

INDUSTRIA ELEKTRONIKAREN ETA
AUTOMATIKAREN INGENIARITZAKO
GRADUA

GRADU AMAIERAKO LANA

Ibilgailu elektrikoen propulzio-sistemen FPGA bidezko denbora errealeko simulazioa

I. DOKUMENTUA: MEMORIA

Ikaslea: Oihane Cuñado Díaz

Zuzendaria: Ibarra Basabe, Edorta

Kurtsua: 2018-2019

Data: 2019/05/15

Laburpena

Azkenengo urteetan atmosferara egindako kontrolik gabeko isuriek aldaketa klimatikoa areagotu dute. Horren efektuak nabariak dira gaur egun, planetaren batezbesteko tenperatura igo egin baita, eta honek eragiten dituen ondorioak inoiz baino gehiago antzematen dira, airearen kalitatea murriztuz eta, bestetik, lehorreak, uholdeak zein poloen desiozoteak eraginez. Arazo honen aurrean, mundu-mailan atmosferara isuritako negutegi-gasen kontrola handitu da. Gaur egun, errepideko garraioa (barne-errekuntzako ibilgailuak) garraio sektorearen negutegi efektuko emisioen % 75aren arduraduna da. Sortu den kontzientzia hau dela bide, ibilgailuen elektrifikazioak interes handia sortu du komunitate zientifikoan. Zero emisiodun automobilak garatzea da gaur egun helburu.

Konbustiozkoekin konparatuz, abantaila ugari eskaintzen dituzte ibilgailu elektrikoek. Hala ere, autonomia da ibilgailu horiek daukaten desabantailarik esanguratsuena. Propulsiio-sistema ibilgailu elektrikoen osagai nagusia dela jakinda, abia-puntu moduan, horren eraginkortasuna hobetzeko soluzioak ikertu behar dira. Horretarako, garrantzitsua da horien simulazio-modeloak diseinatzea, hutsegiteak eta sistemaren ezaugarriak ongi aztertzeke propulsiio-sistemen prototipo fisikoak eraiki aurretik. Hori guztia ahalbidetzeko, lan honetan APERT ikerkuntza-taldearentzat baliagarria izango den ibilgailu elektriko baten propulsiio-sistemaren denbora errealeko modeloa martxan jarri da. Horretarako, Opal-RTren RT-Lab plataforma erabili da. Plataforma horren bidez, potentzia-sistemaren kontrola, errendimendua eta galerak aztertu ahal izango dira gida-ziklo luzee-tan zehar denbora errealean.

Resumen

En los últimos años ha aumentado la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Por ello, sus efectos son significativos hoy en día, aumentando la temperatura media del planeta y sufriendo las consecuencias que ello conlleva. Se está reduciendo la calidad del aire y, además, como consecuencia de ello se están provocando sequas, inundaciones y el derretimiento de los polos.

Frente a este problema, la comunidad internacional está aumentando los controles en las emisiones de los gases a la atmósfera. Hoy en día, el vehículo de combustión es el responsable del 75 % de las emisiones de dichos gases en el sector transporte. Por ello, entre la comunidad científica ha crecido la idea de la necesidad de la electrificación del sector.

Las considerables ventajas que ofrece el vehículo eléctrico frente al de combustión son la principal razón para optar a favor de la electrificación de este. Sin embargo, la desventaja más significativa de estos vehículos es la autonomía. Por esta razón, es necesaria una mayor labor de investigación en este campo y, así, mejorar la eficiencia de estos vehículos. Para ello, es necesario centrar la atención en el sistema de propulsión, ya que es el elemento principal del vehículo. Por ello, es esencial poder analizar el comportamiento del sistema por medio de una herramienta de simulación antes de crear el prototipo físico.

En este trabajo se ha puesto en marcha un modelo en tiempo real del sistema de propulsión de un coche eléctrico para el grupo de investigación APERT. Para ello, se ha utilizado la plataforma RT-Lab de Opal-RT, por la cual se podrá analizar el control, rendimiento y las pérdidas en largos ciclos de conducción.

Abstract

Over the last years, an uncontrolled emission of the greenhouse effect gases has notoriously increased the effects of the climate change. Nowadays, the most relevant consequence is the rise of the average temperature of the planet. But there are also other consequences, namely, the reduction on the quality of the air, producing drought, floods and pole thawing. This problem has to be faced worldwide and this is why it has been made a stricter control of the emission for those gases. Currently, internal combustion vehicles are the responsible of the 75% of transport emissions. For this reason, the electrification of the vehicles has become a relevant topic for the scientist community, targeting the production of zero-emission vehicles.

The reasons to opt in favour of the electrification of the transport are the considerable advantages that the electric vehicles offer comparing them with the combustion ones. However, it is the autonomy the most important disadvantage of the electric transport. For this reason, more research has to be done in order to improve its efficiency. Being the propulsion-system the main element of the vehicle, it is essential to focus on it. Firstly, it is important to have the chance to simulate it before building the physic prototype, that way, failures and characteristics of the model could be analysed.

In this project a complete model of a propulsion-system has been integrated in real time for the APERT research team so that it would be valuable for successive research works. An OP4510 platform of OPAL-RT has been used to develop the model. This tool will allow the analysis of the control, the efficiency and the loses of the model in long driving-cycles.

Akronimoen zerrenda

APERT: Applied Electronic Research Team
BEV: Battery Electric Vehicle
CPSR: Constant Power Speed Region
CPU: Central Processing Unit
DC: Direct Current
eHS: Electric Hardware Solver
FCV: Full Cell Vehicle
ff_d, ff_q: feed-forward
FOC: Field Oriented Control
FPGA: Field-programmable Gate Array
HEV: Hybrid Electric Vehicle
HiL: Hardware-in-the-Loop
I/O: Input/Output
ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle
IM: Induction Machine
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Machine
MBD: Model-based Design
PF: Prefilter
PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PI: Proportional Integral
PMSM: Permanent Magnet Synchronous Machine
ppm: parts per million
PWM: Pulse Width Modulation
RCP: Rapid Control Prototyping
REE: Rare Earth Element
SM-PMSM: Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine
SRM: Switched Reluctance Machine
UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change
VHDL: Very High Speed Integrated Circuit

Sinboloen zerrenda

V_{dc} : Busaren tentsioa

v_u, v_v, v_w : Estatoreko tentsioak

i_u, i_v, i_w : Estatoreko korranteak

R_s : Estatoreko harilkatuaren erresistentzia

Ψ_U, Ψ_V, Ψ_W : Estatorea induzitutako fase bakoitzaren fluxu magnetikoa

Ψ_{PM} : Errotoreko iman iraunkorrek estatorean induzitutako fluxu magnetikoa

θ : Errotorearen posizio elektrikoa

θ_m : Errotorearen posizio mekanikoa

L_j : Estatoreko inductantzia

$v_{bem_{f,u}}, v_{bem_{f,v}}, v_{bem_{f,w}}$: Errotoreak sortutako idar elektroeragilea

w_e : Errotorearen abiadura elektrikoa

w_m : Errotorearen abiadura mekanikoa

v_d, v_q : d eta q planoetako estatoreko tentsioak

i_d, i_q : d eta q planoetako estatoreko korranteak

L_d, L_q : d eta q planoetako estatoreko inductantziak

P: Motorraren polo kopurua

T_{em} : Momentu elektromagnetikoa

T_{em}^* : Erreferentziazko momentu elektromagnetikoa

i_d^*, i_q^* : d eta q planoko erreferentziazko korranteak

$EMF_{(d/q)}$: Indar elektroeragile induzituak eragindako perturbazioa

K_p : Erreguladorearen konstante proportzionala

K_i : Erreguladorearen konstante integratiboa

b, c : Prefiltroaren poloak

Aurkibidea

I. MEMORIA	19
1. Sarrera	21
2. Testuingurua	27
3. Proiektuaren helburuak eta irismena	31
4. Artearen egoera	33
4.1. Sarrera	33
4.2. Motor elektrikoaren teknologia	34
4.3. Makina sinkronoen modelo matematikoa	38
4.4. Makina sinkronoen kontrola	41
5. Propulzio-sistemaren modelizazioa eta offline simulazioa Matlab/Simulink-en	45
5.1. Sarrera	45
5.2. Modeloaren inplementazioa Matlab/Simulink-en	45
5.3. Simulazio emaitzak	47
6. Propulzio-sistemaren modelizazioa eta simulazioa RT-Lab plataforman	51
6.1. Sarrera	51
6.2. Denbora errealeko simulazioaren oinarriko kontzeptuak	51
6.3. Propulzio-sistemaren simulazio konbentzionala RT-Lab plataforman	54
6.4. eHS softwarea eta FPGA bidezko denbora errealeko simulazioa	55
6.5. Propulzio-sistemaren modeloaren inplementazioa eHS bidez	55
6.6. Emaitzak	59
7. Ekarpenak	65
8. Ondorioak	67
II. LANAREN GARAPENEAN JARRAITUTAKO METODOLOGIA	73
9. Eginbeharren, faseen, ekipamenduaren eta prozeduren deskribapena	75
9.1. Espezifikazio eta eskakizunen definizioa	75

9.2. Artearen egoera	75
9.3. Formakuntza	75
9.4. Modelizazioa	76
9.5. Simulaketa eta egiaztapena	76
9.6. Emaitzak eta ondorioak	76
9.7. Dokumentazioa	76
10.Gantt Diagrama	77
11.Proiektuaren aurrekontua	79

Irudien zerrenda

1.1.	Mundu mailan negutegi efektuko gasen emisioaren aldakuntza 1990 eta 2007 artean (iturria [3]).	22
1.2.	Ibilgailuen propulzio-sistema ezberdinen konfigurazioak	24
2.1.	OP4510 gailu digitalaren arkitektura.	28
2.2.	OP4510 gailu digitalaren ezaugarriak.	29
4.1.	Motor elektriko baten ohiko funtzionamendu-eremuak [5].	34
4.2.	Ibilgailu elektrikoetan erabilienak diren motor elektrikoaren albo-sekzioak: (a) PMSM (errotorea kanpoaldean), (b) IM, (c) PMSM eta (d) SRM.	35
4.3.	PMSM baten kurba karakteristikoa eroapen-angeluaren kontrola.	37
4.4.	Motoreen errendimenduaren konparaketa.	38
4.5.	PMSMaren estatorearen zirkuitu baliokide elektrikoa.	38
4.6.	Clarkeren transformazioa.	40
4.7.	Parkeren transformazioa.	40
4.8.	PMSM makinaren errotorearen sekzioa iman iraunkorren kokapenaren arabera.	42
4.9.	FOC baten estruktura konbentzionala.	43
4.10.	D planoko transferentzia-funtzioen errepresentazioa.	43
4.11.	Z domeinuko transferentzia-funtzioen errepresentazioa.	43
5.1.	GKN Land Systems-en EVO AF-130 motor elektrikoa.	46
5.2.	SM master.	47
5.3.	FOC kontrola	48
5.4.	Abiadura angeluarraren bilakaera offline simulazioan.	49
5.5.	i_d eta i_d^* ren bilakaeraren konparazioa.	49
5.6.	i_q eta i_q^* ren bilakaeraren konparazioa.	49
6.1.	Simulazio modu ezberdinak.	52
6.2.	RT-Lab plataformak eskeintzen dituen denbora errealeko simulazio posibleak	53
6.3.	Propulzio-sistemaren modeloa Opal-RTren blokeen implementazioarekin.	56
6.4.	Plataformaren diagrama orokorra.	57
6.5.	Potentzia elektronikoa exekutatuako duen fitxategia.	58
6.6.	FOC kontrola	60
6.7.	Abiadura angeluarraren bilakaera denbora errealeko simulazioan.	61
6.8.	Momentu elektromagnetikoaren bilakaera denbora errealeko simulazioan.	61
6.9.	d ardatzeko korrontearren kontrola.	62
6.10.	q ardatzeko korrontearren kontrola.	62

6.11. Denbora errealeko modeloaren simulazio pausua eta simulazio denbora. . .	62
6.12. PMSMaren momentu elektromagnetikoa eta abiadura Fleet-BEV gida- zikloan zehar.	63
6.13. PMSMaren estatoreko korronteak Fleet-BEV gida-zikloan zehar.	64

Taulen zerrenda

4.1. Motore elektrikoaren konparaketa [19,20].	37
5.1. GKN Land Systems-en EVO AF-130 motor elektrikoaren espezifikazioak.	46
11.1. Barne orduak.	79
11.2. Amortizazio taula.	79
11.3. Proiektuaren kostu osoaren taula.	79

I. atala

MEMORIA

1. kapitulua

Sarrera

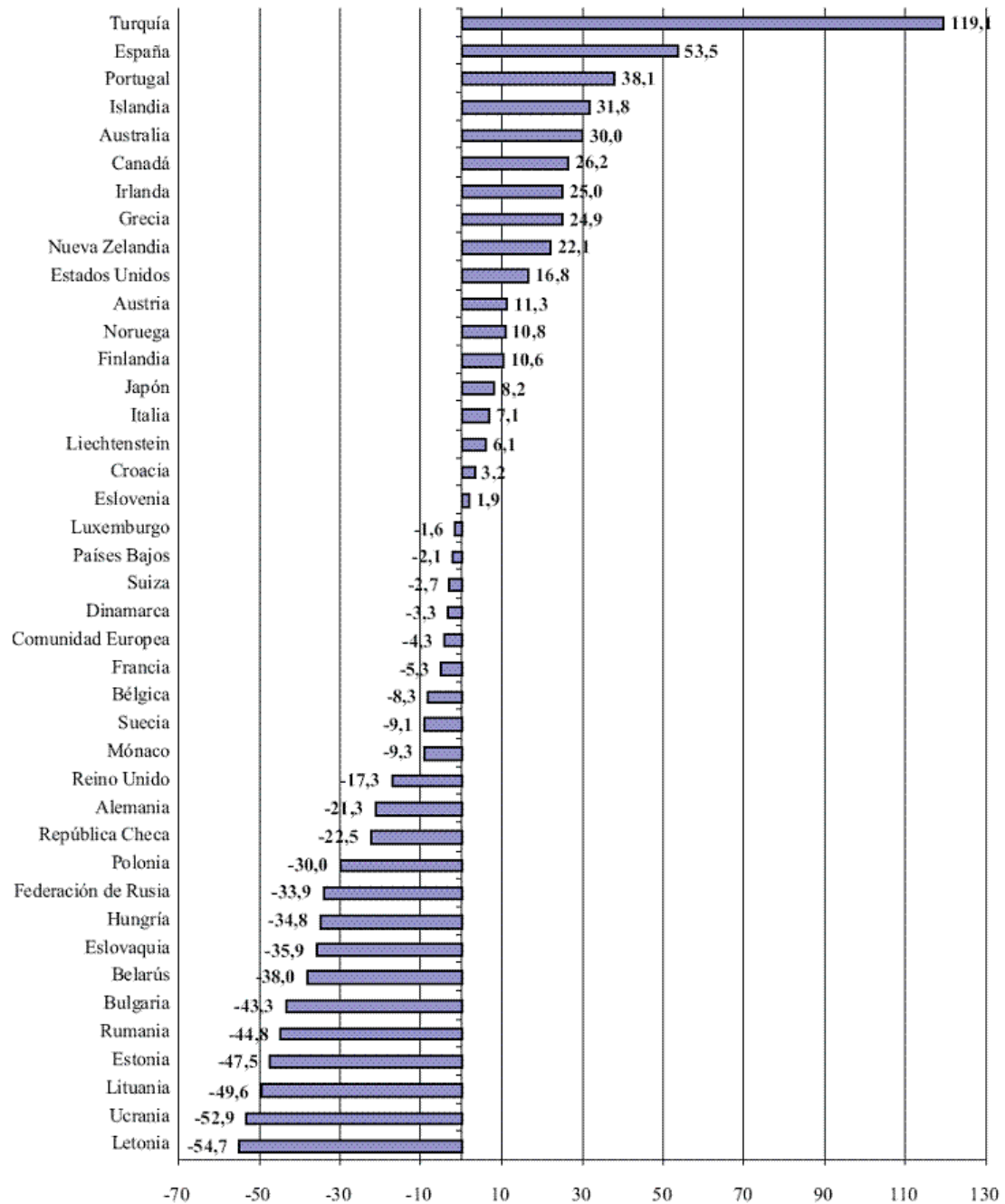
Azkenengo hamarkadetan atmosferara isuritako negutegi efektuko gasak direla eta aldaketa klimatikoa areagotu da. Horren efektuak nabariak dira gaur egun, horregatik atmosferara isuritako negutegi-gasen kontrola areagotu da. Planeta osoan eragina duen fenomenoaren denez, gaia nazioarteko arazo politiko bezala aborrotzen hari da. 1988. urtean Ingurumenerako Nazio Batuen programak eta Munduko Antolaketa Meteorologikoak klima aldaketari buruzko panel intergubernamentalak ezarri zuten (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), ezaguera zientifikoaren bidez klima aldaketaren alderdi ezberdinen gainean ebaluazioak egiteko, ingurunean zein ekonomian eta gizartean, hain zuzen ere [1].

Esan bezala, klima aldaketaren arazoaren jatorria da atmosferan negutegi efektuko gasen kontzentrazioaren hazkundea, gas hauen kontrolik gabeko isurketak direla bide. Arazo honek planetaren batezbesteko tenperatura igotzea eragin du. Gasen kontzentrazioaren balio hori estimatzeko helburuarekin, atmosferan CO_2 -aren presentzia neurtzen da ppm-tan (*parts per million*), non balio egokia 250-350 bitartekoa den [2]. Tarte horretatik aurrera, airearen kalitatea murriztu egiten da, osasunerako kaltegarri bihurtuz; lehortekak, uholdeak zein poloen desizoztea suposatzen du. Iraultza industrialak baino lehen (1780an), CO_2 -aren kontzentrazioa 280 ppm-koa zen. 1990ean, berriz, 353 ppm-ko balioa erregistratu zen eta urtero 1.8 ppm-ko erritmoarekin handitzen joan da, 2017an historikoki ezagutu den zifrarik handiena lortu arte, hori da, 403 ppm. Horrela jarraituz gero, 2050. urterako 550-700 ppm-ko balioa estimatzen da. Ondorioz, batazbesteko tenperatura 1,4-5,8 °C igoko litzateke [2].

Egoera honi aurre egiteko, 1992an Kiotoko Protokoloa sinatu zen, UNFCCCean (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), herrialde industrializatuek klima aldaketan eragina duten emisioak % 5,2ean murrizteko helburuarekin 2008-2012 periodoan (1990ko emaitzak erreferentziatzat hartuz). Alde horretatik, 1.1. irudian ikus daiteke protokoloa aplikatzean herrialdeen emisioek izan duten bilakaera [3].

Garraioaren sektoreak munduko petrolio-produkzioaren % 49a kontsumitzen du [4]. Gainera, gaur egungo tendentzia jarraitzen bada, 2038rako petrolioaren agortuta egongo dela diote egindako zenbait ikerketek [5]. Errepideko garraioaren negutegi efektuko emisioen % 75aren arduradun da garraio sektorean [6]. Alde horretatik, erregai fosilek hainbat desabantaila dituzte, hala nola beraien prezioaren ziurgabetasuna, baliabideen urritasuna eta ingurumen inpaktuak [5].

Automobilaren elektrifikazio (partziala edo totala) indarra hartzen hari da aipatu-



1.1. irudia: Mundu mailan negutegi efektuko gasen emisioaren aldakuntza 1990 eta 2007 artean (iturria [3]).

tako arazoei aurre egiteko aukera ematen duen teknologia delako. Alde horretatik, bai ibilgailu elektriko zein hibridoak kontsideratzen dira aurretik azaldutako ingurugiro arazoak murrizteko. Nahiz eta kontzeptu berria ez izan, ibilgailu elektrikoaren ideia 90eko hamarkadan berrabiaratu zen, barne-errekuntzako motor konbentzionalek (ICEV) energia mekanikoa lortzeko behar duten diesela edo gasolina ekoizteko behar diren erregai fosilak agortzen hasi zirelako. Hala ere, teknologia elektrikoa ez zen guztiz zabaldu XXI. mendera arte, batez ere beharrezko aurrerapen zientifikoak ez zirelako eman [7]. Alde horretatik, potentzia-elektronikan oinarritutako propulsiio-sistema elektrikoek zein energia biltegitzeko sistemek interes handia sortu dute komunitate zientifikoan [8]. Etorkizunari begira, garraio sektorearen helburua da zero emisiodun automobilak ekoiztea [9].

Propulsiio-sistema da ibilgailu elektrikoaren edota hibridoaren osagai nagusia. Alde horretatik, topologia ezberdinak existitzen dira, baina hurrengoak dira ohikoena¹:

1. **Hibrido serie konfigurazioa** (series HEV, *Hybrid Electric Vehicle*).

HEVaren errekuntzako motorraren eraginkortasuna optimizatzeko propulsiio-sistema elektriko bat du topologia horrek paraleloan (1.2. irudia, b konfigurazioa), batera elektriko txiki batekin. Era horretara, algoritmo energetiko batzuek zehaztuta motor elektrikoak lagundu egiten dio konbustiozko motorrari. Ez da konfigurazio entxufagarria, hori da, balaztatze erregeneratiboaren bidez kargatzen da batera. Konfigurazio hau ICEVa (1.2. irudia, a konfigurazioa) baino eraginkorragoa da, baina kasu honetan ibilgailua erregai likidoez elikatuta dago ere.

2. **Hibrido serie entxufagarri konfigurazioa** (PHEV, *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*).

PHEVaren kontzeptua HEVarenaren ia berdina da, baina batera sare elektrikotik kargatzeko aukera ematen du (1.2. irudia, c konfigurazioa), bateriaren tamaina handiagoa izanik, autoaren propulsiore elektrikoaren autonomia hobetuz.

3. **Hibrido paralelo konfigurazioa** (parallel HEV, *Hybrid Electric Vehicle*).

Hibrido paralelo konfigurazioetan, gurpilen propulsiioa guztiz elektrikoa da, baina konbustiozko motor bat erabiltzen da, sorgailu elektriko batekin batera, bateriak beharrezkoa denean kargatzeko. Era horretara, ibilgailuaren autonomia luza daiteke.

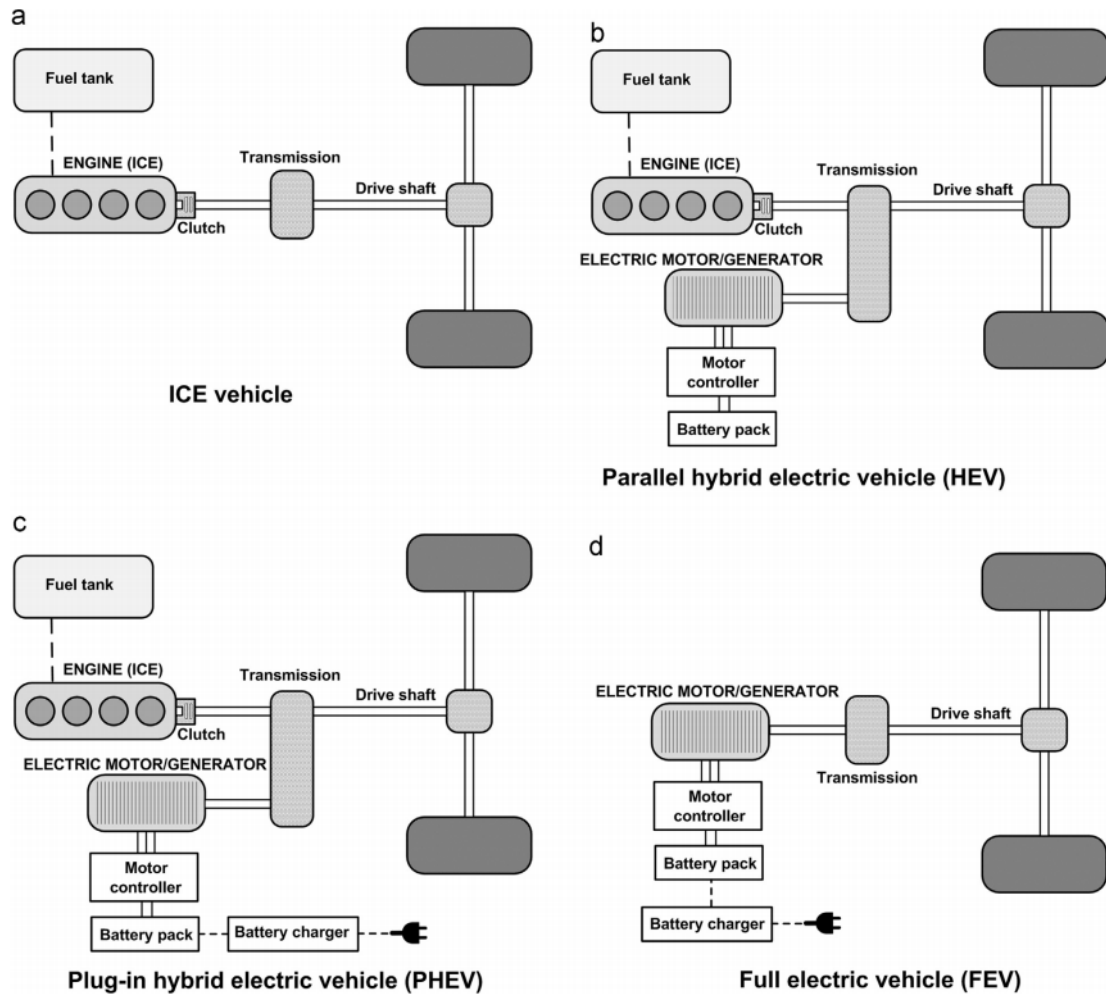
4. **Konfigurazio guztiz elektrikoa** (BEV, *Battery Electric Vehicle*).

BEV ibilgailu elektrikoa (1.2. irudia, d konfigurazioa), *Full Electric* konfigurazio bezala ere ezagutzen direnak, ibilgailua propulsiatzeko behar duen energia guztia batera handi batetatik hartzen dute, sare elektrikoaren bidez kargatu behar dena.

Balaztatze erregeneratiboa oso garrantzitsua da teknologia honetan, kotxearen autonomia % 10-25an handitu baitaiteke horri esker [11].

5. **Erregai-pilan oinarritutako ibilgailuak** (FCV, *Full Cell Vehicle*).

Beste aukera interesgarri bat da FCVa; erregai-pila bat erabiliz (gas naturalean edo hidrogenoan oinarritutakoa), elektrizitatea lortzen da elektrolisiaren bidez [11].



1.2. irudia: Ibilgailuen propulzio-sistema ezberdinen konfigurazioak

Konfigurazio horiek guztiek elementu komun bat dute. Potentzia-bihurgailu baten bidez eta kontrol-algoritmo zehatzei esker, baterietan dagoen energia atontzen dute. Horrela, motorrean beharrezkoa den momentu elektromagnetikoa sortuko da. Era berean eta ibilgailua balaztatzean, motor elektrikoa sorgailu moduan lan egingo du bateriaren karga ahalbidetzen ibilgailuaren autonomia handituko duena [12]. Nahiz eta aurretik azaldu bezala hainbat konfigurazio posible dauden, lan honetan landuko diren simulazio-modeloetan ibilgailu guztiz elektrikoaren konfigurazioa aztertuko da, APERT ikerkuntza-taldearen ikerkuntza-interesak kontuan hartuta.

Ibilgailu elektrikoak konbustiokoekin alderatuz dituen abantailak nabarmenak dira [13]:

- Tamaina eta pisu txikiagoko propulzio-sistema dute.

¹Hala ere, literatura zientifikoan beste hainbat topologia-mota aurki daitezke, hala nola [10] artikuluan azalduakoa.

- Eraginkortasuna nabarmen handiagoa da, ICEV-etan errekontzatik lortutako energiaren %15-18 -koa bakarrik aprobetxatzen duten bitartean, BEV-ek energiaren %60-70 aprobetxatzeko gai dira.
- Muntaiak sinpleagoak da eta baita ere ibilgailuaren mantenua, motor elektrikoaren bizi-zikloa konbustiozkoarena baino handiagoa delako.
- Propultsio-aukerarik garbiena da, kutsadura atmosferiko eta akustikorik gabea.
- Egituraz sinpleagoak dira, ez baita erregairik erretzen.
- Gidatzerakoan oso erosoak dira, ez dutelako ez martxarrik ezta lozagaririk behar.
- Kostu baxuagoa dute, elektrizitatea erregai fosilak baino merkeago baitago (naiz eta hasierako gastua handiagoa izan, epe luzera amortizatu egiten da).
- Bonifikazioak daude erabiltzaileentzat. Zirkulazio-zergetan % 75arteko murrizketak daude, eta hiri askok dohainiko aparkalekuak eskaintzen dituzte mota horretako ibilgailuentzat [14].

Hala ere, autonomia da teknologia honek duen arazo nagusia. Beraz, propultsio-sistemaren eraginkortasuna hobetzeko soluzioak ikertu behar dira. Motor elektrikoek dagokionez, eraginkortasun altutik aparte, potentzia-dentsitate handiak lortu behar dira, erantzun dinamiko onarekin eta fidagarritasun handiarekin batera [15].

Simulazioaren papera garrantzitsua da sistema horien diseinu-prozesuan. Propultsio-sistemen prototipo fisikoak eraiki aurretik, garrantzitsua da fidagarriak eta zehatzak diren simulazio-modeloak eraikitzea, horien bidez diseinuan hutsegiteak detektatzeko edota sistemaren ezaugarriak ongi aztertzeke. Alde horretatik, interesgarria da simulaziorako kalkulu gaitasun handia duen plataforma bat izatea, simulazio luzeak zehaztasunez egin ahal izateko (adibidez, sistemaren modeloari gida-zikloak ezarriz), ibilgailuaren autonomia eta eraginkortasuna aurreikusteko. Hori guztia ahalbideratzeko, lanaren helburua da ibilgailu elektriko baten propultsio-sistemaren modelo denbora errealean simulatzea. Teknikoki oso erronka handia da, konputagailu konbentzionalek ez dutelako simulaketa hori denbora errealean gauzatzeko ahalmenik. Horretarako, lan honetan eHs software-a erabiliko da Opal-RTren OP4510 RT-Lab erremintan inplementatzeko. Era horretara FPGA batetan inplementatu ahal izango da modelo, eta denbora errealeko exekuzioa bermatuko da.

2. kapitulua

Testuingurua

Lan hau UPV/EHUko APERT (*Applied Electronics Research Team*) ikerkuntza-taldean burutu da. Zehazki, 24 kredituko borondatezko praktikak gauzatu dira APERT taldean¹, kurtso batetako iraupena izan dutenak, gutxi gorabehera. Aukera hori baliatuz, lan sakona gauzatu ahal izan da potentzia-sistemen denbora errealeko simulazioaren inguruan. Horrez gain, formazioa jaso da motorren kontrolaren eta horien ezaugarrien inguruan, eta APERT taldearen dokumentazio ugari izan da eskura.

Bilboko Ingeniaritza eskolako irakasle, ikertzaile doktoregaiak zein doktoratu ostekoak eta gradu eta graduondoko ikasleek osatzen dute ikerkuntza-talde hau. Taldearen lan-ildo nagusiak hurrengoak dira:

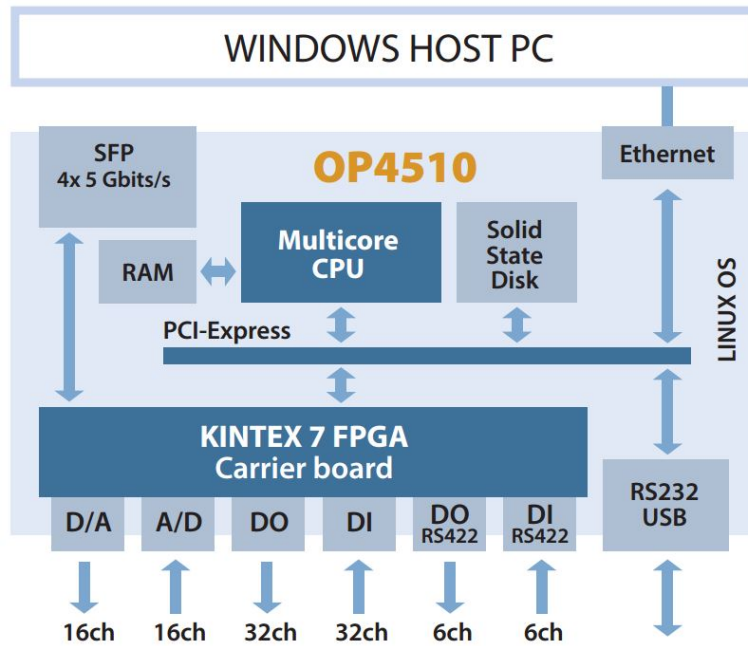
- Administrazio publikoek finantzatutako Ikerkuntza eta Garapen (I+G) proiektuetan lankidetzak gauzatzea.
- Enpresetarako I+G proiektuak gauzatu, beti kontratuean eta taldearen ikerkuntza ildoan barne.
- Enpresetarako trebakuntza-ikastaroak, taldearen ikerkuntza lerroen inguruan.
- Aholkularitza teknikoa, azterketa teknikoak edo txostenak taldearen ikerkuntzarekin erlazionatutako gai ezberdinetan.
- Doktorego-tesiak, nazioarteko aldizkarietan argitalpenak, kongresuak eta patenteak gauzatzea.

Alde horretatik, bi dira taldearen ikerketa arloak. Alde batetik, zirkuitu birkonfiguragarriak eta System-on-Chip-ak; bestetik, energia bihurgailuentzako kontrol- eta potentzia-zirkuituak.

Zehazki, lan hau potentzia-sistemen diseinuan eta garapenean zentratzen den ikerketa-taldearen parte da. Gaur egun, APERT taldearen ikerketa-lerroak potentzia elektronikaren hurrengo esparruetan zentratuta daude:

- Ibilgailu elektrikoaren propulsiio-sistemaren elektronika. Lerro honetan, potentzia-sistemen kontrola, bihurgailuen hozte-zirkuituak eta ibilgailu elektrikoan erabilitako potentzia-bihurgailuen hardwarea ikertzen dira, besteak beste.

¹Gradu amaierako lanari dagozkion 12 kredituez aparte.



2.1. irudia: OP4510 gailu digitalaren arkitektura.

- Korrante zuzeneko transmisioa eta banaketa. Ikerkuntza-ildo honetan, itsas energiaren transmisioa eta banaketa sistemak garatzen dira.

Zehazki, gradu amaierako lan hau ibilgailu elektrikoaren propulzio-sistemarako denbora errealeko plataforma bat gauzatzea du helburu. Plataforma horren bidez posible izango da potentzia-sistema hainbat esparrutan aztertzea (kontrola, errendimendua, galerak, etab.) gida-ziklo luzeetan zehar.

Ibilgailu elektrikoetako motorren kontrol-algoritmoak aztertu eta nola funtzionatzen duten ikasi ondoren, denbora errealeko modeloaren implementazioa gauzatu da lan honetan. Horretarako, OPAL-RT fabrikatzaile kanadiarraren RT-Lab OP4510 prestazio altuko denbora errealeko simulatzaile digitala erabili da. Honek OPAL-RT fabrikatzailearen ezaugarri eta erramintak konbinatzen ditu [16], RCP inguruneen garapena erraztu eta HiL (*hardware-in-the-loop*) diseinuak egiteko aukera emanez, eta baita ere simulazioak azkartzeko erremintak ere [17].

Gailua lau nukleoko Intel Xeon prozesadore batez eta FPGA Xilinx Kintex 7 batez eratuta dago. Honek, simulazio potentzia handia eskaintzen du, denbora errealean simulatzeko eta baita potentzia elektronikaren simulazioa mikrosegundotan simulatzeko. Kontrol algoritmoen implementazioa, modeloetan oinarritutako diseinuak garatzen egiten da Matlab/Simulink liburutegi estandarren bidez eta baita OPAL-RT zein Xilinx (XSG) liburutegiak erabiltzen. Honek guztiak, ingeniariarentzat algoritmoen garapena errazten du. Lan konkretu honetan, ibilgailuaren potentzia-sistema denbora errealean simulatzeko, potentzia-bihurgailua eta motorra RT-Lab gailuko FPGA-n simulatuko dira, OPAL-RTren eHS software espezializatua erabiliz.

Gailuaren arkitektura 2.1. irudian erakusten da. Arkitektura honek denbora errealeko

Processors	CPU	Intel Xeon E3 4-core 3.5 GHz
FPGA	Kintex™-7 K325T standard (K410T optional)	
Performance	CPU	Min. time step model execution of 7 microseconds
	FPGA	Timer resolution of 10ns and minimum time steps of 250 ns
I/O cassettes (max. 4 per system)	Analog	16 channels (max. of 64 per system)
	Digital	32 channels (max. of 128 per system)
Optional I/O boards	RS422	12 channels for I/O, encoder, decoder or other applications
	Optical fiber	6 optical links, 50 Mbps
High-speed optical interface	4 SFP sockets, up to 5Gbps	
Connectivity	Standard	Ethernet
		RS-232
		USB
		JTAG
		VGA
		Keyboard and mouse
Dimensions	W x D x H	2U, 17" x 10.8" x 3.5"

2.2. irudia: OP4510 gailu digitalaren ezaugarriak.

simulaketak egitea ahalbidetzen du, CPUan 10 us-ren azpitik eta 200 ns FPGA-n. FPGA eta CPUaren arteko kosimulaketa posiblea da PCIexpress komunikazioaren bidez, datuak eta seinaleak oso azkar elkartrukatuz [16].

Azkenik, (2.2.) irudian OP4510 erramintaren ezaugarriak aurkezten dira. Aipagarria da eskaintzen dituen sarrera eta irteera analogiko eta digitalen kopurua, zeinekin mikro-prozesadoreen denbora errealeko modeloak eta FPGA mundu errealearekin interkonektatu daiteke, ingurune RCP eta HiL konplexuen garapena ahalbidetuz. Hala ere, lan honetako irismena kontuan izanda ez dira sarrera/irteera horiek erabiliko, gauzatuko den modeloa guztiz birtuala izango baita.

3. kapitulua

Proiektuaren helburuak eta irismena

Lan honen **helburu nagusia** da **denbora errealean exekutatzeko gaitasuna duen ibilgailu elektriko baten propulzio-sistemaren simulazio-modeloa gauzatzea eta modelo hori kalkulu-gaitasun altuko plataforma batetan exekutatzea**. Horren arrazoia da oso luzeak diren gida-zikloen menpe ibilgailuaren propulzio-sistemaren ezaugarriak ebaluatu nahi direla, bai errendimenduari, galerei eta baita ere kontrolari dagokionez. Hori guztia kontuan hartuta, hauexek dira helburu nagusia lortzeko bete beharreko **helburu espezifikoak**:

1. Ibilgailu elektrikoaren propulzio-sistema osa dezaketen motor elektrikoak ezagutzea, beraien arteko ezberdintasunak identifikatuz eta egokiena den soluzioa aukeratuz.
2. Aukeratutako soluzioaren kontrola nola gauzatzen den ulertzea, artearen egoera aztertuz.
3. OPAL-RT fabrikatzailearen OP4510 plataforma ezagutzea eta ulertzea, bereziki, eHS softwareari dagozkion beharrezko jakintzak eskuratuz.
4. Modeloaren denbora errealerako implementazioa OPAL-RT plataforman, gauzatu-tako modeloa FPGA-n integratuz.
5. FPGA-n gauzatu-tako modeloaren balioztatzea, mikrokontrolagailuan gauzatu-tako modelo batekin emaitzak gurutzatuz.

Beraz, proiektu honen **irismena** da **etorkizunean APERT ikerkuntza-taldea-
rentzat baliagarria izango den denbora errealeko propulzio-sistema baten
modelo zehatza martxan jartzea, horretarako FPGA gailuek eta eHS beza-
lako potentzia-elektronikaren simulaziorako software espezifikoek eskaintzen
dituzten abantailak aprobetxatuz**.

4. kapitulua

Artearen egoera

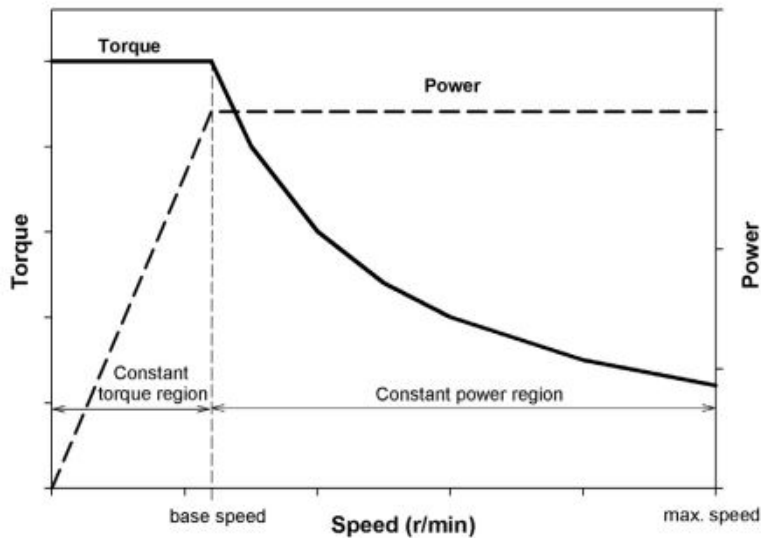
4.1. Sarrera

Lan honen sarreran azaldu den bezala, ibilgailuen elektrifikazio partziala edo totala kontsideratzen da gaur egungo ingurugiro arazoak murrizteko soluzio teknologiko egoki bezala. Alde horretatik, motor elektrikoa eta bere kontrola dira propulzio-sistema elektriko edota hibrido horien elementu nabarmenenetakoak. Desiragarriak diren ezaugarri batzuk bete behar dituzte elementu horiek, hala nola [8, 10, 18]:

- Erantzun dinamiko azkarra izatea, bai abiadurari dagokionez (azelerazio handiak), eta baita momentu elektromagnetikoaren aldaketa azkarrei dagokionez, ibilgailuaren portaera dinamikoari erantzuna emanez.
- Potentzia-dentsitate altua izatea, momentu elektromagnetiko handiak sortzeko gaitasunarekin batera. Potentzia-dentsitate altua oso garrantzitsua da, bereziki, ibilgailu hibridoetan, motor elektrikoa muntatzeko dagoen espazio librea oso txikia delako.
- Fidagarritasun altua, ibilgailuaren funtzionamendu jarraitua bermatzeko eta mantentze-kostuak murrizteko.
- Kontrol-algoritmo egokiak, momentu elektromagnetikoa funtzionamendu-eremu guztian zehar (4.1. irudia) era egokian kontrolatzeko, momentu elektromagnetikoaren aldaketa leunak inposatuz (gidariaren konforta), funtzionamendu-egoera bakoitzean galerak minimizatzeko.
- Zarata akustiko baxua, bidaiarien konforta hobetzeko¹.
- Balaztatze erregeneratiboa ahalbideratzea, energia berreskuratuz bateriaren autonomia luzatuz.
- Gidatzea erosoagoa izateko, inertzia baxuak eta bibrazio txikiak.
- Eraikuntza sinplea eta kostuak ahalik eta murriztenak izatea.

Oro har, bi funtzionamendu-eskualde ezberdindu daitezke ibilgailu elektrikoaren motorretan (4.1. irudia), hori da, momentu elektromagnetiko konstanteko eremua eta potentzia

¹Kasu batzuetan zarata eza desabantaila bihurtzen da oinezkoen segurtasunean.



4.1. irudia: Motor elektriko baten ohiko funtzionamendu-eremuak [5].

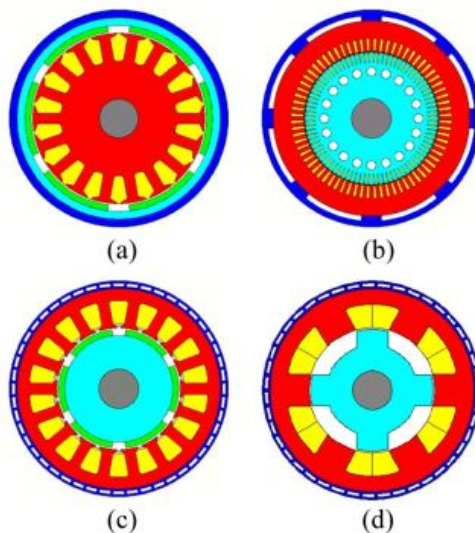
konstanteko eremua (CPSR, *Constant Power Speed Region*). Abiarazten denetik abiadura nominalera heldu arte, motorrak momentu elektromagnetiko maximoarekin egiten dezake lan. Abiadura horretatik aurrera beharrezkoa da momentu elektromagnetiko maximoa mugatzea motorraren potentzia maximoa ez gainditzeko.

Funtzionamendu-kurbak ibilgailuan motorraren portaera eta funtzionamendu-mugak nolakoa izango diren adieraziko du. Alde horretatik, kurba horren itxura eta kurba horretan propulzio-sistemak puntuz puntu izango duen eraginkortasuna motorraren teknologiaren menpekoak izango dira, eta baita ere diseinuaren eta kontrol-estrategiaren arabera [8,19]. Beraz, garrantzitsua da motorren aukera teknologikoen artearen egoeraren azterketa egitea, ibilgailu konkretu batentzako teknologia egokiena zein den zehaztu ahal izateko. Jarraian ibilgailu elektrikoetan erabiltzen diren motorren teknologia arruntenak azalduko dira, teknologia bakoitzak dituen abantailak eta desabantailak nabarmenduz.

4.2. Motor elektrikoek teknologia

Estatorea eta errotorea dira makina elektriko baten osagai nagusiak. Estatorea makinaren atal estatikoa da eta errotorea aldiz, mugikorra. Makina elektriko baten aukeraketa aplikazioaren eskakizunen arabera egin behar da, aurretik aipatutako ezaugarriak kontutan hartuz. Ibilgailu elektrikoek sektorean erabiltzen diren propulzio-sistema elektriko nagusiak hurrengoak dira: korrante jarraituko motorrak (DC, *Direct Current*); indukziozko makinak (IM, *Induction Machine*); iman iraunkorreko makina sinkronoak (PMSM, *Permanent Magnet Synchronous Machine*) eta errelektantzia sinkronoko makinak (SRM, *Switched Reluctance Machine*). Motor horien albo-sekzioa 4.2. irudian azaltzen da.

- **DC motorra.** DC motorrak aproposak izan daitezke propulzio elektrikoeko sis-



4.2. irudia: Ibilgailu elektrikoetan erabilienak diren motor elektrikoekoen albo-sekzioak: (a) PMSM (errotorea kanpoaldean), (b) IM, (c) PMSM eta (d) SRM.

temetarako, eskeintzen duten momentu elektromagnetiko/abiadura erlazioa aproposagaitik, eta baita ere bere kontrola sinplea delako. Hala ere, tamaina handikoak izaten dira. Halaber, eraginkortasun eta fidagarritasun baxua izaten dute [10]. Motor mota honetan, korrantea delgen bidez ailegatzen da nukleora, delgetara konektatuta dauden eskuila batzuen etengabeko kontaktuaz. Honen arazoa da eskuiletan gertatzen den higadura. Ondorioz, mantenimendu handia eta gastu handia suposatzen du [10]. Arazo hau kritikoa denez, ez da teknologia hau kontsideratzen aztertzen hari garen aplikaziorako.

- **IM, indukziozko makina.** Indukziozko makinek aluminiozko edota kobrezko eroaleak dituzte errotorean, eta errotoreko fluxu magnetikoa indukzio bidez sortzen da. Automobilaren sektorean indar handia duen makina da, prezioa, fidagarritasuna eta sinpletasuna direla bide. Makina honek magnetizazio-korrante baxua behar du eremu ahultzearen operazio-eremuan. Horri esker, oso eraginkortasun altua du abiadura altuetan, kobre-galerak murriztu egiten direlako [20]. Beraz, oso teknologia interesgarria izan daiteke abiadura altuetan funtzionatzen duten ibilgailuentzako.

Hala ere, abiadura nominalaren inguruan errotorean sortzen diren galerak direla eta eraginkortasuna murrizten da². Halaber, beste desabantailak dira, hala nola, gainkargan operatzeko aurkezten dituzten mugak, makinako errotorean bero-galera gehigarriak eta magnetizazio-korranteak murrizteko aire-hutsune (*air gap*, ingelesez) txikia behar izatea.

- **SRM, erreluktantzia konmutatuko makina.** Erreluktantzia konmutatuko

²Potentzia-faktore baxuko arazoak konpontzeko, [21] artikuluan kontrol-teknika berriak proposatzen dira.

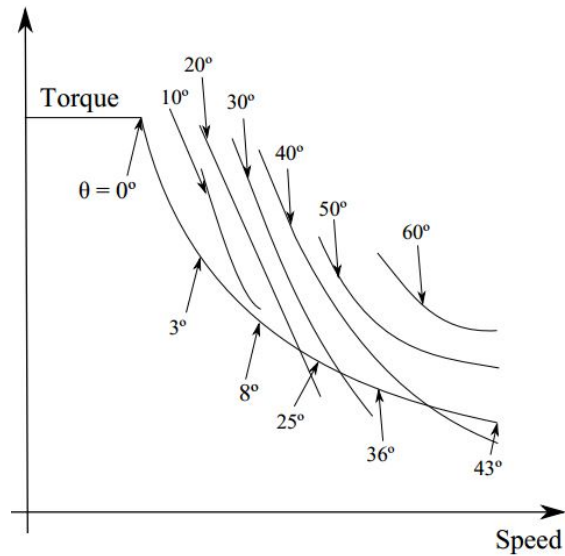
makinek poloak dituzte errotorean eta estatorean (estatoreko poloek bobinatuak dituzte, aurretik azaldutako makina-motek bezala). Estatoreko polo bat kitzikatzean, kitzikatutako polorantz mugitzen hasten da hurbilen duen errotoreko poloa, erreluktantzia minimoa duen posizioaren bila (induktantzia maximoa duen posizioa). Estatoreko poloak era egokian kitzikatuz kontrola daiteke makina horren momentu elektromagnetikoa [22].

Kostu baxua, fidagarritasuna (fabrikazio-sinpletasunagatik), lur arraroekiko independentzia eta hutsegite-tolerantzia intrintsekoa dira teknologia horren abantaila nagusiak [23]. Hala ere, makina-mota horrek baditu zenbait desabantaila beste teknologiek konparatuz gero: uhindura oso altua sortzen dute momentu elektromagnetikoan, zarata akustiko altua, ez-linealtasun altua dute, makinaren disainua eta analisia zailtzen dituen eta potentzia-bihurgailuak jasan behar dituen korrante-mailak handiak dira [20] eta [22]]. Ikusten denez, desabantaila hauek nahiko kritikoak dira autoen aplikaziorako.

- **PMSM, iman iraunkorreko makina sinkronoa.** Makina mota honetan, errotoreko fluxu magnetikoa errotorean kokatzen diren iman iraunkorrek sortzen dute, inongo eszitazioaren beharrik gabe. Iman iraunkorreko motor hauek IMen oso antzekoak dira, baina aplikazio honetarako bereizgarriak diren abantailak eskeintzen dituzte. Alde batetik, potentzia-dentsitate handia, bolumen eta pisu murriztua [24]. Bestalde, momentu/inertzia ratio handia, eraginkortasun- eta potentzia-faktore altuak, momentu elektromagnetiko leuna sortzeko gaitasuna. Galera nagusiak estatoreko kobrea sortzen dira; beraz, hozte-sistema sinpleen bidez kanporatu daiteke galerek sortutako beroa [25]. Bestalde, abiadura hiru edo lauokiztu daiteke oinarritzko abiadurarekiko (*base speed*, ingelesez), potentzia bihurgailuaren eroapen-angelua kontrolatuz (eremu murrizketa, hori da, d ardatzean korrante negatiboa sartzea tentsioa limitatzeko), 4.3. irudian ikusi daitekeen moduan. Ondorioz, abiadura altuetan korrante gehigarri bat sartu behar denez, makinaren eraginkortasuna murrizten da. Hala ere, makina oso eraginkorra da ibilgailuaren abiadura nominalaren inguruan, hori da, ibilgailuak gehien erabiltzen duen abiadura-ingurunean [22].

Hala ere, makina hauek duten desabantailarik esanguratsuena da lur arraroekiko (REE, *Rare Earth Element*) dependentzia. Alde horretatik, imanak eraikitzeke erabiltzen den aleazio arruntenak (NdFeB) neodimioa behar du [26]. Lur arraroen egungo hornitzaile nagusia Txina da [27], mundu mailan neodimioaren % 96 ekoitzi. REEdun produktuek prezioan % 600ko gorakada izan zuten [28], material horren eskaera eta hornidura-arazoak direla-eta. Hainbeste ustiatu dira non erreferbak totalaren % 40ra iritsi direla. Hala ere, meategi berriak aurreikusiten dira, baina produktiboak izatera heltzeko urte batzuk behar dituztenez [27] REEak agortzeko kezka dago. Bi aukera ditu industrial REEen menpekotasuna gainditzeko:

- Honegatik iraganean, ibilgailuen sektoreak lur arraroen beharrik ez duten iman iraunkorreko motor elektrikoak ekoiztea du helburu [29].
- Material hauek birziklatzeko ikerketak egin dira [30], eta etorkizunean industriak hori bultzatu nahi du.



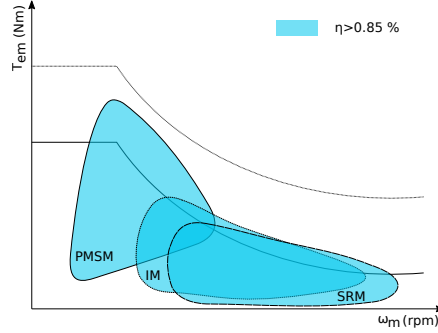
4.3. irudia: PMSM baten kurba karakteristikoaren erroapen-angeluaren kontrola.

Aipatutako guztia laburtzeko, 4.1. taulan motorren konparaketa egiten da ezaugarri garrantzitsuenak puntuatuz. Horretarako ezaugarriak batetik bestera ebalatuak izan dira, puntuaziorik hoberena bost puntu izanik. Emaitzak ikusita, IMak hautagairik hoberena ematen du fidagarritasun altua eta kontrol erraza eskaintzen baitu produkzio-kostu baxuarekin. Hala ere, bere eraginkortasuna txikia da PMSMarekin konparatuta, baina egokia da abiadura altuetan. Makina honekin alderatu daitekeen hautagaia SRMa da baina honek duen desabantailarik nagusia momentu elektromagnetikoan sortzen den uhindura oso nabarmena dela da. Hemendik dator jasotako puntuazio baxua, kontrola oso konplexua bihurtzen delako.

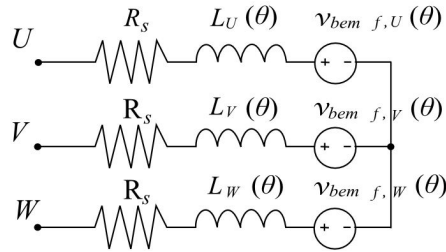
4.1. taula: Motore elektrikoaren konparaketa [19, 20].

	Brushed DC	IM	PMSM	SRM
Potentzia dentsitatea	2.5	3.5	5.0	3.5
Eraginkortasuna	2.5	3.5	5.0	3.5
Kontrola	5.0	5.0	4.0	3.0
Fidagarritasuna	3.0	5.0	4.0	5.0
Teknologiaren heldutasuna	5.0	5.0	4.0	4.0
Kostua	4.0	5.0	3.0	4.0
Guztira	22.0	27.0	25.0	23.0

Ibilgailu elektriko baten propulzio-sistema diseinatzerakoan, eraginkortasuna eta potentzia-dentsitatea dira bilatzen diren ezaugarri desiragarrienak. Taulan ikusi daiteke nola honen puntuaziorik hoberena PMSMak duen. Gainera, momentu elektromagnetikoan uhindura txikia sortzen du kontrola behar bezala gauzatzen bada. Bestalde, hutsegite



4.4. irudia: Motoreen errendimenduaren konparaketa.



4.5. irudia: PMSMaren estatorearen zirkuitu baliokide elektrikoa.

tolerantzia altua du, teknologia oso mardula baita. 4.4. Irudian motorren errendimenduaren konparaketa egiten da, abiaduraren menpean. Bertan ikusi daiteke PMSM motor bat egokia dela propulsio-sistema elektrikodun ibilgailu baterako, abiadura ertainetan errendimendu altua bermatzen baitu, hain zuzen hirietan gidatzeko bilatzen dena [22].

Argi geratzen da errotoreko imanek eratzeko behar diren lur arraroak direla makina-mota honen desabantaila nagusia. Aurrerago aipatutako dependentzia honek suposatzen duen arazoaz aparte, motorraren prezioa igotzea eragiten du, material magnetiko horiek garestiak baitira [22].

4.3. Makina sinkronoen modelo matematikoa

Hemendik aurrera PMSMaren modelo matematikoa azalduko da. Alde horretatik, iman iraunkorreko motor sinkrono baten estatorearen zirkuitu baliokidea azatzen da 4.5. irudian. PMSMaren ekuazio elektrikoak (4.1), (4.2) eta (4.3), estatoreko fase bakoitzean Ohmen legea aplikatuz lortzen dira, denborarekiko estatorean induzitzen den fluxu magnetikoaren aldakuntza kontuan hartuta.

$$v_U = R_s \cdot i_U + \frac{d\Psi_U}{dt}, \quad (4.1)$$

$$v_V = R_s \cdot i_V + \frac{d\Psi_V}{dt}, \quad (4.2)$$

$$v_W = R_s \cdot i_W + \frac{d\Psi_W}{dt}, \quad (4.3)$$

non v_U, v_V, v_W estatoreko tentsioak, i_U, i_V, i_W , estatoreko korronteak, R_s , estatoreko harilkatuaren erresistentzia, Ψ fluxu magnetikoa eta Ψ_{PM} errotoreko iman iraunkorrek estatorean induzitutako fluxu magnetikoa diren, hurrenez hurren, θ errotorearen posizio elektrikoa izanik.

Fluxu magnetikoa estatoreko induktantziaren eta iman iraunkorrek sortutako fluxuaren menpekkoa da, (4.4)-ren arabera.

$$\Psi_j = L_j i_j + \Psi_{PM,j}, \quad (4.4)$$

Bestalde, (4.1), (4.2) eta (4.3) ekuazioak (4.4) espresioarekin operatuta hurrengo lortzen da:

$$v_U = i_U R_s + L_U(\theta) \frac{di_U}{dt} + v_{bemf,U}, \quad (4.5)$$

$$v_V = i_V R_s + L_V(\theta) \frac{di_V}{dt} + v_{bemf,V}, \quad (4.6)$$

$$v_W = i_W R_s + L_W(\theta) \frac{di_W}{dt} + v_{bemf,W}, \quad (4.7)$$

non induktantziek posizioaren menpeketasua izan dezakete, errotoreko imanak muntatuta dauden eraren arabera:

$$L_U(\theta) = L_s + \Delta \cos(2\theta), \quad (4.8)$$

$$L_V(\theta) = L_s + \Delta \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right), \quad (4.9)$$

$$L_W(\theta) = L_s + \Delta \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (4.10)$$

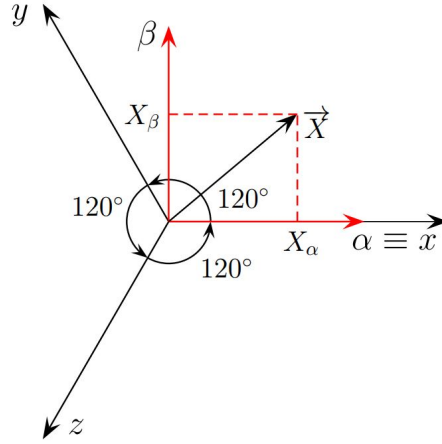
Bestalde, errotoreak sortutako indar elektroeragilea errotorearen posizioaren menpekkoa da:

$$v_{bemf,U} = w_e \Psi_{PM,j} \sin(\theta), \quad (4.11)$$

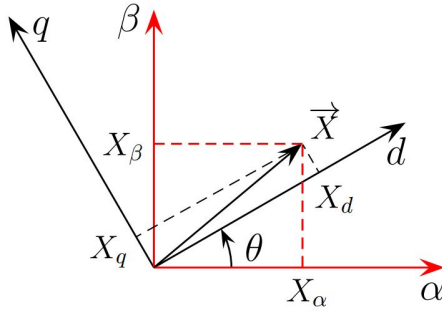
$$v_{bemf,V} = w_e \Psi_{PM,j} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4.12)$$

$$v_{bemf,W} = w_e \Psi_{PM,j} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (4.13)$$

PMSMaren atal elektrikoare modelo matematikoa sinplifikatzeko, hiru faseetik bi faseetara pasatzeko bektore eraldaketa gauzatu daiteke. Alde horretatik, makina elektrikoaren kontrolean oso ezaguna den Clarkeren transformazioa (4.6. irudia) ezarriz gero, U, V, W fasetatik α, β kordenatuak izatera pasatuko gara. Horretarako, hiru faseko magnitudeak adierazten dituen bektorea hurrengo matrizeaz biderkatu behar da:



4.6. irudia: Clarkeren transformazioa.



4.7. irudia: Parken transformazioa.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_U \\ X_V \\ X_W \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Era horretara, $\alpha\beta$ planoan biratzen duen bektore bat lortzen dugu. Azkenik, oso eza-guna den Parken transformazioa erabiliko da $\alpha\beta$ sistema estazionariotik errotorrearekin batera mugitzen den sistema birakari sinkronora pasatzeko (4.7. irudia). Koordinatu-sistema errotorean dauden imanek sortutako fluxu magnetikoaren ardatzarekin lerrotatzen da. Horretarako, (4.15) erabili behar da.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Transformazio horiek aplikatuz, horrelaxe geratzen da estatoreko tentsioen eta korronteen arteko erlazioa dq planoan:

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q, \quad (4.16)$$

$$v_q = R_s i_q + L_d \frac{di_q}{dt} + w_e (L_q i_q + \Psi_{pm}), \quad (4.17)$$

Azkenik, hauxe da motorrak sisteman sortutako momentu magnetikoa dq ardatzetan:

$$T_{em} = \frac{3}{2} P \{ \Psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \}. \quad (4.18)$$

Ekuazio horretako lehenengo terminoak momentu magnetikoa adierazten du, eta momentu erreluktantea bigarrenak. Alde horretatik, fluxua errotoreko iman iraunkorren menpekoea da eta hauen kokapenaren arabera bi PMSM mota bereiz daitezke:

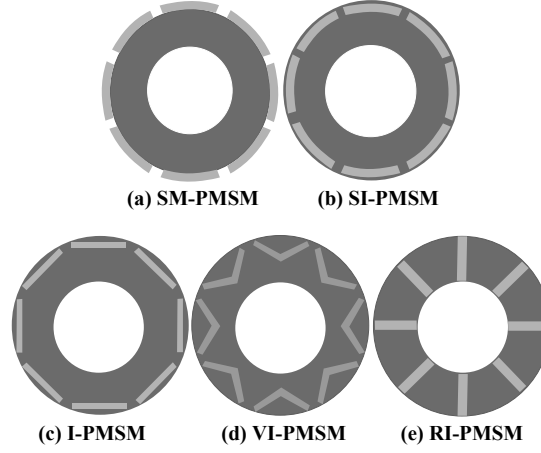
- **Imanak azalean muntatutako PMSM makinak**, (*SM-PMSM, Surface Mounted PMSM*). Makina horietan material magnetikoa errotorearen azalean kokatzen da. Imanen permeabilitate erlatiboa airearenaren antzekoa denez, magnetizazio-induktantzia berdina edo oso antzekoak dira. Horrenbestez, d eta q ardatzek fluxu-dentsitate bera dute eta bakarrik momentu magnetikoa sortzen da, $L_d = L_q$ delako.
- **Imanak barruan montatutako PMSM makinak**, (*IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Machine*). Kasu honetan, imanak errotorearen barrualdean kokatzen dira eta 4.8. irudian ikusi ahal denez, hainbat konbinazio posible daude. Imanak estatoretik geroz eta hurrunago kokatuz, Foucault korrante-galerak txikiagoak dira, beraz, imanak desmagnetizazio partzialak ekiditzen dira. Bestalde, d ardatzeko erreluktantzia, q ardatzekoa baino handiagoa da ($L_d < L_q$). Arrazoi honegatik, momentu erreluktantea sortzea posible da i_d eta i_q korronteak kontrolatuz.

SM-PMSM makinek portaera dinamiko hobe daukate, estatoreko inertzia txikiagoa baitute. Gainera, fabrikatzeko errazago eta merkeagoak dira. IPMSM makinek aldiz, eremu-ahulketarako gaitasun hobe dute, eta bolumen-unitateko momentu elektromagnetiko gehiago sortu dezakete.

Bi aukera teknologikoei abantailak eta desabantailak dituzte. Hori guztia kontsideratuta, SM-PMSM motako motorren modeloa integratzea aukeratu da lan honetan denbora errealeko plataforman.

4.4. Makina sinkronoen kontrola

Makina sinkronoen momentu elektromagnetikoaren kontrola FOC (*Field Oriented Control*) bezala ezagutzen den kontrolaren bidez gauzatu daiteke. Alde horretatik, makina sinkrono baten kontrolaren diagrama orokorra erakusten du 4.9. irudiak. Mota honetako kontrol estrategiatan, erreferentziako momentu elektromagnetikotik (T_{em}^*), abiadura mekanikotik eta busaren tentsiotik sortzen dira korrante optimoak diren i_d^* eta i_q^* aldagaiak. Neurtutako korronteak dq planora eraldatzen dira Park eta Clarke transformatuen bidez. Estatoreko i_d eta i_q korronteak erregulatzen ditu FOC kontrolak, erreferentziako i_d^* eta i_q^* magnitudeen arabera. Horretarako, PI (*proportional integral*) erregulatzailak



4.8. irudia: PMSM makinaren errotoreen sekzioa iman iraunkorren kokapenaren arabera.

erabiltzen dira (4.10. irudia). Era berean, sistemaren erantzun dinamikoa hobetzeko ff_d eta ff_q *feed-forward* terminoak ezartzen dira PIen irteeretan [31].

$$ff_d = -\omega_e L_q i_q, \quad (4.19)$$

$$ff_q = \omega_e (L_q i_q + \Psi_{pm}). \quad (4.20)$$

Azkenik, erreferentziazko v_{UVW}^* tentsioak PWM (*Pulse Width Modulation*) modulazio bidez sintetizatuak dira bihurgailuan.

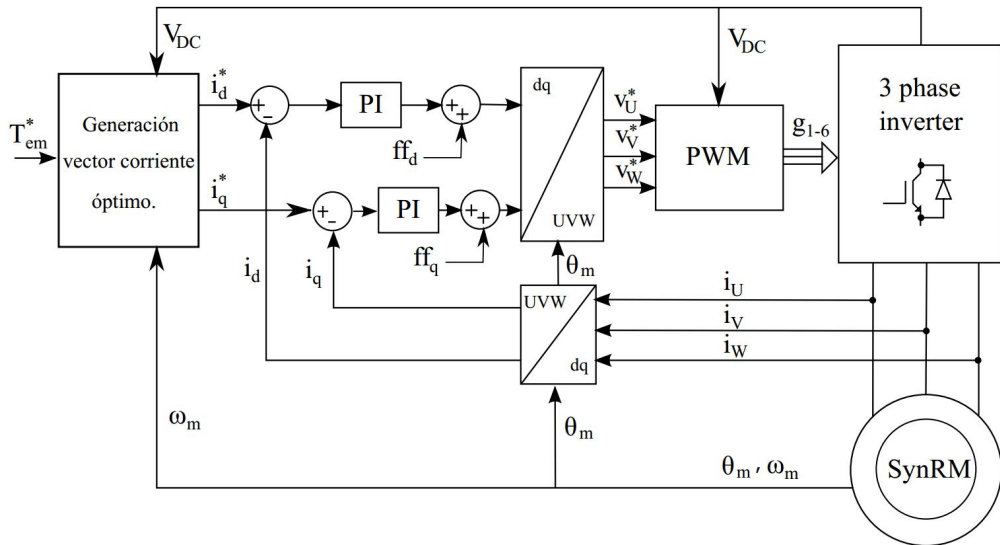
4.16 eta 4.17 espresioen bitartez ikus daiteke nola erresistentzia eta induktantzia batek osatzen duen lehen ordenako sistema batera sinplifikatu daitekeela planta. Bestalde, indar elektroeragile induzituak (4.10.irudiko $EMF_{d/q}(s)$) perturbazio moduan jokatzen du.

Nahiz eta posible den PI erregulatzailak Laplaceren domeinuan (s domeinuan) doitzea, egokiagoa da doiketa z domeinuan egitea [32], kontrola gauzatzen duten mikroprozesadoreek denbora diskretuan funtzionatzen dutelako, laginketa-maiztasun batekin. Tes-tuinguru honetan, z domeinuan plantaren transferentzia-funtzioa eskuratzeko ZOH motako erretenedorea erabiltzen da [33]. Horrez gain, lagin batetako atzerapena (z^{-1}) sartzen du kontrolak, lagin bat behar duelako erantzuteko. PIak doitzeko beharrezkoa den diagrama orokorra agertzen da 4.11. irudian, non transferentzia-funtzioak z domeinuan adierazten diren. Gauzak horrela, zehaztasun handia behar den kasuetan, gomendagarria da aurreiragazki (PF) bat erabiltzea [34]:

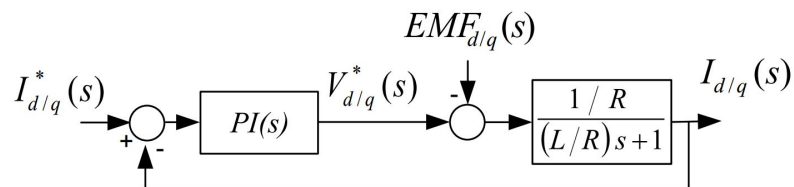
$$PF(z) = \frac{(1-b)(z-c)}{(1-c)(z-b)} \quad (4.21)$$

Behin zenbakiz poloen kokapena zenbakiz ebatzi, hurrengo ekuazioak lortzen dira bai PIen eta baita aurreiragazkiaren irabaziak zehazteko [32]:

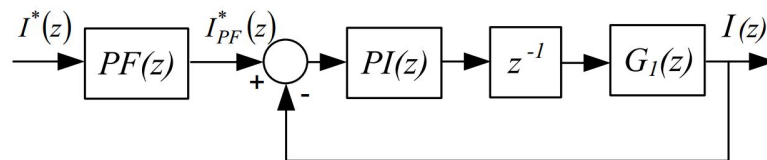
$$c = 1 + e^{-aT} - 2e^{w_n T}, \quad (4.22)$$



4.9. irudia: FOC baten estruktura konbentzionala.



4.10. irudia: D planoko transferentzia-funtzioen errepresentazioa.



4.11. irudia: Z domeinuko transferentzia-funtzioen errepresentazioa.

$$K_p = \frac{Rce^{-2w_nT}}{1 - e^{-aT}}, \quad (4.23)$$

$$K_iT = \frac{R(e^{-2w_nT} + 2e^{-w_nT}c - e^{-aT})}{1 - e^{-aT}} - K_p, \quad (4.24)$$

$$b = \frac{K_p}{K_p + K_iT}. \quad (4.25)$$

5. kapitulua

Propultsio-sistemaren modelizazioa eta offline simulazioa Matlab/Simulink-en

5.1. Sarrera

Offline simulazioa da gehien erabiltzen den simulazio-modalitatea. Formato honetan, modeloa ordenagailu konbentzional batean simulatzen da simulazio-plataforma baten bidez. Alde horretatik, Matlab/Simulink plataforma aukeratu da proiektu honetan potentzia-sistema grafikoki simulatzea errazten duelako. Simulink, MathWorks-en software paketea da. Horrek sistema dinamikoen modelatzea, simulazioa eta analisisa ahalbidetzen du. Modeloak grafikoki deskribatzen dira, blokeez eraturako formato zehatz bat jarraituz. Software horrek, SimPowerSystems izeneko erraminta dauka, sistema elektrikoak modelatu eta irudikatzen ditu.

Jarraian, ibilgailu elektriko baten propultsio-sistemaren Matlab/Simulink-eko modeloa deskribatzen da, eta lortutako emaitzak erakusten dira ondoren. Emaitza horiek baliagarriak izango dira denbora errealeko modeloa balioztatzeko.

5.2. Modeloaren implementazioa Matlab/Simulink-en

Ondoren Matlab/Simulink-en egindako blokeen diseinua azalduko da. Proiektuan GKN-ren EVO AF-130 motorra erabiliko da (5.1. irudia) eta haren espezifikazioak 5.1. taulan kontsulta daitezke.

Modeloa RT-Lab-en simulatzeko prestatuta dago eta bi partetan banatuta dago: kontrola (SM master) eta monitorizazioa (SC userinterface).

- **Propultsio-sistemaren monitorizazioa**

Bloke hau, datuak sartzeko eta emaitzak bistaratzeko erabiliko da, honetan erabiltzaileak propultsio-sistemaren erreferentziarako abiadura eta momentu elektromagnetikoa definituko ditu. Horretarako bi aukera daude: zuzenean eskuz definitzea, edota gida-ziklo bat aukeratzea.

- **Propultsio-sistemaren kontrola**



5.1. irudia: GKN Land Systems-en EVO AF-130 motor elektrikoa.

5.1. taula: GKN Land Systems-en EVO AF-130 motor elektrikoaren espezifikazioak.

Espezifikazio teknikoak	AF-130
Abiadura maximoa	8000 rpm
Momentu elektromagnetiko nominala	145 N
Potentzia nominala	64 kW
Eraginkortasuna	% 95.1
Inbertsoreak beharreko tentsioa	300 Vdc - 720 Vdc
Dimentsioak (L x D)	110 mm x 300 mm, 30.5 kg

Bloke honen barruan motorraren kontrola eta potentzia elektronika daude erreprezentatuta (5.2. irudia).

Propulzio-sistema atala bi azpi-ataletan banatuta dago:

1. Power Control Unit

– Motorraren kontrola:

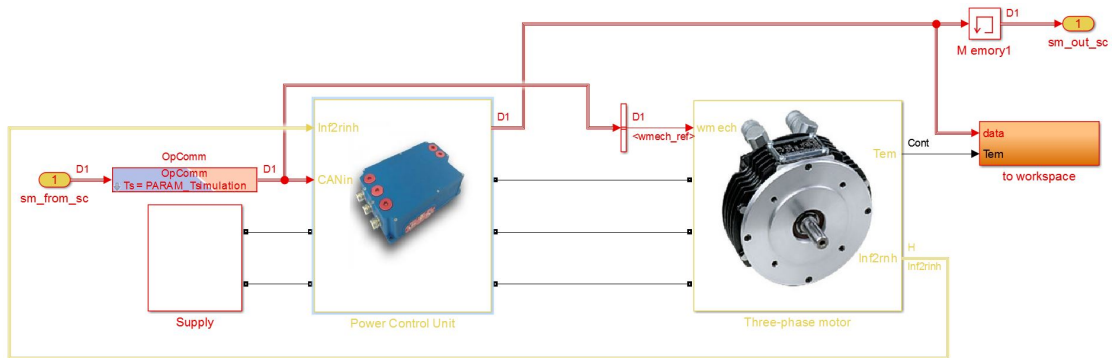
Erabiltzaileak, definitutako momentu elektromagnetikoaren arabera, i_q^* eta i_d^* eskuratuko dira, FOC kontrola ezartzeko erabiliko direnak, 5.3. irudian ikusten den bezala. Horretarako, Clark eta Parkeren transformatuak aplikatu behar dira (4.14) eta (4.15) ekuazioetan azaltzen den bezala, I_U , I_V eta I_W korrante trifasikoetatik, i_q eta i_d lortzeko.

Behin korronteak bi dimentsiotan edukita, PI kontrola egiten da (4.23) eta (4.24) ekuazioak aplikatuz.

Ondoren, 5.3. irudia jarraituz, hirugarren harmonikoaren injekzioa egiten da, ezarri daitekeen tentsio maximoa $\frac{V_{dc}}{2}$ -tik $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ -ra igotzeko, eskualde linealetik irten gabe [35]. Bloke honen amaieran motorraren abiadura angeluarra kontrolatzeko erabiliko den PWM seinalea eskuratzeko, tentsioak lan-ziklotara bihurtzen dira.

– Potentzia elektronika:

Bloke honen bidez, kontroletik lortutako PWM seinaleetatik eta bate-riak emandako tentsio zuzenetik, motorra elikatzen duen tentsio trifasikoa lortzen da.



5.2. irudia: SM master.

2. Three-phase motor

Propultsio-sistema osatzen duen beste blokea motorra da. Hori simulatzeko, SimPowerSystemsek eskaintzen duen PMSMren modeloa aukeratu da eta EVO AF-130 motorraren ezaugarriak definitu dira.

Hortik, (4.18) ekuazioaren arabera, momentu elektromagnetikoa kalkulatu da. Era berean, abiadura mekanikoa (w_m) eta errotorearen posizioaren (θ_m) eguneraketak egingo dira.

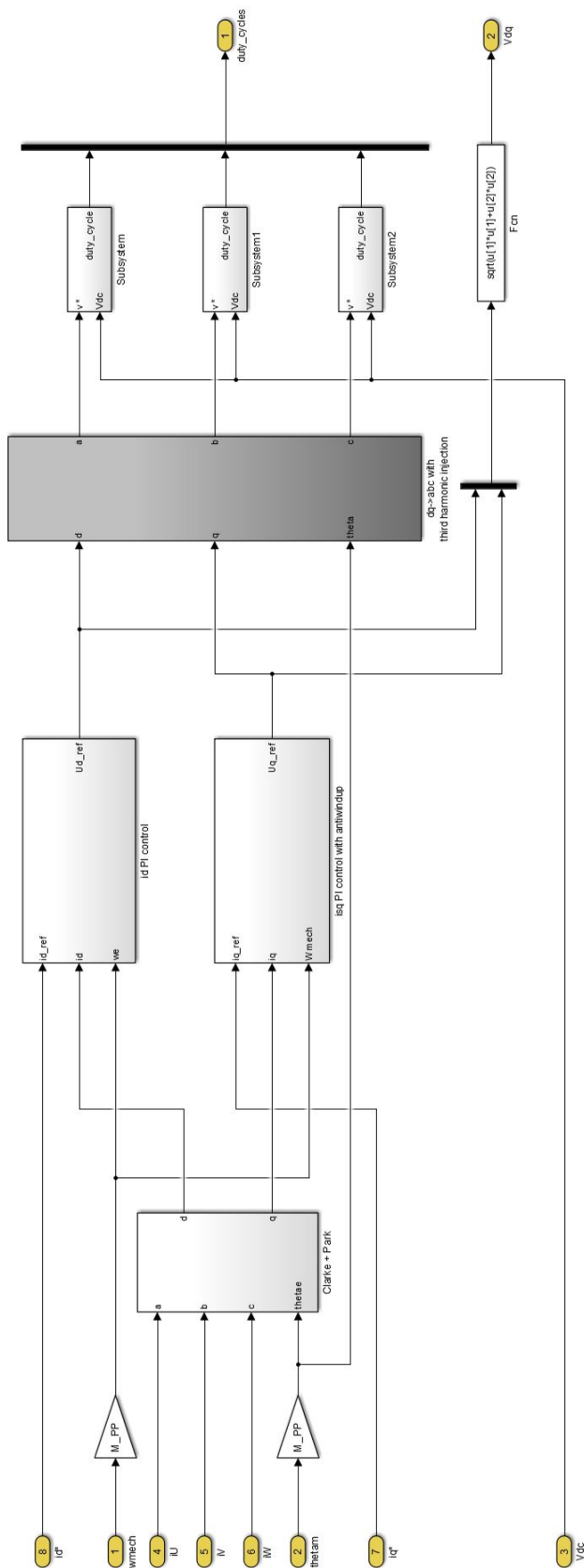
5.3. Simulazio emaitzak

Jarraian, offline modeloa simulatzean lortutako emaitzak erakusten dira. Horretarako, 500 rpm-ko abiadura mekanikoa eta 100 Nm-ko momentu elektromagnetikoa ezarri dira.

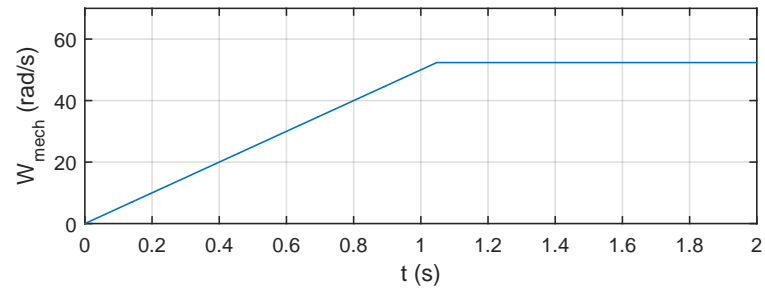
Abiadura angularraren kurba 5.4. irudian ikusi daiteke. Bertan abiadura elektrikoa ikusten da, rad/s-tan neurtuta. Erabiltzaileak abiadura mekanikoa sartu eta modeloan motorraren polo kopuruaz biderkatu egiten da, kasu honetan 5 polo. Beraz, $w_m = 52,35$ rad/s izango da grafikoan ikusi ahal den moduan.

Bestalde, artearen egoeran azaldu den bezala, L_d eta L_q berdinak izango dira eta (4.18) ekuazioaren arabera, $i_d = 0$ definitu da. Horren emaitzak 5.5. grafikoan ikusten dira, erreferentziako balioa gorria izanik eta simulazioan duen bilakaera urdinez. Bestalde, $i_d^* = 0$ izanik, i_q ren balioa (5.1) ekuazioak emango du eta horren bilakaera 5.6. irudian ikus daiteke.

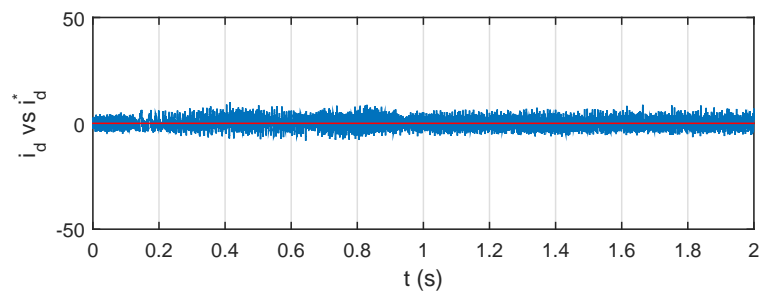
$$i_q = \frac{T_{em}}{\frac{3}{2}P\Psi_{pm}}. \quad (5.1)$$



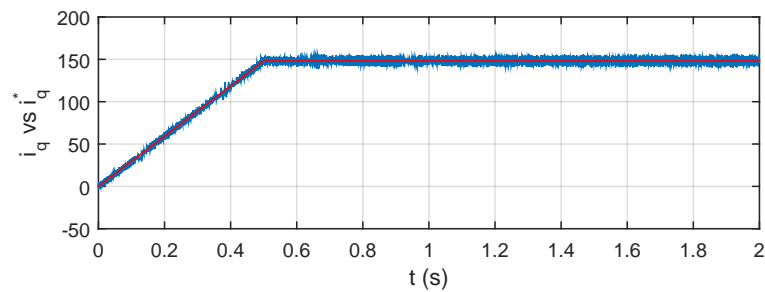
5.3. irudia: FOC kontrola



5.4. irudia: Abiadura angeluarraren bilakaera offline simulazioan.



5.5. irudia: i_d eta i_d^* ren bilakaeraren konparazioa.



5.6. irudia: i_q eta i_q^* ren bilakaeraren konparazioa.

505. kapitula. Propulzio-sistemaren modelizazioa eta offline simulazioa Matlab/Simulink-en

6. kapitulua

Propultsio-sistemaren modelizazioa eta simulazioa RT-Lab plataforman

6.1. Sarrera

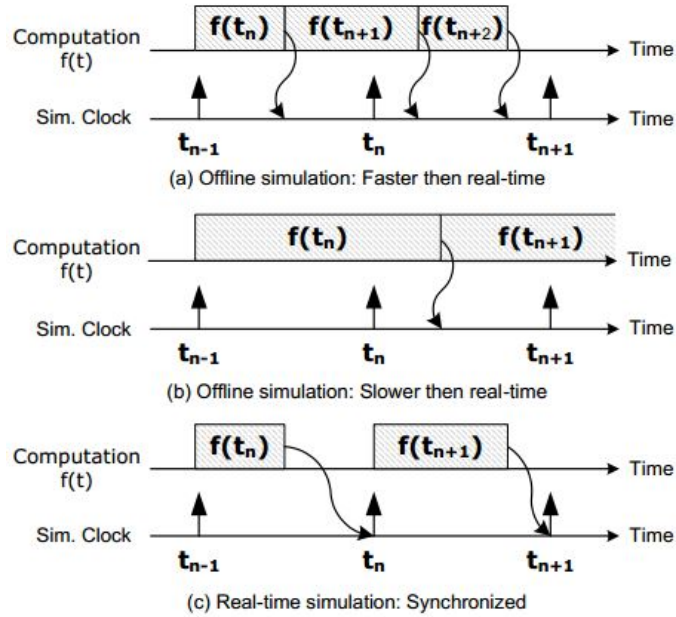
Atal honetan, ibilgailu elektrikoaren propultsio-sistemaren modelizazioa eta bere denbora errealeko integrazioa azalduko dira. Alde horretatik, denbora errealeko simulazioa zer den azalduko da lehenik eta behin. Ondoren, modeloaren inplementazioaren xehetasunak azalduko dira eta, azkenik, denbora errealean lortutako emaitzak aurkeztuko dira.

6.2. Denbora errealeko simulazioaren oinarritzko kontzeptuak

Konputagailuen teknologiak izan duen eboluzio azkarrari esker, simulazio-erreminten bilakaera azkarra izan da azkenengo hamarkadan. Honek eragin du sistema konplexuen diseinu eta simulaziorako erremintak garatu behar izatea diseinatutako sistemaren funtzionamendua eta portaera ahalik eta zehatzena izateko. Horregatik simulatu beharreko algoritmoaren simulazio-denbora garrantzitsua da [36]. Simulazioak denbora diskretuan egingo dira, zeinean denborak iraupen bereko pausotan aurrera egiten du, *Fixed Time-Step* bezala ezagutzen dena [37].

Simulazioetan, sistemaren ekuazio matematikoak ebatzi egin behar dira. Horretarako, garrantzitsua da konputatzeko denbora simulazioaren *time-step*a definitzea. Parametro horren arabera simulazio mota ezberdinak daude: Offline simulazioa eta Denbora errealeko simulazioa. 6.1. irudian laburtuta agertzen dira kasu guzti hauek. (a) moduan konputazio-denbora *Fixed Time-Step* baino txikiagoa da eta (b)-n konputazio denbora handiagoa da. Bi simulazio hauek, offline simulazioak direnak, emaitzak ahalik eta azkarren eskuratzeko balio dute. Hauetan, solVERRAREN eraginkortasuna konputagailuaren potentzia eta sistemaren modelo matematikoaren konplexutasunaren araberakoa da.

Bestalde, 6.1. irudiko (c) kasua denbora errealeko simulazioari dagokio. Kasu honetan, sistema fisikoak izango lukeen portaera bera bilatzen da, hau da, barneko aldagaiak eta irteerak ahalik eta simulazio pausu txikienarekin simulatuz zehaztasun handia



6.1. irudia: Simulazio modu ezberdinak.

bermatzeko. Irudian ikusten den bezala, modeloaren karga konputazionala exekutatzeke beharrezko denbora definitutako *time-step*-a baino txikiagoa izan behar da *overrun*ak ekiditzeko (denbora errealeko exekuzioa bermatzeko).

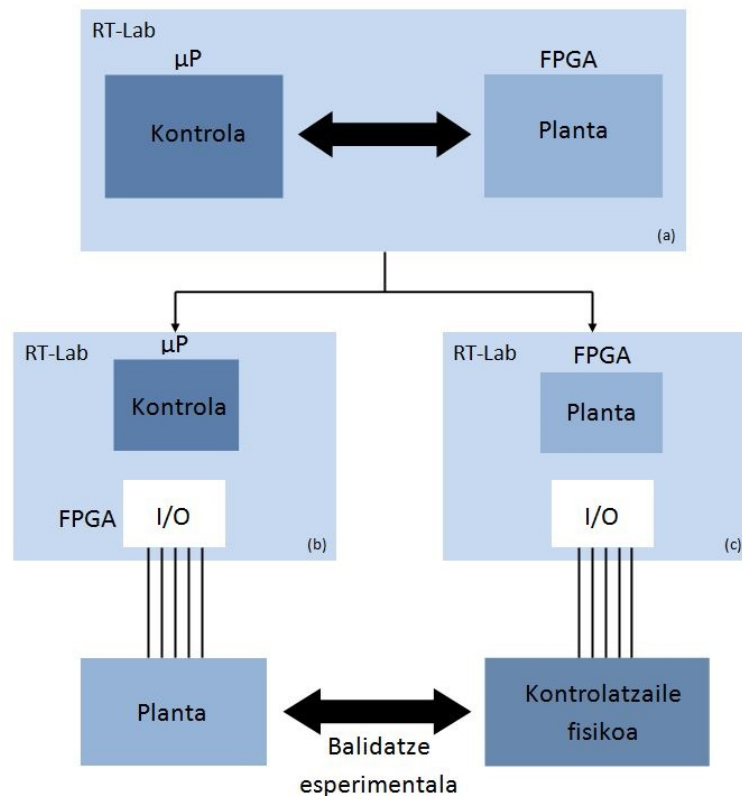
Time-step bakoitzean exekutatzen den sekuentzia hurrengoa da [36]:

1. Modeloan erabiltzen diren input aldagaiak irakurri eta outputak sortu.
2. Modeloaren eragiketa matematikoak kargatu eta ebatzi.
3. Simulazio nodoen arteko emaitzak trukatu.
4. *No operation* denbora (itxoitea), simulazio-periodoa amaitu arte.

Simulazio egoki bat gauzatzeko, exekutatu nahi den sistemaren beharrak asetzen dituen simulatzailea hautatu behar da. Horretarako, irizpide batzuk kontuan izan behar dira.

- Simulazio pausu minimoa.
- Simulatu daitezkeen sistemen konplexutasuna.
- Kontroladore fisikoekin konektatzeko I/O ataka kopurua.

Potentzia elektronikako propulzio-sistemak simulatzeko ahalik eta zehaztasunik al-tuena bilatzen da. Horregatik, modeloen eragiketa matematikoak ebazteko simulazio pausu oso txikiak bilatzen dira.



6.2. irudia: RT-Lab plataformak eskeintzen dituen denbora errealeko simulazio posibleak

Denboran zehar, horrelako sistemak simulatzeko *offline* simulazio modua erabili da, baina honek arazo handi bat aurkezten du: simulatzen den sistema CPUaren mikroprozesadorean exekutatzeko dela. Esan bezala ahalik eta zehaztasun handiena bilatzen denez, simulazio pausu minimoa definitzen da. Honek karga konputazional handia eragiten du, modeloaren eragiketa matematikoak ebazteko. Ondorioz modeloen exekuzio bakoitzak denbora asko behar izatea (batzuetan orduak) [36].

Arrazoi honegatik, aurrerago aipatuko den bezala eta denbora errealean simulatzeak dakarren abantailak kontuan hartuta, simulazioak denbora errealean egiteko aukera ematen duten gailuak garatu dira. Horietako bat Opal-RTren RT-Lab erreminta da, aurretik azaldu dena.

6.2. irudian RT-Lab simuladorearen bidez gauza daitezkeen denbora errealeko modalitate guztiak agertzen dira:

- **Denbora errealeko simulazioa**, 6.2.(a). irudia: Modeloaren kontrola CPUaren mikroprozesagailuan simulatzea, eta planta FPGA-n.
- **Kontrolagailuen prototipatze azkarrak (RCP)**, 6.2.(n). irudia: Sistemaren kontrola RT-Lab-en egiten da denbora-errealean, eta planta fisikora konektatzen

da gailuaren sarrera/irteeren bidez.

- **Hardware-in-the-Loop (HIL)** , 6.2.(c). irudia: Kasu honetan, kontroladore fisiko bat planta birtual batera konektatuta dago (denbora-erreal bermatzen duena). Honek, abantaila garrantzitsuak eskaintzen ditu, kontrolatzaileen alde aurretiko frogia ahalbidetzen baitu sistemaren modelo fisikoaren beharrik gabe (kostuen murriztapena) [38]. Gainera, simulaketak nahi beste aldiz errepikatu daitezke sistema fisikoa kalte gabe. Horrela benetako hardwarean frogatu ezin diren baldintzak simulatu daitezke, adibidez sistemak muturreko baldintzetan izango duen portaera aztertu daiteke [36].

RT-Lab oso lehiakor bihurtzen duen funtzioa, *Model-based Design (MBD)* aukera da. Honen bidez, sistema konplexuen diseinu eta modelatze prozesua erraztu eta azkartu egiten da, modelo matematikoa grafikoki egiteko aukera eskeintzen duelako [36]. Modelizazio grafikorako tresnak Simulinkeko SimPowerSystem toolboxean aurkitzen dira. Hauen bidez zirkuitu elektrikoaren diseinua egitean, automatikoki *Automatic Code Generator* er-ramintaren bidez, VHDL kodea eratzen du FPGAan simulatzeko, MBDaren abantailarik esanguratsuen lortuz [36].

MBDak eskeintzen duen beste abantaila bat da, proiektuaren hasieratik amaierara, komunikazioa eta data-trukea errazten dituen diseinu-ingurune komun bat dagoela. Gainera, diseinu zaharragoak berrerabiltzea erraza da. Prototipoa integrazioarako eta egiaztapena azkartzeko erabili daiteke, offline simulazioa eginez ezin daitekeena egin.

Proiektu hau denbora errealeko simulazioaz MBD bidez egiteak hurrengo abantailak ditu:

- Diseinu-arazoak antzemateko erraztasuna, honek suposatzen duen garapen-kostuen murriztapenarekin.
- Garapen-zikloaren iraupena murriztea.
- Frogapenean errepikagarritasuna bermatzen da, denbora-errealeko simulatzaileak denboran zehar emaitza berberak emango dituztelako, sistema fisikoek ez bezala.
- Frogapen arriskutsu edo garestiak ordezkatea.

6.3. Propultsio-sistemaren simulazio konbentzionala RT-Lab plataforman

RT-Lab plataforman propultsio-sistemaren diseinua inplementatzeko aurretik APERT taldean garatutako Matlab/Simulink modeloa erabiliko da, beharrezko aldatetarako egingo dira denbora errealeko plataformara migratzeko. Horretarako Opal-RTren eHs softwarea erabiliko da, aurrerago azalduko dena. Propultsio-sistemaren parametroak offline simulazioan erabili direna berdina izango dira.

RT-Lab-ek eskaintzen dituen simulazio modalitateak hauexek dira:

- **Simulation:** Simulazioa CPUaren mikroprozesagailuan egiten da, denbora erreal kontuan hartu gabe.

- Software synchronized: Simulazioa denbora errealean egiten da FPGA erabili gabe.
- Hardware synchronized: Modeloaren parte bat FPGAren eta bestea CPUaren mikro-prozesagailuan. Hauxe da, hain zuzen ere, propulsiio-sistemaren modeloa simulatzeko erabiliko den modalitatea.

6.4. eHS softwarea eta FPGA bidezko denbora errealeko simulazioa

Opal-RTren eHS (*electric Hardware Solver*) softwarea koma higikorreko potentzia handiko solverra da. eHS solverrak analisi nodala erabiltzen du, zirkuituko puntu bakoitzaren nodoen tentsioa eta adar bakoitzeko intentsitatea kalkulatzeko *Pejovic* metodoa¹ erabiliz, eroale matrize bat eratuz. Metodo honen bidez potentzia zirkuituko etengailuak matrize bakar baten bidez errepresentatuko dira. Horrela, korronea garraiatzen hari den etengailua inдукtantzia baliokide baten bidez adieraziko da eta, aldiz, korronea garraiatzen ez dabilena kapazitantzia baten bidez [40].

Tresna honen bidez FPGAk duten potentziala eta RT-Labek eskaintzen duen denbora-errealeko simulazioa konbinatzen dira. Modu honetan, modeloaren simulazioa banatzea posible da FPGA eta CPUaren artean. Modeloaren kontrol algoritmoa eta propulsiio-sistema CPUan exekutatu dira baina, potentzia bihurtutako zehaztasun altua behar duenez, FPGAra bidaliko da. Bien arteko datu-trukea OPAL-RTren RT-Events blokeek ahalbidetzen dute.

6.5. Propulsiio-sistemaren modeloaren implementazioa eHS bidez

Propulsiio-sistemaren offline modeloa RT-Lab plataformara migratzeko Simulinken instalatutako OPAL-RTren liburutegian dauden eHsko bloke espezifiko batzuk konfiguratu behar izan dira. Bloke hauek komunikazio guztia kudeatuko dute, eta potentzia-bihurgailuaren topologia eta motor elektrikoaren parametroak FPGAren konfigurazioa ahalbideratuko du. Hauexek dira blokeak (6.3. eta 6.4. irudiak):

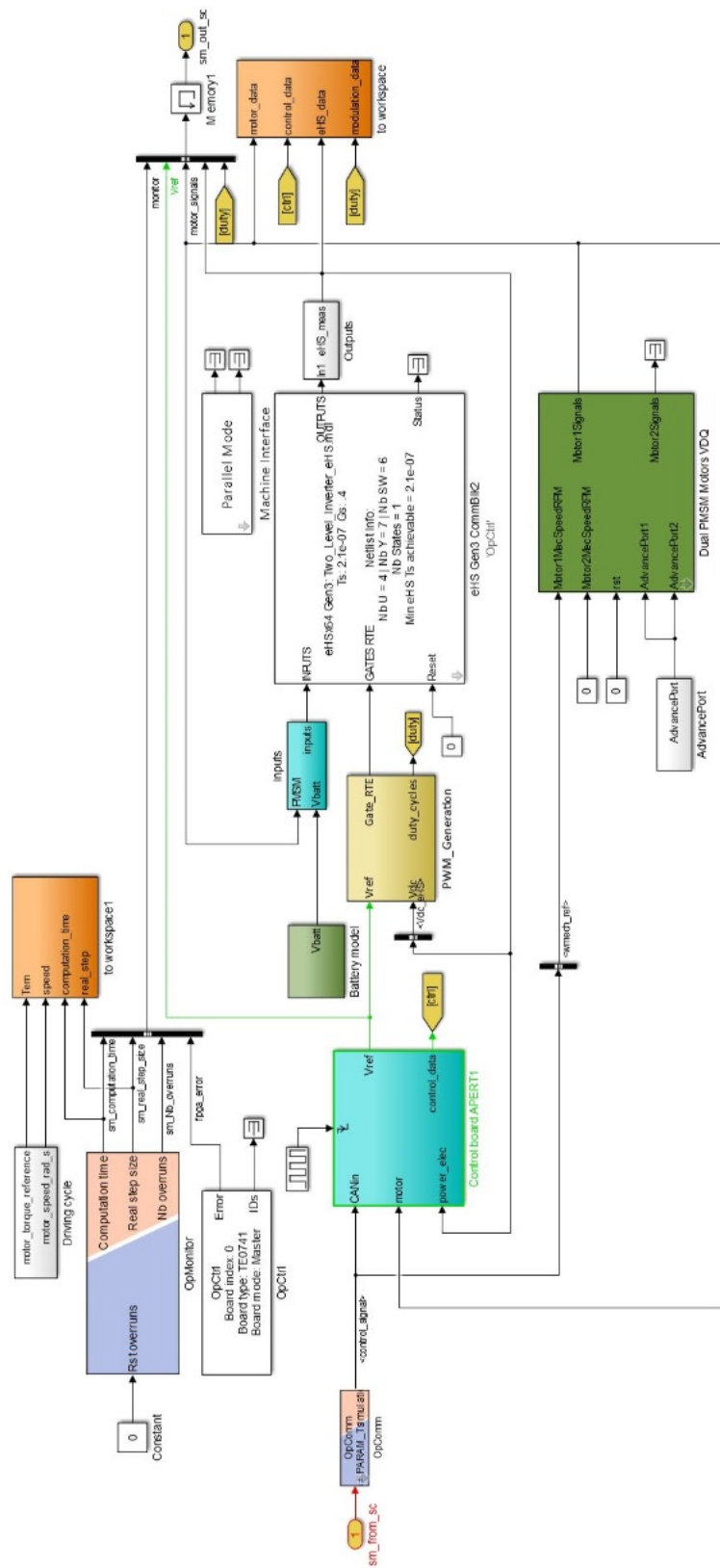
1. eHS Gen3 blokea

Bloke honen bidez aukeratzen da FPGAren simulatuko den potentzia elektronikoaren zirkuitua SimPowerSystem bidez adierazten duen .mdl fitxategia (6.5. irudia). Hurrengo sarrerak izango ditu zirkuituak: bateriaren tentsioa eta motorren hiru faseen korroneak eta 'Gates RTE' sarrerak (PWM seinalearen RT-Events motako pultsuak). Blokearen irteerak hiru faseetan neurtutako tentsioak eta korroneak izango dira.

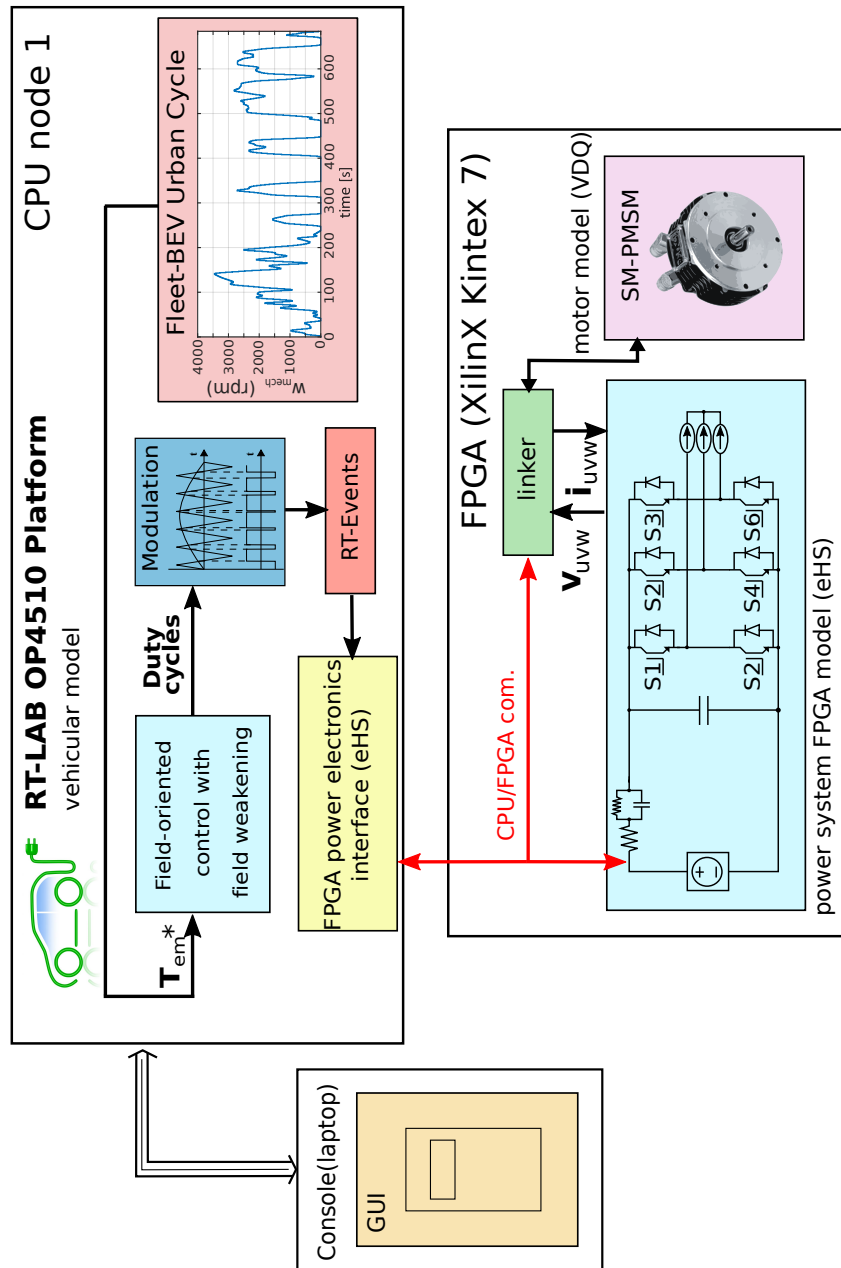
2. OpCtrl blokea

Bloke honen bidez eta hardware synchronized modua aukeratuz FPGAren modeloaren *bitstreama* kargatzen da. Gainera, Komunikazioa burutzen den bitartean

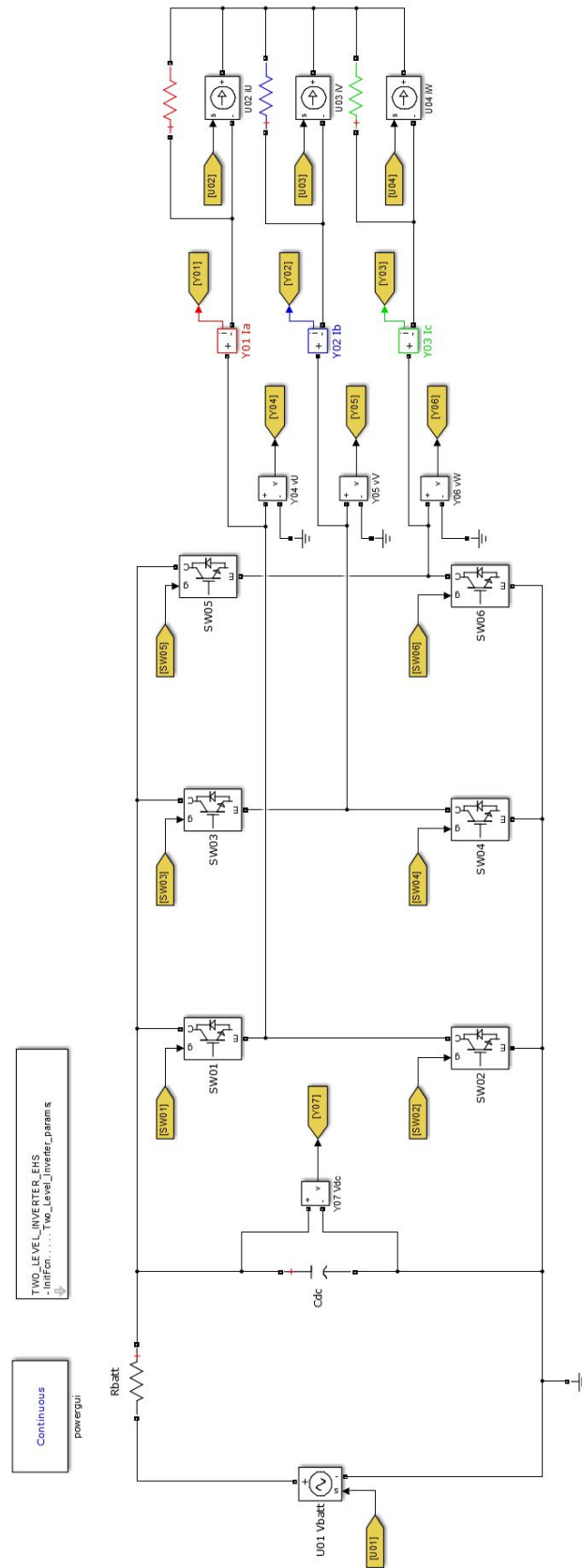
¹Chung-Wen, H. and Ruehli, A. and Brennan, P.; , "The modified nodal approach to network analysis", IEEE Transactions on circuits and systems on, vol.22, pp.504-509, 1975 [39].



6.3. irudia: Propulstio-sistemaren modeloa Opal-RTren blokeen implementazioarekin.



6.4. irudia: Plataformaren diagrama orokorra.



6.5. irudia: Potentzia elektronikoa exekutatuko den fitxategia.

datuen bat galtzen bada, galdutako datuen kopurua 'Error' izeneko irteeratik ikuskatuko da.

3. MachineInterface blokea

Bloke horren bidez potentzia-bihurgailuaren eta motorraren terminalak konektatzen dira.

4. Dual PMSM Motors VdQ

Motorra errepresentatzen duen blokea da. Bertan, erabiliko den motorraren modelo deskribatzen duten parametroak adierazten dira. Kasu honetan motor bakarria erabiliko den arren, irudian ikusi daiteke aldi berean bi motor konektatzeko aukera ematen duela.

Modeloaren azalpena

Aurreko offline simulazioan bezala, abiadura mekanikoa [rpm] eta momentu elektromagnetikoaren [Nm] erreferentziak eskuz edota zuzenean gida-ziklo estandarizatu bat aukeratuz ezarri daitezke. Datu horiek 'Control board APERT1' blokean sartuko dira.

Motorraren abiadura mekanikoa eta errotorearen posizioa adierazten duen θ_m angelua, estatorearen poloengatik biderkatuz, abiadura elektrikoa (ω_e) eta angelu elektrikoa (θ_e) eskuratuko dira. Hori eta definitutako momentu elektromagnetikoa kontuan izanik, (5.1) ekuazioaren arabera i_q^* eta i_d^* kalkulatu dira. Ondoren, i_U , i_V , i_W eta θ_m angeluari Clarke eta Park transformatuak aplikatuko zaizkie kontrolatu beharreko aldagaiak dq espazio bektorialera pasatzeko.

Hortik, i_d eta i_q aterako dira azaldutako FOC kontrola ezartzeko (6.6. irudia). Horien bidez, erreferentziako U_d eta U_q tentsioak zehaztuko dira. Tentsio horietatik abiatuz eta hirugarren harmonikoaren injekzioaren bidez U_u , U_v eta U_w zehaztuko dira. Bestalde, bektore horren modulua kalkulatu da, Vdq aldagaian gordetzeko. i_d^* , i_d , i_q^* , i_q , V_{dc} , V_{dq} 'control-data' moduan gordeko dira, eta ondoren workspacera itzuliko dira aldagaiak irudikatzen.

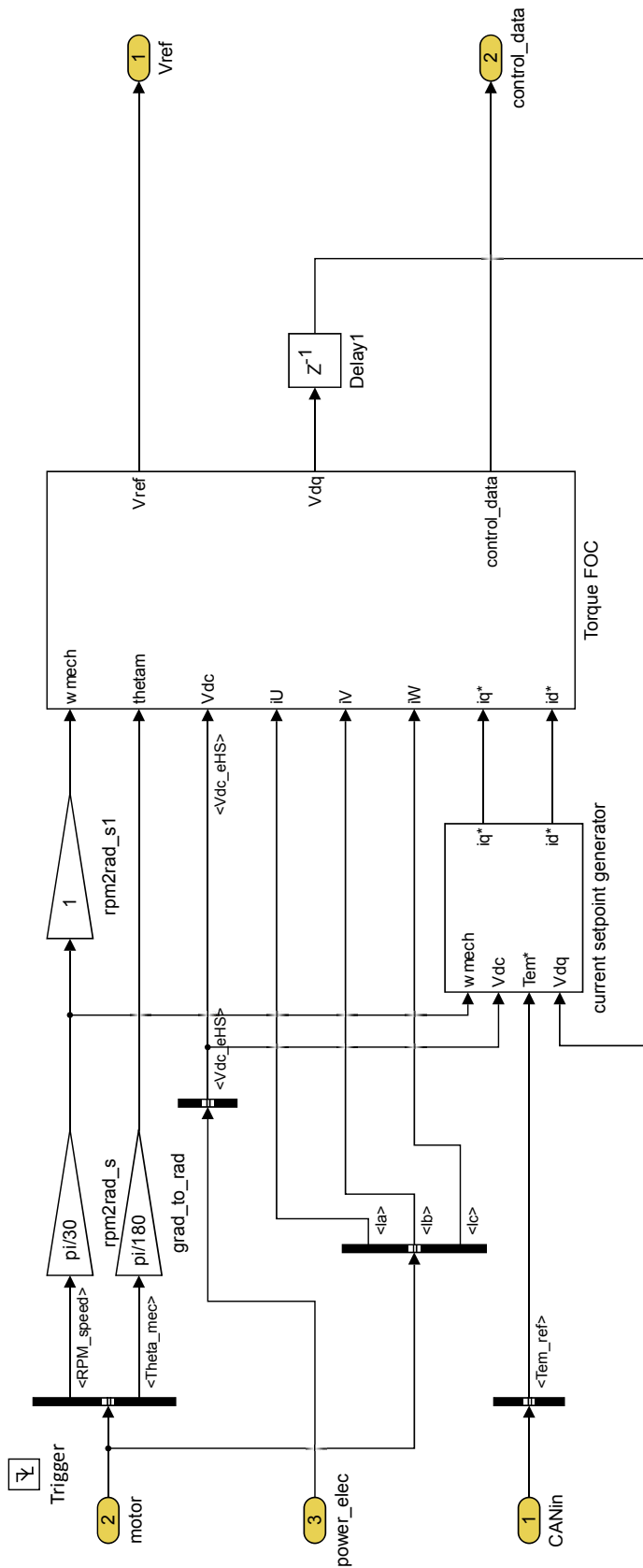
Azkenik, U_u , U_v eta U_w tentsioak eta V_{dc} eHS PWM.Generation blokean sartuko dira. Seinale horiek erabiliko dira lan zikloak eta 'Gate_RTE' seinaleak FPGAko modelora bidaltzeko.

6.6. Emaitzak

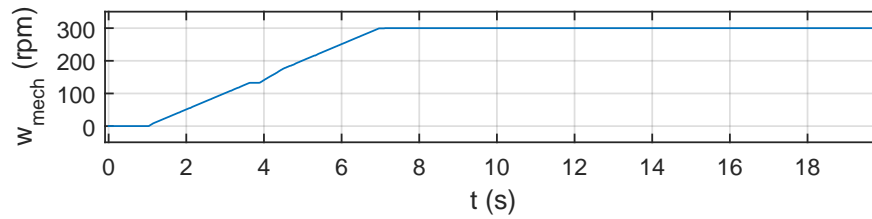
Jarraian, modelo denbora errealean simulatzean lortutako emaitzak erakusten dira. Horretarako, 300 rpm-ko abiadura angeluarra eta 50 Nm-ko momentu elektromagnetikoa ezarri dira erreferentzia modura. 6.7. irudian motorraren abiadura angeluarraren bilakaera ikusten da eta 6.8. irudian momentu elektromagnetikoa.

Modeloa balioztatzeko erabili ditugun emaitzak 6.9. eta 6.10. izan dira, hauetan ikusten da erreferentziako balioa eta modeloak denbora errealean kalkulatuako balioaren arteko konparazioa. Bi irudietan ikusten da kontrolatutako seinaleen balioek balioa erreferentziakoaren joera berbera duela.

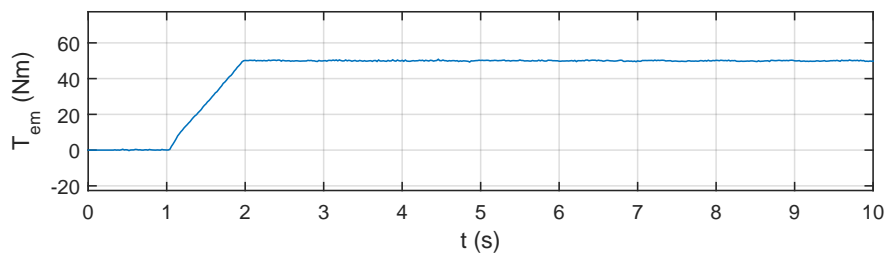
Bestalde, 6.11. irudian ikusi daiteke denbora errealeko modeloaren simulazio-pausoa eta simulazio denbora, hori da, modeloak duen karga konputazionala. Kalkuluak egiteko beharrezkoa den denbora simulazio-pausoa baino nabarmen txikiagoa denez, denbora errealeko simulazioa arazorik gabe dago bermatuta.



6.6. irudia: FOC kontrola



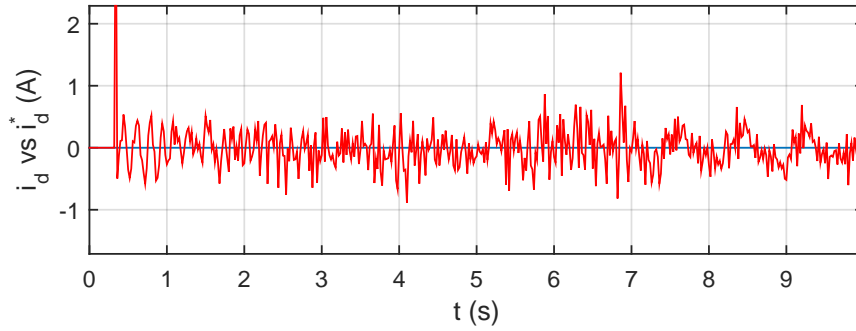
6.7. irudia: Abiadura angeluarraren bilakaera denbora errealeko simulazioan.



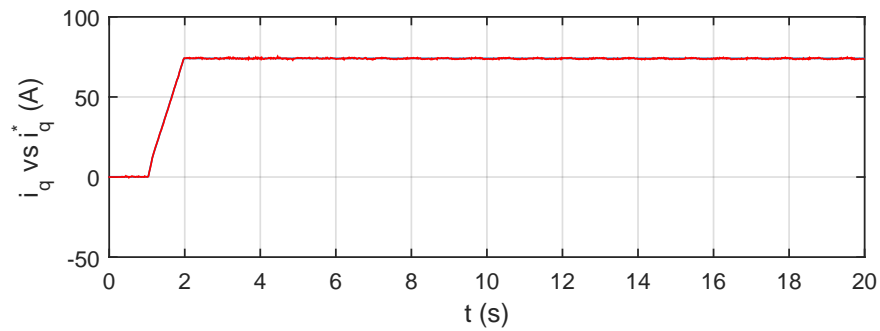
6.8. irudia: Momentu elektromagnetikoaren bilakaera denbora errealeko simulazioan.

Azkenik, 6.12. eta 6.13. irudiek denbora errealeko modeloan Fleet-BEV gida-zikloa² ezartzean lortutako kontrol-emaitzak erakusten dira, modeloak denbora tarte luzeak simulatzeko gaitasuna frogatuz. Garrantzitsua da aipatzea emaitza horiek kongresu batetara bidalitako lan batean aurkeztu direla (7. atala).

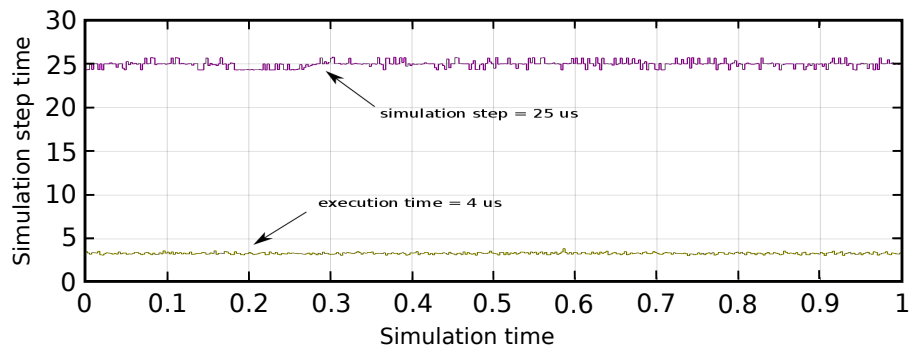
²Gida zikloa eta ibilgailuaren dinamika azaltzen duten modeloak APERT taldean egindako beste TFG batetan garatu dira.



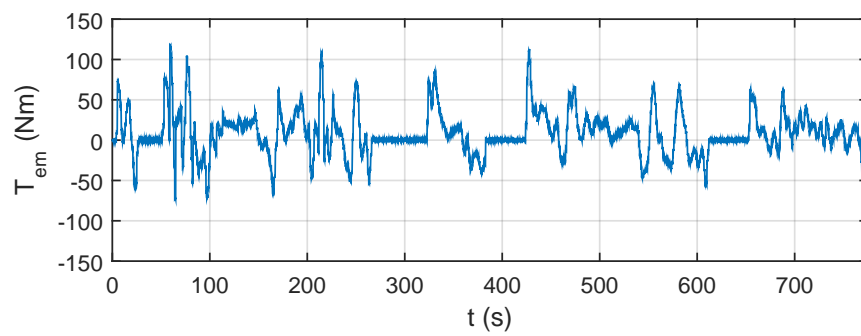
6.9. irudia: d ardatzeko korrontearen kontrola.



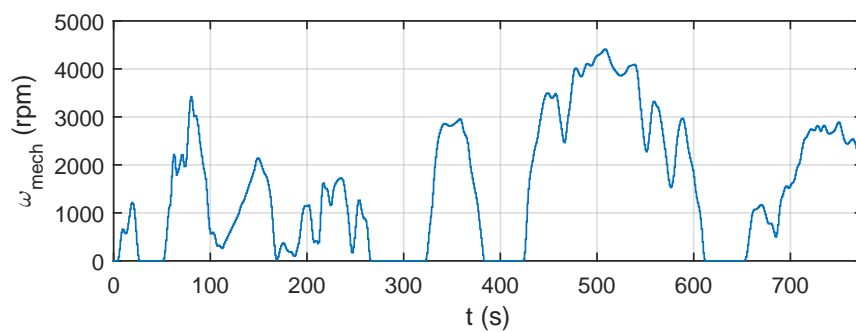
6.10. irudia: q ardatzeko korrontearen kontrola.



6.11. irudia: Denbora errealeko modeloaren simulazio pausua eta simulazio denbora.

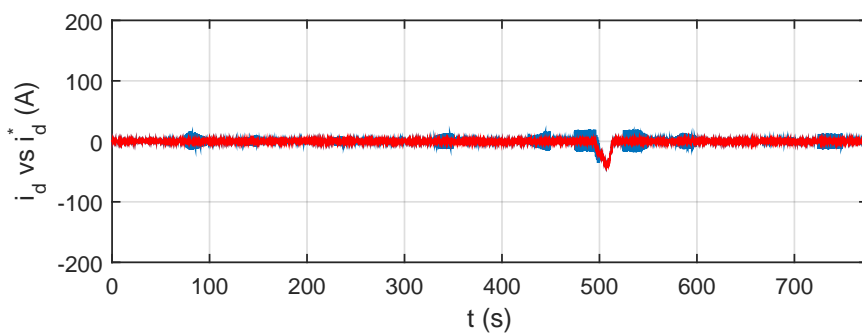


(a) Momentu elektromagnetikoaren kontrola.

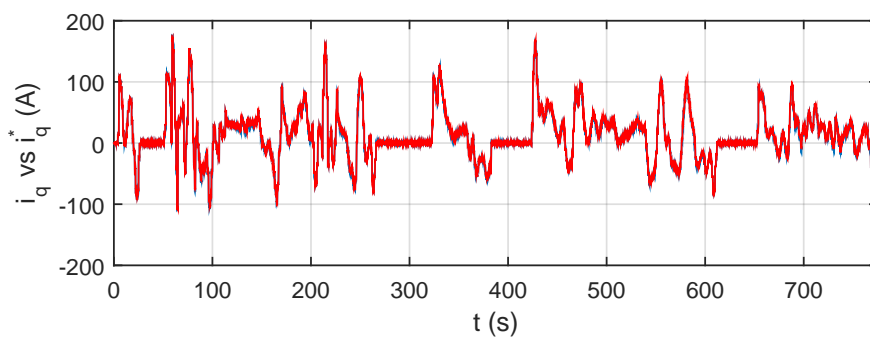


(b) Abiadura gida-zikloan zehar.

6.12. irudia: PMSMaren momentu elektromagnetikoa eta abiadura Fleet-BEV gida-zikloan zehar.



(a) i_d korrontearen kontrola.



(b) i_q korrontearen kontrola.

6.13. irudia: PMSMaren estatoreko korrontek Fleet-BEV gida-zikloan zehar.

7. kapitulua

Ekarpenak

Lan honetan egindako garapen teknikoez gain, artikulu zientifiko baten erredakzioan parte hartu da, non egindako ekarpena azaltzen den, besteak beste. Artikulu zientifiko hori nazioarteko kongresu batetara bidali da eta errebisio-prozesuan dago:

- Markel Fernandez, Edorta Ibarra, Endika Robles, Oihane Cuñado, Maite Aranguren, Iigo Kortabarria, Y. Bouzid, *FPGA and CPU based real-time simulation platform for EV propulsion system analysis under driving cycles*, Conference on Design of Circuits and Integrated Circuits 2019 (DCIS 2019), Bilbao. Data: 20/11/2019-22/11/2019.

8. kapitulua

Ondorioak

Gradu amaierako lan hau ibilgailu elektriko baten propulzio-sistemaren denbora errealeko simulazioan zentratuta dago. Horretarako, sakonki ikertu da literatura zientifikoan zein den ibilgailu mota hauen artearen egoera. Ibilgailu elektrikoak berrikuntza jarraian dirauen esparru bat da. Artearen egoeran aipatu denez, herrialde askoren helburua da etorkizun hurbilean garraioaren sektorea guztiz elektrifikatzea. Gaur egun, oraindik bide luzea dagoen den arren, aurrerapauso handiak gauzatzen hari dira simulazioaren munduan. Horregatik, egokia da ibilgailu hauen denbora errealerako simulazioa eta prototipatze azkarra ahalbideratzen duten tresnak ezagutzea eta garatzea. Arrazoi honegatik, lan honen helburua izan da propulzio-sistema bat simulatzea Opal-RTren RT-Lab erreminta erabiliz. Potentzial handia duen erreminta da eta oraindik berria den arren, oso egokia izan daiteke potentzia elektronikaren arloan ikerketak egiteko, eskaintzen dituen prestazioak, zehaztasuna eta denbora errealeko simulazioa direla bide.

Etorkizuneko ikerketei begira, propulzio-sistemaren modeloa fintzeko aldaketak egitea erraza da. Kontuan izan behar da modeloa APERT ikerkuntza taldeak erabiliko duela kontrol eta modulazio algoritmoak aztertzeko beraien ikerketetan. Amaitzeko, proiektu honetan garatutako lanari buruz esan daiteke helburu nagusia bete dela eta, emaitzen atalean erakusten den bezala, modeloaren funtzionamendua balioztatu dela.

Bibliografía

- [1] I. panel on climate change, *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*, Vol. 17, 2001, pp. 53–55.
- [2] M. González, E. Jurado, S. González, O. Aguirre, J. Jiménez, N. J., *Cambio climático mundial: origen y consecuencias*, *Ciencia UANL* 6 (3) (2003) 377–386.
- [3] *Convenio marco sobre el cambio climático*, in: *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, Vol. 6, 2009, pp. 377–386.
- [4] S. Amjad, S. S. Neelakrishnan, R. Rudramoorthy, *Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles*, *Renewable and sustainable energy reviews* (14) (2010) 1104–1110.
- [5] J. Riba, *Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (22) (2016) 159–167.
- [6] A. Poullikkas, *Sustainable options for electric vehicle technologies*, *Renewable and sustainable energy reviews* (41) (2015) 1277–1287.
- [7] T. Wellington, E. Mason, *The effects of population growth and advancements in technology on global mineral supply*, *Resources Policy* (42) (2014) 73–82.
- [8] I. Boldea, L. Tutelea, L. Parsa, D. Dorrell, *Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview*, *IEEE Transactions on industrial electronics* 61 (10) (2014) 5696–5711.
- [9] M. Hannan, F. Azidin, A. Mohamed, *Hybrid electric vehicles and their challenges: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (57) (2014) 367–379.
- [10] L. Kumar, S. Jain, *Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (29) (2014) 924–940.
- [11] D. Richardson, *Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (19) (2013) 247–254.
- [12] E. Fernández, M. Coello, *El vehículo eléctrico análisis de su infraestructura de carga y su integración a una smart grid*, in: *Congreso Internacional Sostenibilidad Energética I+D+i (iENER)*, 2015, p. s.n.

- [13] K. Jorgensen, Technologies for electric, hybrid and hydrogen vehicles: Electricity from renewable energy sources in transport, *Utilities Policy* (16) (2008) 72–79.
- [14] ¿Qué es un coche eléctrico? Azken bisita: 2018/10/05.
URL <https://www.peugeot.es/que-es-un-coche-electrico.html>
- [15] J. Urresty, J. Riba, M. Delgado, L. Romeral, Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component, *IEEE Transactions on energy conversion* 27 (1) (2012) 42–51.
- [16] O.-R. Technologies, OP4510 RT-Lab-RCP/HIL Systems, User Guide, azken bisita: 2018/10/24 (2016).
URL https://www.opal-rt.com/wp-content/themes/enfold-opal/pdf/L00161_0413.pdf
- [17] G. Boué, Rapid control prototyping solutions electrical drive, power conversion and power systems, Opal-RT Technologies, azken bisita: 2018/10/24 (2003).
URL https://www.opal-rt.com/wp-content/themes/enfold-opal/pdf/L00161_0291.pdf
- [18] A. Cooper, J. Furakawa, L. Lam, M. Kellaway, The ultrabattery a new battery design for a new beginning in hybrid electric vehicle energy storage, *Journal of Power Sources* (188) (2009) 6.
- [19] D. Xue, K. Cheng, N. Cheung, Selection of electric motor drives for electric vehicles, in: *Proc. of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, no. 170, 2008, pp. 1–6.
- [20] M. Zeraoulia, M. Benbouzid, D. Diallo, Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 55 (6) (2006) 1756–1764.
- [21] M. Benbouzid, N. Nait, An efficiency-optimization controller for induction motors, *IEEE Power Engineering Review* 18 (5) (1998) 63–64.
- [22] E. Trancho, E. Ibarra, A. Arias, N. Sabihi, I. Lopez, Ibilgailu elektrikoaren propulsiotegia: motor elektrikoak eta horien kontrola, *Ekaia Ale berezia* (2016) 61–82.
- [23] M. Khwaja, B. Fahimi, G. Suresh, A. Velayutham, M. Ehsani, Advantages of switched reluctance motor applications to ev and hev: Design and control issues, *IEEE Transactions on industry applications* 36 (1) (2000) 111–121.
- [24] S. Hashimoto, M. Sanada, S. Morimoto, Y. Inoue, Basic study on the suitable structure of a permanent magnet synchronous motor with a powder magnetic core, in: *Proc. of the International Power Electronics Conference (IPEC)*, 2014, pp. 3018–3023.
- [25] A. Dehkordi, A. Gole, T. Maguire, Permanent magnet synchronous machine model for real-time simulation, in: *Proc. of the International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, no. 159, 2005.

- [26] V. Ramsden, P. Watterson, G. Hunter, J. Zhu, W. Holliday, H. Lovatt, W. Wu, B. Kalan, S. Collocott, J. Dunlop, P. Gwan, B. Mecrow, High-performance electric machines for renewable energy generation and efficient drives, *Renewable Energy* 58 (5) (2001) 1576–1585.
- [27] K. Smith, Heavy rare earths, permanent magnets and renewable energies: An imminent crisis, *Energy Policy* (79) (2015) 1–8.
- [28] E. Machacek, N. Fold, Alternative value chains for rare earths: The anglo-deposit developers, *Resources Policy* (42) (2014) 53–64.
- [29] Hitachi, Highly efficient industrial 11 kw permanent magnet synchronous motor without rare-earth metals n.d., in: *Proc. of the Green Car Congress, 2012*, azken bisita: 2018/10/9.
- [30] K. Binnemans, P. Jone, B. Blanpain, T. Gerven, Y. Yang, A. Walton, M. Buchert, Recycling of rare earths: a critical review, *Journal of Cleaner Production* (51) (2013) 1–22.
- [31] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Burgos, Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 87 (1) (2006) 130–135.
- [32] E. Tranco, E. Ibarra, A. Arias, I. Kortabarria, Control óptimo de par para máquinas synrm aplicadas a vehículo eléctrico, in: *Proc. of the*, 2017.
- [33] P. Guglielmi, M. Pastorelli, G. Pellegrino, A. Vagati, Position sensorless control of permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor, *IEEE Transactions on Industry Applications* 40 (2) (2004) 615–622.
- [34] A. Arias, J. Caum, R. Grio, Moving towards the maximum speed in stepping motors by means of enlarging the bandwidth of the current controller, *Mechatronics* 40 (2016) 51–62.
- [35] L. Liyi, T. Guangjun, L. Jiayi, K. Baoquan, An optimal pulse width modulation method for high-speed permanent magnet synchronous motor, in: *IEEE (Ed.), Proc. of the International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, 2013, pp. 237–244.
- [36] J. Belanger, P. Venne, J.-N. Paquin, The what, where and why of real-time simulation, *Opal-RT Technologies* (2010) 37–49.
- [37] W. Hermann, Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks, *IEEE Transactions on power apparatus and systems* 88 (4) (1969) 388–399.
- [38] C. Dufour, S. Abourida, Belanger, Hardware-in-the-loop simulation of power drives with rt-lab, in: *Proc. of the Power Electronics and Drives Systems (PEDS)*, 2005.
- [39] H. Chung-Wen, A. Ruehli, P. Brennan, The modified nodal approach to network analysis, *IEEE Transactions on circuits and systems* 22 (6) (1975) 504–509.

- [40] P. Pejović, D. Maksimović, A method for fast time-domain simulation of networks with switches, *IEEE Transactions on power electronics* 9 (4) (1994) 449–456.

II. atala

LANAREN GARAPENEAN JARRAITUTAKO METODOLOGIA

9. kapitulua

Eginbeharren, faseen, ekipamenduaren eta prozeduren deskribapena

Jarraian, lanaren helburua lortzeko beharrezkoak diren eginbeharrak eta lortu beharreko mugarriak aipatzen dira.

9.1. Espezifikazio eta eskakizunen definizioa

- Deskribapena: Ataza honetan propulzio-sistemaren modeloak izango dituen baldintzak finkatuko dira.
- Zeregina: Proiektuaren baldintza funtzional guztiak zehaztea.
- Entregagarriak: Espezifikazioen dokumentua (proiektuaren zuzendariak entregatu beharrekoa).

9.2. Artearen egoera

- Deskribapena: Motor elektrikoak aztertu eta aplikaziorako egokiena zein den ezagutzea eta bere kontrola ulertzea. Horretarako, literatura zientifikoa erabiliko da, hala nola unibertsitateko bibliografia zientifikoaren datu-baseetarako harpidetza garrantzitsuenak (IEEEExplore eta Scopus).
- Zeregina: Inplementaziorako arkitektura ongi ezagutzea.
- Entregagarriak: Artearen egoerari buruzko txostena, gradu amaierako lan honetan kapitulu gisa agertzen dena.

9.3. Formakuntza

- Deskribapena: Proiektu hau aurrera eramateko ezinbestekoa da aplikazioa garatzeko beharrezkoak diren laneko tresnak ezagutzea. Garapena Model Based Design (MBD)

bidez egiten denez, formakuntzaren helburua Matlab/Simulink eta Opal-RTren OP4510 simulazio tresnetan trebetasunak garatzea da.

Horrez gain, fase honetan motor elektrikoaren inguruko kurtso espezifiko bat jaso da (APERT ikerkuntza-taldean antolatutako barne-kurtso bat). Kurtso horretan motorren eta horien kontrolaren inguruko hainbat kontzeptu landu dira.

- Zeregina: Trebetasun aurreratuak lortzea Matlab/Simulink eta Opal-RTren OP4510 plataformen inguruan.
- Entregagarriak: Ez dago.

9.4. Modelizazioa

- Deskribapena: Modeloa Matlab/Simulink simulazio ingurunean eskuratuko da eta OpalRTren OP4510ra migratuko da.
- Zeregina: PMSM motore sinkronoaren modeloaren eskuraketa eta ulertzea Simulink-en, azkenik RT-Lab plataformara migratuz.
- Entregagarriak: Egindako modeloak eta jarraitutako pausuen txostena (dokumentuan zehar azalduta).

9.5. Simulaketa eta egiaztapena

- Deskribapena: Offline eta denbora errealeko modeloen simulaketa
- Zeregina: Emaitzan lortzea eta balioztatzea.
- Entregagarriak: Emaitzen simulazio-emaitzak (dokumentuan zehar azalduta).

9.6. Emaitzak eta ondorioak

- Deskribapena: Ereduak simulatzean lortutako emaitzak aztertuko dira eta horien inguruko ondorioak atera. 1. eginbeharrean ezarritako espezifikazioak lortu direla konprobatu.
- Zeregina: Espezifikazioak bete direla egiaztatuz.
- Entregagarriak: Ondorioen txostena.

9.7. Dokumentazioa

- Deskribapena: Gradu amaierako lana dokumentatzea du helburu betebeharrak honek. Hurrengo pasuak bete ahala egingo da.
- Zeregina: Gradu amaierako lana dokumentatu.
- Entregagarriak: Gradu amaierako lanaren dokumentua.

10. kapituluu

Gantt Diagrama

11. kapitulua

Proiektuaren aurrekontua

11.1. taula: Barne orduak.

Langileak	Ordu tasa (/h)	Orduak (h)	Kostua	
Ingeniari Teknikoa	32	320	10.240,00	
Proiektu zuzendaria	64	50	3.200,00	
			Guztira	13.440,00

11.2. taula: Amortizazio taula.

Inbert./Akt. finkoa	Hasierako kostua (euro)	Bizitza erabilgarria (urte)	Erabiltze denbora (aste)
Ordenagailua	800	4	24
Latex	115	1	23
Matlab/Simulink	1980	3	12
OP4510	28500	4	16
			Guztira

11.3. taula: Proiektuaren kostu osoaren taula.

Kontzeptua	Kostua
Eskulana	800
Gastu suntsikorra	115
Amortizazioak	2487,76
OP4510	28500
Guztira	31902,76