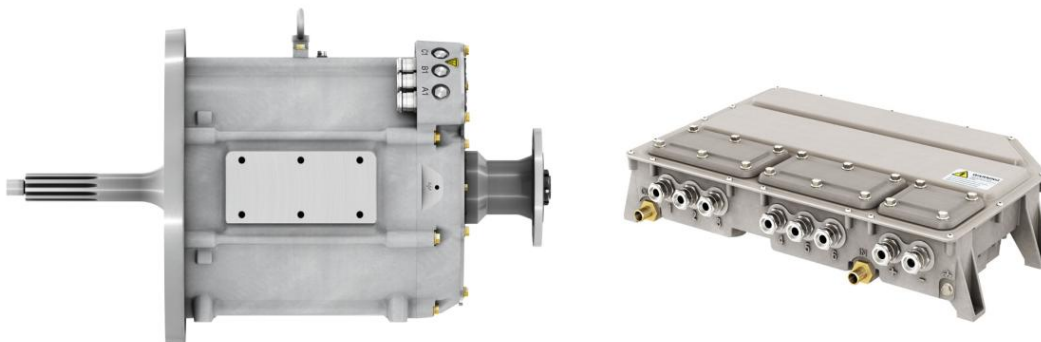


Irudia 8. MotorBrain proiektuko 9 faseko makina-inbertsore integratua.

3.6 Merkatuan dauden soluzioak

Orain dela urte gutxi eragintza multifasikoek ez zeukaten inolako presentziarik merkatuan. 2007an argitaratutako [2] artikuluan esaten den bezala orduan ez zegoen ez makina ezta inbertsore multifasikorik merkatuan. Oihartzun handiegirik izan ez duten arren, badira merkatura azken urteetan ateratako produktu batzuk.

Esate baterako ibilgailu elektrikoan alorrean dabilen *tm4* enpresa kanadarrak hainbat eragintza multifasiko dauzka eskuragarri. SUMO MD eta SUMO HD familien barnean akzionamendu multifasiko ugari eskaintzen ditu hainbat tentsio, potentzia eta abiadura mailatan. Kasu guztietan kanpo errotoareko makina elektrikoak erabiltzen dituzte, potentzia eta momentu dentsitate altuago eta biziraupen luzeagoa dutela esanez. Bestalde, inbertsoreari dagokionez modeloaren arabera 6 edo 9 faseko inbertsore binibelak dauzkate eskuragarri.



Irudia 9. TM4-ren kanpo errotoareko makina eta 6 faseko inbertsorea.

3.7 Helburuak

Master bukaerako lanaren helburua fase anitzeko inbertsore baten diseinua eta garapena da. Bi noranzkoko DC-AC bihurgailu hau Ikerlaneko tentsio ertaineko laborategian makina elektrikoan eragintzarako baliatuko da eta elikatuko den makinaren arabera bi aplikazio nagusi izango ditu. Alde batetik makina multifasikoaren prototipoen entsegurako funtzionalitatea bete behar du. Bestetik, ohiko makina trifasikoaren akzionamendua burutzeko ere moldagarritasuna eskatzen zaio. Hori dela eta, bihurgailua diseinatzerako orduan espezifikazio bikoitza bete beharko da, bi aplikazioen eskakizunak bete eta haien arteko bateragarritasuna bilatuz.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4.1 Espezifikazioak

4.1.1 Bederatzi faseko eragintza

Inbertsorearen lehendabiziko funtzioa bederatzi faseko makina elektriko bat elikatzea izango da. Akzionamendu multifasikoen ikerketarako erabiliko den prototipoaren beharrak Taula 1-en ageri dira.

Bihurgailuaren eskakizunak makina multifasikoen eragintzarako	
Fase kopurua	9 + Crowbar
Potentzia	50 kW
Buseko tentsioa	650 V _{DC-nominal} [450 – 800]
Faseko korrontea	30 A _{RMS}
Faseko tentsio konposatua	400 V _{fase-fase}
Frekuentzia elektrikoa	-
Kommutazio frekuentzia	-

Taula 1. Bihurgailuaren eskakizunak makina multifasikoen eragintzarako.

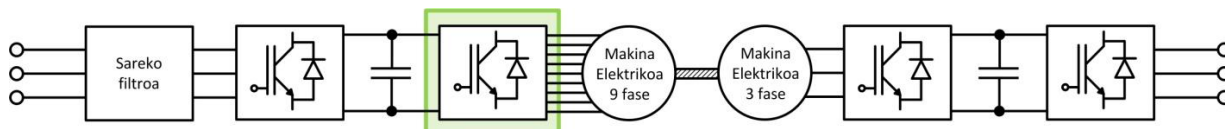
4.1.2 Hiru faseko eragintza

Makina trifasikoen akzionamendurako Taula 2-ko eskakizunak bete beharko ditu bihurgailuak.

Bihurgailuaren eskakizunak makina trifasikoen eragintzarako	
Fase kopurua	3 + Crowbar
Potentzia	130 kW
Buseko tentsioa	900 V _{DC-max}
Faseko korrontea	250 A _{RMS}
Faseko tentsio konposatua	400 V _{fase-fase}
Frekuentzia elektrikoa	130 Hz
Kommutazio frekuentzia	Diseinuan definitzeke (> 4 kHz & ≈ 10kHz)

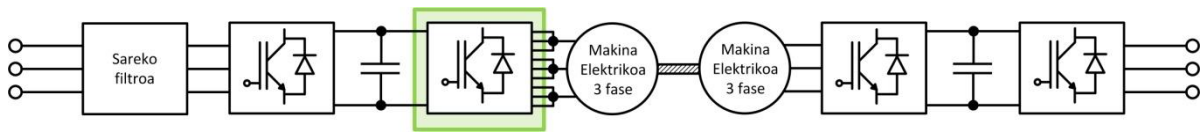
Taula 2. Bihurgailuaren eskakizunak makina trifasikoen eragintzarako.

Kasu honetan potentzia eta korronte maila altuagoak kudeatu beharko dira eta adarren paralelizazioaren bidez egingo da 9 faseetatik 3 faserako inbertsorearen hibridazioa. Diseinu elektrikoaren atalean garatuko da sakonean prozedura hau.



Irudia 10. Laborategiko sistema makina multifasikoen eragintzarako.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 11. Laborategiko sistema makina trifasikoen eragintzarako.

Irudia 10 eta 11-n inbertsoreak sistema orokorraren baitan izango duen kokapena ikusten da. Saretik ardetuz lortzen den DC busetik elikatuko da inbertsorea. Aldi berean saretik bariadore baten bitartez kontrolatutako hiru faseko makina bat izango da karga mekanikoa. Era berean, inbertsorearen bi funtzionalitateetarako komunak izango diren hainbat eskakizun ere kontutan hartu behar dira.

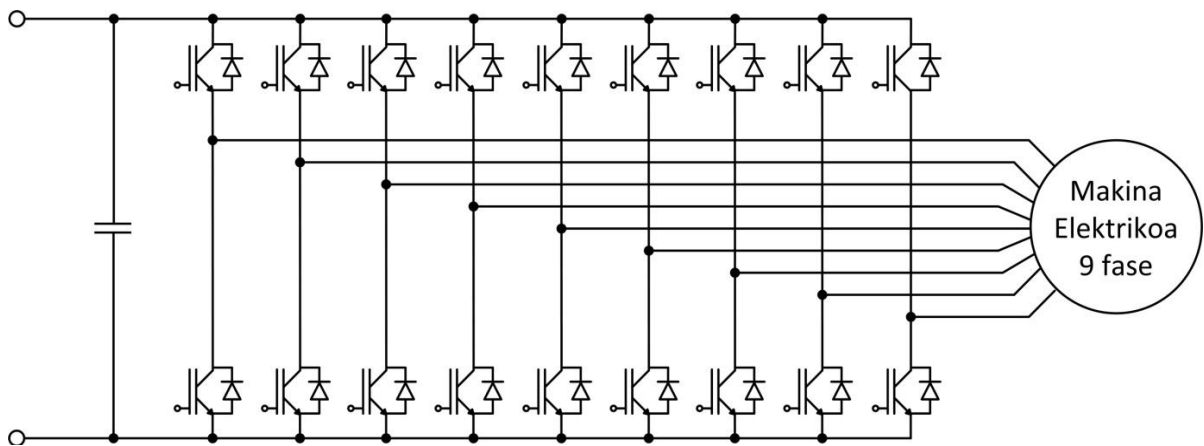
- Sistemaren hozketa aire behatuaren bitartez burutuko da.
- Armairu elektriko batean kokatuko da inbertsorea, hozketa sistema eta sensorizaziorako interfaze txartelekin batera.
- Kontrola armairutik kanpo kokatuta dagoen dSpace plataforma baten implementatuko da, konexioa kableen bitartez egingo delarik.

4.2 Diseinu elektrikoa

Inbertsorearen diseinu elektrikoaren helburua elementu guztiak eta haien disposizioa hautatzea da. Erabaki sendoak hartze aldera kalkulu teorikoak, simulazioen emaitzak, ekoizleen dokumentuak eta ikerketa lanetako informazioa kontuan hartu dira. Diseinu on batek espezifikazioak beteko direla bermatuko du eta aldez aurretik sistemaren funtzionamendua zehaztasunez aurreikustea ahalbidetuko du.

4.2.1 Topologia

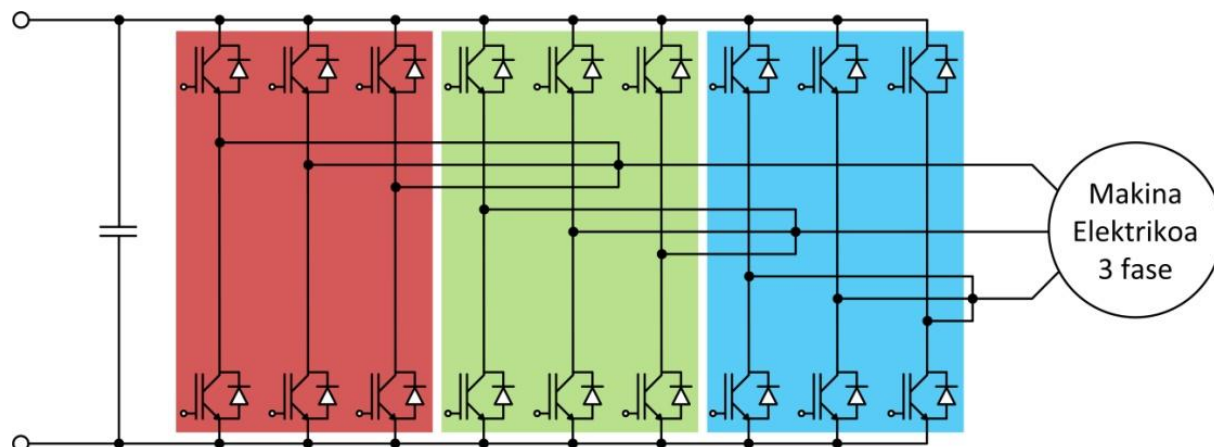
Lehenik eta behin sistemaren arkitektura eta bihurtgailuaren topologia aukeratu dira. Ikerketa artikuluak eta aurkeztutako merkatu soluzioak argi eta garbi adierazten dute eragintza multifasikoetan joera nagusia dela n faseko makina elektrikoak elikatze n faseko bi mailako inbertsorea baliatzea. Irudia 12-n ageri den topologia izan da aukeratua beraz.



Irudia 12. Bederatzi faseko eta bi mailako inbertsorea.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Dauden diseinu aukeren aurrean hainbat abantaila eskaintzeaz gain, adarren arteko paralelizazioa era sinplean egitea ahalbidetzen du. Modu honetan adarren arteko hiru hiru konektatuz makina trifasiko baten eragintza burutu daiteke, espezifikazioak eskatu bezala.



Irudia 13. Sistema trifasikoa adarrak paralelizatuz.

Paralelizazioak erdieroaleen koordinazio zorrotza eskatzen du desoreka estatatikoak (kondukzioan) eta dinamikoak (konmutazioan) ekiditeko. Erdieroaleen propietateak, haien arteko konexioa eta kokapena zein driver-en hautaketa berebizikoa da desorekak murrizteko. Atalez atal aurkeztuko dira zentzu honetan hartutako neurriak.

4.2.2 IGBT-ak

Bihurgailuaren garapenean erdieroale egokiena hautatzea garrantzi handiko prozedura da. Alde batetik funtzionala izan behar da, hau da, aplikazioak inposatzen dituen baldintzetan arazorik gabe lan egin behar du erdieroaleak; bestetik, inbertsorearen prestazioak ahalik eta onenak izatea bermatu behar du: errendimendu altua, galera minimoak, portamolde termiko egokia, konmutazio frekuentzia altuak posible izatea...

Proiektu honek eskatzen dituen tentsio eta korronteak ageri dira **Errorea! Ez da erreferentzia-iturburua aurkitu.**-en. Espezifikazio bikoitza bete behar denez, baldintza murriztaileak zehaztuko du erdieroalearen dimentsionamendua. Tentsio zein korronte handienak funtzionamendu trifasikoan ematen dira.

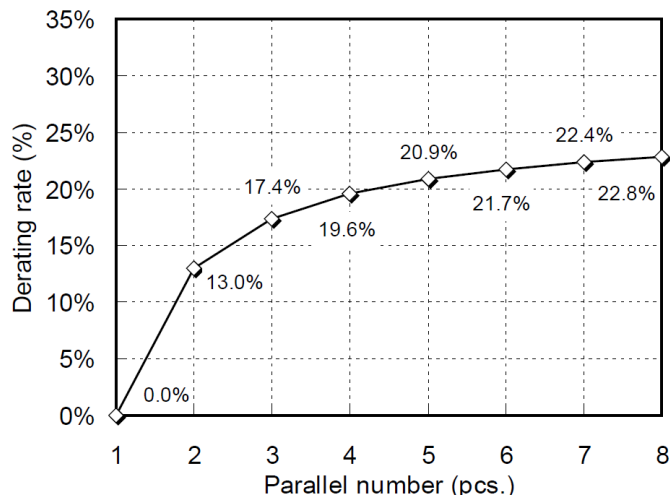
Erdieroalearen dimentsionamendurako espezifikazioak		
	9 faseko sistema	3 faseko sistema
V_{DC}	$800 V_{DC-MAX}$	$900 V_{DC-MAX}$
I_{RMS}	$30 A_{RMS-ADARREKO}$	$83,3 A_{RMS-ADARREKO}$

Taula 3. Erdieroaleen dimentsionamendurako espezifikazioak.

Ikus daitezkeen tentsio eta korronte mailetarako IGBT-a da gaur egun kontrolatutako erdieroalerik egokiena. Tentsio mailari dagokionez, 900V-ko blokeo tentsiorako 1700V-ko IGBT-ak erabili behar dira, konmutazioetan sortzen diren gaintentsioak egoki kudeatu dituzan. Korronteari dagokionez aldiz, kontuan hartu beharra dago adarrek paraleloan eroango

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

dutela. Eman daitezkeen desorekak kontuan hartuz ekoizleak gaindimentsionamendu koefiziente bat aplikatzea proposatzen dute.



Irudia 14. Fuji Electric ekoizleak proposatutako derating rate.

$$I_{IGBT} = (1 + \text{Derating rate}) * I_{RMS} = (1 + 0.174) * 83.3 \cong 100A$$

Irudia 14-n ikus daiteke paralelizatutako erdieoale kopuruaren arabera Fuji Electric ekoizleak proposatzen duen gaindimentsionamendu indizea. Indize hauek erdieoaleen arteko %15-eko korrante desorekak ematen direnerako proposatzen dira. Kontuan hartu behar da ABB ekoizleak aleatorioki hautatutako moduluentzat %5-eko korrante desoreka suposatzen duela eta produkzio lote berekoentzat %2.5-ekoa. Beraz, Fuji-ren indize hori aplikatuta desoreka handien aurrean ere segurtasunez lan egitea bermatuta egongo da.

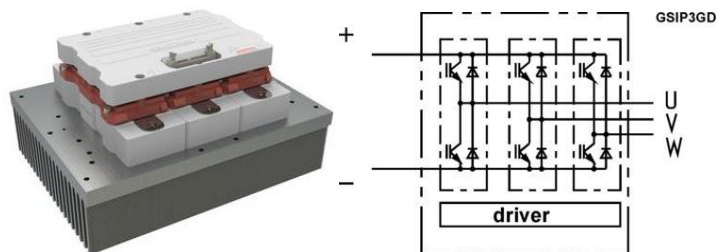
Hala ere, paralelizatutako IGBT moduluen arteko korrante banaketa guztiz orekatua ez da erreal, moduluen parametroen bariazioen eta konexioen inpedantzia desberdintasunen ondorioz. Era berean, erdieoaleen hozketa ez homogeenoa desoreka areagotu dezake, moduluen parametroek tenperaturarekiko duten menpekotasunaren ondorioz. Driver-ak ere kontutan hartu beharreko elementuak dira korrante banaketa orekatua bermatu nahi bada. Desoreka hauek konmutazioan zein kondukzioan ematen dira eta ERANSKINA: IGBT PARALELIZAZIOA atalean aztertzen dira sakonago.

Bihurgailu bat eraikitzerako orduan hainbat integrazio mailatako elementuak har daitezke oinarritzat. Erdieoale ekoizle jakin batzuek IGBT-ekin elementuak integratzen dituzte bihurgailuaren fabrikazio prozesua errazte aldera. Merkaturatze denbora murrizteaz gain elementuen arteko muntaketa eta diseinu optimoa lortu daiteke esfortzurik gabe modu honetan. Hala ere, produktu komertzialaren eta aplikazio zehatzaren arteko bateragarritasuna aztertu behar da.

Lehenik eta behin horrelako produktuetan aitzindaria den Semikron ekoizlearen eskaintza aztertu da. Bi produktu mota nagusi dauzka merkatuan:

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

- **IPM (Integrated Power Module):** Soluzio honek IGBT moduluak, driver-ak eta hozketa sistema integratzen ditu, korrante eta tentsio sentsorizazioarekin batera.



Irudia 15. Semikronen Integrated Power Module.

Modulu hauek topologia (Half Bridge edo Six Pack), tentsio (1200V edo 1700V) eta hozketa sistema (airea edo likidoa) desberdinekin eskaintzen dira. Korrante mailari dagokionez gaindimentsionatutako produktu familia da (maila txikienekoak 500A-koak dira) eta paralelizaziorako gomendatutakoak soilik 1000A-tik aurrerakoak dira.

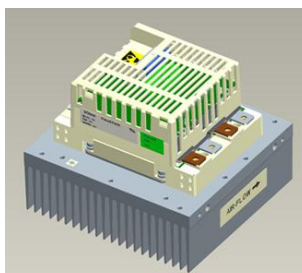
- **Stack:** Produktu familia honek integrazio maila altuagoa suposatzen du. DC buseko kondentsadoreak, konexio guztiak eta muntaketa egitura bati esker erabiltzeko prest dagoen bihurtu komertzial bat osatzen du.



Irudia 16. Semikronen SlimLine familiako Stack-a.

Potentzia maila egokiko soluzioak egon arren, erabiltzen dituen IGBT moduluak aplikazioarekin bateraezina egiten dute produktu linea hau, 1200V-ko moduluak dira eta.

Infineon ekoizleak ere soluzio integratuak eskaintzen ditu IGBT Stacks & IGBT Assemblies produktu lerroaren barnean. Kasu honetan ere konfigurazio, topologia, hozketa sistema eta tentsio zein korrante mailaren arabera eskaintza zabala dago.



Irudia 17. Infineon-en PrimeSTACK familiako soluzio integratua.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Produktu interesgarriak izan arren proiektuaren eskakizunekin bat egiten duen soluziorik ez dago eskuragarri. 1700V-ko moduluak integratu, 6 pack formatukoak diren eta aire bidezko hozketa erabiltzen duten produktuen artean korrante dimentsio txikieneko produktua 800A-koa da eta potentzian gaindimentsionatua geratzeaz gain konmutazio maiztasun oso mugatua eskaintzen du ($2.5kHz$) lortu nahi diren $10kHz$ -ekin alderatuta.

Ikusi ahal izan den moduan, nahiz eta merkatuan eskaintza zabala egon, ez da bihurgailua eraikitzeko baliagarria den soluzio integraturik topatu. Hori dela eta diseinu propioa garatzeko erabakia hartu da.

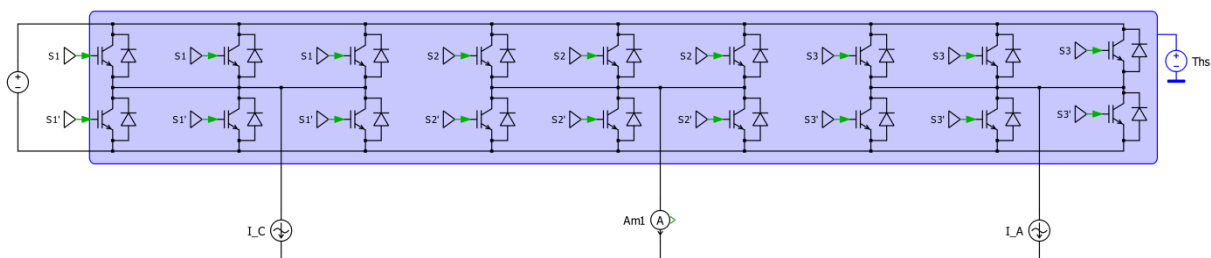
Aplikaziorako IGBT-rik egokiena aukeratzeko hainbat modeloren arteko konparaketa aurkeztuko da jarraian. Lehenik eta behin aurreko atalean aipatutako 1700V eta 100A eskakizun minimoa betetzen duten modeloen artean bilaketa bat egin da. Bilaketa horri erdieroaleen ezaugarrien arabera filtro bat pasa ostean aplikazio errealeko baldintzak simulatuz frogatu da haien portamolde termikoa. Termikoki bidera ezina izatekotan, hurrengo korrante mailako modulueta pasa da bilaketa iteratiboki junction tenperatura balio onargarrietan mantentzea ahalbidetzen duen erdieroale bat topatu bitartean.

Erdieroaleen simulazioak PLECS potentzia elektronikako sistementzako abiadura handiko erremintaren bitartez egin dira. Software honek erdieroaleei galera modelo bat eta modelo termiko bat esleitzeko aukera eskaintzen du, modu honetan simulatutako baldintzen arabera automatikoki eskuratuko dira elementu bakoitzaren galerak eta bere portamolde termikoa. Modelo horiek datasheet-eko kurbetan oinarrituta eraikitzen dira kondukzio galera, pizketa zein itzalketa galera eta inpedantzia termikoen kurbak erreproduzitzen.

Simulaziorako konfigurazioa hirunaka paralelizatutako adarrez osatutako sistema trifasikoarena izan da. Tentsio eta korrante eskakizunek exigentzia maila handiagoa dutenez, funtzionamendu mota hau da termikoki mugatzailea sistemaren diseinu elektrikoan.

Simulazio prozeduraren bitartez sistemak eskatzen duen Heatsink-aren erresistentzia termiko maximoa bilatu nahi da junction tenperatura $125^{\circ}C$ -tik pasa ez dadin, IGBT gehienek gaur egun $150^{\circ}C$ -ko tenperatura maximoa definitzen baitute. Modelo guztien simulazioak ikusi ostean erresistentzia termikorik handiena exijitzen duena izango da aukerarik egokiena.

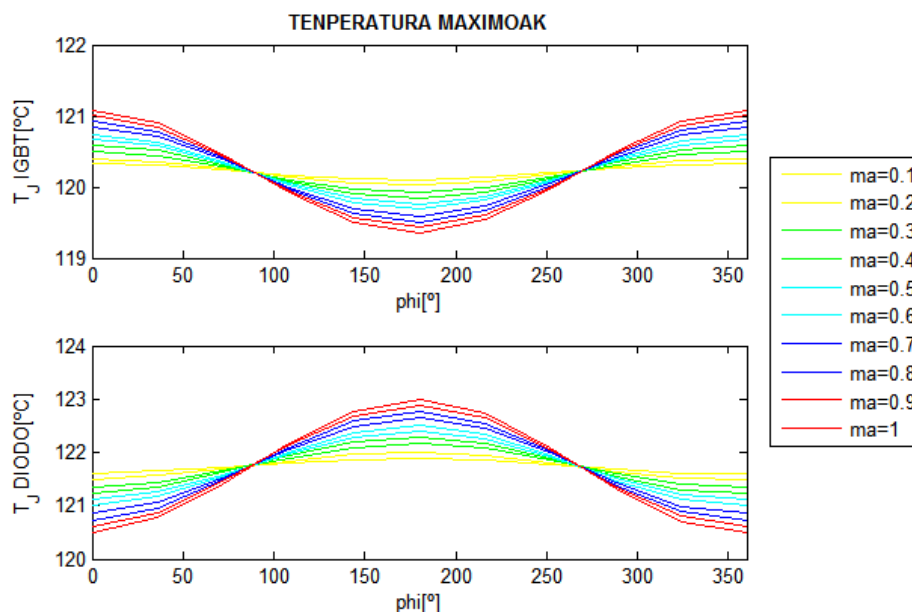
Irudia 18-n ikus daitekeen moduan erdieroaleen konparaketa egiteko DC busa tentsio iturri ideal baten bitartez modelatu da eta kargako korrante sinusoidal idealak ezarri dira.



Irudia 18. PLECS-en simulatutako sistema.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

IGBT modelo bakoitza bi egoera desberdinetan simulatu da: korrante eta tentsioaren arteko desfase angelua $\varphi = 0^\circ$ denean eta $\varphi = 180^\circ$ denean. Lehenengo kasuan IGBT-aren funtzionamendu puntu kritikoena kontutan hartzen da eta bigarrenengan aldiz diodoarena. Bi egoeretatik okerrena izango da hain zuzen ere moduluaren emaitza determinatuko duena. Modulazio indizeari dagokionez $m_a = 1$ ezarriko da simulazioetan, kasurik mugatzaileena delako. Irudia 19-n ikus daiteke mugako kasuak justifikatuta daudela.



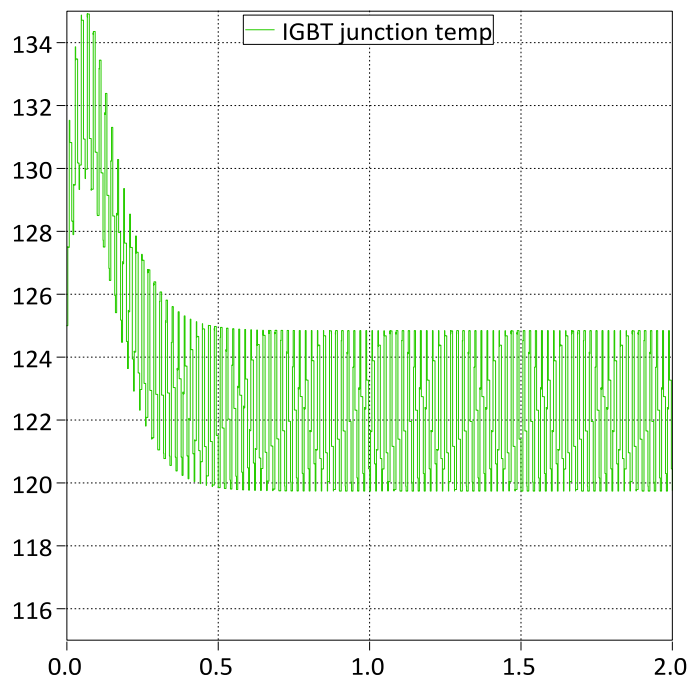
Irudia 19. Junction temperatura maximoa modulazio indize eta desfase desberdinetarako.

Jarraian simulazioaren beste hainbat baldintza ageri dira:

- Simulazio denbora $\rightarrow 2s$
- Simulazio jautzia $\rightarrow 1\mu s$
- Buseko tentsioa $\rightarrow 900V$
- Kargako korrantea $\rightarrow 250A_{RMS}$
- Irteerako maiztasuna $\rightarrow 50Hz$
- Kommutazio maiztasuna $\rightarrow 10kHz$
- Junction T° maximoa $\rightarrow 125^\circ C$
- Ingurugiroko T° $\rightarrow 35^\circ C$

Sistemaren dinamika termiko geldoak ekiditeko Heatsinka temperatura finko batekin simulatu da. Temperatura hori moldatu egin da IGBT modelo bakoitzaren muga termikoa topatu arte: hau da, junction temperatura erregimen egonkorrean $125^\circ C$ -tik pasa gabe eman daitekeen maximoa. Irudia 20-n ikus daitekeen moduan dinamika termikoak kontuan ez hartzearen ondorioz simulazio hasieran piko bat ageri da. Funtzionamendu errealean emango ez den efektu bat da hori.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 20. IGBT-aren junction tenperatura 125°C-tik pasatu gabeko mugan.

Funtzionamendu egoera horretan, sistemaren puntu desberdinen batz besteko tenperaturetan oinarriturik kalkulatu da beharrezko erresistentzia termikoa. Lehenik eta behin bihurgailuaren galera totalak kalkulatu dira jauzi termikoetan oinarrituz eta hortik abiatuta Heatsinkak galera horiek disipatzeko eduki beharreko erresistentzia termikoa. Moduluaren erresistentzia termikoa bi simulazioen arteko baxuenak determinatuko du.

$$Q_{tot} = \left(\frac{(T_{J_IGBT} - T_{heatsink})}{R_{th_IGBT}} + \frac{(T_{J_D} - T_{heatsink})}{R_{th_D}} \right) * 18$$

$$R_{th_heatsink} = \frac{(T_{heatsink} - T_{ambient})}{Q_{tot}}$$

Erresistentzia termikoa eta sistemaren dinamika termiko osoa kontutan hartzen duen simulazioa burutu da egindako prozedura balioztatzeko eta ostean, IGBT modelo guztientzat simulazio eta kalkulu prozesua errepikatuz, Taula 4-n ikus daitezkeen emaitzak eskuratu dira:

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

EZAUGARRIAK			SIMULAZIOA PHI=0°					SIMULAZIOA PHI=180°					R _{th}
MODELOA	R _{th_IGBT}	R _{th_D}	T _{HS}	T _{IGBT}	T _D	Q _{Tot}	R _{th}	T _{HS}	T _{IGBT}	T _D	Q _{Tot}	R _{th}	
2MBI100VA-170-50	0.23	0.42	43	107	60	5737	0.00139	51	98	109	6164	0.00260	0.00139
CM100DY-34A	0.13	0.21	81	116	108	7160	0.00642	71	97	104	6429	0.00560	0.00560
GD100HFL170C2S	0.171	0.263	58	114	85	7743	0.00297	75	118	117	7401	0.00540	0.00297
GD100HFT170C2S	0.16	0.28	63	115	96	7971	0.00351	71	112	119	7698	0.00468	0.00351
FF150R17ME3G	0.12	0.21	83	119	109	7629	0.00629	83	113	119	7586	0.00633	0.00629
GD150HFT170C2S	0.12	0.22	82	119	109	7759	0.00606	82	112	120	7609	0.00618	0.00606
SKM200GB17E4	0.122	0.276	65	108	100	8627	0.00348	58	96	106	8737	0.00263	0.00263
FF200R17KE4	0.12	0.16	80	118	98	7725	0.00583	87	119	113	7725	0.00673	0.00583
FF225R17ME4_B11	0.099	0.16	88	119	113	8449	0.00627	84	109	116	8145	0.00602	0.00602
5SNG0200Q170300	0.12	0.15	84	115	102	6810	0.00720	88	112	115	6840	0.00775	0.00720
2MBI225VX-170-50	0.12	0.2	80	116	107	7830	0.00575	76	104	114	7620	0.00538	0.00538
GD200HFT170C2S	0.099	0.19	83	120	109	9190	0.00522	87	118	121	8857	0.00587	0.00522
GD225HFT170C6S	0.091	0.16	93	121	116	8126	0.00714	91	115	121	8122	0.00689	0.00689
SKM300GB17E4	0.083	0.19	86	114	114	8725	0.00585	75	100	110	8737	0.00458	0.00458
FF300R17ME4_B11	0.083	0.13	91	119	109	8565	0.00654	93	118	118	8883	0.00653	0.00653
5SNG0300Q170300	0.08	0.12	95	119	110	7650	0.00784	95	114	116	7425	0.00808	0.00784
2MBI300VX-170-50	0.09	0.15	90	115	117	8240	0.00667	82	102	115	7960	0.00590	0.00590
GD300HFT170C6S	0.074	0.14	99	121	122	8308	0.00770	93	111	121	7978	0.00727	0.00727
SKM400GB17E4	0.066	0.13	87	114	114	11102	0.00468	79	103	112	11115	0.00396	0.00396
FF400R17KE4	0.0632	0.106	97	118	120	9887	0.00627	93	111	119	9542	0.00608	0.00608
FF450R17ME4	0.06	0.1	100	117	120	8700	0.00747	96	110	119	8340	0.00731	0.00731
2MBI450VN-170-50	0.06	0.1	102	117	120	7740	0.00866	97	110	119	7860	0.00789	0.00789
GD400HFT170C2SN	0.057	0.11	97	118	116	9741	0.00637	96	115	118	9600	0.00635	0.00635
GD450HFT170C6S	0.048	0.104	101	117	121	9462	0.00698	97	111	121	9404	0.00659	0.00659
2MBI550VN-170-50	0.04	0.06	111	122	121	7950	0.00956	108	117	121	7950	0.00918	0.00918

Taula 4. IGBT modeloen simulazioen emaitzak.

Modeloen arteko konparaketa egin ostean soluzio egokienaren aukeraketa modelatu termikorako software batean oinarrituz egin da (airez refrigeratutako radiadoreentzat erabiltzen dena). Mersen enpresaren R-tools (R-tools 3D Heatsink Thermal Modeling) erreminta erabiliko da hain zuzen ere. Software honetan beroa disipatzeko dispositiboa eta bero iturrien distribuzioa modelatzen da era oso intuitibo batetan eta sistemaren puntu desberdinetako tenperaturak kalkulatzeko, erdieroaleen junction tenperatura barne.

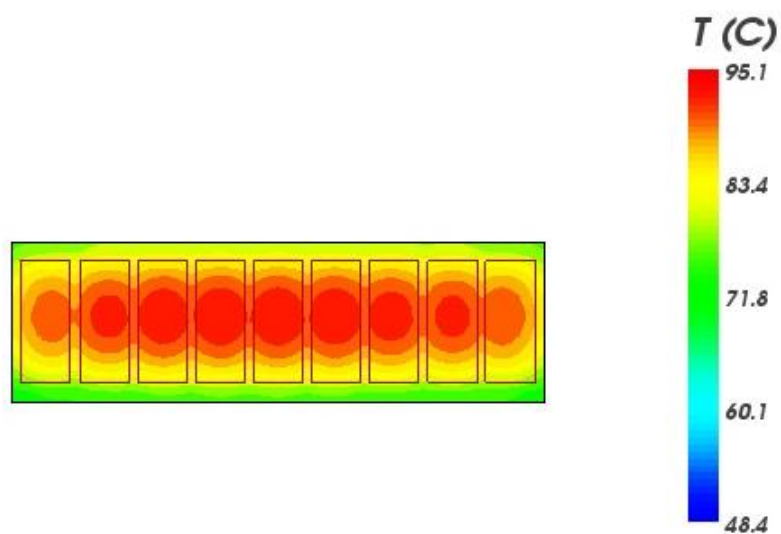
Fase honetan konparaketako hiru modelorik onenak kontuan hartuko dira: 2MBI550VN-170-50, 2MBI450VN-170-50 eta FF450R17ME4. 5SNG0300Q170300 modelo alboratu egin da enkapsulatu mota horretarako driver komertzial egokirik ez delako aurkitu.

Modelo bakoitzaren kasuan hasierako simulazio termiko bat egin da mugako kasuan edukitako galera termikoekin. Simulazioaren emaitzetan ateratako heatsink tenperatura

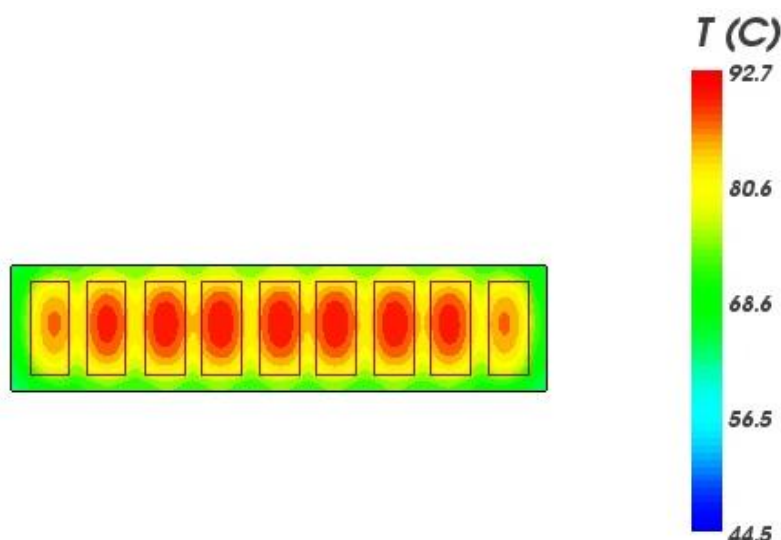
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

berriarentzat moduluen galera zehatzak kalkulatu dira PLECS-en. Galera horiekin simulazio termikoa errepikatuz konbergentzia bat bilatu da galerak eta tenperatura egonkortu arte.

Bihurgailu baten diseinuan bolumena eta kostua garrantzi handiko faktoreak izan ohi dira. Hori dela eta IGBT-ak erradiadorearen gainean ahalik eta hurbilen kokatzea bilatu da. Fuji-ren bi modeloek heatsink tamaina murriztu batekin nahikoa daukate egonkortasun termikoa bermatzeko, Infineonenak aldiz moduluen arteko banaketa handiago bat eskatzen du beroa kanporatu ahal izateko.



Irudia 21. Heatsink-aren simulatutako irudi termikoa 2MBI550VN-170-50 modeloarentzat.



Irudia 22. Heatsink-aren simulatutako irudi termikoa FF450R17ME4 modeloarentzat.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

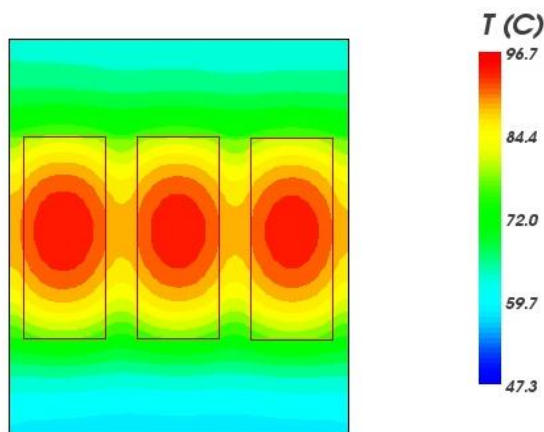
IGBT-en konparaketarako simulazio termikoa			
Modeloa	Erradiadorea	Galerak moduluko	Junction temperatura max.
2MBI550VN-170-50	Txikia (662mm)	830 W	113.4 °C
2MBI450VN-170-50	Txikia (662mm)	865 W	121.8 °C
2MBI450VN-170-50	Handia (862mm)	795 W	104.5 °C
FF450R17ME4	Handia (862mm)	995 W	111.6 °C

Taula 5. Erdieroaleen konparaketa simulazio termikoa.

Fuji-ren bi modeloen artean korrante altuagoko modeloak (2MBI550VN-170-50) galera baxuagoak ditu eta radiadorearen dimentsioak gehiago ajustatzeko aukera ematen du.

450A-ko erdieroaleak junction temperatura muga barnean mantentzeko nahikoa direla ikusita Fuji-ren 550A-ko modeloa alboratu da. 450A-ko bi modeloak heatsink berdinarekin konparatzerakoan ikusten da Fuji-ren modeloak galera baxuagoak dituela eta horren ondorioz bihurgailuaren errendimendu hobea lortuko da eta estres termiko txikiagoa jasango du. Prestazio aldetik 2MBI450VN-170-50 egokiena izan arren, aurrerago azalduko diren arrazoiengatik Infineonen erdieroalearekin burutuko da diseinua.

Hurrengo ataletan azalduko den bezala, Irudia 21 eta Irudia 22-n IGBT-en konparaketa egiteko erabilitako erradiadore konfigurazioa moldatu egin da diseinu mekanikoen eskakizunei erantzunez. Hiru IGBT-ko erradiadore bloke modularretan oinarritutako sistemarentzat simulazio termikoa errepikatu dira erdieroaleen portamoldea aztertzeko.



Irudia 23. Behin betiko erradiadore konfigurazioaren simulazio termikoa R-Tools-ekin.

Behin betiko sistemaren konfigurazio horrentzat jarraian ageri direnak izango dira IGBT zein diodoak lan punturik txarreanean izango dituzten galerak eta temperatura maximoak.

FF450R17ME4 IGBT modeloa hiru moduluko erradiadorean				
Lan puntua	Galerak IGBT	T junction IGBT	Galerak Diodo	T junction Diodo
$\varphi = 0^\circ\text{C}$	286.3 W	107.2°C	195.7 W	109°C
$\varphi = 180^\circ\text{C}$	246.2 W	104.4°C	236.5 W	114.4°C

Taula 6. Erdieroaleen mugako galera eta temperaturak.

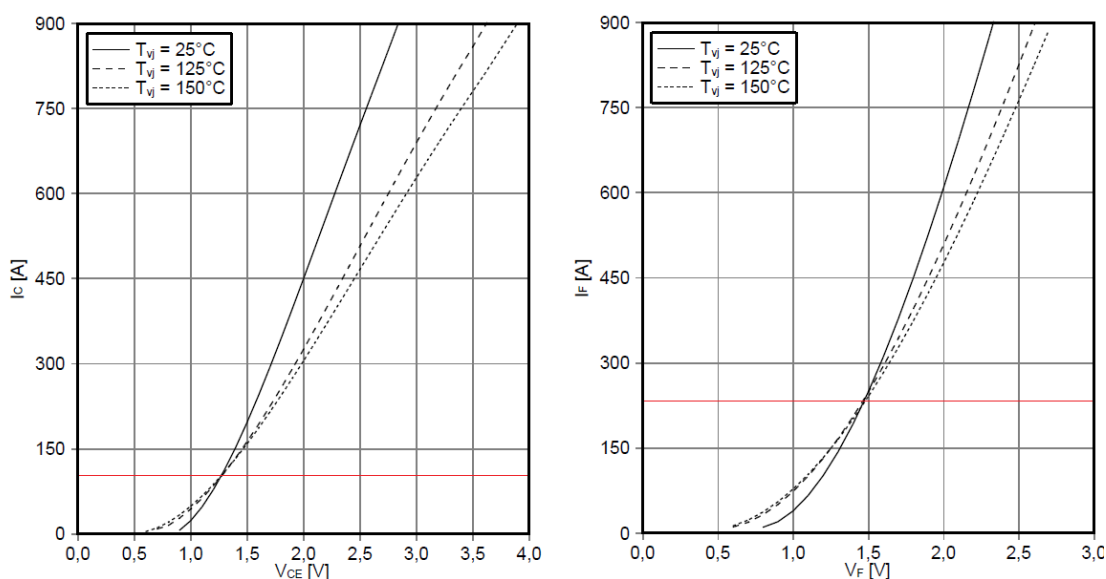
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Aurretik aipatu den bezala, paralelizatutako IGBT-en artean korrontea ez da modu ideal batean banatzen. Funtzionamendu trifasikoan erradiadore bloke bakoitzeko hiru modulu paralelizatuaren artean desberdintasunak eman daitezke, eta horrela izatekotan efektu horren eragina aztertu nahi da ikuspegi termikotik.

IGBT moduluen barneko IGBT eta diodoen kondukzio ezaugarriak joera desberdina izan dezake tenperaturarekiko. Joera hau tenperatura koefizienteak definitzen du eta positiboa zein negatiboa izan daiteke.

Koefiziente positibodun erdieroaleen kasuan, paraleloan lan egiterakoan, saturazio tentsio berdinerako tenperatura altuenean dagoen elementuak korronteari erresistentzia handiagoa ezarriko dio, eta beraz, korronte maila baxuagoa eroango du. Modu horretan tenperatura baxuagoan dagoen erdieroaleak korronte gehiago eroatearen ondorioz bere galerak handitu eta berotu egingo da. Portamolde hori duten erdieroaleek korronte banaketa orekatu bat laguntzen dute eta beste hainbat arrazoirengatik sortutako desorekak konpentsatzera hel daitezke.

Temperatura koefiziente negatiboaren kasuan, aldiz, beroen dagoen erdieroaleak korronte gehiago eroango du eta kontrako efektua sortuko da: tenperatura altuagoan dagoen moduluak galera gehiago izango ditu, aurretik zegoen korronte desoreka areagotuz.



Irudia 24. Infineon-en FF450R17ME4 IGBT moduluen kondukzio ezaugarria IGBT eta diodoarentzat.

Irudia 24-n ikus daiteke korronte mailaren araberako tenperatura koefizientea izango dutela IGBT eta diodoek. IGBT-aren kasuan korronte nominalean (100A) koefiziente positiboaren gunean sartzen da ozta-ozta (≈ 95 A). Diodoak aldiz bihurgailuaren potentzia nominaletik oso gora joan ezean (230A) koefiziente negatiboko gunean egingo du lan. Tenperatura koefizienteak, beraz, ez du korronte oreka lagunduko sistemaren lan puntu gehienetan. Bihurgailuaren funtzionamenduan ematen diren korronte desorekak minimizatu eta aztertu beharko dira hauen ondorioz korronte gehien eroaten duen modulu bere tenperatura maximotik pasa ez dadin, bereziki rektifikadore moduan diodoak lan gehiago egiten duenean.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4.2.3 Driver-ak

Erdieroaleen kommutazio kontrola burutu ahal izateko kontrol seinalearen eta erdieroalearen arteko interfazea da driver-a. Ateko kargak sartu eta atera ahal izateko potentzia amplifikatzeko funtzioa izateaz gain, babeserako hainbat gaitasun eskaini ditzake, hala nola: adarreko zirkuitulaburrak ekiditeko pizketa seinaleei atzerapen denbora bat aplikatzea, zirkuitulaburren aurkako babesa, gaintentsioen aurkako babesa, akatsen monitorizazioa...

Driver-a aukeratzeko orduan hainbat aukera aurkezten dira. Alde batetik zuzenean Plug and Play soluzio bat erabili daiteke. Topatu direnen artean Power Integrations-en 2SP0115T modeloak erdieroaleak paralelizatzeko gaitasuna eta moduluaren gainean muntatzearen abantailak ditu. Era berean, IGBT-en atalean aipatutako modeloentzat espresuki diseinatutako driver-ak daude familia honen barnean. Semikron, Isahaya eta Inpower ekoizleek ere Plug and Play soluzioak eduki arren ez dira hain egokiak ez baitira moduluaren gainean muntatzekoak eta kableatuak sinkronizazio eta zarata arazoak suposa ditzake.

- 2SP0115T – Power Integrations



Irdia 25. Poert Integrations-en 2SP0115T.

- GAU205P-15402 – Isahaya



Irdia 27. Isahaya-ren GAU205P-15402.

- SKHI 23/17 R – Semikron



Irdia 26. Semikron-en SKHI 23/17 R.

- 2IPSE3W17-60 – Inpower

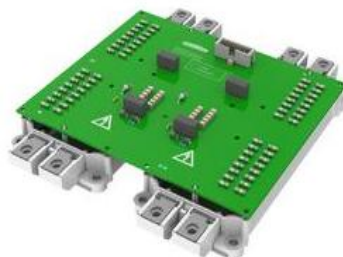


Irdia 28. Inpower-en 2IPSE3W17-60.

Bestetik, driver nukleo bat hautatu eta txartela diseinatzeko aukera dago. Kasu honetan Power Integrations-en 2SC0108T modeloa izan zitekeen aukera on bat, ekoizlearen ospe ona, IGBT-ak paralelizatzeko duen gaitasuna eta ekoizle bereko beste nukleoekin konparatuta bere ezaugarriak aplikaziorako egokienak direlako. Dena den, atal honetan eskaintza zabalago da eta beste ekoizleek ere nukleo egokiak eskaintzen dituzte.

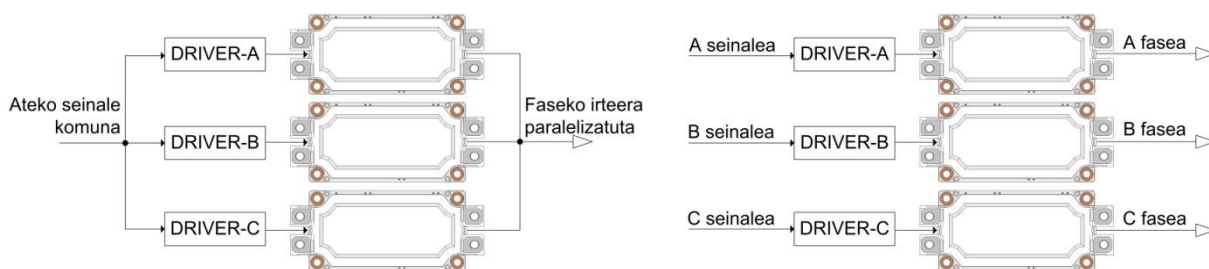
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Driver-a aukeratzeko orduan ekoizleek eskaintzen duten beste soluzio bat egokitzapen txartelak dira. Driver nukleo bakar baten bitartez paralelizatutako modulu guztiak kontrolatzea posible da modu honetan.



Irudia 29. Bi IGBT paralelizatzeko Semikronen adapter board-a.

Moduluen paralelizaziorako produktu interesgarria izan arren, garatu nahi den bihurgailuak moduluak paraleloan eta era independentean kontrolatzeko aukera eman behar du. Hori dela eta IGBT bakoitzak bere Driver-a izango du eta funtzionamendu trifasikoan moduluak hiruak paralelizatuko dira, Irudia 30-n ikusten den bezala. Bederatzi faseko sisteman aldiz moduluak era independentean lan egitea posible izango da ere.



Irudia 30. IGBT-ak hiruak paralelizatuta eta era independentean lan egiten.

Aukeratutako 2SP0115T modeloari erreparatuz, bi IGBT modelo posibleentzako soluzioak aztertu dira. Fuji-ren IGBT-arentzat (2SP0115T2Ax-2MBI450VN-170-50) eta Infineon-en IGBT-arentzat (2SP0115T2Ax-FF450R17ME4) diren driver-ak ia berdinak izan arren, diseinurako garrantzi handiko desberdintasuna dago. Itzalketarako erresistentziak suposatzen duen aldaketa txikia alboratuta, kommutazio frekuentzia maximoak baldintzatuko du IGBT-aren aukeraketa. Fuji-rentzako driver-ak $9.5kHz$ -ko kommutazio frekuentzia maximoa dauka eta beraz ez du balio aplikazioak eskatzen dituen $10kHz$ -etara heltzeko. Infineon-en modeloarentzako driver-ak aldiz $14.5kHz$ -ko frekuentzian kommutatu dezake eta honen ondorioz FF450R17ME4 IGBT-a eta 2SP0115T2Ax-FF450R17ME4 driver-a izan dira hautatuak.

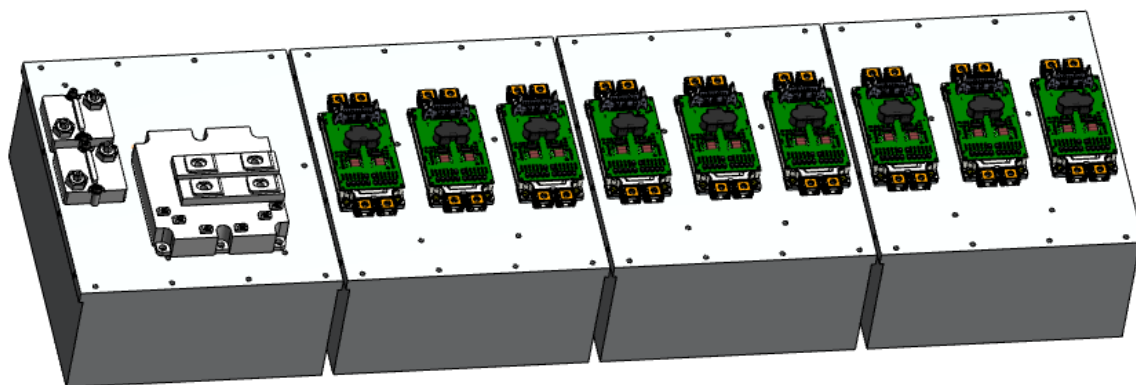
4.2.4 Heatsink-ak

Bihurgailu baten berebiziko garrantzia dauka hozketa sistemak. Aire behartu bidezko sistema honek erdieroaleen galerak kanporatu eta haien egonkortasun termikoa ahalbidetuko duen erradiadore egoki baten beharra dauka, aire abiadura jakin bat lortu ahal izateko haizagailuekin batera. IGBT-en aukeraketan erabili den simulazio termikoko

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

heatsinkaren prestazioak eskaintzen dituzten soluzio komertzialak bilatuko dira merkatuan eta haien artean egokiena izango da hautatua.

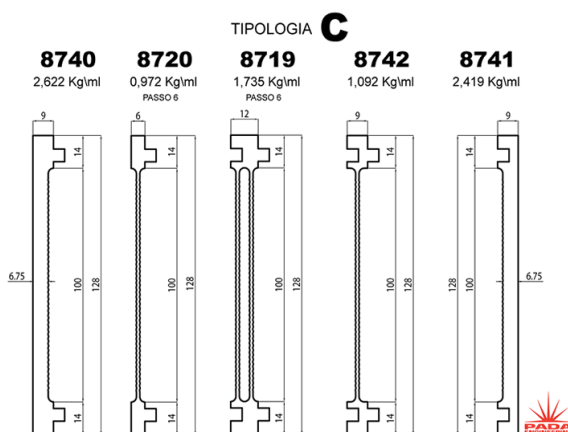
Era berean, diseinu mekanikoaren ikuspegitik ere interes handia dauka erradiadoreen konfigurazioak. Batetik bihurgailua bilduko duen armairuak erradiadoreen zabalera maximoa mugatuko du bere dimentsioak direla eta. Bestetik, tamaina oso handiko erradiadorea lortzeko zailtasuna eta muntaketa lanetako trabak ekiditeko sistema modular baten alde egin da. Hirunaka paralelizatuko diren IGBT-ak bloke berean joango dira, sistemaren simetria mantentzen duen hiru erradiadoreko bihurgailu diseinua lortuz. Laugarren erradiadore baten crowbarra eta deskarga iraunkorreko erresistentziak ezarriko dira.



Irudia 31. Erradiadoreen sistema modularra.

Erradiadore ekoizleen artean bilaketa bat burutu ostean hurrengo modeloak identifikatu dira egoki izan daitezkeen artean.

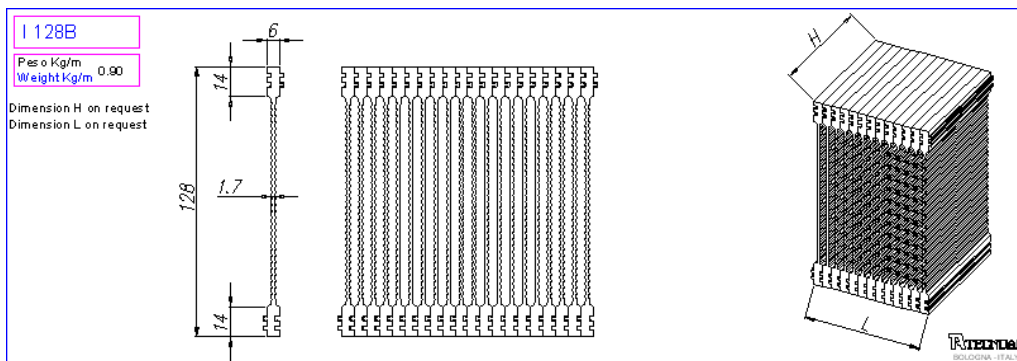
Pada konpainiak SuperPower produktu linearen barnean luzera eta zabalera pertsonalizatuko erradiadoreak ekoizten ditu. Aleta modelo desberdinen artean C SuperPower izango litzateke egokiena, 128mm-ko heatsink altuera eta 100 mm-ko zerratutako aletekin.



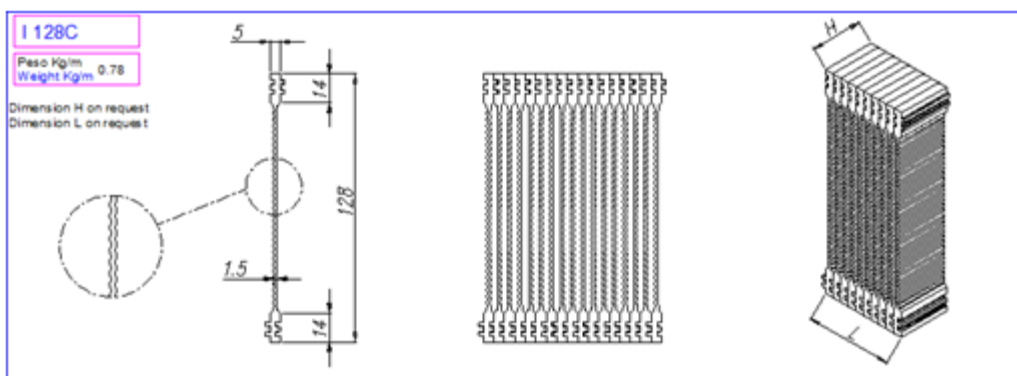
Irudia 32. PADA-ren C SuperPower heatsink-a.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Tecnoal enpresak I Series produktu linean biltzen ditu tamaina pertsonalizagarriko produktuak. Aleta zerratuei dagokienez Pada-k bezala 128mm-ko heatsink alturako soluzioak eskaintzen ditu alde batetik. I128B eta I128C modeloak mota honetakoak dira eta haien arteko aldea aletaren lodiera da.

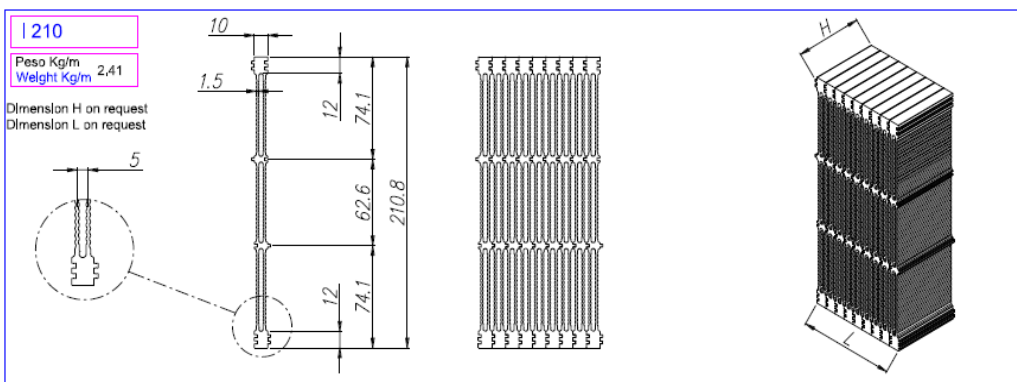


Irdia 33. TECNOAL-en I128B modeloa.



Irdia 34. TECNOAL-en I128C modeloa.

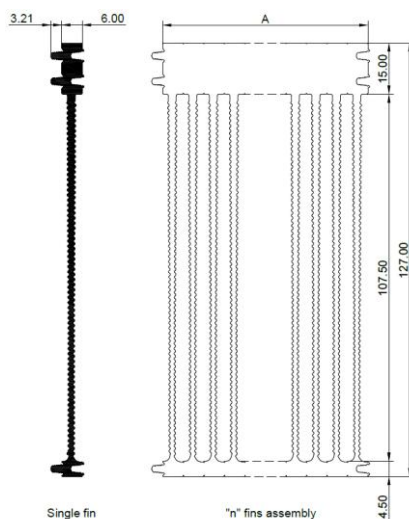
Bestalde, aleta altuera handiagoko I210 modeloa eskaintzen dute ere. Honek gaitasuna dauka galerak era egokian disipatzeko baina bere altuera handiagok pisu gehiago dakar eta baita haizagailu egokiak topatzeko zailtasuna ere.



Irdia 35. TECNOAL-en I210 modeloa.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Enpresa honek eskaintzen dituen altuera eta zabalera moldagarriko modeloen artean RG42120 da egokiena. 127mm -ko altuerako aleta zerratuko radioadoreak eskaintzen dituzte eta 120mm -ko bentiladoreak kokatzeko adaptadoreak gehitzeko aukera ematen dute.



Irudia 36. GUASCH-en RG42120 modeloa.

Mersen ekoizlearen modeloak R-Tools erremintan simulatu eta bere portamolde zehatza jakiteko aukera dago. Aleta mota eta tamaina desberdinak simulatu dira aplikaziorako egokiena topatu arte. Fabfin familiako Delta Fin aleta zerratuak bermatzen du ondoen erradiadorearen portamolde termiko zuzena.

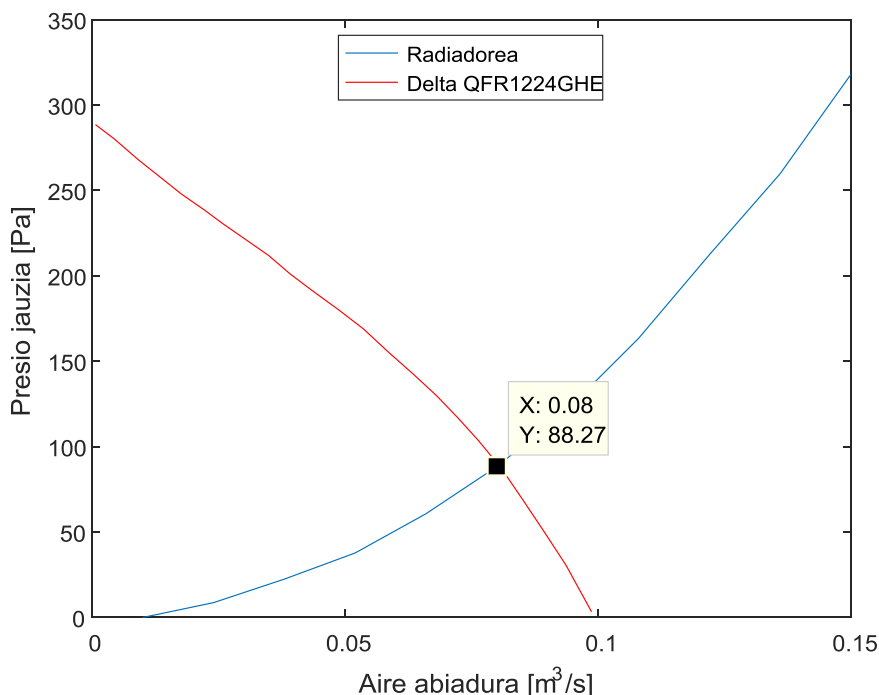


Irudia 37. Mersen-en Delta Fin aleta zerratuarekin.

Aukera desberdinen artean GUACH-en RG42120 modeloa izan da hautatua. Funtzionalitate, kostu zein zerbitzu arrazoiak kontuan hartu dira horretarako.

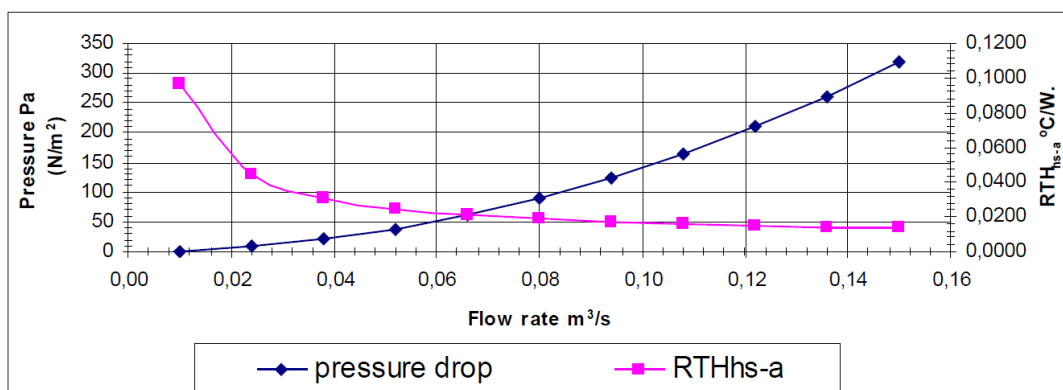
Erradiadorearen funtzionamendua baldintzatuko duen faktore garrantzitsu bat haizearen abiadura da. Heatsinkean ematen den presio jauzia eta haizagailuaren ezaugarrietan oinarriturik aukeratuko dira haizagailuak. Hainbat modeloen ezaugarriak aztertu ostean Delta ekoizlearen QFR serieko GH modeloa aukeratuko da.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 38. Delta ekoizlearen QFR haizagailuaren funtzionamendu puntua RG42120 erradiadorearekin.

Irudia 38-n ikus daitekeen bezala erradiadorearen presio galera ezaugarria eta haizagailua bateratuz lan puntu jakin bat lortzen da, $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ aire fluxua ematen duena. Lan puntu horretan hautatutako erradiadoreak Irudia 39-n ikus daitekeen $0.02 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ erresistentzia termikoa izango du.



Irudia 39. RG42120 erradiadorearen ezaugarria.

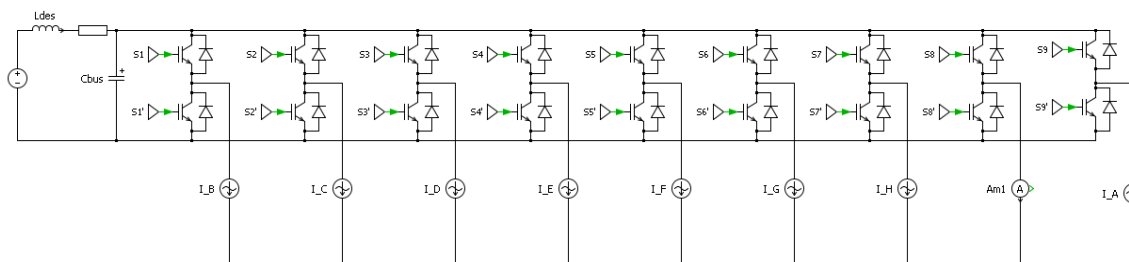
Erresistentzia balio hau hiru IGBT izango dituen erradiadore bloke batentzat izango da. Beraz, IGBT-en aukeraketa atalean Infineon-en FF450R17ME4 modeloak bederatzi faseetako erdieroaleentzat eskatzen zuen $0.00731 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ erresistentzia termikoa bermatu daiteke. Hiru moduluko blokearentzat erdieroale honek $0.022 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ beharko luke, eta erradiadoreak balio baxuagoa lortzea ahalbidetzen du.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4.2.5 DC buseko kondentsadoreak

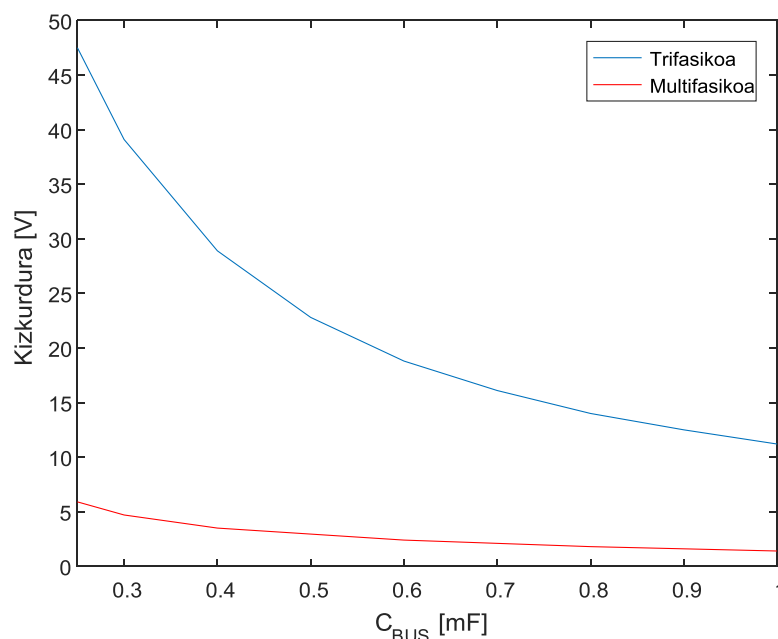
Abiadura aldakorreko akzionamendu elektrikoetan korrante zuzeneko erdibideko etapa bat dago inbertsorean frekuentzia eta anplitude aldakorreko korrante alternoa sortu aurretik. DC-AC bihurtgailuaren sarrerako tentsioa egonkorra eta rizado txikikoa izan dadin kondentsadoreen bitartez filtratu egiten da DC bus deiturikoan. Kondentsadore hauen kapazitatea zenbat eta handiagoa izan orduan eta buseko tentsio egonkorragoa lortuko da, baina bolumena eta kostua ere handituko direla kontuan hartu behar da.

DC busaren dimentsionamendu egokia burutzeko simulazio bitartez zehaztuko da zenbateko kapazitatea den beharrezkoa buseko tentsioak $\pm 15V$ -ko kizkurdura gainditu ez dezan. Horretarako PLECS-en 3 eta 9 faseko sistemak simulatuko dira eta funtzionamendurik kritikoenak definituko du DC busaren kapazitatea. Irudia 40-n ikus daitekeen moduan sarrerako tentsio iturria busetik desakoplatu egin da $3mH$ -ko inдукtanzia baten bitartez eta amortiguazio erresistentzia bat gehitu da sistema egonkortzeko.



Irudia 40. DC busa dimentsionatzeko PLECS-eko eskema.

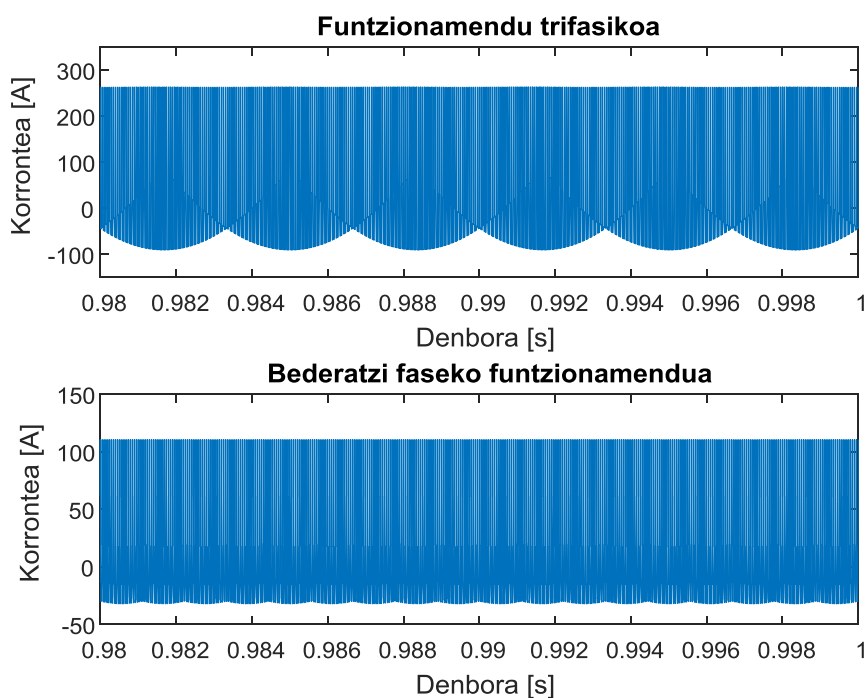
Kapazitate balio bakoitzak suposatzen duen rizadoa aztertu ostean DC busak $0.4mF$ -ko kapazitatea izan behar duela erakusten du simulazioak. Irudia 41-en ikusten da sistemaren funtzionamendu trifasikoak determinatzen duela kapazitate minimoa.



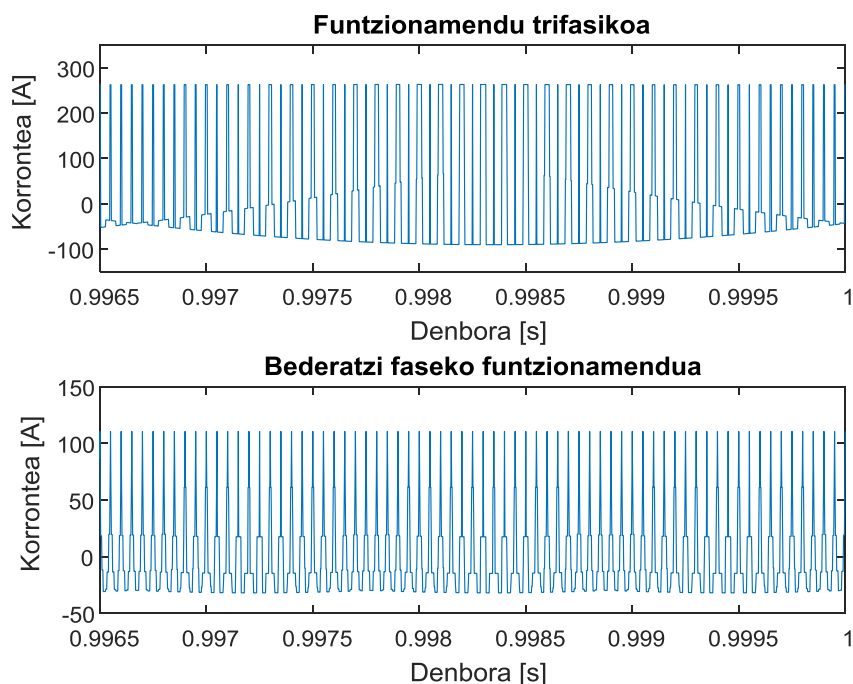
Irudia 41. Buseko tentsioaren kizkurdura kapazitatearen konparaketa.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Definitutako kapazitatea eta sistemak eskatzen dituen baldintza elektrikoak kontutan harturik DC buseko kondentsadoreen aukeraketa burutuko da. Tentsioari dagokionez 3 faseko funtzionamenduko 900V-ak jasan beharko ditu eta korronteari dagokionez simulazioan frogatu da DC buseko korrante maximoa $127A_{RMS}$ -koa dela funtzionamendu trifasikoan eta $36A_{RMS}$ -koa bederatzi faseko funtzionamenduan.



Irudia 42. Buseko korronteak modu trifasiko eta multifasikoan.



Irudia 43. Buseko korronteen detailea modu trifasiko eta multifasikoan.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

3.2 atalean aipatu bezala, sistema multifasikoetan buseko korrontearen kizkurduaren frekuentzia handitu eta bere anplitudea txikitu egiten dela simulazio bitartez frogatu egin da. Kizkurdua horren frekuentzia fase kopuruarekin aldatuko da. Korrontearen beraren frekuentzia aldiz bi kasuetan finkoa izango da, konmutazio frekuentziaren bikoitza ($20kHz$).

DC busaren eta IGBT-en arteko konexioaren layout-a ahalik eta egokiena izan dadin kondentsadoreek konexio busbar-aren zabalera osoa hartu dezaten komeni da. Hori dela eta, hainbat kondentsadoreen paralelizazioaren bitartez lortuko da kapazitate totala, bide batez kondentsadore bakoitzetik igaro beharreko korronte maila murrizten delarik.

KEMET ekoizlearen korronte zuzeneko tentsioak filtratzeko C44UNG76430A8SK modeloa hautatu da. Ikuspegi elektromekanikotik 10 kondentsadore ezarriko dira paraleloan busbarraren zabalera osoa hartzeko. Honi esker korronte totala banatu egingo da eta kondentsadore bakoitzetik kasurik okerreanean $12.7A_{RMS}$ pasako dira, nominaletik behera dagoen balioa. Diseinuko kapazitate minimoa baino askoz altuagoa izan arren, etorkizunean bihurtgailuak beste lan puntu batzuetan segurtasunez funtzionatu ahal izatea bermatuko du eta bolumen zein kostu aldetik ez du trabarik suposatzen.

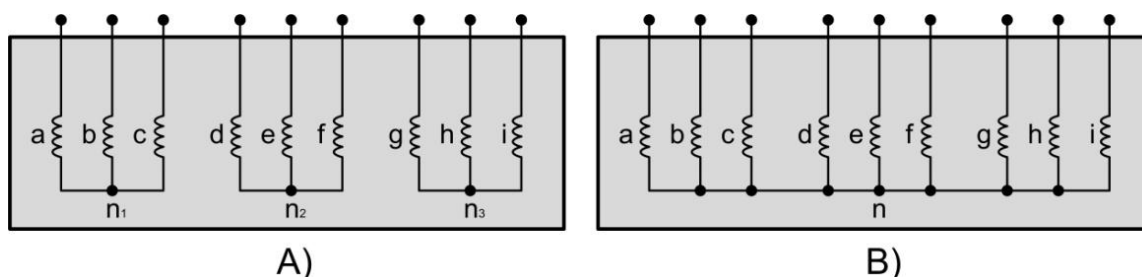
C44UNG76430A8SK		
Kapazitatea	DC tentsio nominala	Korronte nominala
430 μF	1000V _{DC}	69 A _{RMS}

Taula 7. C44UNG76430A8SK kondentsadoreen ezaugarri nagusiak.

4.2.6 Sentsoreak

Bihurtgailu baten kontrola eta funtzionamendu egokia bermatzeko beharrezkoa da hainbat aldagai elektrikoren balioa neurtzea. Kasu honetan makina elektriko baten abiadura aldakorreko kontrola burutzeko irteerako korronteak eta DC buseko tentsioa sentsorizatu beharko dira.

Makina elektrikoaren eta kontrol estrategiaren arabera neurtu beharreko korronte kopurua desberdina izango da. Ohiko sistema trifasikoetan adibidez, 2 fasetako neurketekin nahikoa da, neutroaren konexioa dela eta hirugarren fasea kalkulatu daitekeelako. 9 faseko makinan aldiz neutroaren konexio konfigurazio desberdinak egon daitezke, eta horren arabera beharrezko korronte neurketa kopurua aldatuko da. Irudia 44-ko A aukeran neutro bakoitzeko bi korronte neurtu behar dira gutxienez, guztira 6 beharrezkoak izanik. B aukeran aldiz 8 izango dira beharrezkoak.



Irudia 44. 9 faseko makina elektrikoaren neutro konexio desberdinak.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Makina topologia eta kontrol estrategia desberdinak ikertzeko bideratutako bihurtailua izanik, aukera guztietara moldatzeko aukera eskaini behar du. Hori dela eta fase guztien irteerako korronteak neurtuko dira. Irteerako korronte maximoak, desoreka faktorea kontutan hartuta, $100A_{RMS}$ baloretik igotzea izan liteke eta egoera nominalean korronte hori neurtzeko sentsore bat bilatuko da. Bestetik, $130Hz$ -ko korronte ematen da espezifikazioetan baina gutxienez konmutazio frekuentziaren ondoriozko kizkurdura irakurtzeko gaitasuna eskatuko zaio sentsoreari, bost aldiz handiagoa hartu eta $50kHz$ -ko banda zabalera eskatuz.

HO 150-S-0100 korronte sentsorea		
Korronte nominala	Korronte maximoa	Banda zabalera
$\pm 150 A$	$\pm 375 A$	$100kHz$

Taula 8. HO 150-S-0100 korronte sentsorearen ezaugarri nagusiak.

Aukeratutako sentsorea LEM ekoizlearen HO 150-S-0100 modeloa da. Korronte neurketaren rangoa, isolamendua eta parametro elektrikoak egokiak izateaz gain faseen irteerako pletinetan zuzenean muntatzeko aukera eskaintzen du.



Irudia 45. LEM-en HO 150-S-0100 modeloa.

Tentsio neurketari dagokionez DC buseko tentsioaren neurketa beharrezkoa da kontrolak makinari ezartzen dion tentsioa estimatu ahal izateko eta busean gaintentsioak ekidin ahal izateko. Kasu honetan $900V$ -ko tentsio nominala neurtu dezakeen sentsorea behar da. LEM ekoizleak $1000V$ -ko tentsio nominalerako eskaintza zabala dauka bai soluzio industrialetan zein PCBan muntatzeko sentsore txikietan. Seinaleen egokitzapenerako PCB bat beharrezkoa izango dela aprobetxatuz, bertan tentsiorako LV 25-P/SP5 sentsorea eta beharrezko zirkuituak ezarriko dira, tentsio neurketaren kostua asko murriztuz.

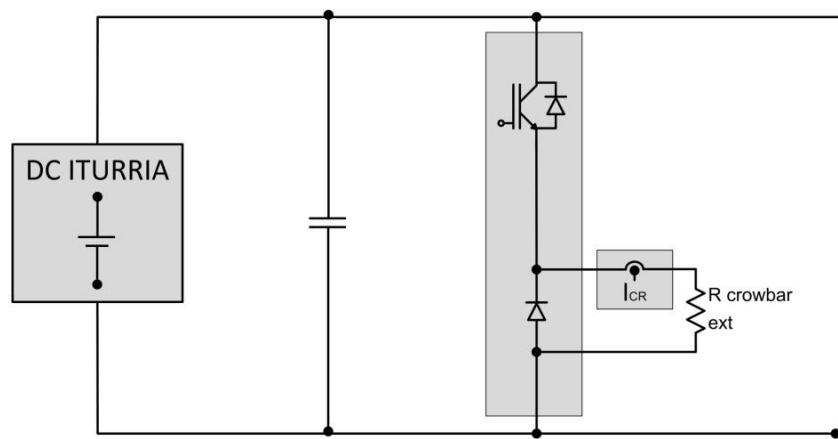
4.2.7 Crowbar-a

Akzionamenduetan makina elektrikoak sorgailu moduan lan egiten duen kasuetarako potentzia fluxua ere kontuan hartu beharra dago. Potentzia fluxu aldakor horiek inbertsorearen DC buseko tentsio mailan eragin zuzena daukate eta crowbar zirkuitua babes moduan sartzten da tentsioak balio onargarri batetik gora egiten duenean. Diseinatzen ari den bihurtailuaren kasuan buseko kondentsadoreak bidirekzionala ez den iturri batetik

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

elikatuko dira eta ondorioz noranzko horretan doan edozein potentzia fluxuk zuzenean buseko tentsioaren gorakada bat ekarriko du.

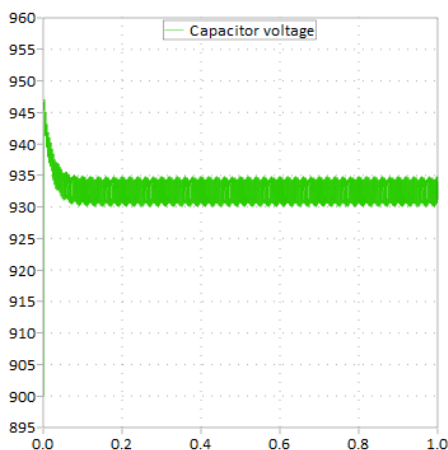
Irudia 46-n ikus daiteke burutuko den crowbar konfigurazioa. IGBT modulu dualak bilatuko dira modulu bakar batekin IGBT bat erabili eta bestearen diodoa aprobetxatu ahal izateko. Aurreko proiektuetan erabilitako moduluen artean bilaketa bat egin ostean 1700V-ko hiru aukera topatu dira. Horietako bat (Infineon-en FZ1600R17KE3_B2) duala ez izanagatik alboratu egin da, eta beste bien (Infineon-en FF1000R17IE4 eta Mitsubishi-ren CM1200DC-34N) arteko konparaketa bat burutu da simulazio bidez.



Irudia 46. Crowbar-aren eskema elektrikoa.

Simulazioaren bitartez frogatu egin da Mitsubishi-ren modeloa dela portamolde egokiena erakusten duena, eta crowbarraren funtzionamendu egokia frogatu da. Irudia 47-n ikus daiteke maniatuko den potentzia maximoa regeneratzerakoan crowbarrak buseko tentsioa balio seguruetan mantentzeko gai dela. Kontrolaren bitartez tentsio muga hori moldatu daiteke, Irudia 47-ko simulazioa 950V-tik pasa ez dadin burutu delarik.

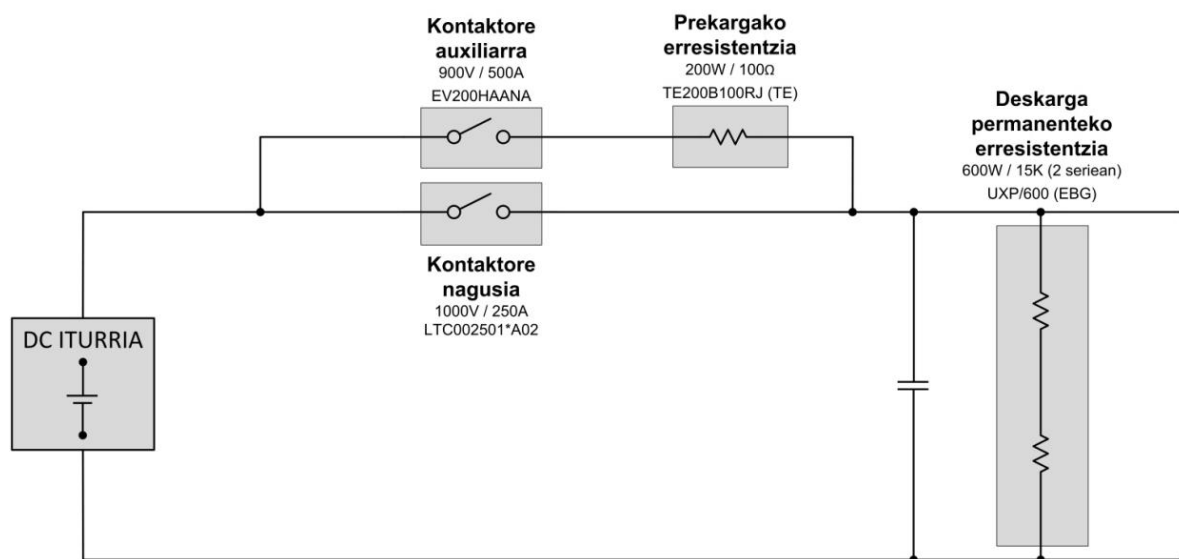
Era berean, simulazioaren bitartez crowbarreko korronea kontutan izanik korrone sentsoare egoki bat aukeratu da crowbar sisteman integratzeko. 300A-tik beherako pikoak dituen korrone pultsatu hori LEM ekoizlearen HAH1DR 300-S modeloarekin neurtuko da.



Irudia 47. Buseko tentsioa 130kW regeneratzerakoan.

4.2.8 Prekarga

Buseko kondentsadoreen tentsioa igotzeko prozesua era kontrolatua egitea bermatzen duen sistema da prekargakoa. Irudia 48-n ikus daitekeen moduan lehenik eta behin prekargako erresistentzia baten bitartez burutzen da kargako prozesua. Erresistentzia honen balioaren bitartez karga prozesuko korronea mugatu egiten da kondentsadoreentzat onargarria den korrone balio batetara. Prozesu hau kontaktore auxiliarraren bitartez egiten da, eta behin karga amaitu delarik, kontaktore nagusiaren bitartez prekarga zirkuitu laburrean jarri eta funtzionamendu normalari hasiera emateko aukera dago.



Irudia 48. Prekarga sistemaren eskema elektrikoa.

Prekargarako 100Ω -ko erresistentzia bat erabiliko da, modu honetan hasierako korrone piko $9A$ -tara mugatuta geratuko delarik. Balio hau kondentsadoreen mugatik oso behera geratzen da eta $1.6s$ -tan prekarga egitea ahalbidetuko du.

Kontaktore auxiliarra $900V$ -tan lan egin ahal izateko eta $9A$ -ko korrone hori erroteko dimentsionatu behar da. Kasu honetan aurreko proiektuetan erabilitako EV200HAANA kontaktorea erabiliko da. $900V$ arteko tentsio nominalean lan egin dezake eta $500A$ arte ireki dezake ekoizlearen datasheeteko balioen arabera baldintza jakin batzuetan. Gaindimentsionatua dagoela dirudien arren, bere tamaina txikiak eta itxiera prozesuaren acknowledge seinale irakurketak egokia egiten du bere funtzioa betetzeko.

Bestetik, kontaktore nagusi bezala LTC002501*A02 modeloa aukeratu da. Hau ere aurreko proiektuetan erabilia izan da eta bere funtzionalitatea frogatua dago. $1000V$ arteko eta $250A$ irekitzeko gaitasunarekin DC iturritik etor daitekeen $100A$ -ko korrone maximoa segurtasunez eteteko gailua da, honek ere acknowledge seinalea dauka.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 49. Kontaktore auxiliarra eta nagusia.

Prekarga sistemaz gain, bihurgailua erabilpenean ez dagoenean kondentsadoreak deskargatuta geratzen direla ziurtatzeko deskarga permanenteko erresistentzia batzuk ezarri dira. Haien balio resistiboa deskarga hori bost minutu baino lehenago gertatzeko diseinatu da eta horretarako $15\text{k}\Omega$ -ko bi erresistentzia ezarri dira seriean. Deskarga denbora egokia dela (4.3 min) eta erresistentziek disipatu beharreko potentzia (60W) jasan dezaketela simulazioan frogatu egin da. EBG ekoizlearen 600W-ko UXP erresistentziak aukeratu dira.



Irudia 50. Prekargako erresistentzia (ezkerrean) eta deskarga permanenteko erresistentzia (eskuinean).

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4.2.9 Elementuen laburpena

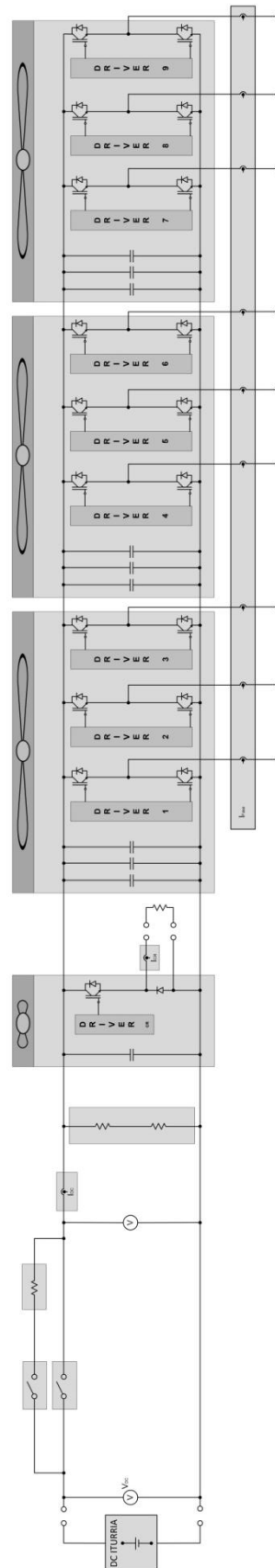
ELEMENTUEN LABURPENEA			
Elementua	Ekoizlea	Modeloa	Kopurua
Faseko IGBT-ak	Infineon	FF450R17ME4	9
Faseko Driver-ak	Power Integrations	2SP0115T2Ax-FF450R17ME4	9
Crowbarreko IGBT-a	Mitsubishi Electric	CM1200DC-34N	1
Crowbarreko Driver-a	Power Integrations	2SB315-B03-CM1200DC-34N	1
Heatsink-ak	Rectificadores Guasch	RG42130N43/300M	4
Haizagailuak	Delta Electronics	QFR1224GHE	4
Kondentsadoreak	Kemet	C44UNG76430A8SK	10
Prekargako erresistentzia	TE Connectivity	TE200B100RJ	1
Kontaktore auxiliarra	TE Connectivity	EV200HAANA	1
Kontaktore nagusia	Microelettrica Scientifica	LTC002501*A02	1
Deskarga permanenteko erresistentziak	EBG resistors	UXP/600	2
Faseko korrante sentsoreak	LEM	HO 150-S-0100	9
DC korrante sentsorea	LEM	LF 205-S/SP3	1
Crowbarreko korrante sentsorea	LEM	HAH1DR 300-S	1
Tentsio sentsoreak	LEM	V 25-P/SP5	2

Taula 9. Elementuen laburpena.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

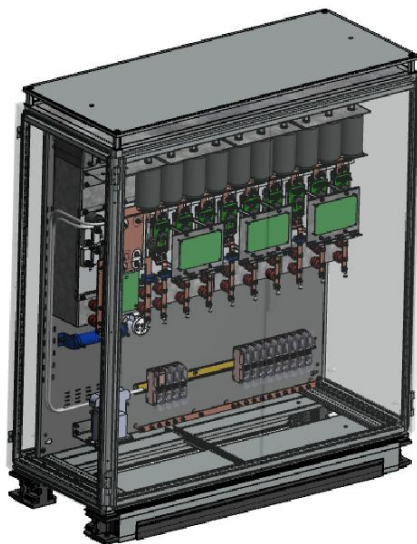
4.2.10 Potentziako eskema

Irudia 51. Potentziako eskema.



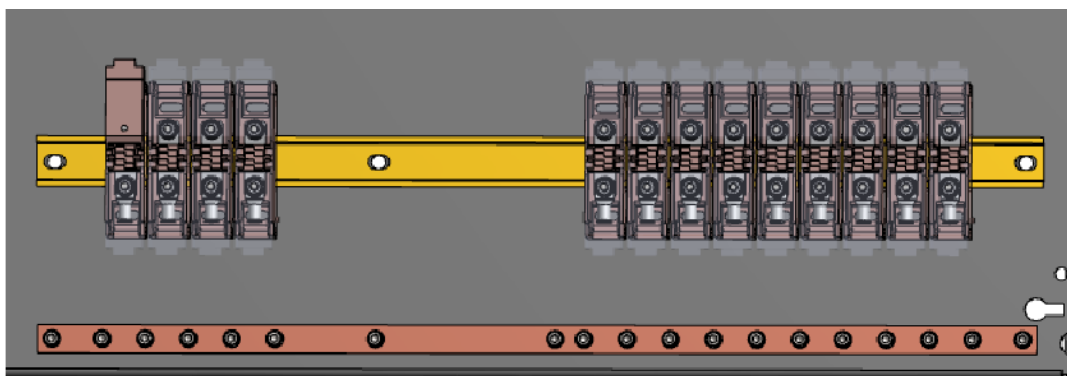
4.3 Diseinu mekanikoa

Diseinu elektrikoan hautatutako elementuen dispozizio egokiena hautatzean datza diseinu mekanikoaren fasea. Hainbat ikuspuntutik izango da garrantzi handikoa diseinu zuzen bat. Lehenik eta behin bihurgailuaren zurruntasun eta egonkortasun mekanikoa bermatu behar du elementuen arteko akoplamenduan. Beste aplikazio batzuetan exigentzia maila altuagoa izan daitekeen arren, laborategi baten geldi egongo den armairu bat izanik ez dauka eskakizun berezirik zentzu honetan. Bihurgailua barnean kokatzeko dimentsioak eta aire bidezko bentilazioa bermatzeko irekiuneak izan dira armairua aukeratzeko irizpide nagusiak. Aukeratutako armairua Rittal ekoizlearen TS 8215.500 modelo izan da, teilatua distantziatzeko pieza banatzaile (DK 7967.000) eta lurra altxatzeko kantonera batzuekin batera (TS 8100.000).



Irudia 52. Bihurgailuaren armairuaren diseinu orokorra.

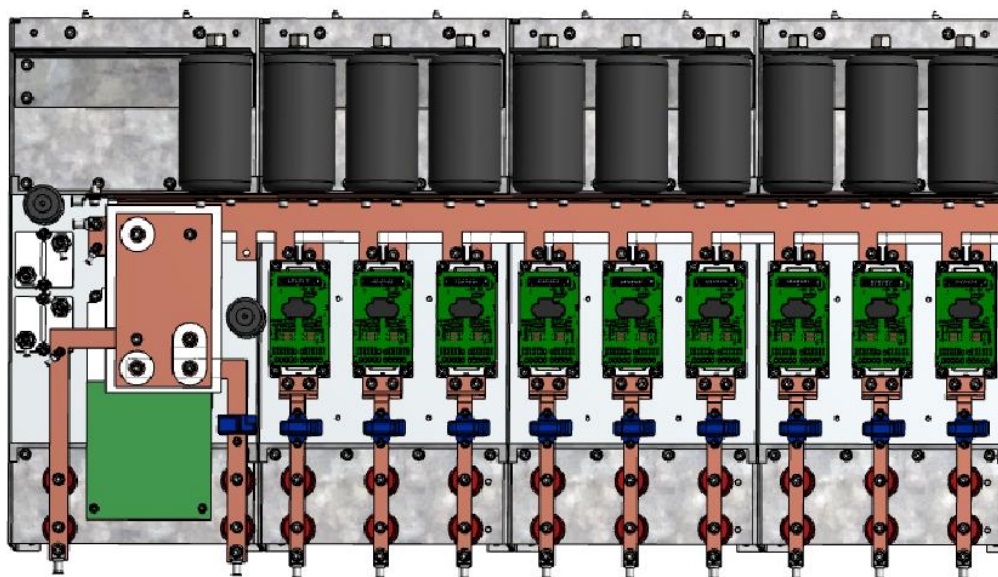
Potentziako kableen irteera armairuaren azpiko irekiunean kokatutako zepilo baten bitartez burutu da. Hori dela eta, kableen lotura puntuen zurruntasuna bermatu behar da kanpotik etor daitezkeen tentsioak jasateko. Bornero batzuen bitartez egingo da kanpora doazen kableen desakoplamendu mekanikoa barnekoekiko. Era berean, potentziako kableen mailak tierrara konektatzeko pletina bat ezarriko da borneroen parean.



Irudia 53. Potentziako kableen borneroen eta mailak lotzeko pletina.

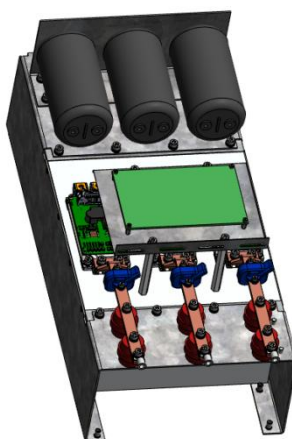
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Era berean, ikuspegi mekaniko zorrotzetik haratago funtzionamendu elektrikoan eragina izango duten faktoreak ere kontutan hartu dira. Alde batetik, paralelizatuko diren hiru IGBT-etako bloke bakoitzaren barneko simetria bilatu da. Modu honetan haien arteko korrante banaketa egokia ematea bermatuko da. Banaketa egoki hori ziurtatzeko IGBT guztien korronteez erresistentzia eta induktantzia berdina ikusi behar dute, oreka estatikoa eta dinamikoa eman dadin kondukzioan zein konmutazioetan. Bestetik, busbarraren diseinua ere induktantziak minimizatu eta simetria mantenduz egin da, bloke bakoitzaren simetria haratago sistema mailakoa ere izateko. Azkenik, puntu aktiboen artean arku elektrikoa ekiditeko airean eta azaletik errespetatu beharreko distantziak definitu dira 1000V-ko isolamendua bermatzeko. Clearance 5,5mm eta creepage 10mm balioak jarraituz burutu da diseinua.



Irudia 54. IGBT adarren arteko simetria eta busbarraren diseinua.

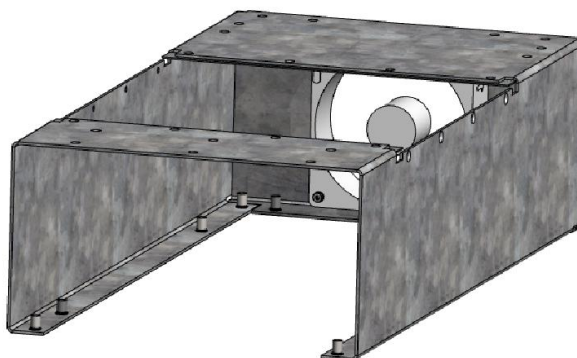
Potentziako zirkuituen simetria gain, kontroleko seinaleen simetria ere kontuan izan da, gehien bat zaraten aurrean immunitate ahalik eta handiena lortzeko. Irudia 55-en ikus daitekeen moduan bloke bakoitzeko kontrolaren interfaze txartel bat dago, kableatuak ahalik eta simetrikoenak eta luzera berdinekoak izan daitezten.



Irudia 55. IGBT bloke bakoitzerako kontrol txartel komuna simetria bermatzeko.

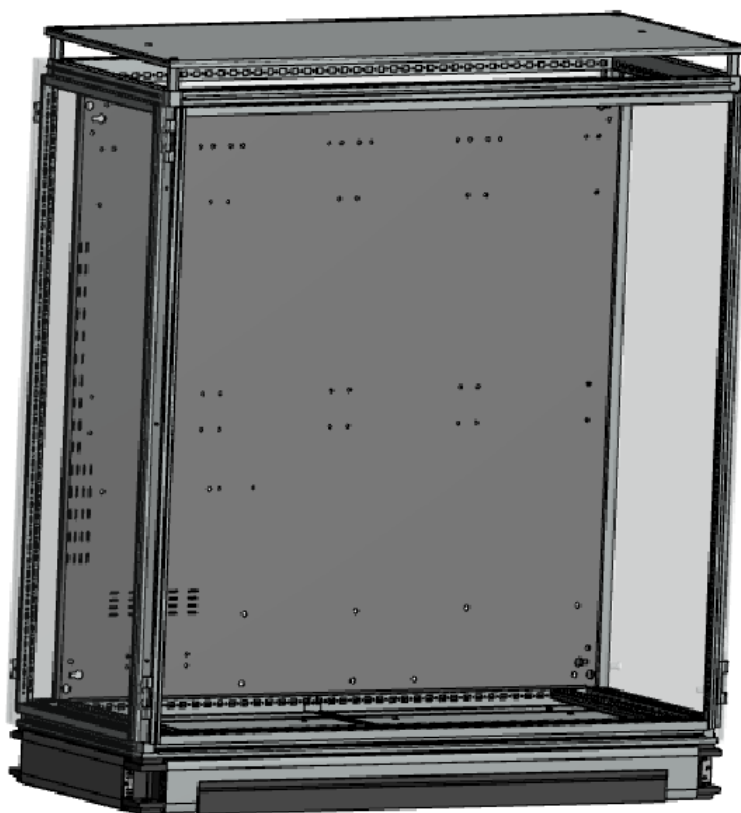
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Haizagailuek sortutako aire fluxua erradiadoreetatik pasako dela bermatzeko bentilazio kanalak ageri dira Irudia 56-n. Erradiadoreak inguratzen dituzten txapazko pieza hauek gainontzeko elementuak akoplatzeko oinarri mekanikoa eskaintzen dute ere.



Irudia 56. Bentilaziorako aire kanala.

Azkenik, erradiadore blokeak guztiak eta gainontzeko elementuak plaka baten lotuta doaz. Elementu guztien oinarri mekanikoa izango da eta aldi berean armairuarekiko lotura bermatuko du.



Irudia 57. Armairua eta elementuen muntairako atzeko plaka.

4.4 Kontrolaren diseinua

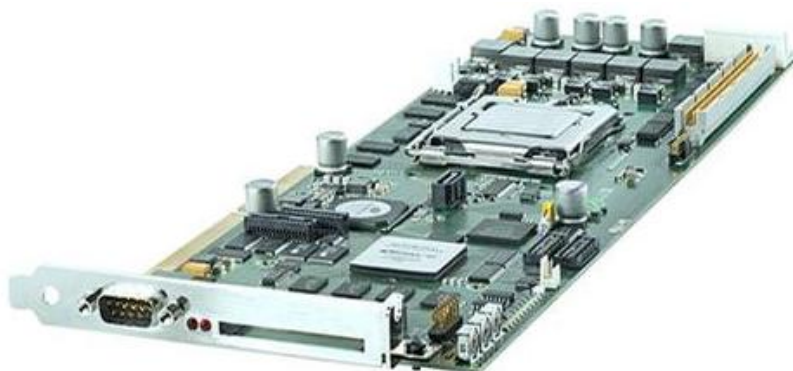
4.4.1 Kontrol plataforma

Inbertsorearen kontrola dSPACE plataforma baten bitartez burutu da; prototipatu azkarreko funtzionalitatea eskaintzen duen denbora errealeko kontrolagailua. Plataforma honen abantailen artean zuzenean Matlab/Simulink-en programatu eta prozesadorera konpilatzeko aukera dago. Bestetik, dSPACE plataforma modularra da eta txartela gehigarrien bitartez seinaleen sarrera eta irteerak era oso eraginkorrean egin daitezke.



Irudia 58. dSPACE-ren Expansion Box-ak.

Irudia 58-n ikus daitekeen Expansion Box ertainean (PX10) oinarritutako dSPACE sistema baten burutu da kontrola. Kutxa honek funtzionalitate desberdineko 10 txartel konektatzeko aukera ematen du, 16 biteko ISA (Industry Standard Architecture) zuloen bitartez. Txartel nagusia DS1006 prozesadorea izango da, gaitasun konputazional handiari esker modelo zehatz eta konplexuak kalkulatzeko diseinatuta dagoena. Txartel prozesadore honek burutuko ditu kontrolaren kalkulu guztiak denbora errealean.



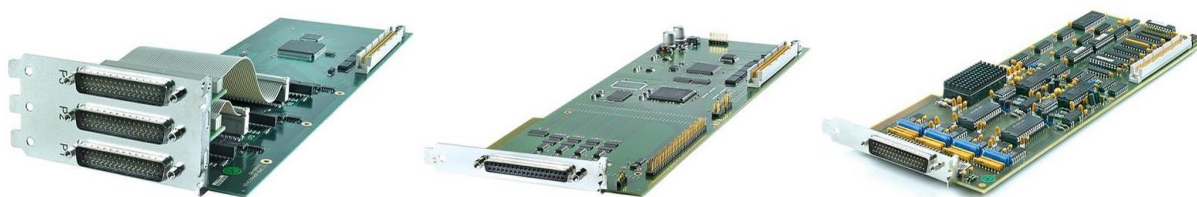
Irudia 59. DS1006 prozesadore txartela.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Kontrol sistema eta sistema fisikoaren arteko konexioak egiteko hainbat txartel gehitzen zaizkio prozesadoreari. Horien artean seinale digitalen irteera eta sarrera DS4003 txartelaren bidez egiten da. 50 pineko 3 sub-D konektore dauzka, guztira 92 linea eskaintzeko. Konektore horietako bakarra erabiliko da, modu horretan 8-ko taldeetan sarrera zein irteera moduan konfiguragarriak diren 32 seinale edukiz, TTL maila logikoan.

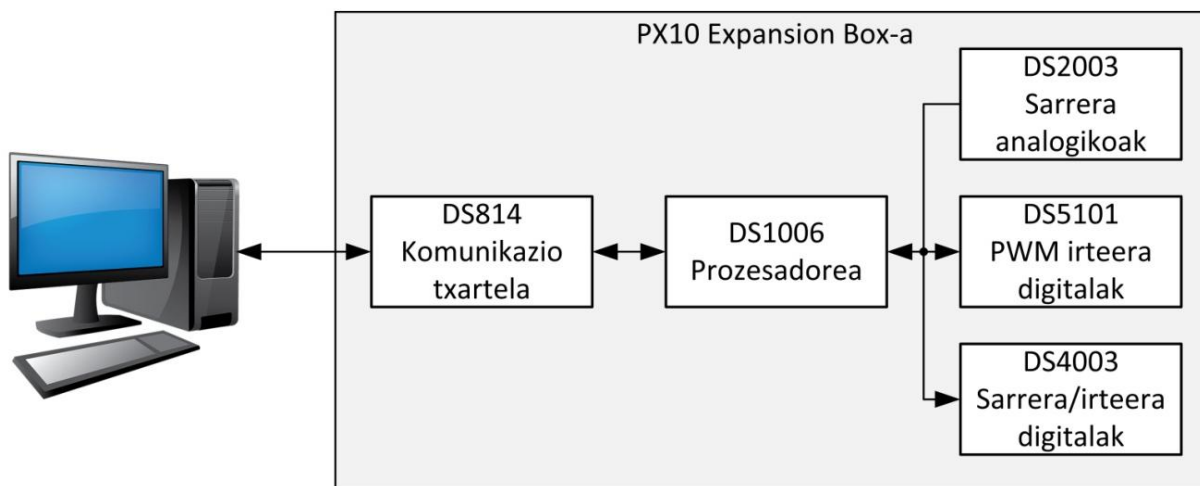
Aurreko seinale digitaletatik bereizirik, DS5101 txartelaren bitartez sortuko dira erdieroaleentzako konmutazio seinaleak. Txartel hau espezifikoki diseinatuta dago frekuentzia altuko eta konplexutasun maila handiko seinale digitalak sortzeko. Seinale hauen tentsio maila ere TTL logikakoa da eta seinaleen konexioa 37 pineko sub-D konektore baten bitartez egiten da.

Seinale analogikoei dagokionez, DS2003 txartelak $\pm 5V$ edo $\pm 10V$ moduan konfiguratu daitezkeen 32 seinale analogiko 16 biteko erresoluzioarekin digitalizatu eta irakurtzeko aukera ematen du. Kasu honetan konexioa 50 pineko sub-D konektore baten bitartez burutzen da.



Irdia 60. DS4003, DS5101 eta DS2003 txartelak.

Azkenik, PX10 Expansion Box-ean dagoen DS1006 prozesadorearen eta kontrolatzeko ordenagailuaren arteko konexioa fibra optiko bidez ematen da, Expansion Box-ean kokatuta dagoen DS814 eta ordenagailuan txertatutako DS817 txartelei esker.

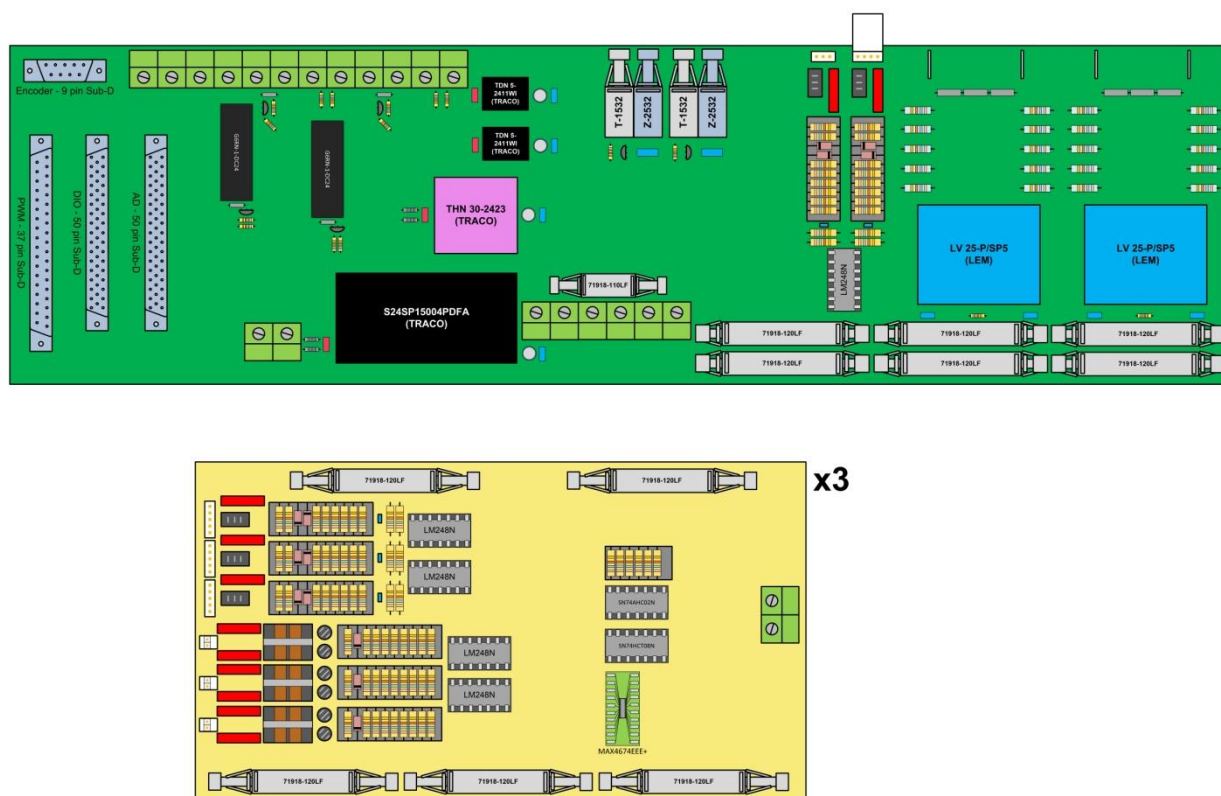


Irdia 61. Kontrolerako dSPACE plataformaren laburpena

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

4.4.2 Interfazeak

Sistemaren kontrol seinaleak azaldutako dSPACE kontrol plataformara moldatzeko txartela elektronikoko batzuk diseinatu dira interfaze moduan ezartzeko. Txartel hauen funtzioa sistemako sensorizazioaren tentsio maila dSPACE-ren mailara egokitzea da nagusiki. Bestetik, sistema fisikoaren hainbat akzionamendurako zirkuitu egokitzailak, sentsoreen alimentaziorako iturriak eta trifasiko/multifasiko funtzionamendu moduen arteko aldaketa ahalbidetzeko zirkuituak barnebilduko ditu.

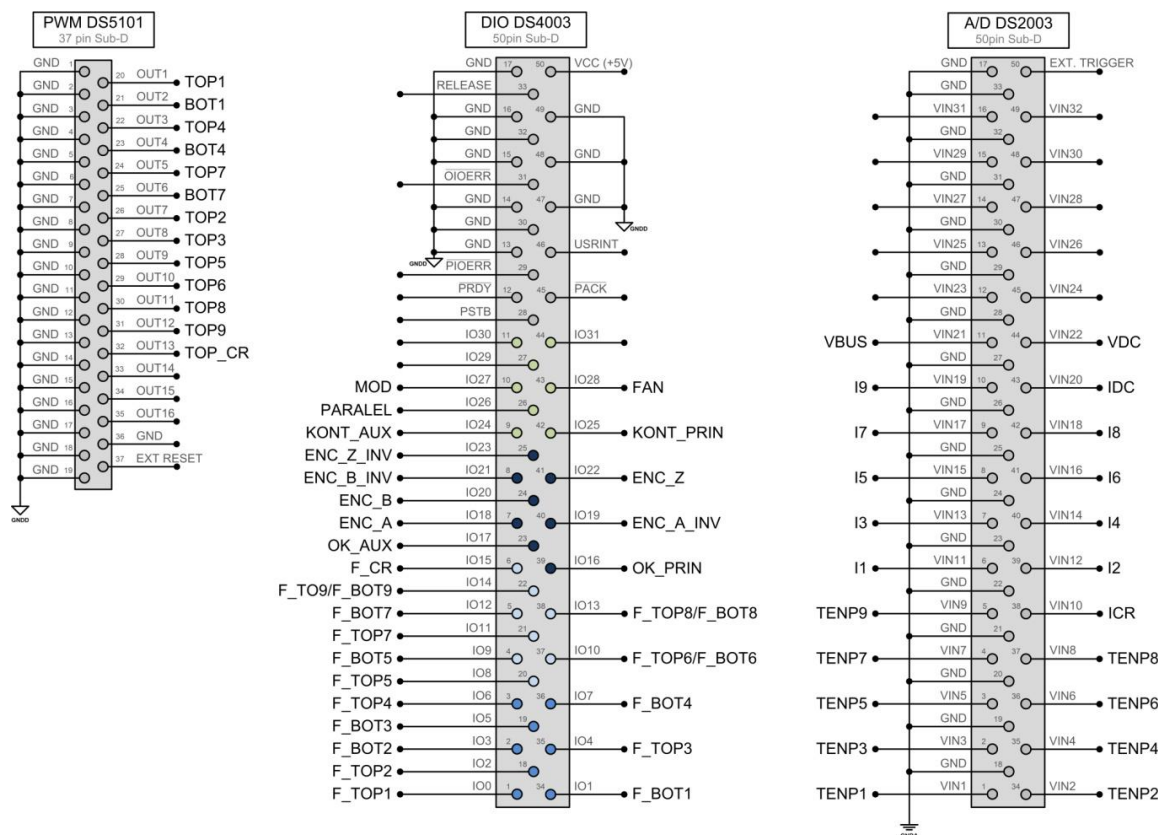


Irudia 62. Interfaze txartelen diseinua.

Bi txartel desberdin diseinatu dira. Lehenik eta behin txartel handi berde ilunean seinaleen distribuzioa eta hainbat zirkuitu ezarri dira. Bestetik, txartel hori txikian erradiadore bloke bakoitzeko korrante eta tenperatura sentsoreen egokitzapena eta konmutazio seinaleen trifasiko/multifasiko adaptazioa egiten da. Mota honetako hiru txartel berdin egingo dira.

Txartel handiari dagokionez, dSPACE-tik datozen seinaleentzako sub-D konektoreak ezarri dira. Irudia 63-n ikus daiteke nola dauden kokatuta konmutazioa seinaleak, sarrera/irteera digitalak eta baita sarrera analogikoak ere. Seinale hauetako batzuk txartel handian bertan dauden zirkuituetara egongo dira lotuta (kontaktoreen aginduak eta acknowledge-ak, tentsio irakurketak, bentiladoreen pizketa seinalea...) baina gehiengoa kable planoen bitartez txartel txikietara doaz lotuta, bertako zirkuituetan konmutazio seinaleak tratatu edo bertako egokitzapenetatik irakurketa analogikoak jasotzeko.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 63. dSPACE-tik datozen seinaleen konektoreak.

Bestetik, interfaze txartelek duten 24V-ko kanpo elikaduratik zirkuituetan beharrezkoak diren tentsio maila guztiak lortzeko alimentazio iturriak ere txartel handian daude kokatuta. Seinale digitalen zirkuituetarako +5V-ko alimentazioa eta IGBT-en driver-ak alimentatzeko +15V-ko tentsio iturriak ezarri dira. Seinale analogikoentzat aldiz, +5V-ko beste iturri bat eta $\pm 15V$ -koa daude. Elikadura iturrien aukeraketa zirkuituen kontsumoak kontuan izanik egin da, funtzionamendu egokia bermatu eta gehiegizko beroketak ez emateko.



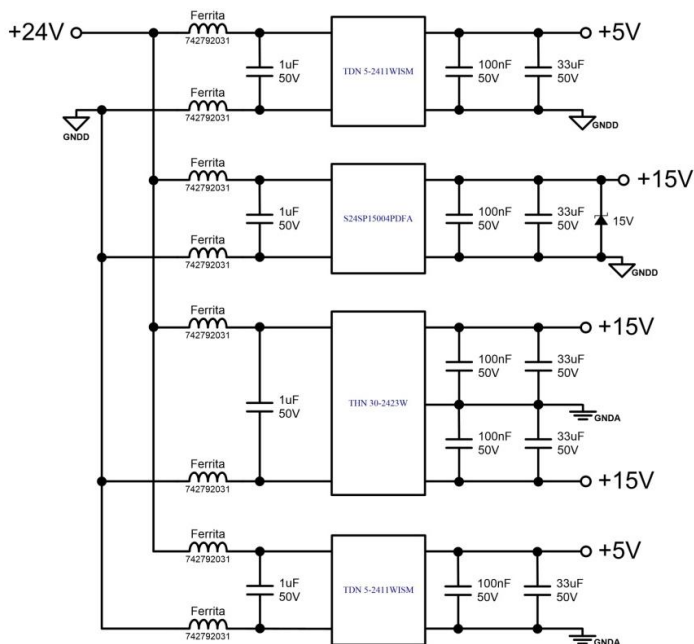
Irudia 64. Erabiltako tentsio iturriak.

DC-DC tentsio iturrien espezifikazioak				
Modeloa	5V analogiko TDN 5-2411WISM	5V digital TDN 5-2411WISM	+15V digital S24SP15004PDFA	$\pm 15V$ analogiko THN 30-2423W
Kontsumo estimatua	1.125 W	1 W	39.15 W	13.6 W
DC-DC potentzia	5 W	5 W	60 W	30 W

Taula 10. DC-DC iturrien kontsumoen espezifikazioa eta potentzia.

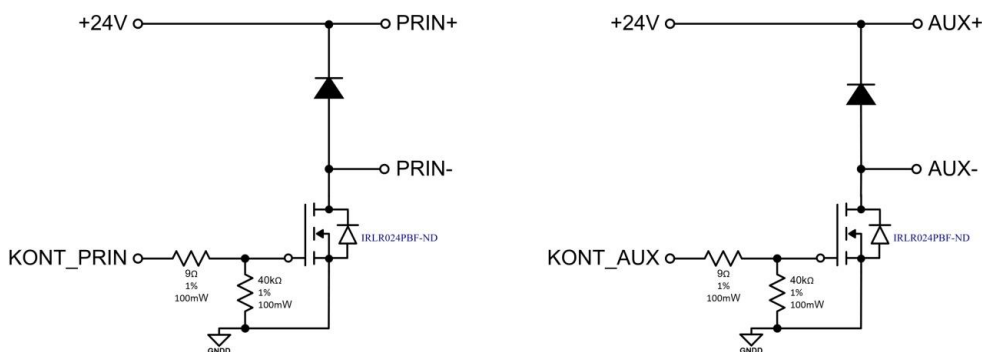
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Elikadura iturri isolatuak erabiltzeari esker seinale analogiko eta digitalen arteko banaketa eman da, bakoitzak masa desberdina izanik haien arteko zarata elkarreragina minimizatuz. Gainontzeko seinaleekin gertatu bezala, alimentaziorako tentsio maila batzuk txartel txikitara eraman dira bertako zirkuitaria elikatzeko.



Irudia 65. Alimentazio iturrien zirkuitu elektrikoa.

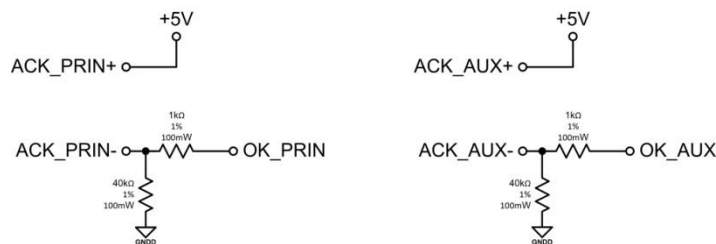
Aurretik aipatu bezala, kontaktoreak eragiteko zirkuituak ere txartel handian kokatu dira. Kontaktore ekoizleek gomendatutako zirkuitua erabili da eta Mosfet-a kontaktoreen artean ixteko eta irekitzeko korrante gehien eskatzen duenarekin era seguruan lan egiteko aukeratua izan da. Mosfeta aukeratzeko beste parametro bat ateko seinalearen tentsio maila izan da, zuzenean dSPACE-tik datorren TTL tentsio mailako seinalearekin lan egin ahal izateko.



Irudia 66. Kontaktoreak eragiteko zirkuituak.

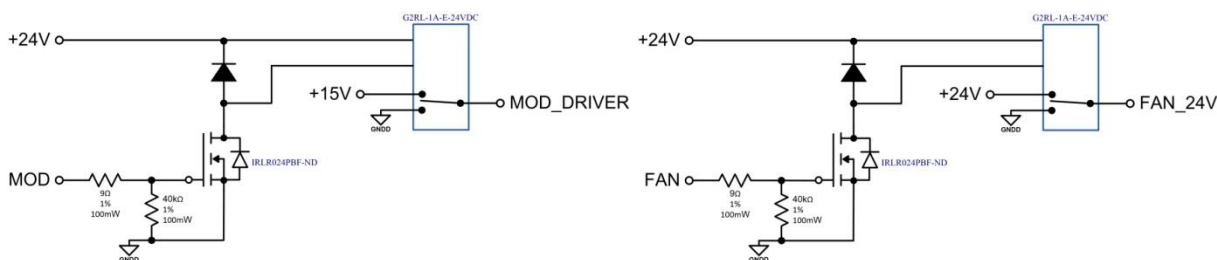
Kontaktoreek normalean haien egoera islatzen duen seinale bat eskuratzeko aukera ematen dute. Acknowledge seinale deritzon honi esker, kontaktorea agindutako posizioan dagoela ikus daiteke segurtasun funtzioetarako. Erabilitako kontaktore biek “normally open” moduko bi kontaktu eskaintzen dituzte. Irudia 67-n “NO” kontaktu horiek TTL mailako seinale digital moduan irakurtzeko erabilitako zirkuituak ageri dira.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



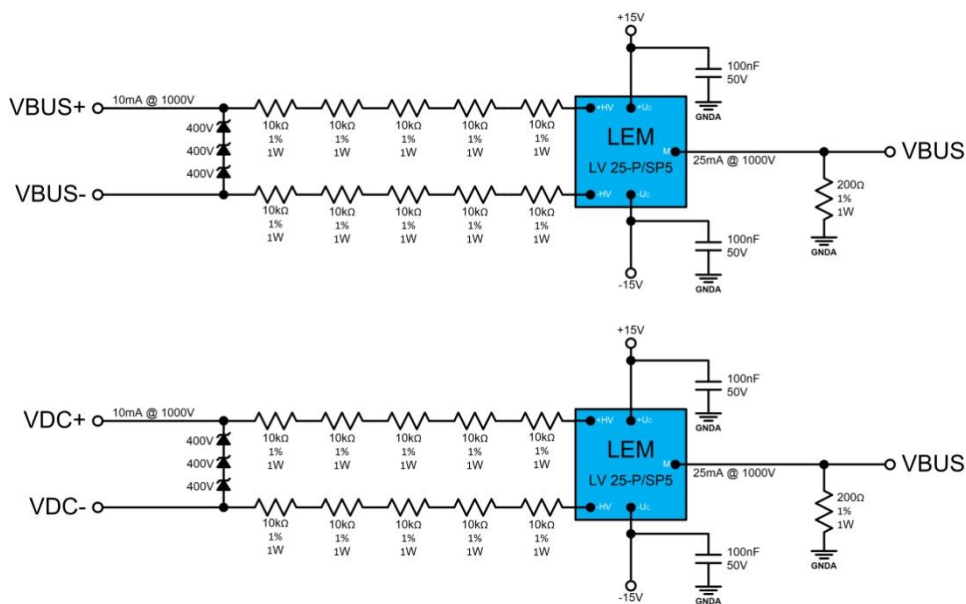
Irudia 67. Kontaktoreen acknowledge seinalea irakurtzeko zirkuitua.

Kontaktoreen eragintzarako zirkuituekin antza duten haizagailuen eta driver-en funtzionamendu modua kontrolatzeko zirkuituak ere txartel handia kokatu dira. Kasu hauetan dSPACE-ko TTL seinaleen bitartez rele bat aktibatuko da aurreko zirkuiteria bera erabiliz. Rele horiek driver-etara +15V-ko seinalea bidali eta bentiladoreak +24V-tan elikatu eta eskatzen duten korrante guztia jasateko aukeratu dira.



Irudia 68. Bentiladoreak eta driver-en funtzionamendu modua aukeratzeko zirkuituak.

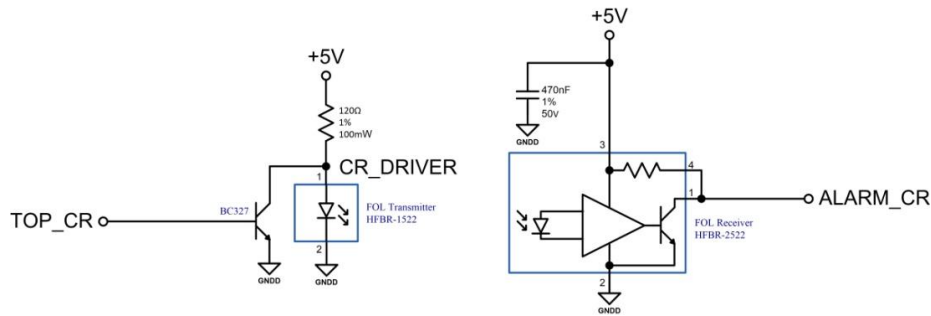
Diseinu elektrikoaren atalean aipatu bezala, tentsio tentsioak interfaze txartela handian ezarri dira. LEM-en LV 25-P tentsorea erabili da horretarako, eta ekoizleak gomendatutako zirkuitua erabili da. Irakurri beharreko tentsioari zener-en bidezko babesak ezarri zaizkio tentsorea ez kaltetzeko eta irteeran dSPACE-ren seinale analogikoetara zuzenean joateko moduko seinale bat sortzea bilatu da, irakurketarako tarte barruan geratuko dena.



Irudia 69. Tentsio irakurketarako zirkuituak LEM-en LV 25-P tentsorea erabiliz.

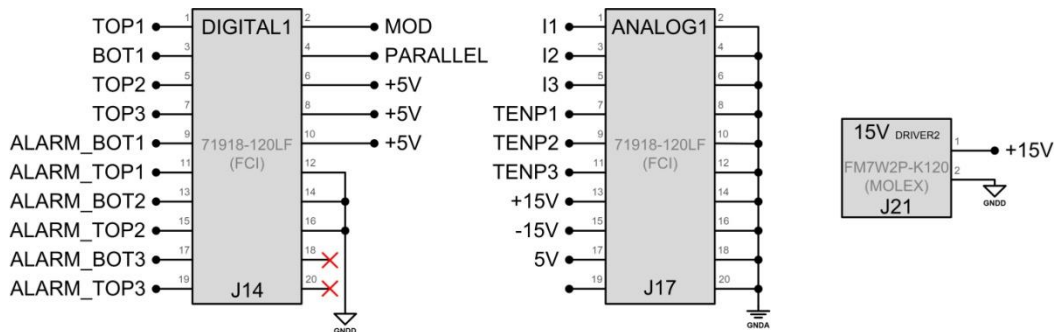
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Azkenik, DC eta crowbarreko korronteentzako egokitzapen zirkuituak eta crowbarreko IGBT-a kontrolatzeko zirkuituekin txartel handiaren deskribapena amaituko da. Korrontearen egokitzapena txartel txikietako berdina izanik aurrerago ikusiko da. Crowbarreko IGBT-aren kontrolari dagokionez, alimentazioaz aparte konmutazio seinale bat bidali eta status seinale bat jasoko dira zuntz optikoaren bitartez. Zuntz optikoa kontrolatzeko zirkuitua transmisore eta recepitoreen ekoizleak gomendatzen duena erabili da.



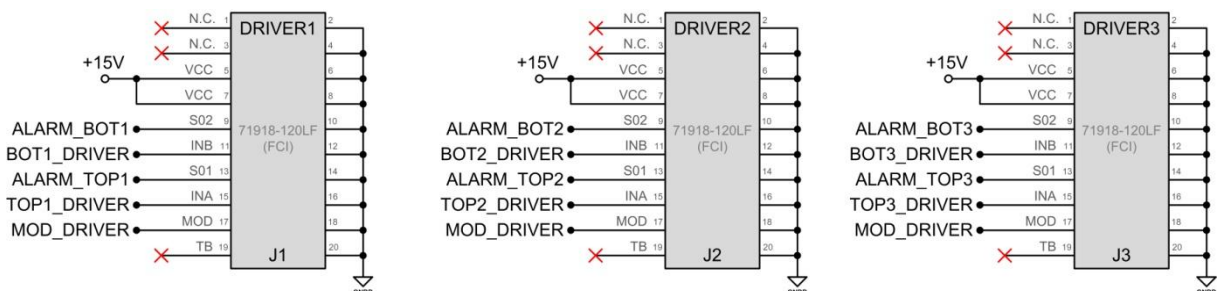
Irudia 70. Crowbarreko IGBT-a kontrolatzeko zuntz optiko bidezko seinaleak.

Interfaze txartel txikien deskribapena hasteko lehenik eta behin txartelera heltzen diren seinaleak aurkeztuko dira. Aurretik esan bezala, kable planoen bitartez helduko dira seinaleak. Mundu digitala eta analogikoa bereizteko, seinale eta zirkuituak elikatzeko tentsio analogikoak kable baten bitartez joango dira, eta digitalak beste batetik. Era berean, driver-en alimentazioak korronte gehiago eskatzen duenez banatutako kableen bitartez eramango dira +15V horiek.



Irudia 71. Txartel txikietara heltzen diren seinale eta elikatzeko tentsioak.

Txartel txikietatik interfaze txartel handira doazen konektoreak Irudia 71-en ikusten dira, eta Irudia 72-n aldiz txartel hauetatik sistema fisikora doazenak, IGBT-en driver-etara.



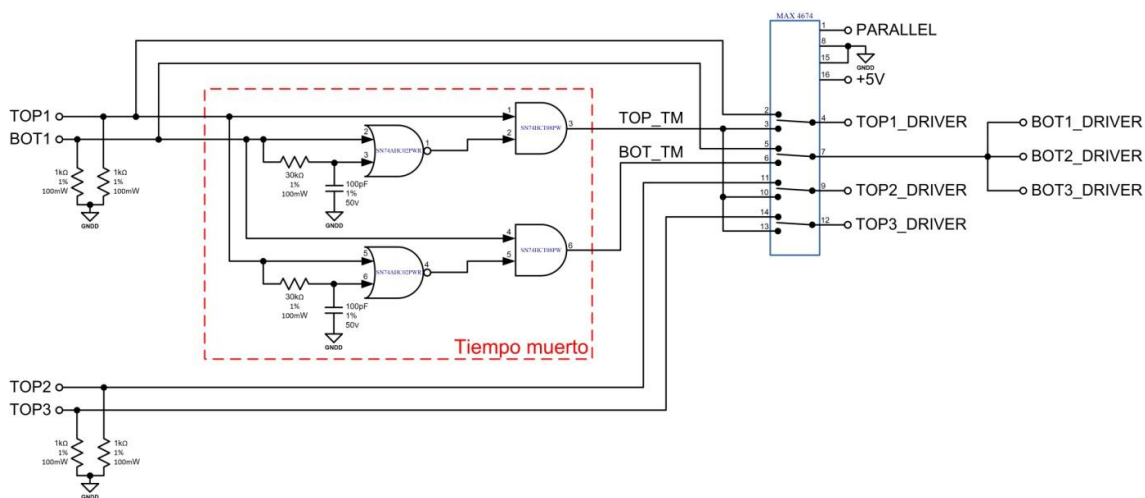
Irudia 72. Interfaze txartela txikietatik IGBT-en driver-etara doazen kable planoen konektoreak.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Aurreko irudietan ikusi ahal den moduan, seinaleetako batzuk zuzenean pasatzen dira konektore batetik bestera, inolako egokitzapenik izan gabe. Horiek driver-en falta seinaleak (ALARM), haien funtzionamendu modua (MOD) eta driver-ak elikatzekeo +15V-ak izango dira. Gainontzeko seinaleen (Konmutazioa aginduak, korrontek eta tenperaturak) egokitzapen zirkuituak azalduko dira jarraian.

Bihurgailuak bi funtzionamendu modu izango dituela aipatu da hainbatetan: trifasikoa eta 9 fasekoa. Era berean, modu trifasikoan IGBT-ak paralelizatzerako orduan hainbat neurri hartuko direla ere aipatu da korronte desorekak ekiditeko. Hori dela eta, funtzionamendu modu bakoitzean IGBT-en konmutazio seinaleekin modu desberdinean lan egitea erabaki da.

IGBT-ek paraleloan lan egiten dutenean, erabili diren driver-en Power Integrations ekoizleak “Direct Mode” moduan lan egitea gomendatzen du. Driver hauek IGBT moduluaren bi IGBT-ak kontrolatzeko bi seinale eskaintzen dituzte eta hauen funtzioa lan egiteko moduaren arabera aldatzen da. “Direct Mode” funtzionamendu moduan seinale bakoitzak IGBT baten gaineko kontrola izango du. “Half Bridge” moduan aldiz seinaleetako batek konmutazio aginduak bidaliko ditu eta besteak “Enable” funtzioa beteko du, beste IGBT-arentzako agindua driver txartel barruan sortzen delarik “tiempo muerto” bat txertatuz.



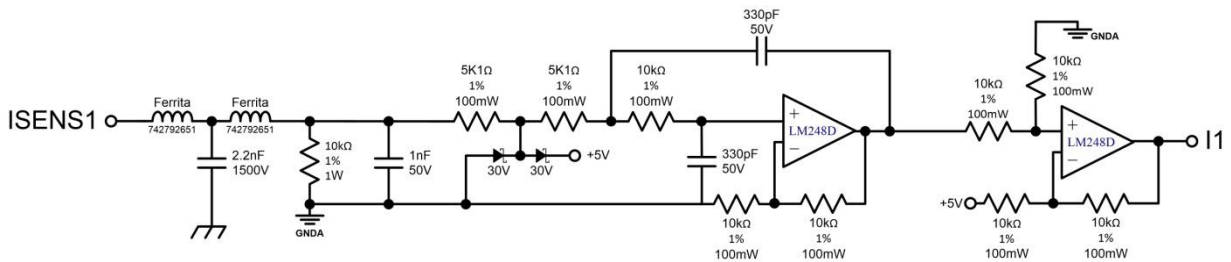
Irudia 73. IGBT-en Half Bridge modua eta modu zuzena aldatzeko zirkuitua.

Irudia 73-n ageri den MAX 4674 zirkuitu integratuaren bitartez egin da bi moduen arteko bereizketa. Alde batetik, funtzionamendu trifasikoan “Direct Mode” modua aktibatuko da, eta “Tiempo muerto” zirkuituan sortutako TOP_TM eta BOT_TM seinale berdina helduko zaio paralelizatutako IGBT bakoitzari. 9 faseko funtzionamentuan, aldiz, driver-en Half Bridge modua aktibatuko da, eta IGBT bakoitza TOP1, TOP2 eta TOP3 dagokion seinalearekin kontrolatuko da, hirurak BOT1 seinale berdina izango dutelarik driver-aren Enable funtzioa betetzeko.

“Tiempo Muerto” zirkuituan erresistentziari eta kondentsadoreari ezarritako baloreak IGBT baten itzalketaren eta bestearen pizketaren artean $3\mu s$ -ko denboraz biak itzalita egon daitezen diseinatu dira. Modu honetan IGBT moduluan adarreko zirkuitulaburra gertatzea ekidituko da.

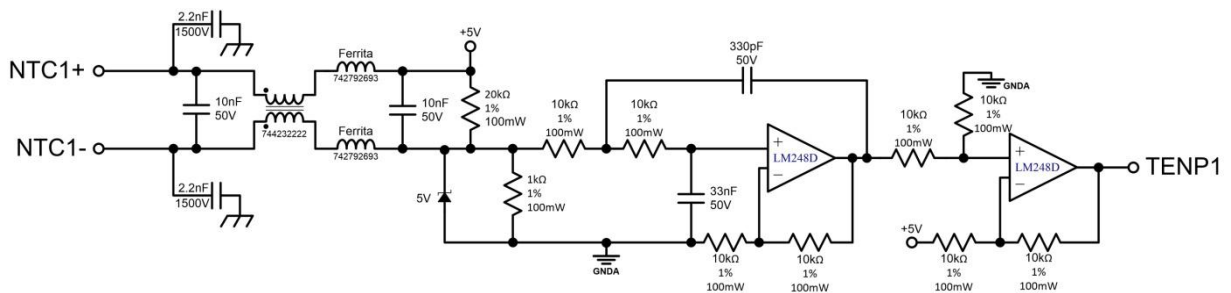
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Seinale analogikoei dagokionez, korronte sentsorearen egokitzapena eta IGBT-aren NTC-tik tenperatura irakurtzeko zirkuituak daude txartel txikietan. Lehenik eta behin korronte sentsorea +5V-tan elikatuko da, eta sentsoreak ematen duen 0tik 5V-ra seinalea $\pm 5V$ balioetara egokituko da. Irudia 82-en ikus daitekeen bezala lehenengo etapa baten seinalea filtratu egiten da, ondoren operazionalen bitartez amplifikatu (0 – 10V mailara) eta azkenik kenketa bat egiten da $\pm 5V$ -ko maila lortzeko.

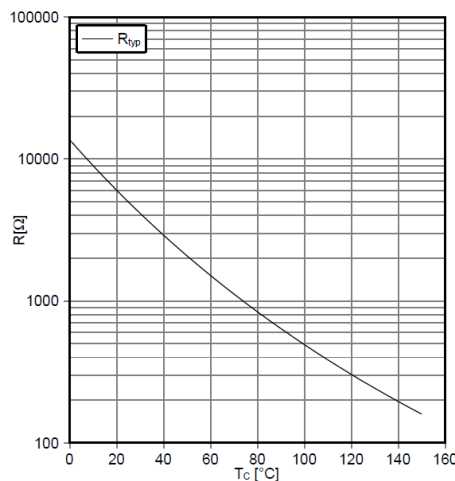


Irudia 74. Korronte sentsoreen seinalearen egokitzapena dSPACE-ra.

IGBT-en barneko NTC-a erdieroalearen junction tenperatura estimatzea ahalbidetzen du. Aurreko kasuan bezala seinalea filtratzeko lehenengo etapa bat ikus daiteke. +5V-ko tentsio maila NTC erresistentzia aldakorrera konektatu eta zatitzaile erresistibo baten bitartez 0tik 5V-ra doan seinalea sortuko da. Erresistentzia bat paraleloan jarrita NTC-aren ezaugarria linearizatuko da, tenperatura tarte guztian erresoluzioa ahal den heinean berdintzeko. Azkenik, korrontearen kasuan egin den bezala operazionalen bitartez zirkuitu berdinak erabilia $\pm 5V$ -ko seinalea izateko egokituko da.



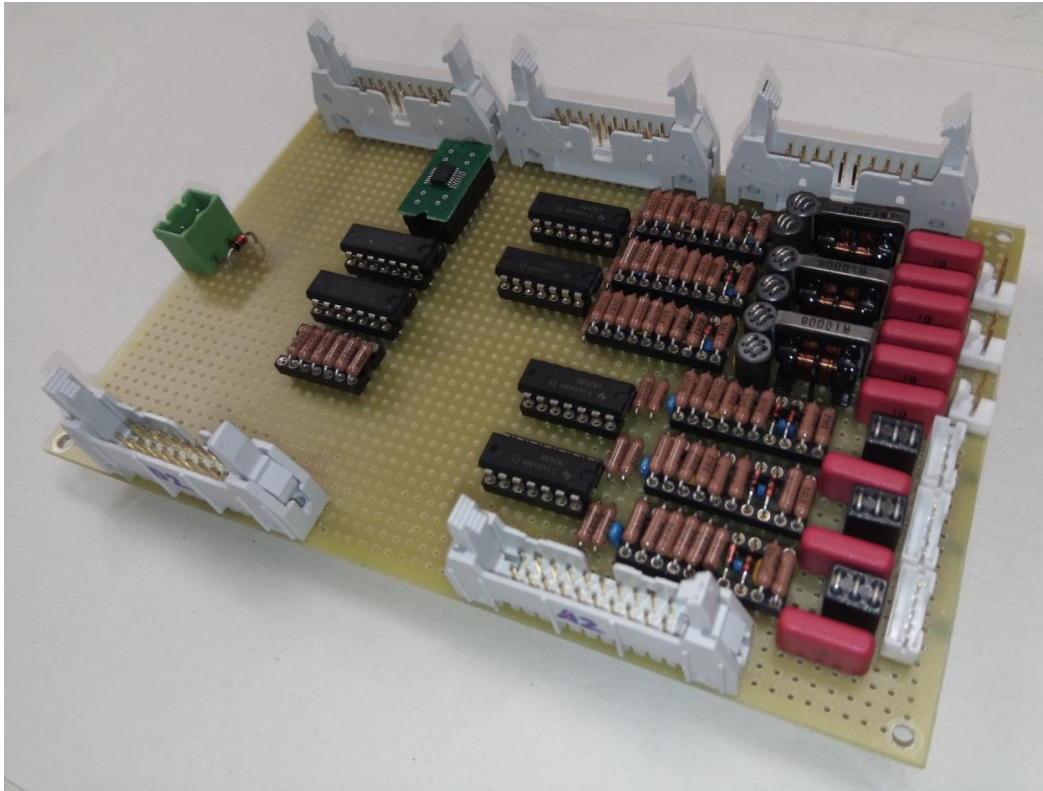
Irudia 75. IGBT-aren NTC-tik tenperatura seinalea lortzeko zirkuitua.



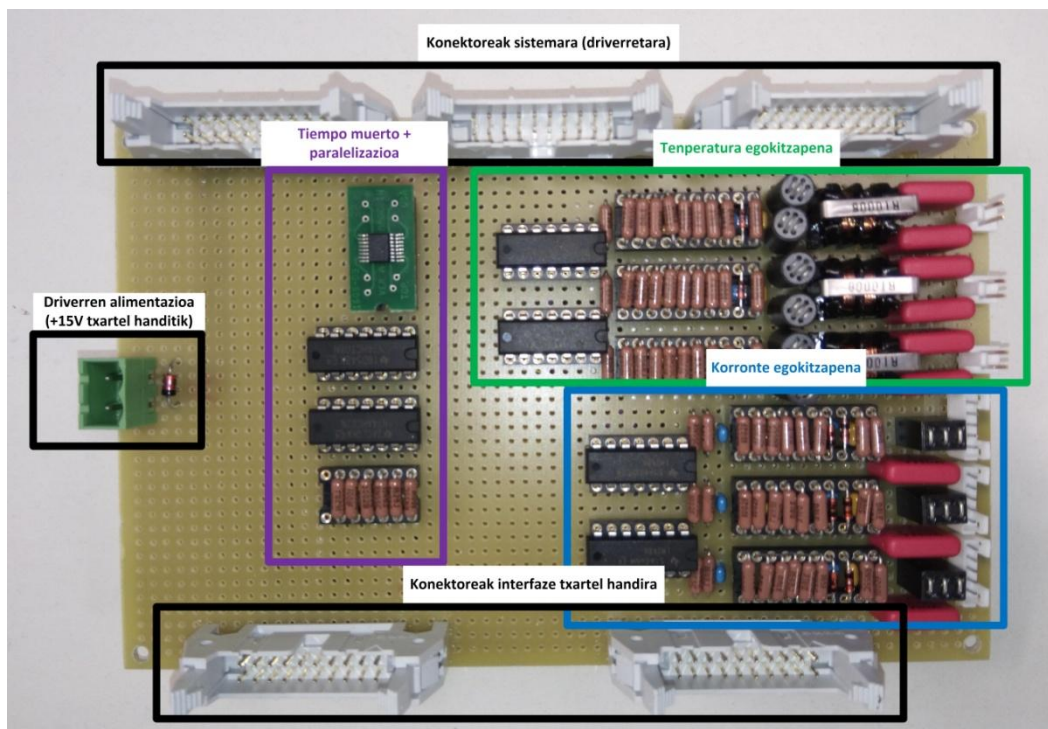
Irudia 76- NTC-aren ezaugarria, erresistentzia vs tenperatura.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Interfaze txartelekin amaitzeko, aipatutako zirkuitu horien muntaiaren emaitza erakutsiko da. Txartel zulatuetan egin da muntaia eta soldaduraz gain “Wire Wrapping” teknika erabili da.

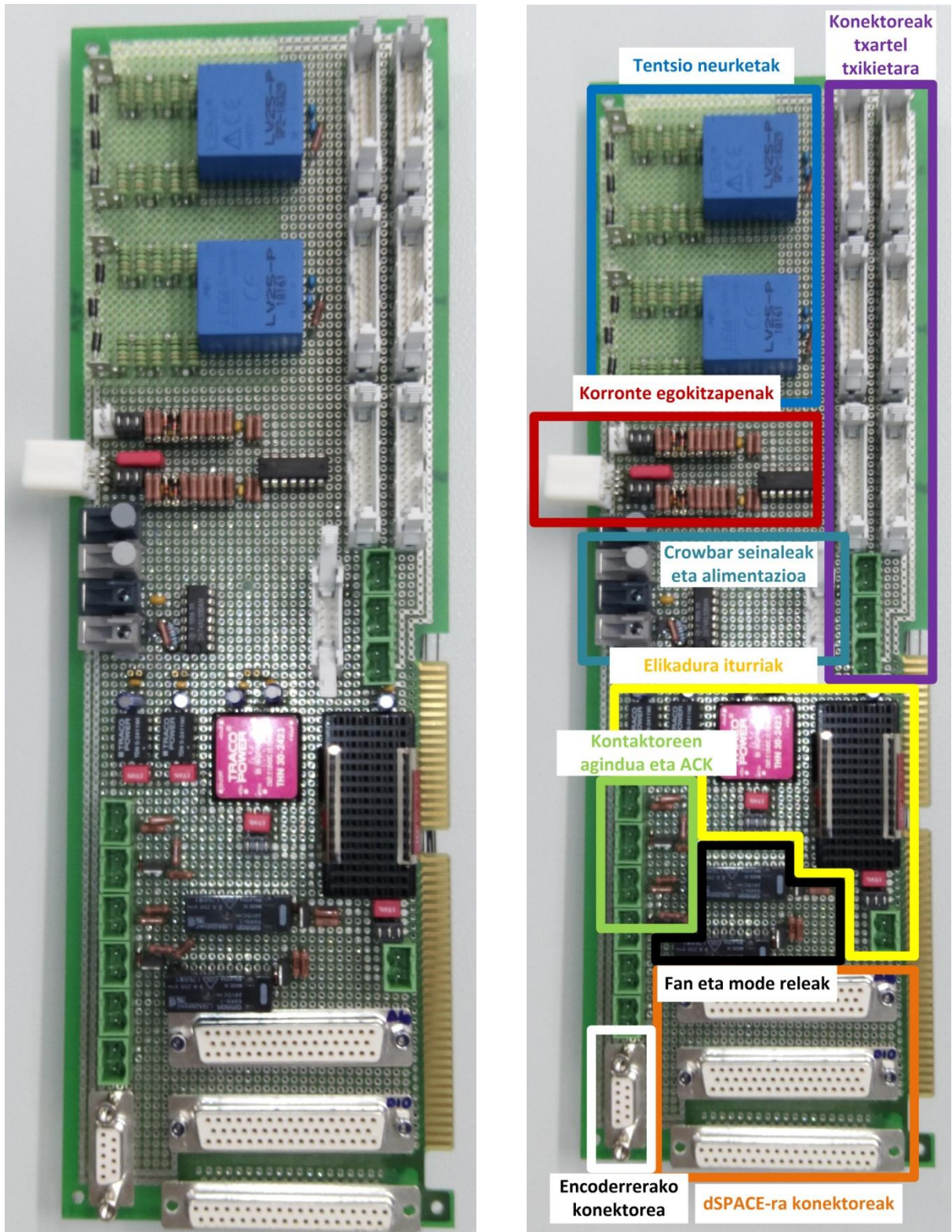


Irudia 77. Interfaze txartel txikia.



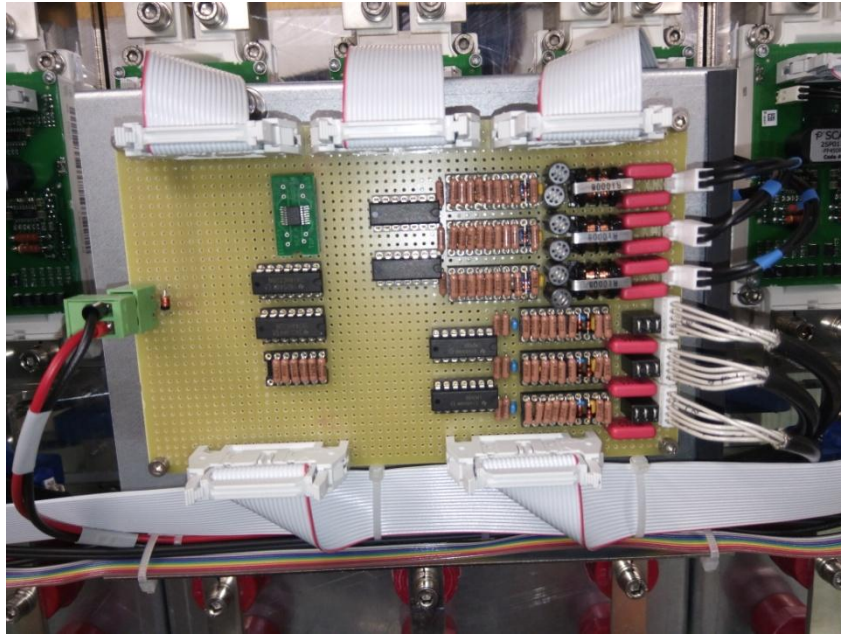
Irudia 78. Interfaze txartel txikien eskema deskriptiboa.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 79. Interfaze txartel handiaren irudia eta eskema.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 80. Txartel txikien kokapena bihurgailuan.

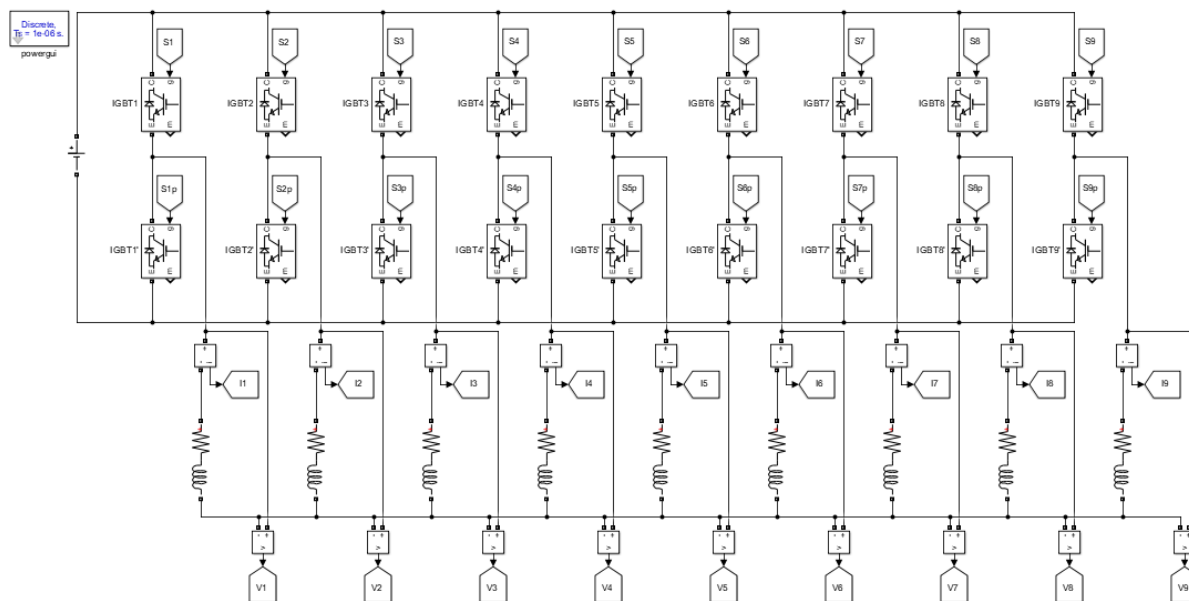


Irudia 81. Txartel handiaren kokapena bihurgailuan.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

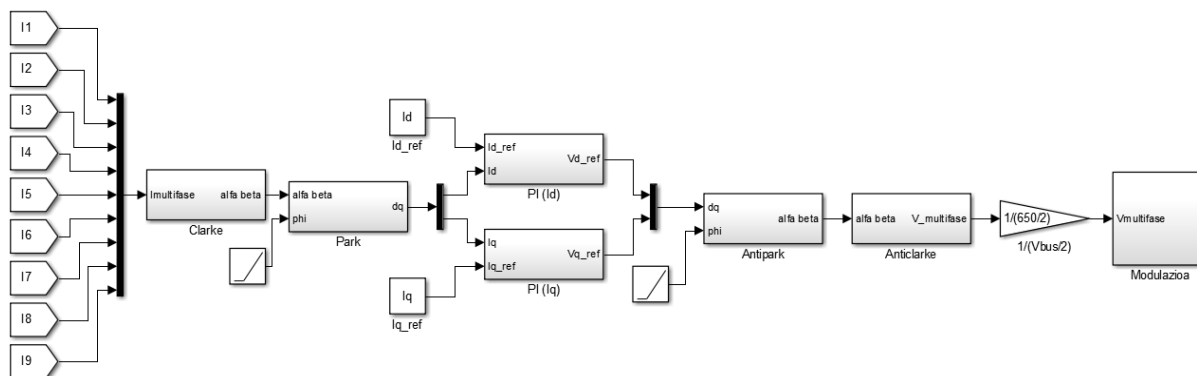
4.4.3 Kontrol estrategia

Kontrolaren diseinua balioztatzeko Matlab/Simulink herremintaren SimPowerSystems liburutegiaren bitartez modelatu da bihurgailua. Modu trifasikoan lan egiteko adarrak hironaka paralelizatu egin dira, eta kontrolean moldaketa txikiak egin dira sistema bakoitzera egokitzeko.



Irudia 82. Bihurgailuaren modeloa SimPowerSystems liburutegia erabilia.

3.4 atalean ikusitako kontrolen inguruko informazioa kontuan harturik definitu da kontrol estrategia. Kontrol bektorialaren alde egin da, carrier based PWM modulazio batekin batera. Bi aukera hauek implementatzerako orduan erraztasuna eta aldi berean funtzionamendu egokia bermatzeko konbinazio egokia dira.



Irudia 83. 9 faseko funtzionamendurako kontrol bektorialaren korrante begizta.

Estrategia honek kontroleko seinaleak bektore bezala tratatu eta hainbat transformaturen bitartez balio eskalar bezala kontrolatzea dauka oinarri. Funtzionamendu moduaren arabera (trifasikoa edo 9 fasekoa) transformatu horietako batzuk aldatuko dira baina gainontzeko egitura finkoa izango da.

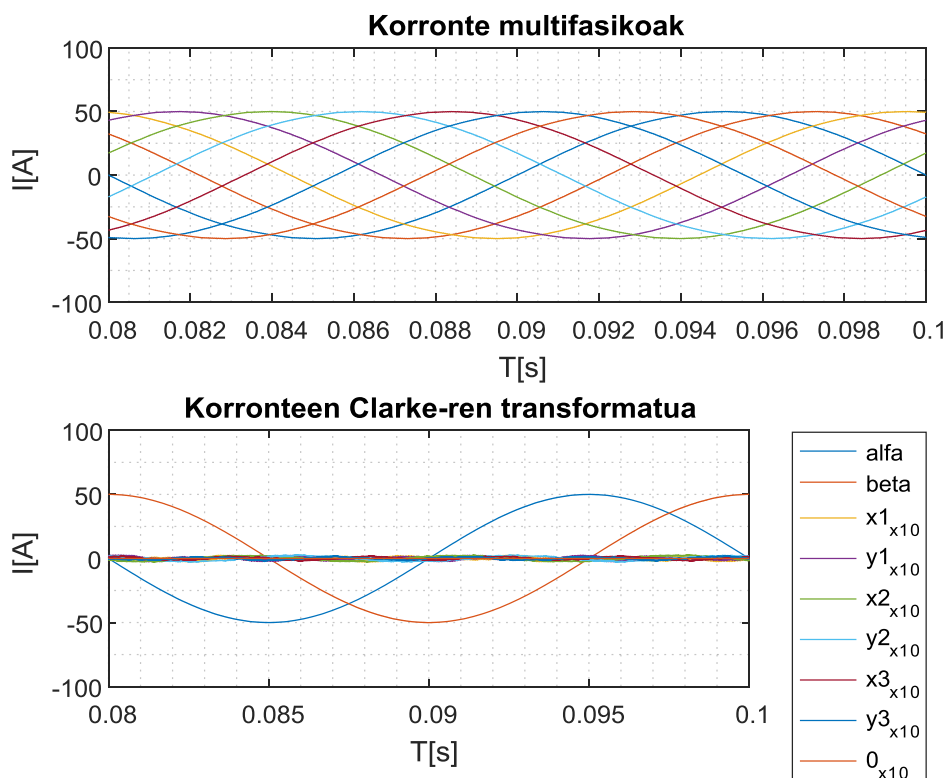
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Jarraian korronteen kontrola azalduko da baina kanpoko beste maila baten erreferentziak sortzeko hainbat filosofia aplikatu daitezke, makina elektriko baten kontrola burutzeko adibidez.

Lehenik eta behin irteerako faseetako korronteak neurtu eta Clarke transformatuaren bitartez $\alpha - \beta$ erreferentziako ardatzetara pasatzen dira. Hau da hain zuzen ere fase kopuruaren arabera aldatzen den transformatua. Kasuetako bakoitzean transformazioa egiteko erabilitako matrizeak ageri dira jarraian, bietan lehenengo bi errenkadak direlarik $\alpha - \beta$ ardatzetako aldagaiak.

$$Clarke_{(3fase)} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 120 & \cos 240 \\ 0 & \sin 120 & \sin 240 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$Clarke_{(9fase)} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 40 & \cos 80 & \cos 120 & \cos 160 & \cos 200 & \cos 240 & \cos 280 & \cos 320 \\ 0 & \sin 40 & \sin 80 & \sin 120 & \sin 160 & \sin 200 & \sin 240 & \sin 280 & \sin 320 \\ 1 & \cos 80 & \cos 160 & \cos 240 & \cos 320 & \cos 40 & \cos 120 & \cos 200 & \cos 280 \\ 0 & \sin 80 & \sin 160 & \sin 240 & \sin 320 & \sin 40 & \sin 120 & \sin 200 & \sin 280 \\ 1 & \cos 120 & \cos 240 & 1 & \cos 120 & \cos 240 & 1 & \cos 120 & \cos 240 \\ 0 & \sin 120 & \sin 240 & 0 & \sin 120 & \sin 240 & 0 & \sin 120 & \sin 240 \\ 1 & \cos 160 & \cos 320 & \cos 120 & \cos 280 & \cos 80 & \cos 240 & \cos 40 & \cos 200 \\ 0 & \sin 160 & \sin 320 & \sin 120 & \sin 280 & \sin 80 & \sin 240 & \sin 40 & \sin 200 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



Irdia 84. Clarke-ren transformatua 9 faseko sistemarako.

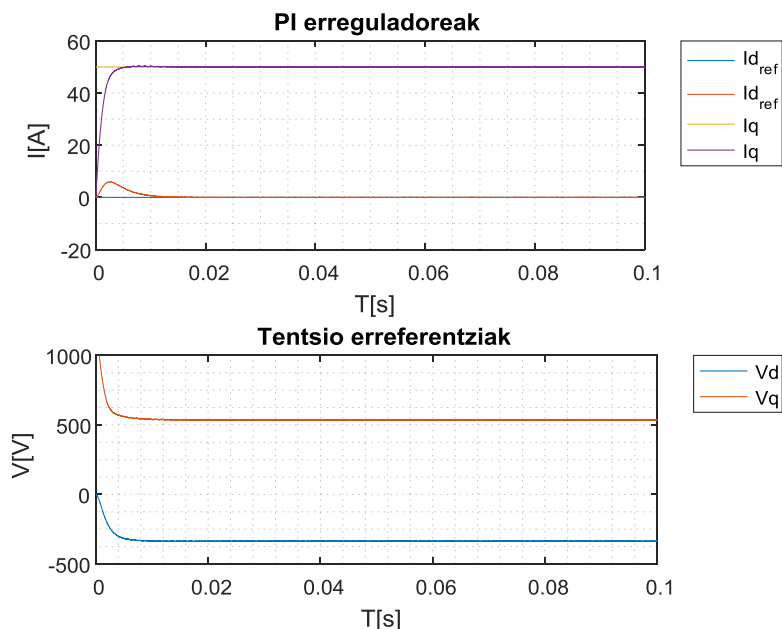
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Irudia 84-n ikus daitekeen moduan, kontrolerako $\alpha - \beta$ aldagaiak soilik kontutan hartzea hurbilketa egokia izan daiteke 9 faseko sistema baten. Clarkeren transformazioan sortutako gainontzeko aldagaien gaineko inolako kontrolik ezarri gabe haien balioa oso baxua da (irudian 10 aldiz biderkatuta ageri dira). 103.4.1 atalean aipatu bezala, $\alpha - \beta$ ez den gainontzeko azpisistema bakoitzak harmoniko jakin batekin dauka lotura eta seinaleen eduki harmonikoa txikia izanik ez dago aldagai guztiak kontrolatzeko beharrik.

Ondoren $\alpha - \beta$ aldagai bektorial horiek Park-en transformatuaren bitartez erreferentzia sistema birakari batera pasatzen dira. Erreferentzia sistema hori korranteekin era egokian sinkronizatuz lortzen da $\alpha - \beta$ aldagai bektorialak $d - q$ aldagai eskalar bilakatzea. Korrante kontrol hutsa egiterakoan erreferentzia sistemaren frekuentzia era arbitrarioan moldatuz frekuentzia elektrikoa aldatzea bilatuko da. Makina elektrikoen kontrolean aldiz makinarekin sinkronizatu egiten da erreferentzia sistema hori, kontrol bektorial egokia burutu ahal izateko.

$$Park = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformatuen bitartez lortutako $I_d - I_q$ korrante horiek ohiko PI erreguladoreen bitartez kontrolatu daitezke, eta $d - q$ ardatzean sortuko dira tentsio erreferentziak ezarritako korrante kontsigna lortzeko. Funtzionamendu moduaren arabera erreguladoreen dinamika balio desberdinekin sintonizatuko da, baina funtzionamendua berdina izango da bi kasuetan. Irudia 85-en ikus daiteke $d - q$ korranteek haien erreferentzia jarraitzen dutela.



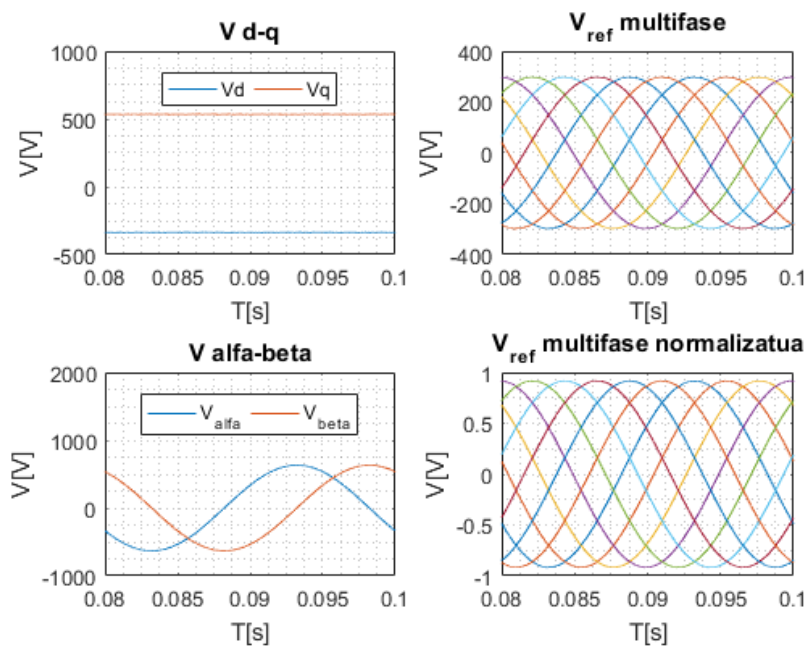
Irudia 85. PI erreguladoreen funtzionamendu egokia eta sortutako d-q tentsio erreferentziak.

PI erreguladoreen sintonizazioa simulazioan erabilitako RL kargen modeloetan oinarrituta egin da, akoplamenduko terminoen konpentsazioarekin. Modeloaren dinamika kalkulatu egin da eta ondoren kontrol begizta itxia bi poloko transferentzia funtzio batekin berdindu da, K_p eta K_i terminoen baloreak kalkulatzeko. Sintonizazio eredu hau ideala da,

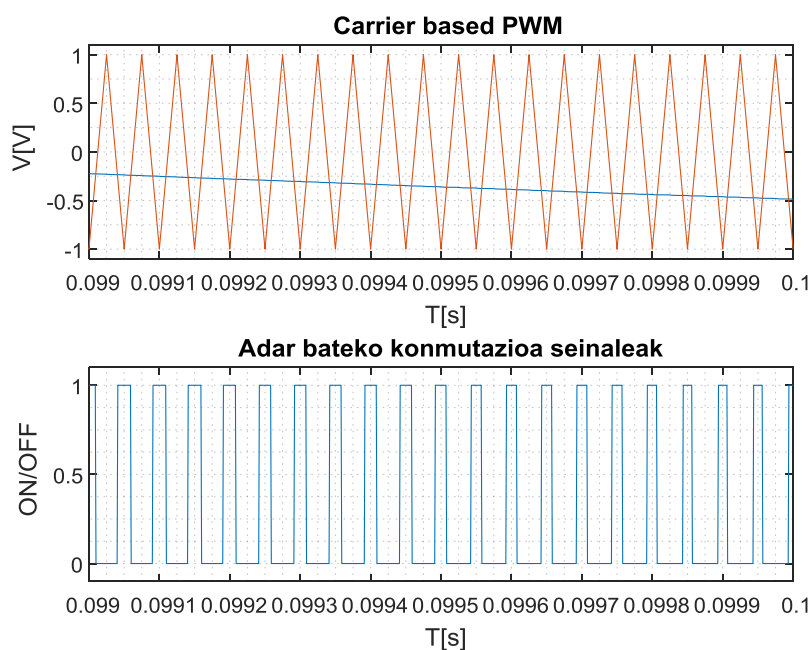
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

eta beraz, sistema erreala martxan jartzerako orduan balore horiek oinarri bezala hartuko dira ondoren funtzionamendu errealean erregulazioaren dinamika doitzeko.

Egindako transformazio prozesua atzera eginez sistemaren fase kopuruaren arabeko tentsio erreferentziak lortuko dira, aipatutako transformazio matrizeen alderantzizkoak aplikatuta.



Irudia 86. d-q erreferentzia sistemako tentsio erreferentzien multifasikora transformazioak.



Irudia 87. Carrier based PWM modulazioa.

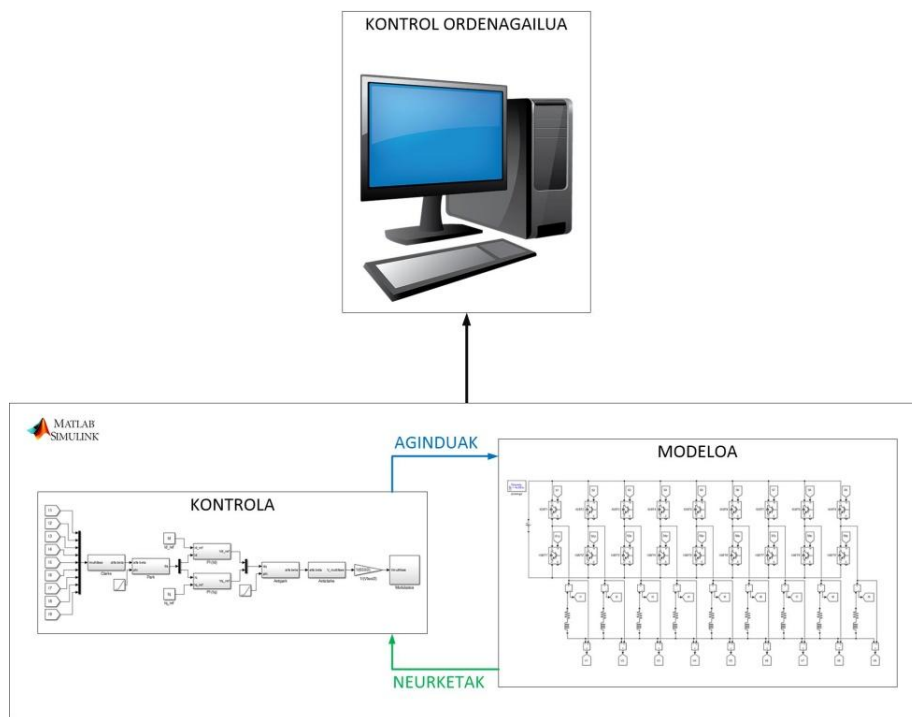
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Azkenik, sistemaren fase kopuruko tentsio erreferentzia horiek buseko tentsioaren arabera normalizatu egiten dira, haien balioa ± 1 tartean egon dadin carrier based PWM modulazio blokeru sartu aurretik. Tentsio erreferentziak carrier deituriko seinale trianguluar batekin konparatuz sortuko dira konmutazio seinaleak. Tentsio erreferentzia trianguluarra baino handiagoa denean, goiko IGBT-ari ixteko agindua emango zaio, eta txikiagoa denean aldiz irekitzekoa. Modulazio honetan beheko IGBT-aren agindua goikoaren ukatua eginda lortuko da. Triangeluar honen frekuentziak ($10kHz$) sistemaren konmutazio frekuentzia markatuko du.

4.4.4 Inplementazioa

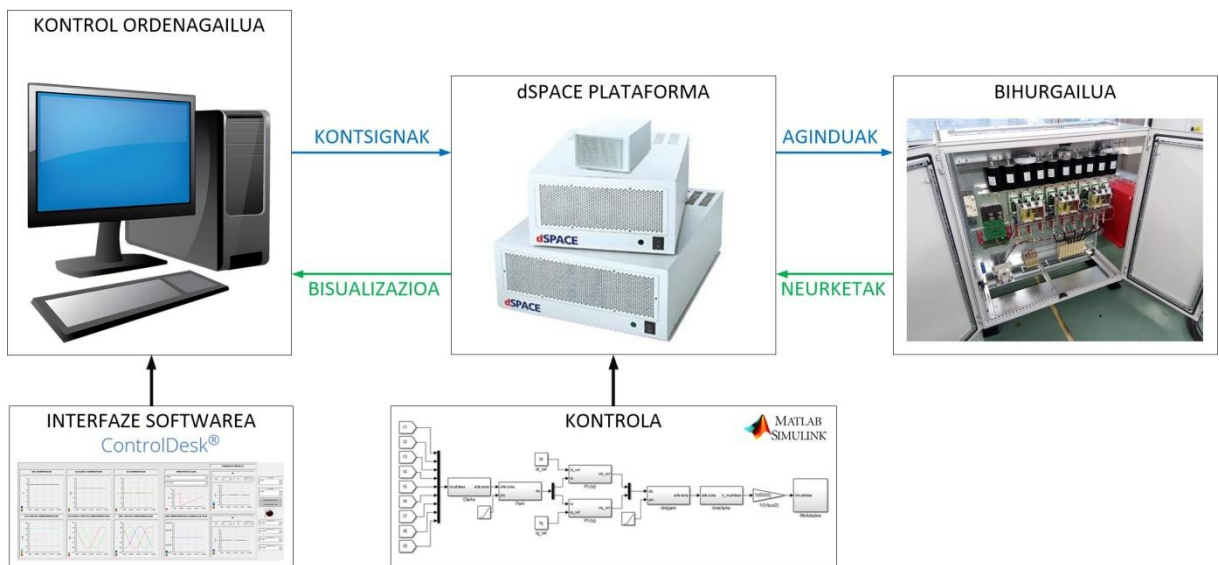
Atal honetan Simulink-en frogatutako kontrolerik abiatuta sistema kontrolatzera heltzeko eman beharreko aldaketak azalduko dira. Lehenik eta behin simulazioa dSPACE-ra moldatzeko egin beharreko moldaketak aurkeztuko dira eta jarraian seinaleen monitorizazioa eta kontroladorearekin interfaze funtzioa betetzen duen Control Desk softwarean sakonduko da.

Irudia 88-ko funtzionamendutik abiatuta, zeinetan kontrola eta modeloa ordenagailuko simulazio baten dauden, Irudia 89-ko eskemara heldu nahi da. Bertan, Simulink bitartez diseinatutako kontrola konpilatu eta dSPACE plataformako DS1006 prozesadorean lan egingo du. Kontrolaren aginduak dSPACE plataformaren bitartez bihurtuak kontrolatuko dute eta sistema fisikoaren seinaleak berriz ere prozesadoreak irakurriko ditu dSPACE txartel desberdinei esker. Azkenik, kontrolaren gaineko interfaze hutsa izango da ordenagailua. Hari esker kontrolerako hainbat kontsigna bideratu ahal izango dira prozesadorera eta seinaleen ikuskapena egin ahaliko da.



Irudia 88. Kontrola balidatzeko simulazioa.

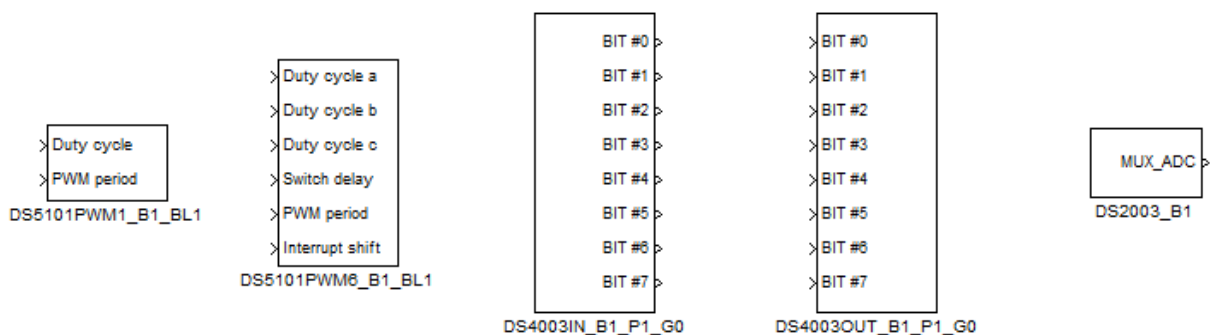
4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 89. Funtzionamendu errealeko sistema.

Simulazioan balidatutako Simulink fitxategitik abiatuta bihurgailuaren modeloa bihurgailu fisikoarekin ordezkatu behar da. Horretarako dSPACE-k eskaintzen dituen blokeak erabiliz sistema fisikoari aginduak eman eta bere erantzunak neurtuko dira. dSPACE bertsioa eta bateragarritasun arrazoiak direla medio inplementazio errealerako kontrola Matlab2010 bertsiora moldatu behar izan da.

Jarraian ageri direnak izango dira Simulink barnean dagoen dSPACE-ren liburutegitik erabiliko diren blokeak. Haietako bakoitzak plataformaren txartel jakin baten gaineko kontrola eskaintzen du:

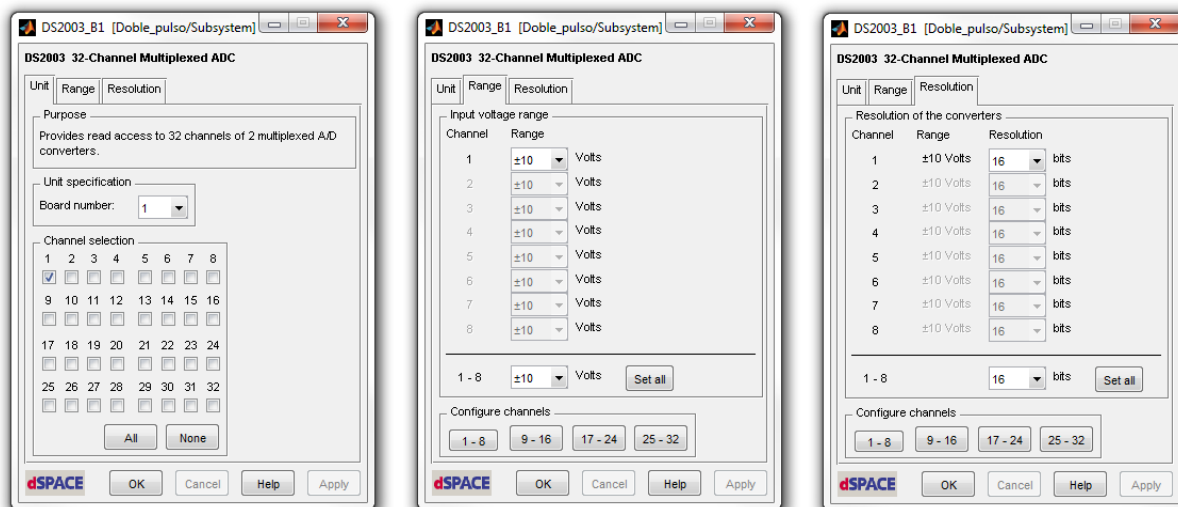


Irudia 90. dSPACE-ren blokeak Simulinkerako.

- DS5101PWM1_B1_BL1 → DS5101 txarteleko irteera digital baten gaineko kontrola eskaintzen du. PWM funtzioa duen bloke honek “Duty cycle” eta periodo jakin bateko pultsoak sortzen ditu erdieroaleak kontrolatzeko. Gainontzeko sistema baino askoz frekuentzia altuagoan lan egin dezake eta bloke bakoitzak txartelaren irteera jakin baten gaineko kontrola ematen du. Blokean klik bikoitza eginik kontrolatu nahi den seinalea hautatu daiteke eta initalizazio zein amaierako balioak hautatu.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

- DS5101PWM6_B1_BL1 → Aurreko kasuan bezala DS5101 txartelaren gaineko kontrola ahalbidetzen du. Kasu honetan bihurgailu trifasiko bat kontrolatzeko prestatuta dago eta fase bakoitzeko “duty cycle” bat sartuz blokeak barne mailan sortzen du seinalearen ukatua eta 6 konmutazio seinale emango ditu. Guztira 7 kanal erabiltzen dira, konmutazio seinaleekin sinkronizazioa ahalbidetzeko beste kanal batek “timer” seinale bat ematen baitu. Konmutazio maiztasuna kontrolatzeko periodoaz gain, “tiempo muerto”-a kontrolatzeko “Switch delay” sarrera eta inhibizio digitalerako “Interrupt shift” sarrerak dauzka ere.
- DS4003IN_B1_P1_G0 / DS4003OUT_B1_P1_G0 → Bi bloke hauek DS4003 txartelarekin komunikatzeko balio dute eta sarrera/irteera digitalerako erabiltzen dira. Kanalak zortzinaka irteera edo sarrera bezala konfiguragarriak dira.
- DS2003_B1 → DS2003 txartelarentzat da bloke hau. Blokeari klik bikoitza eginez hainbat faktore konfiguratu daitezke. Lehenik eta behin irakurri nahi diren kanalak hautatu behar dira eta blokeak multiplexaturik aterako ditu. Ondoren, seinaleen sarrera $\pm 5V$ edo $\pm 10V$ moduan konfiguratu behar dira. Azkenik, kanal bakoitzaren erresoluzioa hautatu daiteke, 16 bit-eko maximo batekin.

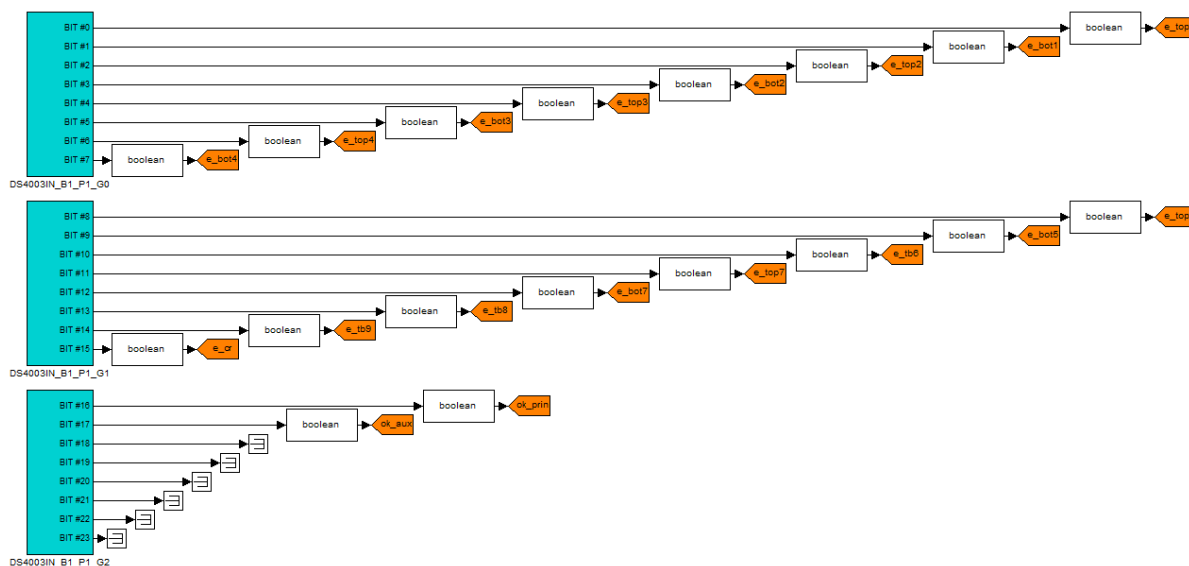


Irudia 91. DS2003_B1 blokea konfiguratzeko pantailak.

Azaldutako blokeak erabilia hasierako Simulink eredua moldatu eta bihurgailua kontrolatzeko moduko fitxategia sortu da. Jarraian azalduko da kontrolaren egitura: sarreretatik hasita, simulazioetan erabilitakoaren berdina den kontrolarekin jarraituz eta irteerekin amaituz.

Blokeen koloreak bakoitzaren funtzioa intuitiboki ulertzen laguntzen du. Alde batetik, urdinak direnak dSPACE-ko blokeak dira, seinaleen sarrera edo irteera funtzioa dutenak. Bestetik, kolore laranja daudenak kontrolaren barneko seinaleak dira, “Goto” eta “From”-ak. Azkenik, kolore berdea duten blokeak ondoren ControlDesk softwarearen bitartez kontrolatuko diren balioak izango dira: kontsignak, PI-en dinamikak, frekuentziak, pultsadoreen aginduak...

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 92. Input digitalak.

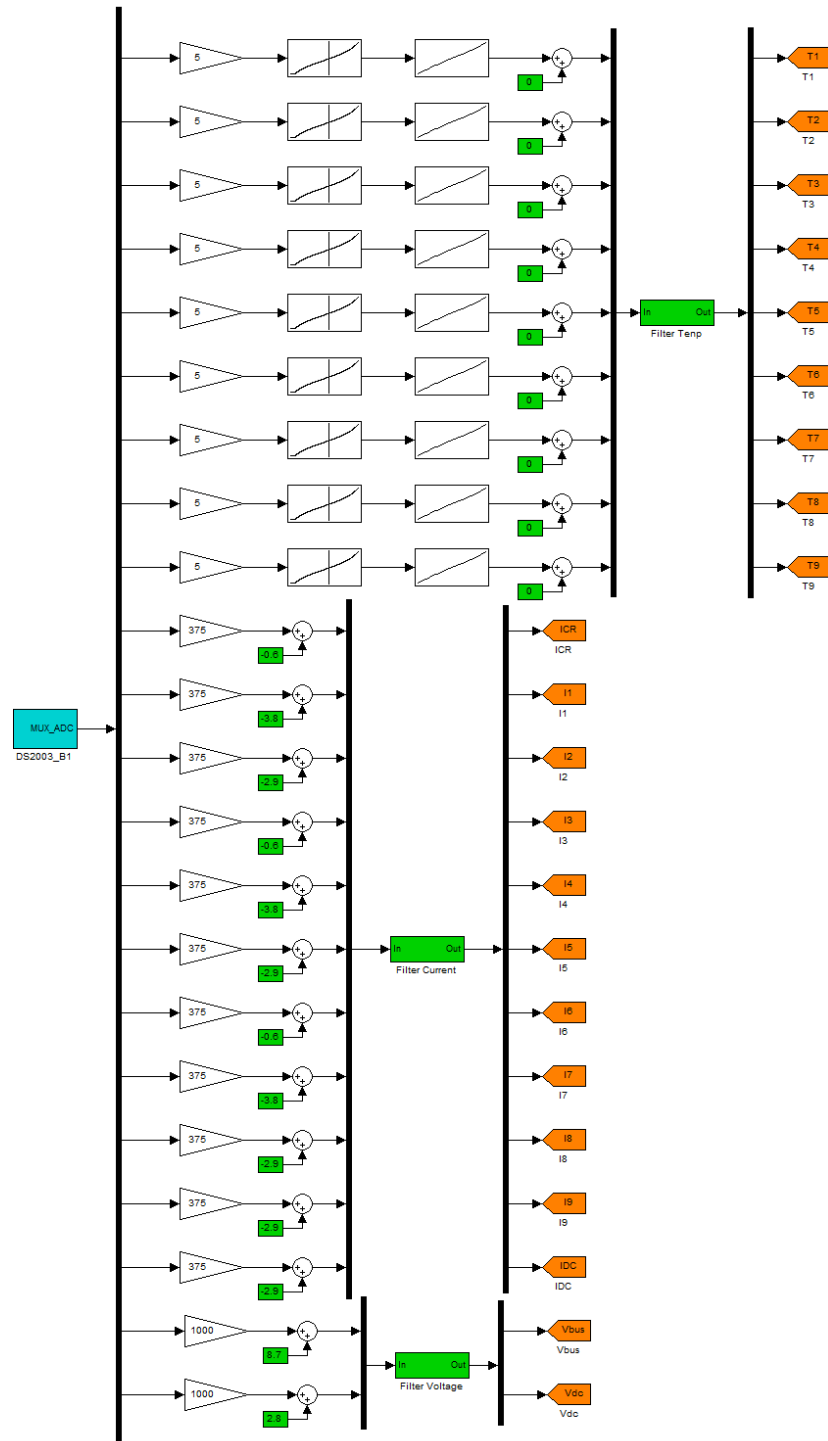
Sarrera digitalak ikus daitezke Irudia 92-n, IGBT guztien driver-ek bidaltzen dituzten falta seinaleak eta kontaktoreen “acknowledge” seinaleak hain zuzen. Erabili gabe dauden 6 kanalak etorkizunean makinaren eragintzan Encoder baten sarreretarako daude gordeta. Simulink-ek balio digital bezala ulertu ditzan datu mota aldatzeko bloke bat gehitu zaie kanal guztiei data mota “boolean” izan dadin.

Sarrera analogikoei dagokionez seinale guztiak $\pm 5V$ -ko balioarekin heltzen dira dSPACE-ra, interfazeen atalean azaldu den bezala. Blokeak balio horietara konfiguratu ostean ± 1 balioko seinale bat eskuratzen da Simulink-en. Irudia 93-n ikus daitezkeen moduan seinale horiek balio errealera pasatzen dira ganantzia batekin biderkatu eta offset bat gehituz. Offset balio hori denbora errealean ControlDesk-etik aldatu ahal izango da, sistemak hala eskatzen duenean kalibratu ahal izateko.

Temperaturen kasuan simulazioan oinarritutako look-up table bat ezarri da lortutako seinalearen tentsioa temperatura balio bihurtzeko. Horren ostean, balio esperimentaletan oinarritutako beste look-up table bat gehitu zaio aurrekoari neurketaren zehaztasuna ahalik eta gehien handitzeko.

Azkenik, sistema errealetik datozen seinale horiek dakarten zaratak sor ditzakeen arazoei aurre egiteko seinaleak filtratzeko bloke bat gehitu da. Bloke horiek kolore berdeak adierazten duenez filtroaren mozketa frekuentzia ControlDesk-etik moldatu ahal izango da denbora errealean funtzionamendu bakoitzera egokituko den balioa bilatu ahal izateko.

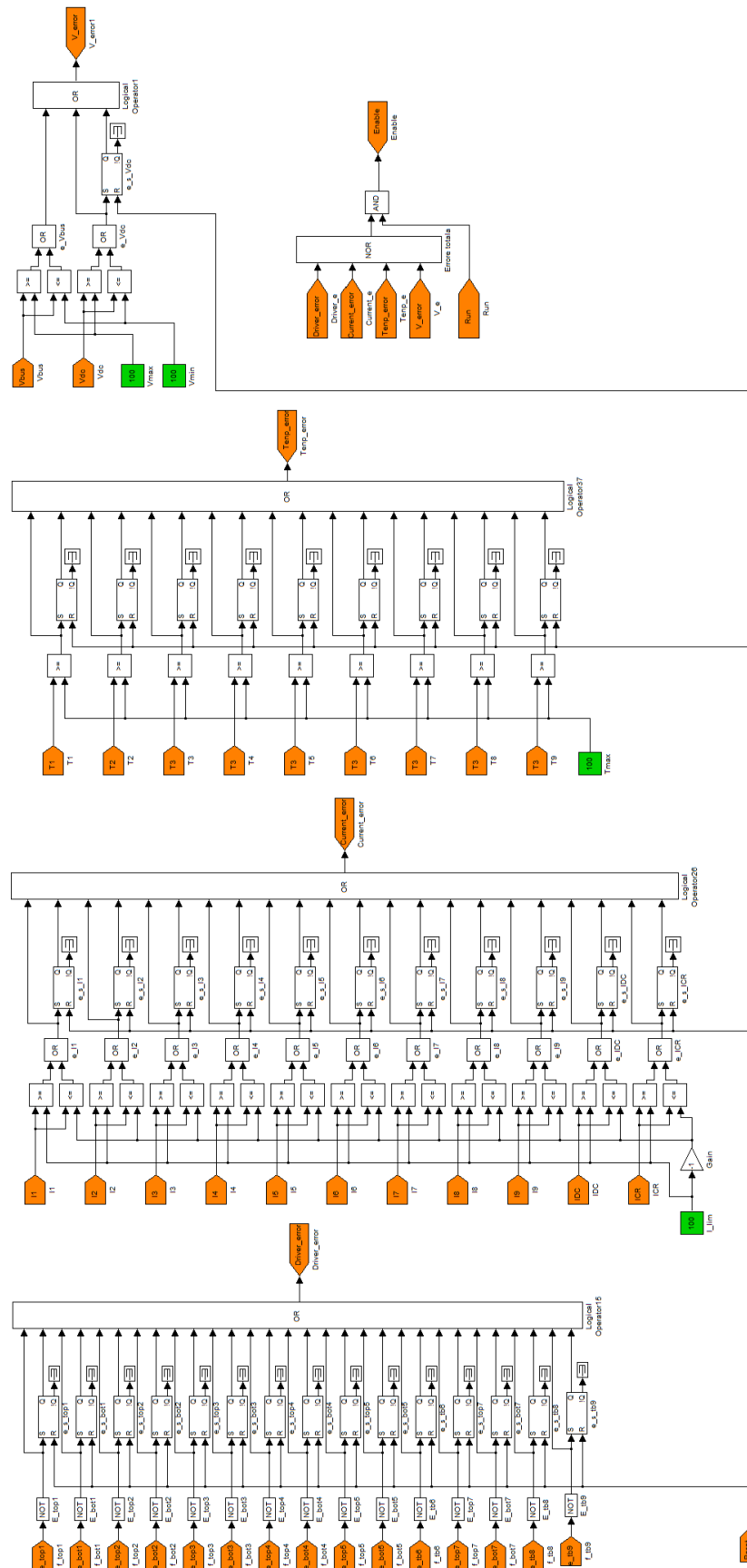
4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 93. Sarrera analogikoak.

Sarrera analogiko zein digital guzti hauek kontrol bloke nagusira joateaz gain babesen logika integratzen duen subsistema batera bideratuko dira. Bertan hainbat errore eman daitezke (driver-en faltak, gehiegizko korronea, tenperatura edo tentsioa) sistema geldiarazteko edo bere abiaraztea ekiditeko errore horietakoren bat eman bada. Errore puntual bakoitzak errore finko bat set egoerara eramango du eta dagokion konprobazioak egin ostean reseteatu arte ezin izango da bihurgailua berrabiarazi.

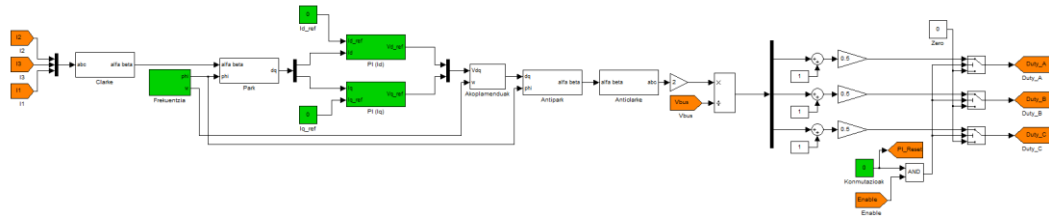
4. PROIEKTUAREN GARAPENA



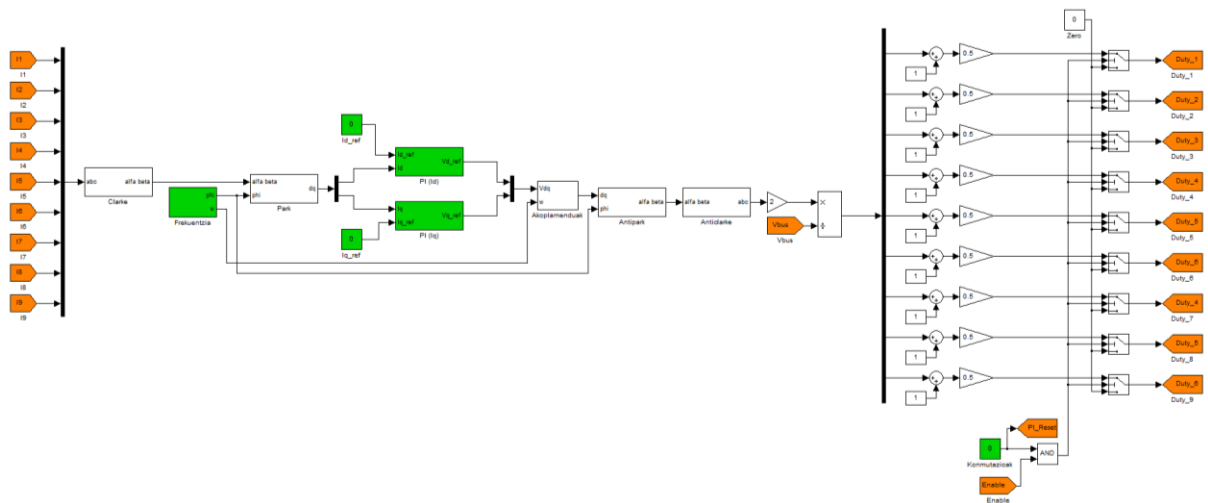
Irudia 94. Kontrolaren babesak.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Babesek martxa ahalbidezten dutenean beraz kontrol bektorialak lan egingo du. Jarraian datozen irudietan ikus daiteke aurretik azaldutako kontrolaren bloke diagrama berdina erabili dela kasu honetan ere.

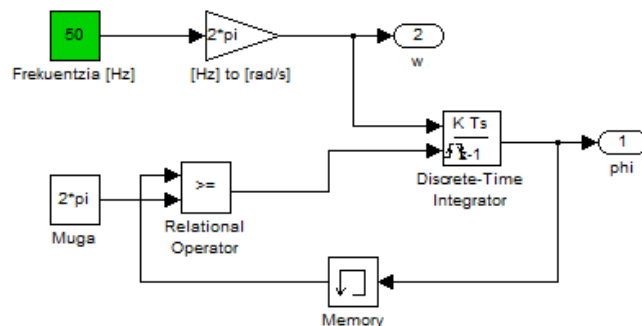


Irudia 95. Implementatutako kontrola funtzionamendu trifasikorako.



Irudia 96. Implementatutako kontrola 9 faseko funtzionamendurako.

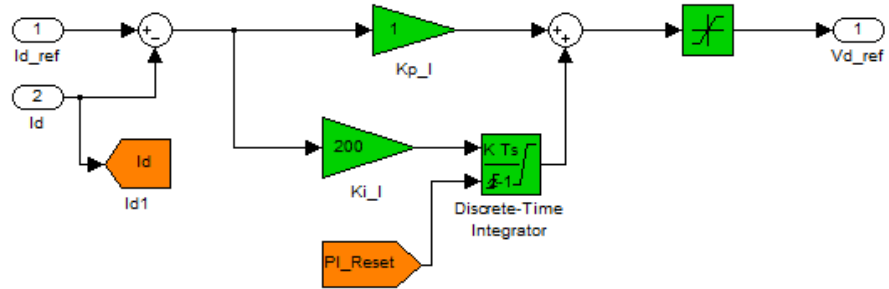
Aurretik ikusitako kontrolekin alderatuz dauden desberdintasunak oso arinak dira. Alde batetik, transformazioen erreferentzia sistema ezartzeko frekuentzia elektriko bat markatzen da eta horren arabera 0 tik 2π ra errepikakorki doan seinale bat sortu da phi angelu elektrikoa adierazteko.



Irudia 97. Phi angelua eta frekuentzia elektrikoa sortzeko blokea.

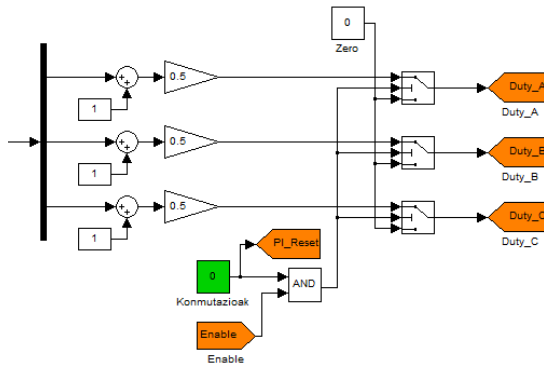
Bestetik, PI erreguladoreak modu diskretuan programatu dira eta funtzionamendu egokia eman dadin saturazioak ezarri zaizkio bai osagai integratzaileari eta baita irteera orokorrari ere. Azkenik, integratzailea abiarazterakoan reseteatuko da ere.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



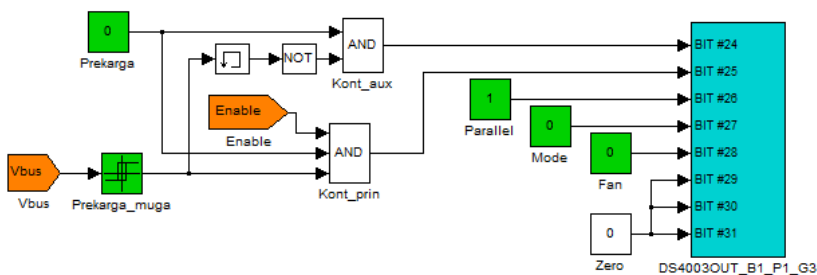
Irudia 98. PI erreguladoreak implementatutako kontrolean.

Azken desberdintasun moduan modulazioa azpimarratu daiteke. Modulazioa kontrolean bertan ezarri ordez, dSPACE-ko PWM blokeari 0tik 1era doan “Duty cycle” balio bat ematen zaio eta blokeak berak sortzen ditu konmutazio aginduak. Helburu hori betetzera dator Irudia 99-n ageri den diagrama. Alde batetik ± 1 balio tarterekin datorren erreferentzia blokeak eskatzen duen balioetara moldatuko du. Bestetik, babesek eta martxa aginduak baldintzatzen duten Enable seinalea egon ezean “Duty cycle”-a beti zerora finkatuko da.



Irudia 99. Modulazioa eta martxa kontrolatzeko diagrama.

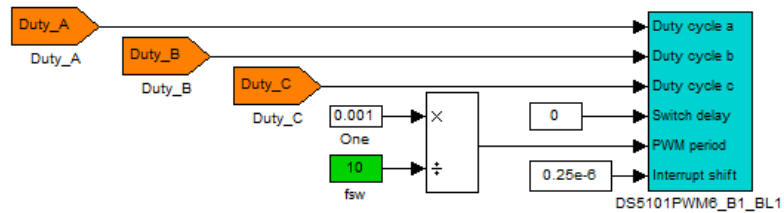
Kontrolerako Simulink modeloarekin amaitzeko seinaleen irteera azalduko da. Hauen artean irteera digitalen bitartez prekarga kontrolatuko da alde batetik. Agindua ematerakoan kontaktore auxiliarrak aktibatuko da eta ezarritako tentsio mailara heltzerakoan nagusia itxi eta auxiliarrak irekiko da. Errore bat ematekotan kontaktoreak irekiko dira ere. Bestetik, funtzionamendu trifasikoa eta 9 fasekoa bereizteko Parallel eta Mode seinaleak daude. Hauek “Half Bridge” eta “Direct Mode” artean aukeratzeko balio dute driver-etan eta seinaleak paralelizatuko dituzte interfaze txartel txikietan. Azkenik, haizagailuak piztu edo itzaltzeko aukera dago Fan seinalearen bitartez.



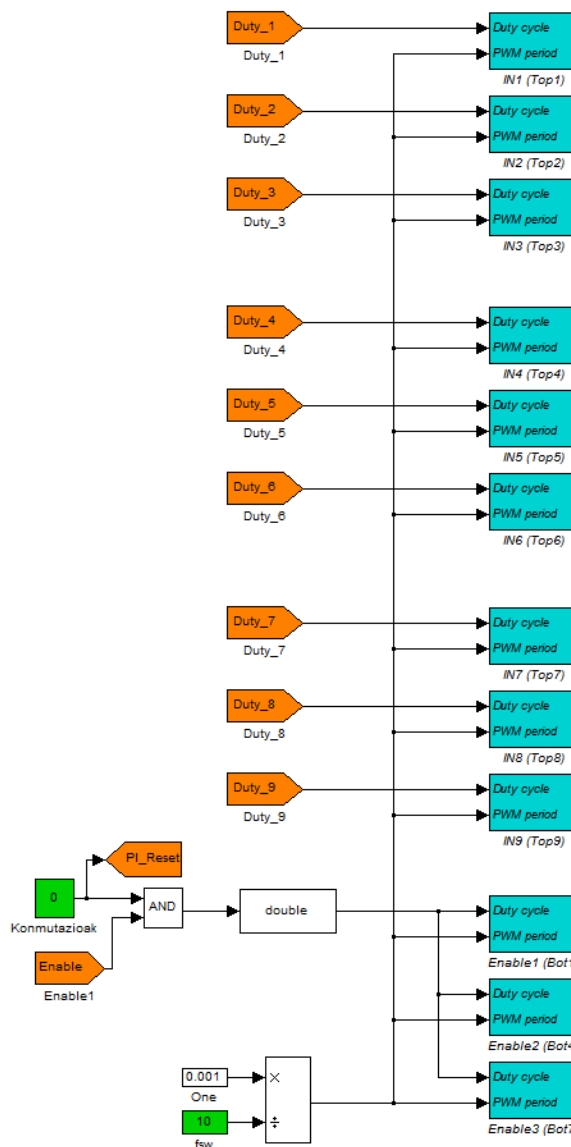
Irudia 100. Irteera digitalak.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Amaitzeko, aurretik azaldutako DS5101 txartelaren irteera blokeak daude. Funtzionamendu trifasikoan horretarako prestatua dagoen blokea erabiliko da, multifasikoan aldiz seinaleak banan banan sortu beharra dago. Alde batetik konmutazio aginduak bidaliko dira IGBT bakoitzaren Top kanalera eta bestetik Bot seinaleen bitartez konmutazioen inhibizioa egingo da kontroletik datorren Enable seinalea erabiliz.



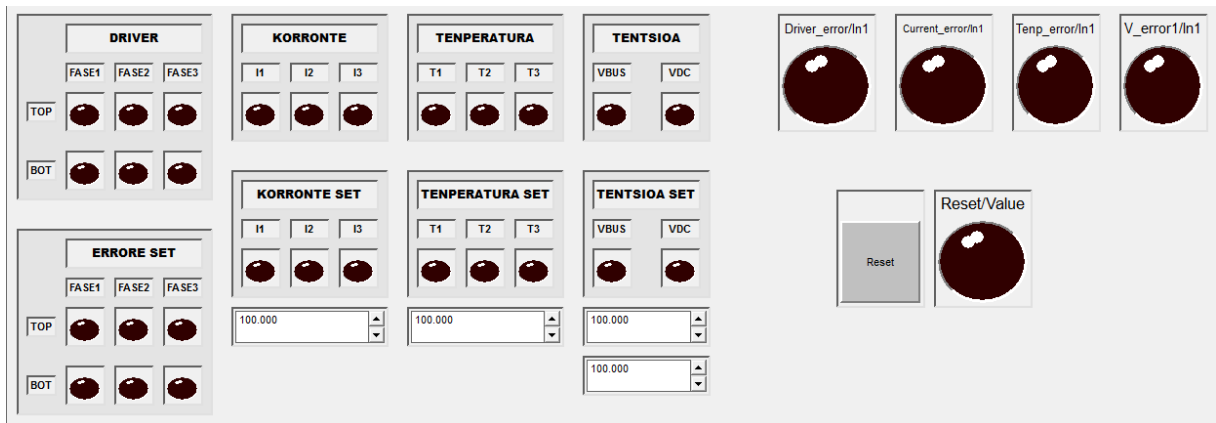
Irudia 101. DS5101 txartelerako blokeak funtzionamendu trifasikoan.



Irudia 102. DS5101 txartelerako blokeak funtzionamendu multifasikoan.

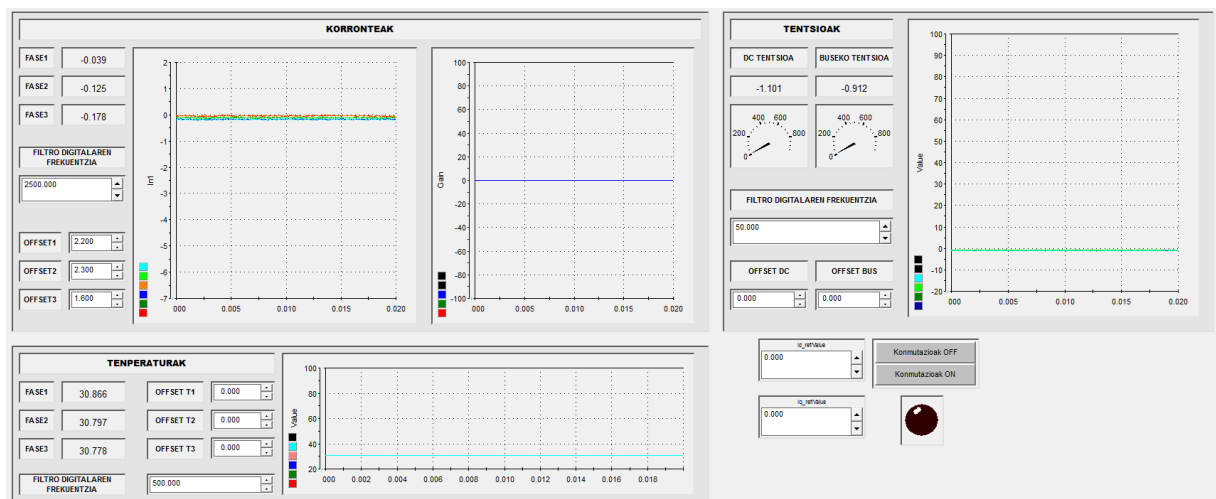
4. PROIEKTUAREN GARAPENA

Azaldutako kontrol hau behin konpilatu eta dSPACE plataformako DS1006 prozesadorean kargatu dela, ControlDesk softwarearen bitartez kudeatuko da. Horretarako interfaze grafiko bat diseinatu da, seinaleak bistaratu eta kontrolatu ahal izateko. Interfaze grafiko horren pantailak azalduko dira jarraian:



Irdia 103. Erroreak bistartzeko pantaila funtzionamendu trifasikorako.

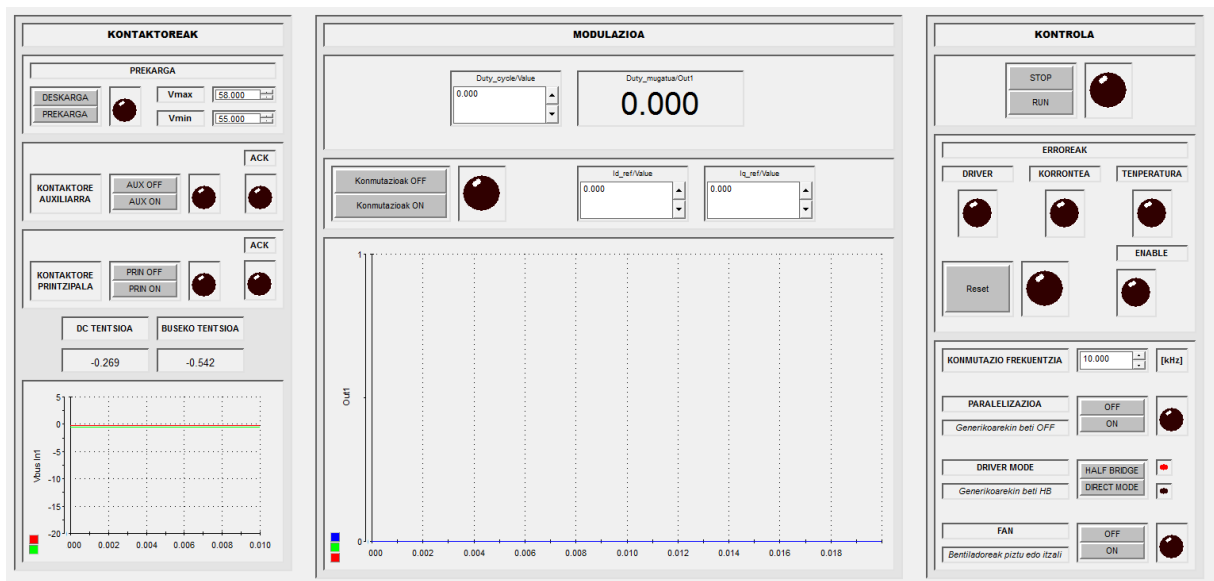
Erroreak bistartzeko pantailan denbora errealean ematen ari diren erroreak eta "Set" egoeran geratu direnak ikus daitezke. Horretaz gain korronte, temperatura eta tentsio erroreak emateko dauden mugak bertatik aldatu daitezke eta erroreak resetatzeko aukera dago ere. Funtzionamendu multifasikorako pantaila berdina izango da baina errorentzako seinale gehiagorekin.



Irdia 104. Seinaleak bistartzeko input pantaila.

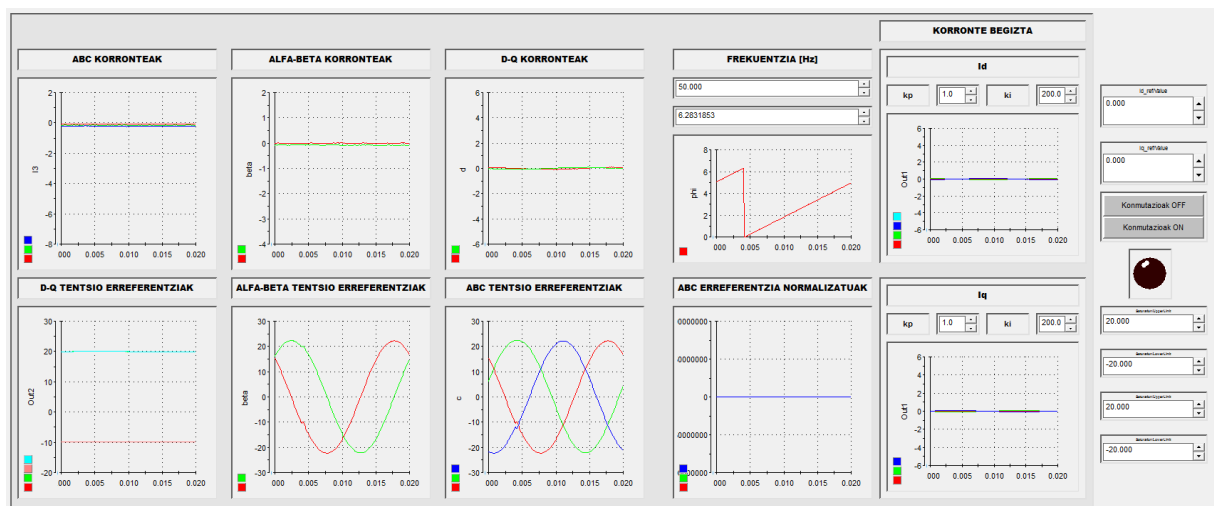
Bigarrengo pantaila honetan seinale analogikoak bistaratu ahal dira. Seinale bakoitzaren balioa numerikoki eta grafikoki adierazteaz gain filtratu aurretik eta ondoren bistaritzen dira. Filtroaren mozketa frekuentzia moldatzeko aukera dago eta denbora errealean filtroaren eragina ikusi daiteke. Era berean seinaleen offset-a erregulatu daiteke ere, seinaleen kalibrazioa era egoki baten burutu ahal izateko. Azkenik, konmutazioak piztu eta itzaltzeko aukera dago ere.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA



Irudia 105. Kontrol orokorrerako pantaila.

Kontrol orokorrerako pantaila izango da sistemaren funtzionamendurako oinarriko pantaila. Bertan dago edozein ekintza ahalbidetzeko sakatuta egon behar den “Run” botoia. Behin martxa ahalbidetuta, buseko kondentsadoreen prekarga agindu eta bisualizatzeko eremua dago ezkerrean. Prekarga zein tentsio mailara egiteko baloreak numerikoki sartu behar dira eta prekarga agindu ostean tentsio iturriaren maila eta DC buseko tentsioa ikusiko da grafikoki, baita kontaktore bakoitzak ze agindu jasotzen duen eta zein egoeratan dagoen ere. Erdialdean kontrol bektorialik egin gabe zuzenean “Duty cycle” anplitude jakin bateko erreferentzia sinusoidalak ezartzeko aukera dago alde batetik, eta bestetik korrante kontrol bektorialerako I_d eta I_q korrante kontsignak ezartzeko aukera ere. Azpikaldean dSPACE-ren PWM modulazio blokeetara sartzen diren “Duty cycle” erreferentziak ikusiko dira grafikoki. Eskuinaldean aurretik aipatutako “Run” eta “Stop” kontrol nagusirako botoiak daude. Era berean errore nagusiak bistaratu daitezke eta hauek reseteatu, eta azkenik kontrolerako aldagai orokorrak: PWM-aren konmutazio frekuentzia, funtzionamendu trifasikoa eta multifasikoa bereizteko botoiak eta haizagailuen aktibazioa ere.



Irudia 106. Kontrol bektorialerako pantaila.

4. PROIEKTUAREN GARAPENA

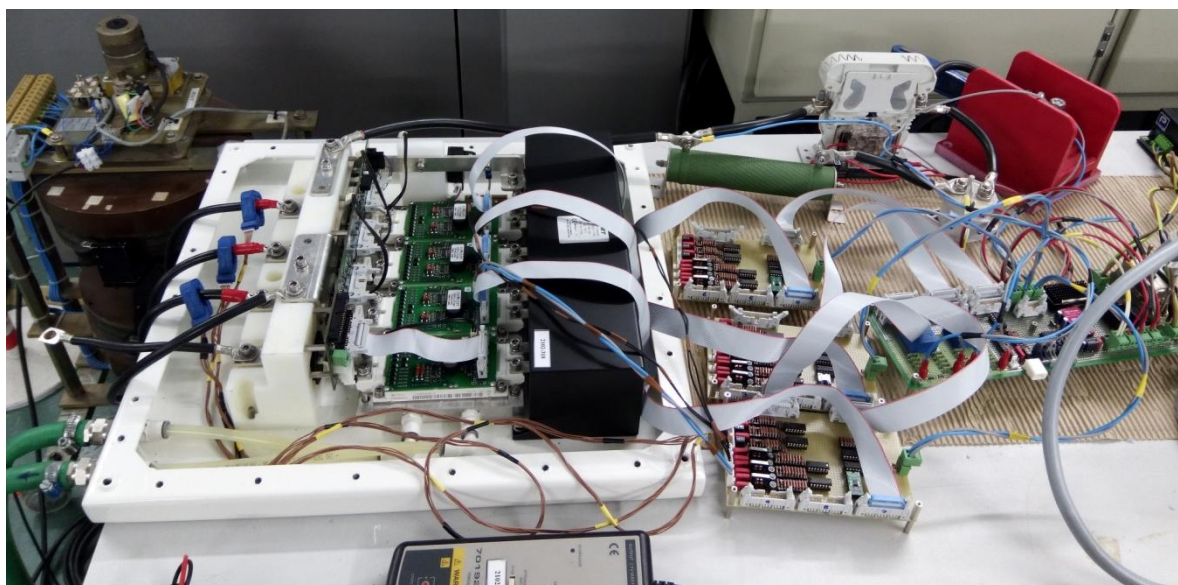
Amaitzeko kontrol bektorialaren funtzionamendua bistartzeko pantaila azalduko da. Bertan transformazioen funtzionamendu egokia frogatuko da aldagaiak erreferentzia sistema desberdinetan (ABC , $\alpha\beta$ eta dq) bistaratu. Bestetik, frekuentzia kontsigna ere bisualizatu eta kontrolatu ahal izango da. Park transformatuari sartzen zaion phi angeluaren seinalearen frekuentzia moldatuz sortutako korrontearen frekuentzia aldatuko baita. Azkenik PI erreguladoreen atala kokatzen da eskuinaldean. Bertan ardatz bakoitzeko (d eta q) kontsigna eta balore erreala bistaratu dira funtzionamendua ziurtatu ahal izateko. Bestetik, erreguladoreen dinamika denbora errealean moldatzeko K_p eta K_i baloreak moldatu ahal izango dira ere.

5. EMAITZAK

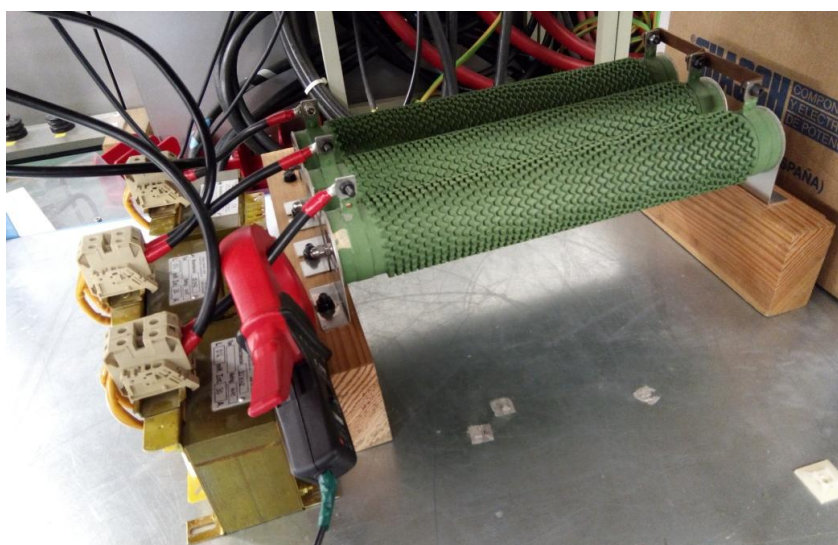
5. EMAITZAK

Proiektu honen emaitzak azalduko dira jarraian, bihurgailuaren muntai fisikoaren argazki batzuk aurkeztuz. Dokumentu honen aurkezte datarekin batera emango zaio hasiera bihurgailuaren martxan jartzeari, eta beraz, etorkizunerako ildoen barnean barnebiduko da gai hori.

Sistemaren balidazioari dagokionez orain arte interfaze txartelen eta kontrolaren balioztapena egin da beste bihurgailu trifasiko bat erabilita, garatutako bihurgailuaren muntaia amaitu bitartean. Jarraian datozen irudietako sistemaren kontrolaren bitartez interfaze txartelen eta dSPACE plataformaren bitarteko kontrola balidatu egin dira. Era berean sensorizazioaren doiketa eta filtro digitalen optimizazioa egin dira.



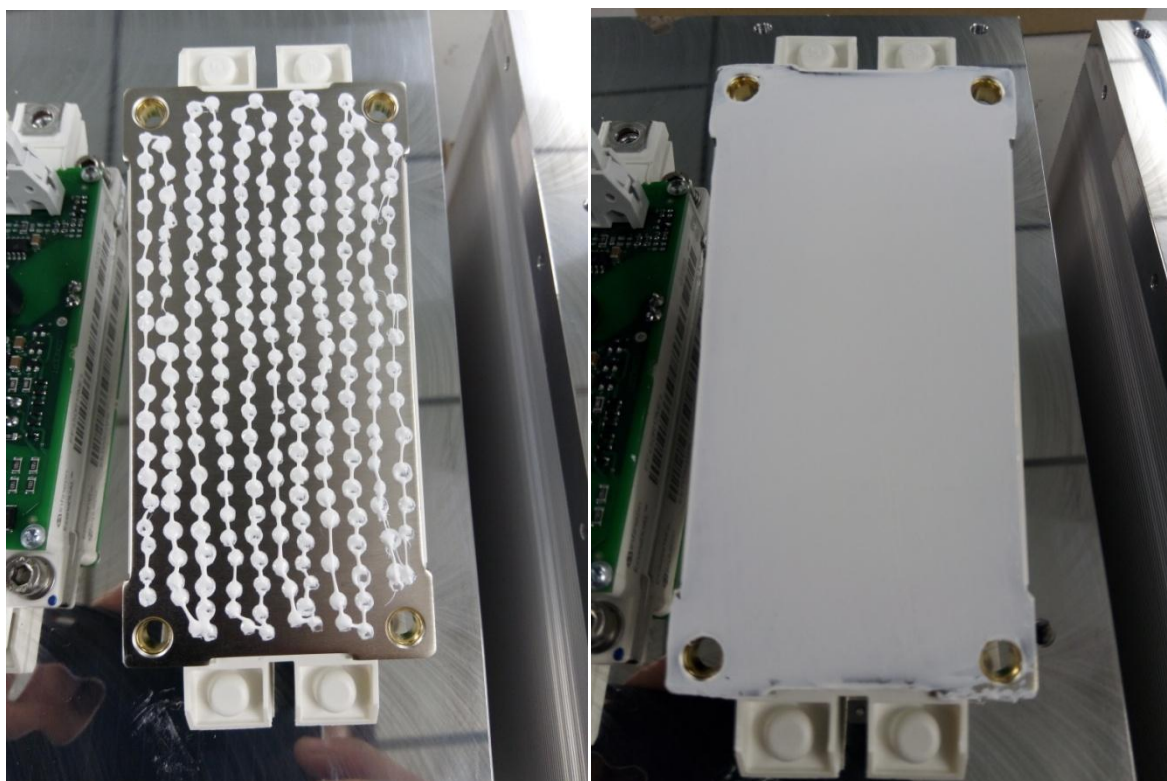
Irudia 107. dSPACE plataforma eta interfaze txartelak balidatzeko sistema.



Irudia 108. Balidazioan erabilitako RL kargak.

5. EMAITZAK

Muntaiari dagokionez, IGBT ekoizlearen dokumentazioaren gomendioak jarraituz moduluari $50\mu m$ eta $100\mu m$ arteko geruza jarri zaio, horretarako 0.4 eta $0.8cm^3$ arteko pasta termiko bolumena erabiliz. Geruza ahalik eta homogeenoa lortzeko lehenik eta behin pasta bolumena era banatu baten aplikatu da eta ostean espatula batekin leundu egin da azalera osoa.



Irudia 109. IGBT-ei pasta termikoa jartzeko prozesua.

Ondoren IGBT-ak bere tokian jarri eta erradiadorera lotzeko ere ekoizlearen gomendioak jarraitu dira. Lehenik eta behin bere tokian kokatu eta eskuz estutu egin dira torlojuak, jarraian $0.5Nm$ -ko indarrarekin lotu eta ordu batzuk utzi da egonkortzen pasta termikoa. Azkenik 3 eta $6Nm$ arteko indarrarekin lotura definitiboa egin da. Torlojuen lotze prozedura guztiak Irudia 110-n proposatutako zentzuan egin dira.

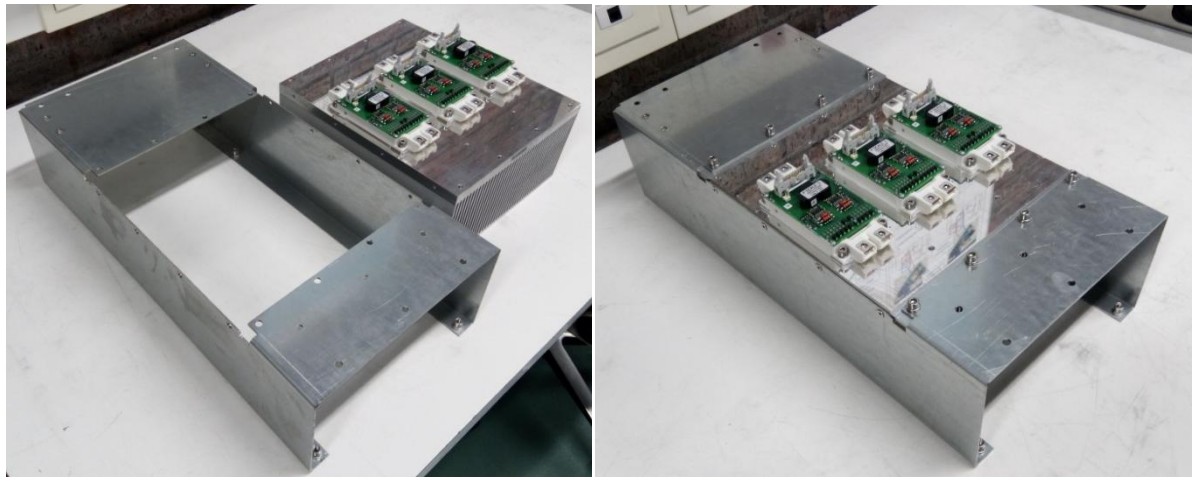


Irudia 110. Infineonek gomendatutako torlojuak lotzeko sekuentzia.

5. EMAITZAK



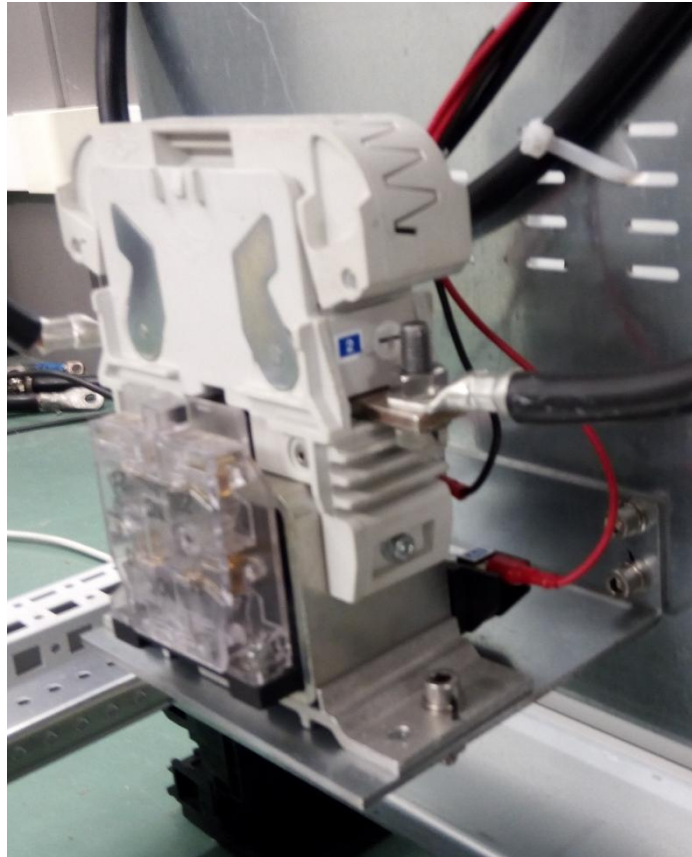
Irudia 111. IGBT-en muntaketa erradiadoreetan.



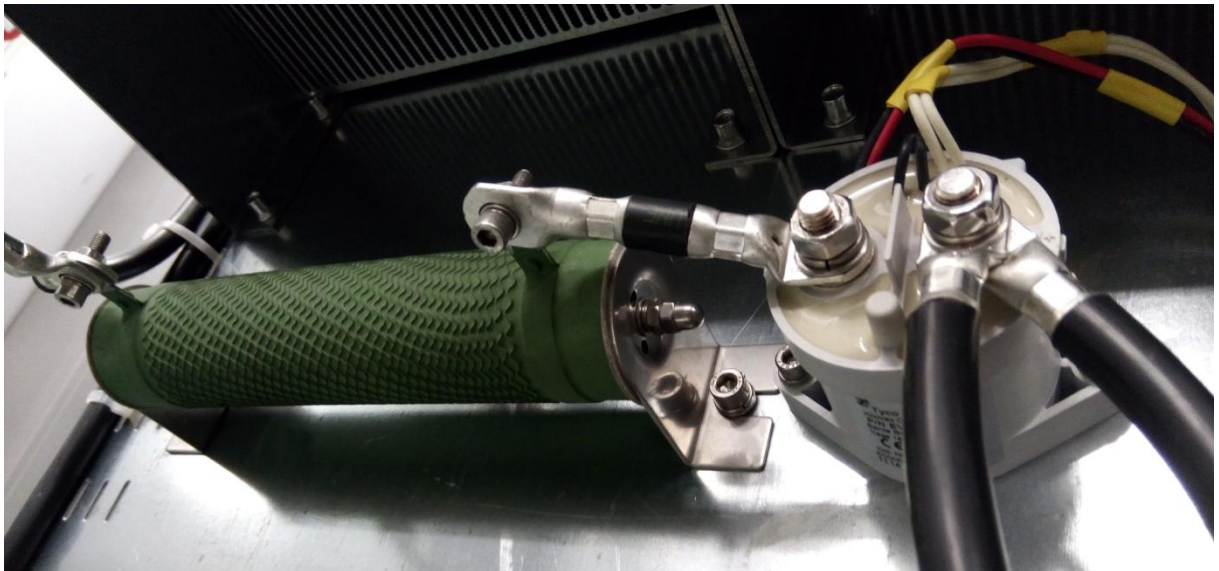
Irudia 112. Erradiadoreak ingururko txapan sartu aurretik eta ostean.

Behin erradiadoreak txapa inguratzailean sartuta bloke modularrak armairura lotu eta gainontzeko elementuak lotu dira.

5. EMAITZAK

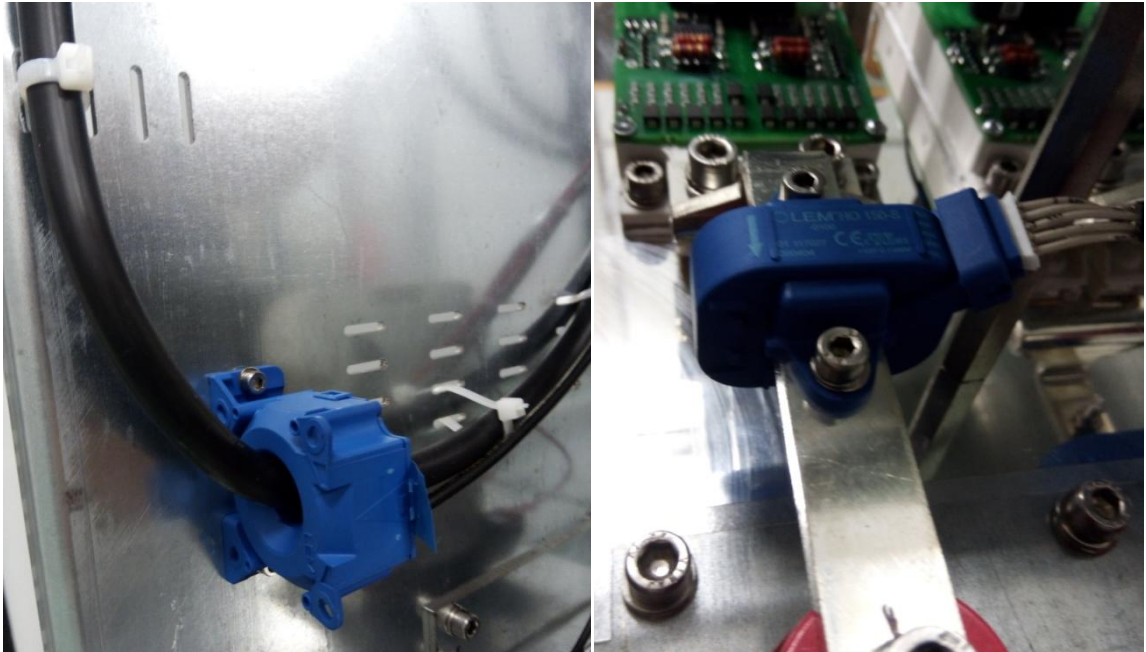


Irudia 113. Kontaktore nagusia soportean jarrita kableatuarekin.



Irudia 114. Prekargako erresistentzia eta kontaktore auxiliarra.

5. EMAITZAK



Irudia 115. DC korrante sentsorea ezkerrean eta fasekoak eskuinean.

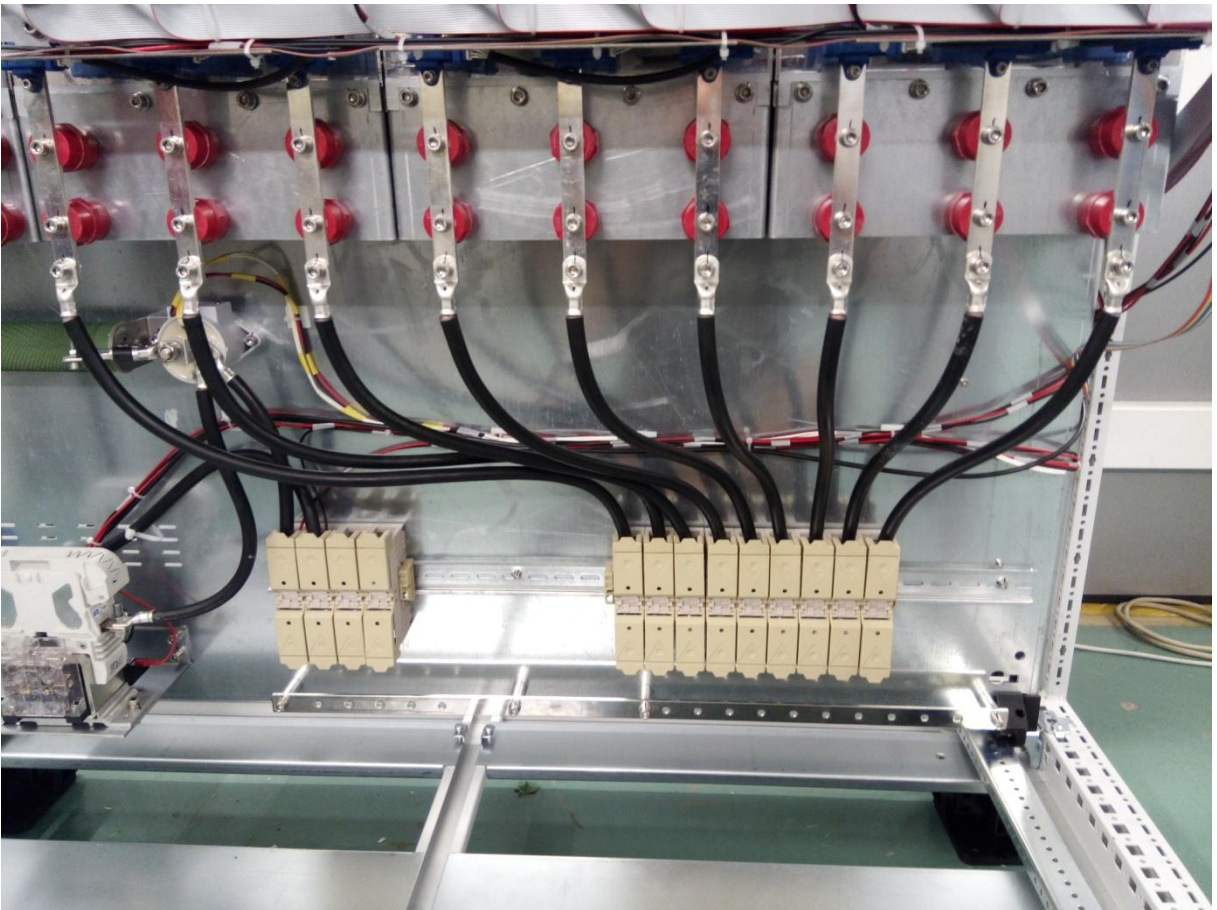


Irudia 116. DC buseko kondentsadoreak eta busbarra.

5. EMAITZAK

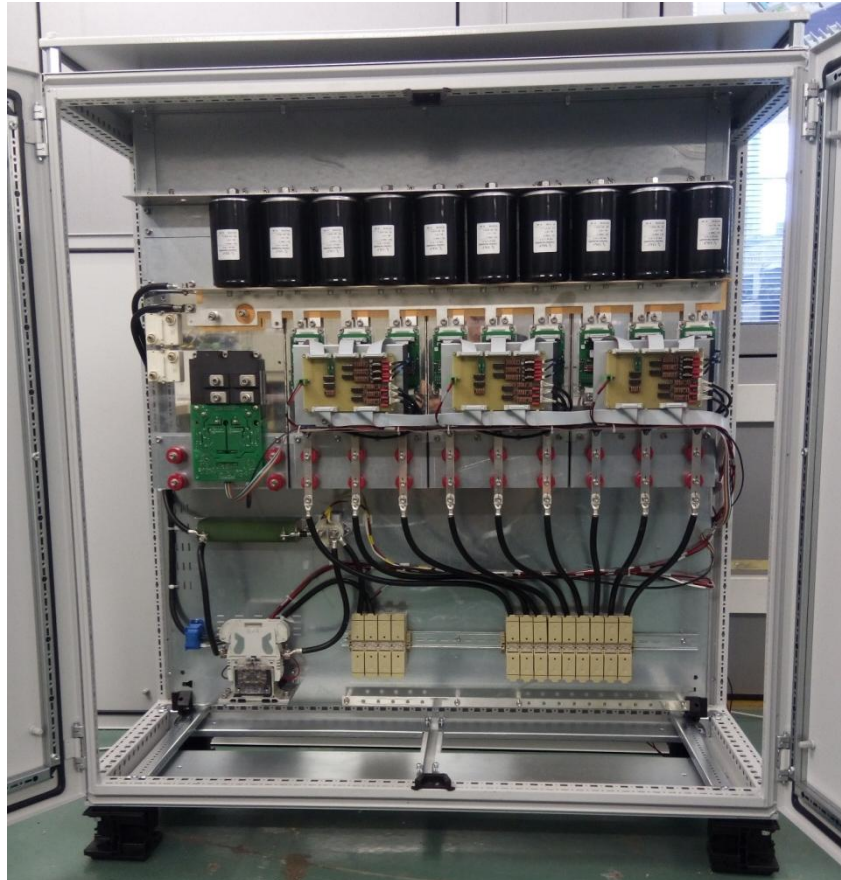


Irudia 117. Bentilazio kanala haizagailuekin.



Irudia 118. Potentziako kableen irteera borneroetara.

5. EMAITZAK



Irudia 119. Bihurgailuaren ikuspegi orokorra.



Irudia 120. Bihurgailuaren armairuaren kanpoko vista.

6. ONDORIOAK ETA AURRERA BEGIRAKOAK

Proiektu honen garapenean eragintza multifasikoen inguruko ezagutza bat eskuratu da lehenik eta behin. Horri esker bihurgailu multifasikoa diseinatzeko sistemaren topologiaren, bihurgailu topologiaren eta kontrolaren gaineko erabakiak hartu dira era justifikatu batean. Bihurgailu bat diseinatzeko prozedura eta hainbat erreminta erabiltzen ikasi eta emaitzak ikuspegi kritikoarekin aztertzen ikasi da ere. Merkatuan topatu daitezkeen produktuen ezaugarriak aztertu eta eskakizunekin bat egiten duen aukerarik egokiena hautatzen ikasi da era berean. Muntaiari dagokionez gaitasuna eta trebetasuna eskuratu da teknika berriak ikastearekin batera, interfaze txartelen elektronika analogikoko zirkuituetatik hasita potentziako kableak egitera, muntai mekanikotik pasatuz.

6.1 Etorkizunerako ildoak

Epe laburrean etorkizunerako ildo nagusia bihurgailuaren balioztapena eta martxan jartzea izango da, funtzionamendu trifasikoan eta multifasikoan. Horretarako lehenik eta behin hainbat froga burutuko zaizkio bihurgailuari, hala nola: IGBT-en konmutazioa karakterizatzeko probak, zirkuitulaburreko proba, gaintentsioen babesaren probak... Ondoren proba termikoak egingo dira bihurgailuaren potentzia nominal erreala topatzeko. Prozesu horretan paralelizazioan emandako korrante desorekak aztertu eta beharrezkoa izatekotan neurriak hartuko dira potentzia hori maximora eraman ahal izateko.

Behin bihurgailua balioztatua eta martxan, aukera asko emango dituen plataforma izango da. Lehenengo urrats moduan kontrola makina elektrikoaren eragintzarako moldatu daiteke. Horretarako kontrol bektoriala moldatu eta beharrezkoa izatekotan encoderrerako seinale sarrerek aktibatu beharko lirarteke. Makina topologiari dagokionez, proiektuaren muina den eragintza multifasikoen arloan ikerketa lanak egiteko balioko du. Gai horren inguruan hamaika dira eragintza trifasiko klasikoaren eta multifasikoaren artean egin daitezkeen konparaketak. Era berean, eragintza multifasikoaren gaian modulazio eta kontrol estrategia aurreratuen alorrean potentzialitate handi dago, fase anitzeko sistemek eskaintzen duten erredundantzia baliatzeko.

Bestetik, eragintza multifasikoetatik haratago ohikoagoak diren topologiak baliatzeko plataforma egokia izan daiteke ere. Funtsean hiru bloke trifasikoz osatutako bihurgailua da eta horietako bakoitza era independentean funtzionatuz edo nahieran paralelizatuta hainbat eta hainbat konfigurazio posible sortzen dira.

7. ERREFERENTZIAK

- [1] F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, "Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems - Part 1: System efficiency improvement," in *2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS)*, 2016, pp. 1–8.
- [2] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives - a technology status review," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 489–516, 2007.
- [3] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, 2008.
- [4] Z. Pan and J. Ikaheimo, "Control optimization of nine-phase variable speed drive," in *2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 910–915.
- [5] E. E. Ward and H. Härer, "Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor," *Electr. Eng. Proc. Inst.*, vol. 116, no. 6, pp. 980–984, 1969.
- [6] L. Zarri, M. Marano, M. Bonavoglia, and D. Casadei, "Power losses of multiphase inverters," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010, pp. 1–6.
- [7] G. Grandi, J. Loncarski, and C. Rossi, "Comparison of peak-to-peak current ripple amplitude in multiphase PWM voltage source inverters," in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1–10.
- [8] E. Levi, N. Bodo, O. Dordevic, and M. Jones, "Recent advances in power electronic converter control for multiphase drive systems," in *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on*, 2013, pp. 158–167.
- [9] W. N. W. A. Munim, M. F. Ismail, A. F. Abidin, and H. C. M. Haris, "Multi-phase inverter Space Vector Modulation," in *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International*, 2013, pp. 149–154.
- [10] E. Semail, X. Kestelyn, and F. Locment, "Fault tolerant multiphase electrical drives: The impact of design," in *Reliability in Electromagnetic Systems, 2007 IET Colloquium on*, 2007, pp. 1–5.
- [11] J. W. Kelly, E. G. Strangas, and J. M. Miller, "Multi-phase inverter analysis," in *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, 2001, pp. 147–155.
- [12] H. S. Che, M. J. Duran, E. Levi, M. Jones, W. P. Hew, and N. A. Rahim, "Postfault Operation of an Asymmetrical Six-Phase Induction Machine With Single and Two

- Isolated Neutral Points,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 10, pp. 5406–5416, 2014.
- [13] J. S. Hu, K. Y. Chen, T. Y. Shen, and C. H. Tang, “Analytical Solutions of Multilevel Space-Vector PWM for Multiphase Voltage Source Inverters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1489–1502, 2011.
- [14] C. Govindaraju, “Efficient sequential switching hybrid modulation techniques for multiphase multilevel inverters,” *IET Power Electron.*, vol. 4, no. 5, pp. 557–569, 2011.
- [15] T. Friedli and J. W. Kolar, “Comprehensive comparison of three-phase AC-AC Matrix Converter and Voltage DC-Link Back-to-Back Converter systems,” in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 2789–2798.
- [16] E. Jung, H. Yoo, S. K. Sul, H. S. Choi, and Y. Y. Choi, “A Nine-Phase Permanent-Magnet Motor Drive System for an Ultrahigh-Speed Elevator,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 987–995, 2012.
- [17] W. Yongqing, Z. Xiaofeng, Q. Mingzhong, and K. Jun, “Control of parallel inverters based on CAN bus in large-capacity motor drives,” in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, 2008, pp. 1375–1379.
- [18] H. A. Toliyat, R. Shi, and H. Xu, “A DSP-based vector control of five-phase synchronous reluctance motor,” in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, 2000, vol. 3, pp. 1759–1765 vol.3.
- [19] D. Dujic, M. Jones, and E. Levi, “Space Vector PWM for Nine-Phase VSI with Sinusoidal Output Voltage Generation: Analysis and Implementation,” in *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, 2007, pp. 1524–1529.
- [20] “Fuji IGBT Modules,” no. February. p. 87, 2004.
- [21] Siemens, “Connecting IGBTs in Parallel (Fundamentals).” pp. 1–6.
- [22] Abb, “Paralleling of IGBT modules,” *an-56Ya 2098-00*, p. 10, 2013.
- [23] Fuji Electric, “Parallel Connections.” pp. 1–9, 2015.
- [24] Fuji Electric, “IGBT MODULE (V series) 1700V / 550A / 2 in one package,” no. April. pp. 1–6, 2015.
- [25] Z. Zhenbo and Infineon, “Application tips to parallel IGBT.” pp. 1–36, 2008.

8. IRUDIEN AURKIBIDEA

8. IRUDIEN AURKIBIDEA

IRUDIA 1. BI MAKINA TRIFASIKO 6 FASEKO INBERTSORE BATEN BITARTEZ KONTROLATUAK.	9
IRUDIA 2. SERIEAN JARRITAKO BI MAKINA INBERTSORE BAKARRAREKIN KONTROLATUAK.	9
IRUDIA 3. 9 FASEKO MAKINA BAT HIRU INBERTSORE TRIFASIKOEKIN KONTROLATUTA.	10
IRUDIA 4. CLARKE-REN TRANSFORMAZIO MATRIZEA N FASEKO SISTEMENTZAT [2].	10
IRUDIA 5. KONTROL BEKTORIALA 5 FASEKO ERRELUKTANTZIA SINKRONOKO MAKINA BATENTZAT[18].	11
IRUDIA 6. HISTERESIAN OINARRITUTAKO DTC KONTROLA 5 FASEKO INDUKZIO MAKINA BATENTZAT [2].	12
IRUDIA 7. 5 FASEKO BEKTORE ESPAZIOA [9] ETA 9 FASEKO BEKTORE ESPAZIOA [19].	13
IRUDIA 8. MOTORBRAIN PROIEKTUKO 9 FASEKO MAKINA-INBERTSORE INTEGRATUA.	14
IRUDIA 9. TM4-REN KANPO ERROTOREKO MAKINA ETA 6 FASEKO INBERTSOREA.	15
IRUDIA 10. LABORATEGIKO SISTEMA MAKINA MULTIFASIKOEN ERAGINTZARAKO.	16
IRUDIA 11. LABORATEGIKO SISTEMA MAKINA TRIFASIKOEN ERAGINTZARAKO.	17
IRUDIA 12. BEDERATZI FASEKO ETA BI MAILAKO INBERTSOREA.	17
IRUDIA 13. SISTEMA TRIFASIKOA ADARRAK PARALELIZATUZ.	18
IRUDIA 14. FUJI ELECTRIC EKOIZLEAK PROPOSATUTAKO DERATING RATE.	19
IRUDIA 15. SEMIKRONEN INTEGRATED POWER MODULE.	20
IRUDIA 16. SEMIKRONEN SLIMLINE FAMILIAKO STACK-A.	20
IRUDIA 17. INFINEON-EN PRIMESTACK FAMILIAKO SOLUZIO INTEGRATUA.	20
IRUDIA 18. PLECS-EN SIMULATUTAKO SISTEMA.	21
IRUDIA 19. JUNCTION TENPERATURA MAXIMOA MODULAZIO INDIZE ETA DESFASE DESBERDINETARAKO.	22
IRUDIA 20. IGBT-AREN JUNCTION TENPERATURA 125°C-TIK PASATU GABEKO MUGAN.	23
IRUDIA 21. HEATSINK-AREN SIMULATUTAKO IRUDI TERMIKOA 2MBI550VN-170-50 MODELOARENTZAT.	25
IRUDIA 22. HEATSINK-AREN SIMULATUTAKO IRUDI TERMIKOA FF450R17ME4 MODELOARENTZAT.	25
IRUDIA 23. BEHIN BETIKO ERRADIADORE KONFIGURAZIOAREN SIMULAZIO TERMIKOA R-TOOLS-EKIN.	26
IRUDIA 24. INFINEON-EN FF450R17ME4 IGBT MODULUAREN KONDUKZIO EZAUGARRIA IGBT ETA DIODOARENTZAT.	27
IRUDIA 25. POERT INTEGRATIONS-EN 2SP0115T.	28
IRUDIA 26. SEMIKRON-EN SKHI 23/17 R.	28
IRUDIA 27. ISAHAYA-REN GAU205P-15402.	28
IRUDIA 28. INPOWER-EN 2IPSE3W17-60.	28
IRUDIA 29. BI IGBT PARALELIZATZEKO SEMIKRONEN ADAPTER BOARD-A.	29
IRUDIA 30. IGBT-AK HIRUNAKA PARALELIZATUTA ETA ERA INDEPENDENTEAN LAN EGITEN.	29
IRUDIA 31. ERRADIADOREEN SISTEMA MODULARRA.	30
IRUDIA 32. PADA-REN C SUPERPOWER HEATSINK-A.	30
IRUDIA 33. TECNOAL-EN I128B MODELOA.	31
IRUDIA 34. TECNOAL-EN I128C MODELOA.	31
IRUDIA 35. TECNOAL-EN I210 MODELOA.	31
IRUDIA 36. GUASCH-EN RG42120 MODELOA.	32
IRUDIA 37. MERSEN-EN DELTA FIN ALETA ZERRATUAREKIN.	32
IRUDIA 38. DELTA EKOIZLEAREN QFR HAIZAGAILUAREN FUNTZIONAMENDU PUNTUA RG42120 ERRADIADOREAREKIN.	33
IRUDIA 39. RG42120 ERRADIADOREAREN EZAUGARRIA.	33
IRUDIA 40. DC BUSA DIMENTSIONATZEKO PLECS-EKO ESKEMA.	34
IRUDIA 41. BUSEKIO TENTSIOAERN KIZKURDURA KAPAZITATEAREN KONPARAKETA.	34
IRUDIA 42. BUSEKO KORRONTEAK MODU TRIFASIKO ETA MULTIFASIKOAN.	35
IRUDIA 43. BUSEKO KORRONTEEN DETAILA MODU TRIFASIKO ETA MULTIFASIKOAN.	35
IRUDIA 44. 9 FASEKO MAKINA ELEKTRIKOAREN NEUTRO KONEXIO DESBERDINAK.	36
IRUDIA 45. LEM-EN HO 150-S-0100 MODELOA.	37
IRUDIA 46. CROWBAR-AREN ESKEMA ELEKTRIKOA.	38
IRUDIA 47. BUSEKO TENTSIOA 130kW REGENERATZERAKOAN.	38
IRUDIA 48. PREKARGA SISTEMAREN ESKEMA ELEKTRIKOA.	39
IRUDIA 49. KONTAKTORE AUXILIARRA ETA NAGUSIA.	40
IRUDIA 50. PREKARGAKO ERRESISTENTZIA (EZKERREAN) ETA DESKARGA PERMANENTEKO ERRESISTENTZIA (ESKUINEAN).	40
IRUDIA 51. POTENTZIAKO ESKEMA.	42
IRUDIA 52. BIHURGAILUAREN ARMAIRUAREN DISEINU OROKORRA.	43

8. IRUDIEN AURKIBIDEA

IRUDIA 53. POTENTZIAKO KABLEEN BORNEROAK ETA MAILAK LOTZEKO PLETINA.....	43
IRUDIA 54. IGBT ADARREN ARTEKO SIMETRIA ETA BUSBARRAREN DISEINUA.....	44
IRUDIA 55. IGBT BLOKE BAKOITZERAKO KONTROL TXARTEL KOMUNA SIMETRIA BERMATZEKO.....	44
IRUDIA 56. BENTILAZORAKO AIRE KANALA.....	45
IRUDIA 57. ARMAIRUA ETA ELEMENTUEN MUNTAIRAKO ATZEKO PLAKA.....	45
IRUDIA 58. dSPACE-REN EXPANSION BOX-AK.....	46
IRUDIA 59. DS1006 PROZESADORE TXARTELA.....	46
IRUDIA 60. DS4003, DS5101 ETA DS2003 TXARTELAK.....	47
IRUDIA 61. KONTROLERAKO dSPACE PLATAFORMAREN LABURPENA.....	47
IRUDIA 62. INTERFAZE TXARTELEN DISEINUA.....	48
IRUDIA 63. dSPACE-TIK DATOZEN SEINALEEN KONEKTOREAK.....	49
IRUDIA 64. ERABILITAKO TENTSIO ITURRIAK.....	49
IRUDIA 65. ALIMENTAZIO ITURRIEN ZIRKUITU ELEKTRIKOA.....	50
IRUDIA 66. KONTAKTOREAK ERAGITEKO ZIRKUITUAK.....	50
IRUDIA 67. KONTAKTOREEN ACKNOWLEDGE SEINALEA IRAKURTZEKO ZIRKUITUA.....	51
IRUDIA 68. BENTIRADOREAK ETA DRIVER-EN FUNTZIONAMENDU MODUA AUKERATZEKO ZIRKUITUAK.....	51
IRUDIA 69. TENTSIO IRAKURKETARAKO ZIRKUITUAK LEM-EN LV 25-P SENSOREA ERABILIZ.....	51
IRUDIA 70. CROWBARREKO IGBT-A KONTROLATZEKO ZUNTZ OPTIKO BIDEZKO SEINALEAK.....	52
IRUDIA 71. TXARTEL TXIKIETARA HELTZEN DIREN SEINALE ETA ELIKATZEKO TENTSIOAK.....	52
IRUDIA 72. INTERFAZE TXARTELA TXIKIETATIK IGBT-EN DRIVER-ETARA DOAZEN KABLE PLANOEN KONEKTOREA.....	52
IRUDIA 73. IGBT-EN HALF BRIDGE MODUA ETA MODU ZUZENA ALDATZEKO ZIRKUITUA.....	53
IRUDIA 74. KORRONTE SENSOREEN SEINALEAREN EGOKITZAPENA dSPACE-RA.....	54
IRUDIA 75. IGBT-AREN NTC-TIK TENPERATURA SEINALEA LORTZEKO ZIRKUITUA.....	54
IRUDIA 76- NTC-AREN EZAUGARRIA, ERRESISTENTZIA VS TENPERATURA.....	54
IRUDIA 77. INTERFAZE TXARTEL TXIKIA.....	55
IRUDIA 78. INTERFAZE TXARTEL TXIKIEN ESKEMA DESKRIPTIBOA.....	55
IRUDIA 79. INTERFAZE TXARTEL HANDIAREN IRUDIA ETA ESKEMA.....	56
IRUDIA 80. TXARTEL TXIKIEN KOKAPENA BIHURGAILUAN.....	57
IRUDIA 81. TXARTEL HANDIAREN KOKAPENA BIHURGAILUAN.....	57
IRUDIA 82. BIHURGAILUAREN MODELOA SIMPOWER SYSTEMS LIBURUTEGIA ERABILITA.....	58
IRUDIA 83. 9 FASEKO FUNTZIONAMENDURAKO KONTROL BEKTORIALAREN KORRONTE BEGIZTA.....	58
IRUDIA 84. CLARKE-REN TRANSFORMATUA 9 FASEKO SISTEMARAKO.....	59
IRUDIA 85. PI ERREGULADOREEN FUNTZIONAMENDU EGOKIA ETA SORTUTAKO D-Q TENTSIO ERREFERENTZIAK.....	60
IRUDIA 86. D-Q ERREFERENTZIA SISTEMAKO TENTSIO ERREFERENTZIEN MULTIFASIKORA TRANSFORMAZIOAK.....	61
IRUDIA 87. CARRIER BASED PWM MODULAZIOA.....	61
IRUDIA 88. KONTROLA BALIDATZEKO SIMULAZIOA.....	62
IRUDIA 89. FUNTZIONAMENDU ERREALEKO SISTEMA.....	63
IRUDIA 90. dSPACE-REN BLOKEAK SIMULINKERAKO.....	63
IRUDIA 91. DS2003_B1 BLOKEA KONFIGURATZEKO PANTAILAK.....	64
IRUDIA 92. INPUT DIGITALAK.....	65
IRUDIA 93. SARRERA ANALOGIKOAK.....	66
IRUDIA 94. KONTROLAREN BABESAK.....	67
IRUDIA 95. INPLEMENTATUTAKO KONTROLA FUNTZIONAMENDU TRIFASIKORAKO.....	68
IRUDIA 96. INPLEMENTATUTAKO KONTROLA 9 FASEKO FUNTZIONAMENDURAKO.....	68
IRUDIA 97. PHI ANGELUA ETA FREKUENTZIA ELEKTRIKOA SORTZEKO BLOKEA.....	68
IRUDIA 98. PI ERREGULADOREAK INPLEMENTATUTAKO KONTROLEAN.....	69
IRUDIA 99. MODULAZIOA ETA MARTXA KONTROLATZEKO DIAGRAMA.....	69
IRUDIA 100. IRTEERA DIGITALAK.....	69
IRUDIA 101. DS5101 TXARTELERAKO BLOKEAK FUNTZIONAMENDU TRIFASIKOAN.....	70
IRUDIA 102. DS5101 TXARTELERAKO BLOKEAK FUNTZIONAMENDU MULTIFASIKOAN.....	70
IRUDIA 103. ERROREAK BISTARATZEKO PANTAILA FUNTZIONAMENDU TRIFASIKORAKO.....	71
IRUDIA 104. SEINALEAK BISTARATZEKO INPUT PANTAILA.....	71
IRUDIA 105. KONTROL OROKORRERAKO PANTAILA.....	72
IRUDIA 106. KONTROL BEKTORIALERAKO PANTAILA.....	72
IRUDIA 107. dSPACE PLATAFORMA ETA INTERFAZE TXARTELAK BALIDATZEKO SISTEMA.....	74

8. IRUDIEN AURKIBIDEA

IRUDIA 108. BALIDAZIOAN ERABILITAKO RL KARGAK	74
IRUDIA 109. IGBT-EI PASTA TERMIKOA JARTZEKO PROZESUA	75
IRUDIA 110. INFINEONEK GOMENDATUTAKO TORLOJUAK LOTZEKO SEKUENTZIA	75
IRUDIA 111. IGBT-EN MUNTAKETA ERRADIADOREETAN	76
IRUDIA 112. ERRADIADOREAK INGRURKO TXAPAN SARTU AURRETIK ETA OSTEAN	76
IRUDIA 113. KONTAKTORE NAGUSIA SOPORTEAN JARRITA KABLEATUAREKIN	77
IRUDIA 114. PREKARGAKO ERRESISTENTZIA ETA KONTAKTORE AUXILIARRA	77
IRUDIA 115. DC KORRONTE SENTSOREA EZKERREAN ETA FASEKOAK ESKUINEAN	78
IRUDIA 116. DC BUSEKO KONDENSADOREAK ETA BUSBARRA	78
IRUDIA 117. BENTILAZIO KANALA HAIZAGAILUEKIN	79
IRUDIA 118. POTENTZIAKO KABLEEN IRTEERA BORNEROETARA	79
IRUDIA 119. BIHURGAILUAREN IKUSPEGI OROKORRA	80
IRUDIA 120. BIHURGAILUAREN ARMAIRUAREN KANPOKO VISTA	80
IRUDIA 121. KORRONTE DESOREKA ESTATIKOAK KONDUKZIO EZAUGARRIAREN ONDORIOZ [21]	88
IRUDIA 122. KONDUKZIO EGOERAKO MODELOA [22]	89
IRUDIA 123. TENPERATURA KOEFIZIENTEAK KONDUKZIO EZAUGARRIAN [23]	89
IRUDIA 124. ATEKO TENTSIOAREKIKO MENPEKOTASUNA KONDUKZIOAN [24]	90
IRUDIA 125. INPEDANTZIA DESBERDINEK SORTUTAKO DESOREKA KONMUTAZIOAN [22]	91
IRUDIA 126. PARALELIZATZEKO GOMENDIOAK [25]	92
IRUDIA 127. MODU KOMUNNEKO FILTROEN BITARTEZ ATEKO TENTSIOAK BERDINTZEKO ABB-K PATENTATUTAKO METODOA [22]	93
IRUDIA 128. FASEKO INDUKTORE GEHIGARRIEN BITARTEZ KORRONTE OREKATZEA [22]	93

9. TAULEN AURKIBIDEA

TAULA 1. BIHURGAILUAREN ESKAKIZUNAK MAKINA MULTIFASIKOEN ERAGINTZARAKO.	16
TAULA 2. BIHURGAILUAREN ESKAKIZUNAK MAKINA TRIFASIKOEN ERAGINTZARAKO.....	16
TAULA 3. ERDIEROALEEN DIMENSIONAMENDURAKO ESPEZIFIKAZIOAK.	18
TAULA 4. IGBT MODELOEN SIMULAZIOEN EMAITZAK.....	24
TAULA 5. ERDIEROALEEN KONPARAKETA SIMULAZIO TERMIKOAN.	26
TAULA 6. ERDIEROALEEN MUGAKO GALERA ETA TENPERATURAK.	26
TAULA 7. C44UNG76430A8SK KONDENTSADOREEN EZAUGARRI NAGUSIAK.	36
TAULA 8. HO 150-S-0100 KORRONTE SENSOREAREN EZAUGARRI NAGUSIAK.....	37
TAULA 9. ELEMENTUEN LABURPENA.....	41
TAULA 10. DC-DC ITURRIEN KONTSUMOEN ESPEZIFIKAZIOA ETA POTENTZIA.	49

10. ERANSKINA: IGBT PARALELIZAZIOA

Eranskin honetan IGBT moduluak paralelizatzerakoan sortzen diren korrante desorekak landuko dira. Lehenik eta behin banaketa ez-orekatu horren arrazoiak aztertuko dira, ondoren korrante banaketa homogeneo bat ahalbidetuko duten diseinu neurriak proposatzeko. Korrante banaketa egokia berebiziko faktore bat da inbertsorearen irmotasuna bermatu eta moduluen aprobeixamendu egokia egiteko.

Paralelizatutako IGBT moduluen arteko korrante banaketa guztiz orekatua ez da erreala moduluen parametroen bariazioen eta konexio inpedantzia desberdintasunen ondorioz. Era berean, erdieroaleen hozketa ez homogeneoak desoreka areagotu dezake moduluen parametroek tenperaturarekiko duten menpekotasunaren ondorioz. Driver-ak ere kontutan hartu beharreko elementuak dira korrante banaketa orekatua bermatu nahi bada.

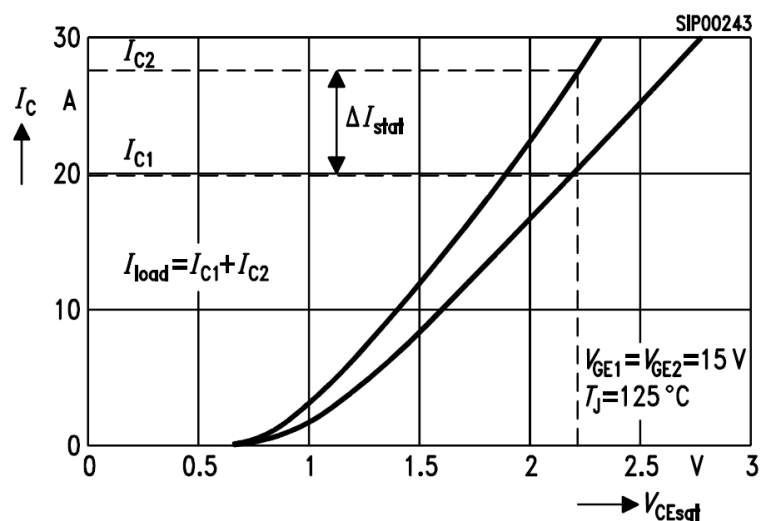
10.1 DESOREKA ESTATIKOAK

Desoreka hauek IGBT moduluak errotan ari denean ematen dira. Korrante banaketa estatikoan pisu handiena duten faktoreak konexioen erresistentzia desberdintasunak eta erdieroaleen kondukzio ezaugarriak dira.

Desoreka estatikoei dagokienez ere, blokeoan ematen diren desberdintasunak mespretxatu egiten dira, kondukzio galerekin alderatuz haien efektua oso txikia delako.

10.1.1 Erdieroaleen ezaugarriak

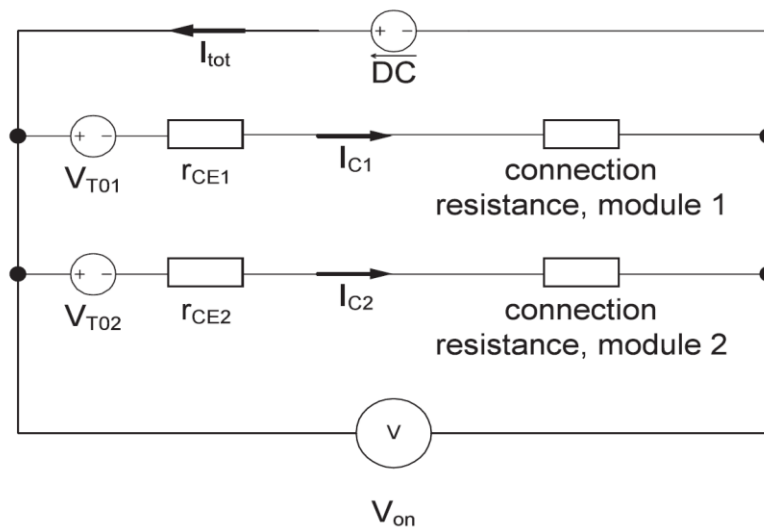
Erdieroaleen kondukzio ezaugarri kurbak baldintzatu egiten du korrante banaketa neurri handi batean. Irudia 121-en ageri den bezala ezaugarri kurba desberdina edukita bi erdieroaleek saturazio tentsio berdinerako korrante desberdinak eroango dituzte. Honen ondorioz saturazio tentsio baxuena duenak korrante altuagoa eroango du eta bere galerak handiagoak izango dira.



Irudia 121. Korrante desoreka estatikoak kondukzio ezaugarriaren ondorioz [21].

10.1.2 Konexio erresistentziak

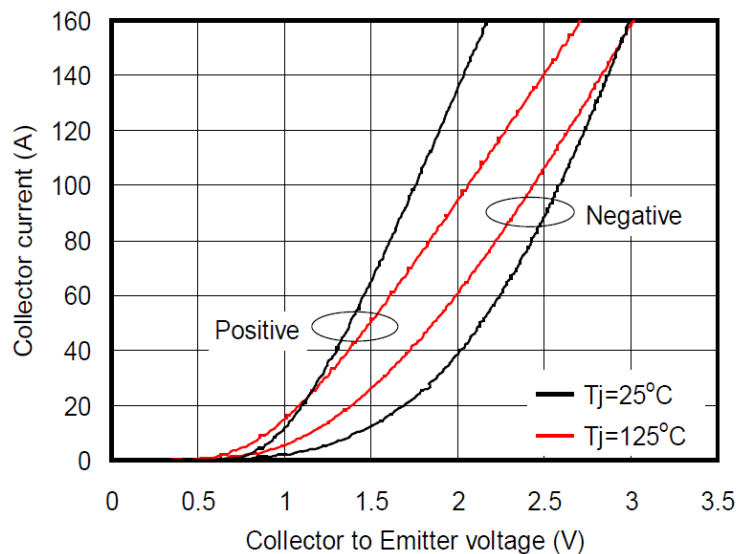
Moduluen arteko konexioen erresistentziek duten eragina Irudia 122-ko zirkuituaren bitartez aztertu daiteke. Modelo honetan kondukzio ezaugarriaren hurbilketa linearra egiten da eta konexio erresistentzia gehien bat emisoreko konexioak baldintzatzen du. Kondukzio tentsio baxua, eta berez, kondukzio erresistentzia baxua duten erdieroaleetan bereziki, influentzia esanguratsua izan dezake konexio desorekatu batek, erdieroalearen ezaugarrien desorekaren mailako pisua izateraino.



Irudia 122. Kondukzio egoerako modelo [22].

10.1.3 Junction temperatura

Korrente desoreka estatikoak baldintzatzen dituen kondukzio ezaugarria temperaturaren menpekoa den heinean berebizikoa da ahal den neurrian oreka termikoa ziurtatzea.



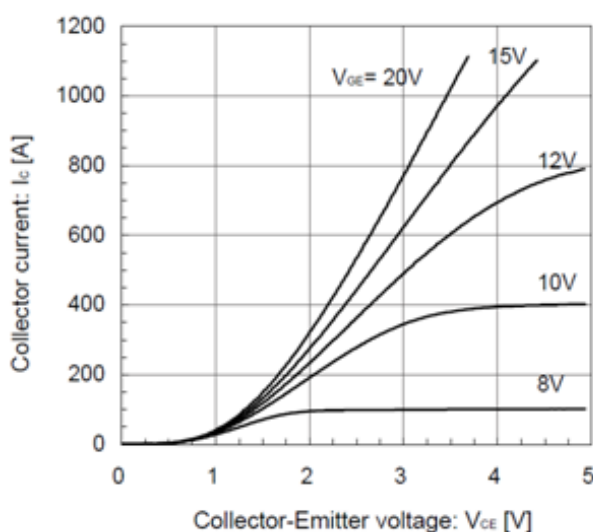
Irudia 123. Temperatura koefizienteak kondukzio ezaugarrian [23].

10. ERANSIKAK

Orohar IGBT-ek temperatura koefiziente positiboa izaten dute eta honi esker korrante desberdintasunak orekatzen dira. Saturazio tentsio baxuena duen IGBT-tik korrante gehiago pasatzerakoan honen galerak handitu egiten dira, eta berotzearen ondorioz saturazio tentsioa igoko da, korranteak orekatzen direlarik. Hala ere, diodoak ez du izaten koefiziente positiboa korrante tarte osoan eta koefiziente negatiboaren ondorioz desorekak are gehiago handitzen dira.

10.1.4 Ateko tentsioa

IGBT-en ateko tentsio maila berdinarekin ez elikatzeak korrante desoreka sortzen du ere, Irudia 124-n ikus daitekeen moduan.



Irudia 124. Ateko tentsioarekiko menpekotasuna kondukzioan [24].

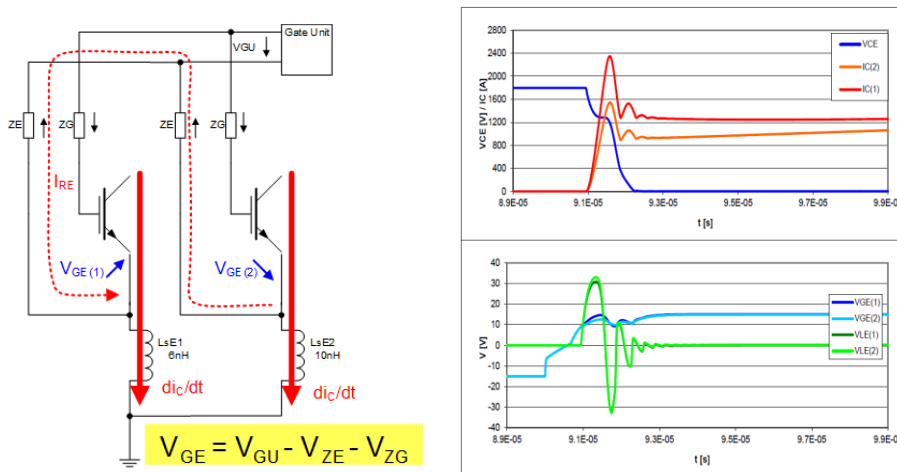
10.2 DESOREKA DINAMIKOAK

Korrante banaketa dinamiko gehien bat IGBT-aren inguruko potentzia zirkuituaren araberakoa da. Era berean, konmutazioetan ematen diren desoreka hauek erabiltzen den Driver konfigurazioaren arabera efektu desberdina izaten dute.

10.2.1 Driver komuna

Paralelizatutako moduluak Driver bakar batekin kontrolatzen direnean eragin handia dauka emisoretik konmutazio puntu komunerako inpedantzia desberdintasunak, pizketan batez ere. Inpedantzien desberdintasunek emisore auxiliarraren artean potentzial diferentzia bat sortu eta korrantea zirkulatzea eragiten dute. Honek Driver tentsio berdinerako IGBT bakoitzaren ateko tentsioa desberdina izatea dakar. Ondorioz moduluetakoa batek korrante handiagoa konmutatuko du, galera gehiago izanik.

10. ERANSIKAK



Irudia 125. Inpedantzia desberdinek sortutako desoreka konmutazioan [22].

Pizketa konmutazioan ematen den gainkorrontea areagotu egiten da desorekatutako korrante banaketaren kasuan. Efektu hau kontuan hartu behar da moduluaren korrante maila dimentsionatzerakoan, SOA-n (Safe Operating Area) lan egingo duela bermatzeko.

Itzalketa konmutazioan aldiz, nahiz eta ateko tentsioan eragina nabarmena izan ere, ez da korrante desorekarik ematen itzalketa ez baita ateko tentsioaren hain menpekoa.

10.2.2 Driver diskretua

Modulu bakoitza Driver batekin kontrolatzen denean lehen aipatutako efektua ez da agertzen. Kontutan hartu beharra dago beste edozein konponentek bezala Driver-ek ere haien parametroetan desberdintasun txikiak izaten dituztela eta garrantzia handikoa dela Driver guztien koordinazioa bermatzea eta ateko tentsioak berdinak izatea.

10.2.3 Junction temperatura

Kondukzio ezaugarriarekin gertatu bezala, IGBT moduluen konmutazio ezaugarria ere erdieroalearen tenperaturaren menpekoa da, korrante banaketa baldintzatuz. Kasu honetan erdieroale beroenak beti izango ditu konmutazio galera handiagoak eta ondorioz ez da auto-orekatze efekturik emango.

10.3 OREKARAKO NEURRIAK

Paralelizatutako IGBT-etan hozketa homogeen bat bermatzea berebizikoa da, ikusi den bezala puntu beroek desoreka sortu baitezakete. Erdieroaleen koefiziente termikoa oreka termikoa lortzeko baliatu nahi bada, koefiziente positiboko elementuak erabiltzekotan termikoki desakoplatuta egon behar dira eta koefiziente negatibokoak izatekotan termikoki akoplatuta.

Potentzia zirkuituaren simetria eta layout egokia ere garrantzi handikoak dira banaketa egokia izan dadin baldintza estatiko zein dinamikoetan. Parametrorik kritikoena emisoreko inductantzia parasitua izango da.

Ekoizle gehienek gomendatzen duten beste prozedura bat moduluak ekoizpen lote berekoak izatea da, parametroen arteko desberdintasunak minimizatze aldera. Hala ere, ikusi ahal izan den moduan moduluen parametroek inpaktu txikiagoa daukate konexio inpedantzien desorekak edo Driver-en eragina baino.

10.3.1 Gomendioak

- Take care about
 - Balanced stray inductance of DC-Bus
 - Laminated bus bars
 - Low stray inductance of driver circuit
 - Low impedance of driver circuit
 - IGBTs with same V_{ceSAT}
 - Module from same lot
 - Use of high speed opto-couplers or use of CT-Technologies

- Module selection
 - Same date code;
 - Same chip technologies;
 - Same type;

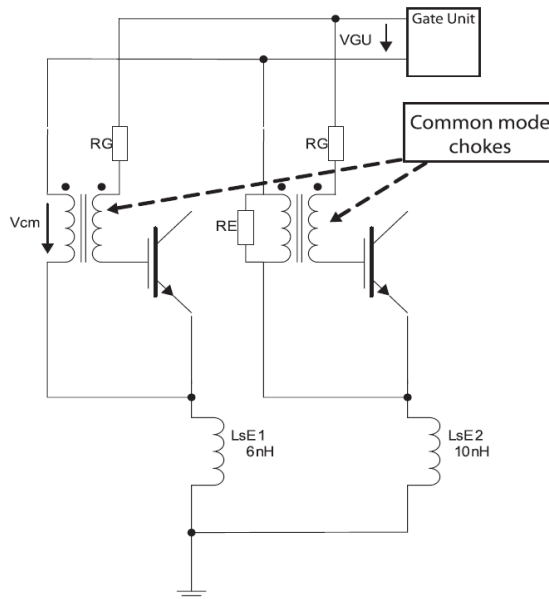
- Drive
 - Same connection cable;
 - Split gate resistor;
 - Respective active adaptor board+ driver core;
 - Adequate driver power;
 - Symmetrical and min. loop area;

- Module layout
 - Symmetrical commutation loop;
 - Optimized thermal coupling;

Irudia 126. Paralelizatzeko gomendioak [25].

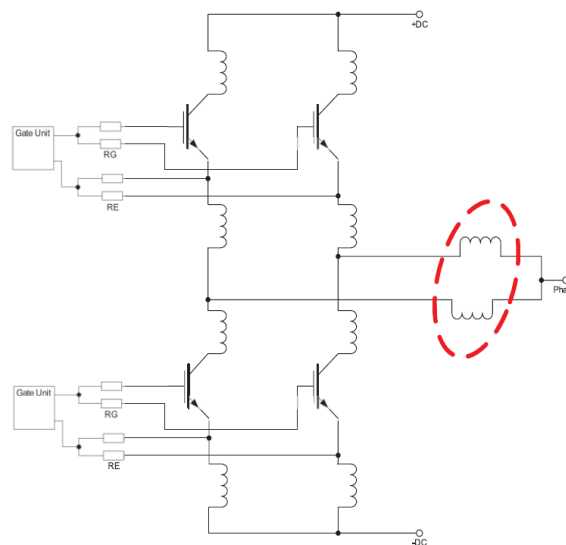
10.4 Irtenbide zehatzak

- ABB ekoizleak patentatutako metodo bat proposatzen du Driver komunarekin lan egiten duten paralelizatutako IGBT moduluentzat. Konexio inpedantzia desberdinak dauzkaten kasuetan efektu hori konpentsatzeko modu komuneko filtroen bitartez ateko tentsioaren gaineko eragina ezabatu egiten da.



Irudia 127. Modu komuneko filtroen bitartez ateko tentsioak berdintzeko ABB-k patentatutako metodoa[22].

- Paralelizatutako moduluen arteko korrante oreka bermatzeko beste modu bat faseen konexioan inpedantzia bat gehitzea da. Modu honetan moduluak desakoplatu egiten dira. Hala ere, induktore horietan potentzia erreaktibo gehigarri bat kontsumitzea ekidin ezina da.



Irudia 128. Faseko induktore gehigarrien bitartez korrante orekatzea [22].