

POTENTZIA BAXUKO SORGAILU EOLIKO MONOFASIKO BATEN DISEINUA ETA MUNTAIA

Markel Etxabe, Ioritz Iribar, Jon Ander Juaristi, Ander Merino, Axier Zeberio, Unai Oyarzabal

Laburpena— Krisi klimatikoa eta baliabide energetikoen eskasia nagusi diren mundu horretan, gero eta gehiago dira arazo horri aurre egiteko ateratzen diren ideiak. Honen aurrean guk potentzia baxuko sorgailu eoliko bat diseinatu dugu. Horretarako 37W sortzen dituzten pala batzuk diseinatu ditugu. Gainera, funtzionamendu egokia bermatzeko haien analisi mekanikoa ere gauzatu dugu. Ondoren, potentzia hori trifasikoa denez, monofasikora pasa artezgailu baten bidez eta DC/DC boost bihurgailu bat erabiliz 42V tentsio konstante bat lortu da. Horretarako MPPT kontrola aplikatu dugu, sarrerako eta irteerako korronte eta tentsioak neuriaz eta egokitzapen zirkuitu baten bitartez MyRioan txertatuz. Ondoren, 42V tentsio finko hori bus DC bezala baliatuz inbertsore baten bitartez KZ tentsio eta korronte horiek KA izatera pasa ditugu. Horretarako kontrola ere MyRio bitartez egin dugu, bi PWM seinale lortuz kontrafasean. Ondoren, inbertsorearen irteeran induktantzia bat ezarri da seinale sinusoidalda lortu ahal izateko, horrela 50Hz duen korronte eta tentsio sinusoidalak lortu ditugu. Azken pausua, guk aplikatu ez badugu ere, bihurgailu bat aplikatzea izango litzateke 230V lortu ahal izateko, horrela guk sortutako energia sarean txertatu ahal izango genuke.

Hitz gakoak— Sorgailua, Eolikoa, MPPT, MyRio, Boost, FPGA, PLL, Reynolds, airfoil.

I. SARRERA

A. Testuinguru

Krisi klimatikoa eta baliabide energetikoen eskasia premiazko gizarte-arazoak diren mundu horretan, ezinbestekoa da turbina eolikoak bezalako teknologia jasangarriak ezartzeari. Gizarteak klima-aldeketa arintzeko eta etorkizun iraunkorra bermatzeko irtenbideak bilatzen dituen bezala, turbina eolikoek energia-iturri garbi eta berriztagarri bat aprobetxatzeko aukera ematen dute, karbono-isuriak murritzenean eta ingurumen-kutsaduren aukako borrokan nabarmen lagun dezakeena. Testuinguru horretan, turbina eolikoko proiektu baten garapena aurrerapen teknologikoa izateaz gain, gaur egun hainbeste behar dugun gizarte- eta ingurumen-erantzukizunarekiko konpromisoa ere bada.

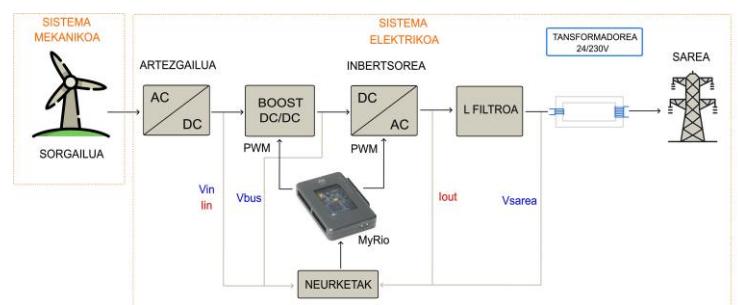
B. Helburuak

Proiektu honen helburu nagusia potentzia baxuko aerosorgailu baten diseinua, muntaia eta sarerako konexioa gauzatzea da. Horrez gain, helburu horretara iriseko, azpi helburu batzuk ere finkatu ditugu. Besteak beste palen bidez

gutxienez 30W sortzea, sorgailuak gutxienez 300W sortzen dituela frogatzea, parametroak karakterizatzeko garaian %10ko errore maximoa egitea, korronte eta tentsio egokitzapenak egin ondoren %2ko zehaztasuna izatea, sorgailuaren potentzia teorikoaren gutxienez erdia lortzea haize tunelean, eta garapen jasangarrietako helburuetan inpaktu positiboa izatea.

C. Produktuaren deskribapena

Lehenik eta behin, sorgailuaren palak diseinatu dira gure aplikazioaren neurri eta angelu optimoak definituz, ahalik eta potentzia gehien lortu ahal izateko. Ondoren, pala hauen bidez PMSG motor bat birarazi dugu energia mekaniko hori energia elektriko bilatzeko. Sorgailu honek seinale trifasikoa alterno bat emango digu, beraz, artezgailu baten bitartez DC seinale batera itzuliko dugu. Ondoren, sarrerako tentsioa irakurri eta MyRio-an sartu ondoren egokitzapen zirkuituaren bidez, gure kontrolagailuak PWM seinale bat sortuko du kasuan kasuko duty balioa kalkulatuta irteeran 42V ateratzeko, inbertsoreko bus tentsioa 42V izan behar delako. Ondoren, sareko tentsioa eta korrontea neurrtuta, PLL bitartez MyRio kontrolagailuaren bitartez bi PWM seinale lortuko ditugu inbertsorean sartzeko, biak aurkako fasean. Horrela, gure seinalea sarekoarekin bat egitea lortuko dugu, eta gure seinalea sarean txertatu ahal izango dugu.



Irudia 1. Sistemaren eskema orokorra

D. Garapen jasangarrietako helburuak

Gure proiektuak inpaktu zuzena du 7.2 eta 7.3 helburuekin, energia iturri jasangarriak eta ez-kutsagarriak oinarri dituztelarik.

Eragin positiboa izango dugu 11.6 helburuan, airearen kutsadura gutxituz eta per capita ingurune-inpaktu negatiboa gutxituz.

12.2 helburuan ere eragin zuzena dugu energia iturri naturalen erabilpen jasangarria bultzatzuz, eta 12.5 helburuan gure proiektuak ez duelako hondakinik sortuko energiaren sorkuntzan,

Impaktu negatiboa izango du 15 helburuaren azpi-helburu gehienekin, ekosistema naturalen kontserbazioa baitu helburu, eta gure proiektua eskala handira eramateko garaian, turbinak instalatzeko ekosistemak suntsitu beharko baitira.

II. PALAREN DISEINU AERODINAMIKOA

Sorgailu eoliko baten oinarritzko osagaia palak dira, hauek baitira haizearen energia aprobetxatzen dutenak, sorgailuaren ardatzean momentu mekanikoa sortzeko. Atal honetan bi aplikazio motatarako palak garatu dira: potentzia handikoa eta mini-eolikoa. Prozesu honetan landutako alderdi nagusien artean palen optimizazio prozesua, kontrola errendimendu optimoa lortzeko eta haize-patroien azterketa denboran zehar. Hala ere, inprimatuko den pala txikia denez, diseinu prozesu honen deskribapena izango da gehien aztertuko dena.

A. Palaren optimizazio prozesua

Lehenik eta behin, profil aerodinamiko (*airfoil*) egokiena hautatu da arretaz, helburu nagusia *lift* (sostengu) eta *drag* (erresistentzia) indarren arteko proportzioa ahalik eta gehien maximizatzea delarik ($\frac{C_L}{C_D}$). Hala ere, profil aerodinamiko egokia aukeratzeko erabilitako irizpideak ez dira uniformeak izan aplikazio guztietan. *Airfoil*-ak [1] (palaren forma) hautatzeko, NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) geometriadun *airfoil*-ak erabili dira, hauek baitira beharrezko lan-baldintzetara ondoen egokitzen direnak.

Reinolds balioak beheko formularen (1) bidez zehaztu dira, non w palaren abiadura erlatiboa den, L kordaren balioa eta U airearen biskositate zinematikoa, $1,4207 \cdot 10^{-5}$ balioarekin.

$$Re = \frac{w \cdot L}{U} \quad (1)$$

Balio hauek aldakorrak izango dira, palaren puntu bakoitzak abiadura erlatibo eta korda zabalera ezberdinak izango baititu. Zehazki, bujetik hurbilago egon ahala, korda zabalagoa eta abiadura erlatibo baxuagoa lortuko dira; bujetik urrundu ahala, berriz, korda estuagoa eta abiadura erlatibo haundiagoa eskuratuko dira. Eraso-angelua palaren luzeran zehar berdina izango da, baina abiadura erlatiboa aldatu egiten denez, palak *twist* angelu aldakor bat izango du, palan zehar haizearen indar máximoa posiblea aprobetxatzeko.

Behin polarrak sortu eta *airfoil*-a hautatuta, eraso angelu eta TSR (*Tip Speed Ratio*) optimoetarako pala optimizatu da.

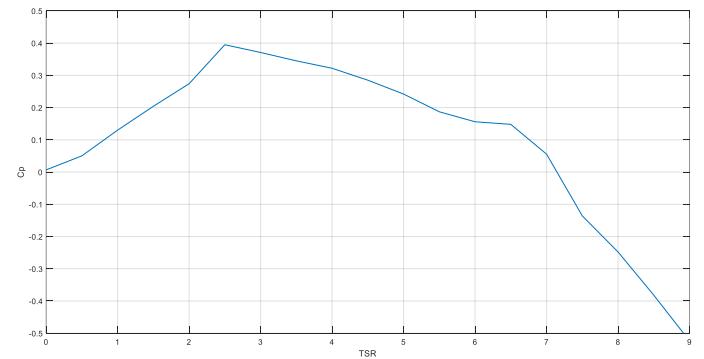
$$TSR = \frac{w \cdot R}{c} \quad (2)$$

TSR-aren balio honek pala ahalik eta gehien optimizatzen laguntzen du.

Potentzia baxuo pala diseinatzerako garaian honako baldintza hauek izan dira kontuan: Erratoreko abiadura nominala 500 rpm izan dadila, haize abiadura nominala 7 m/s eta korda maximoa 0,14 m.

Pala txikiaren kasuan, lortutako *Reinolds* balioak $5.94 \cdot 10^4$ eta $6.74 \cdot 10^4$ artean dabilta. Palaren seko ezberdinak *Reinolds*-en antzekotasunaz ohartuz, bataz besteko balioa hartza kontuan erabaki da, $6,097 \cdot 10^4$ delarik. *Reinolds* balio hontaz baliatuz aukeratutako *airfoil*-a NACA 4412 izatea erabaki da, 10° -ko eraso angelu optimoaz. TSR-ari dagokionez, 3,74-eko balioa ezarri da.

Horiek horrela, beheko irudian [Irudia 2. Cp kurba definitiboa TSR-arekiko] beharrezko optimizazio eta doikuntza guztiak egin ondoren lortutako behin betiko diseinua ageri da, puntu nominaleko C_p balioa 0,395 delarik.



Irudia 2. Cp kurba definitiboa TSR-arekiko

B. Potentzia altuko palaren diseinua

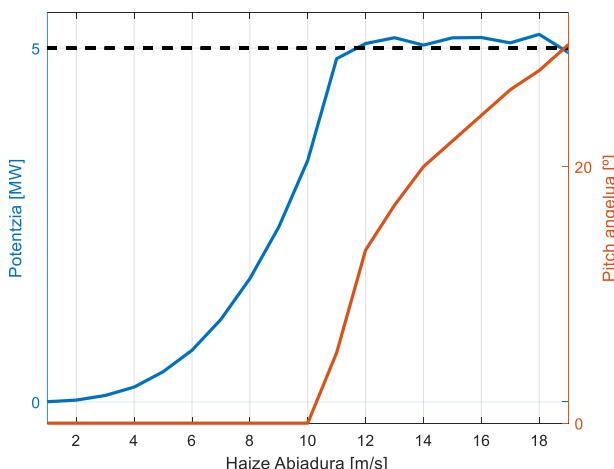
Behin potentzia baxuko turbinaren diseinutik abiatuta, potentzia altuko turbinaren diseinua garatu da, honako baldintza hauek kontuan hartu direlarik: Potentzia nominala 5 MW izatea, erratoreko abiadura 12,1 rpm, korda maximoa 4,7 m eta haize abiadura nominala 12 m/s izatea.

Pala haundiaren kasuan, txikiarekin eginda bezala bataz besteko *Reinolds* balioa erabiltzea erabaki da, $6,38 \cdot 10^6$ -ko balioaz validatuz.

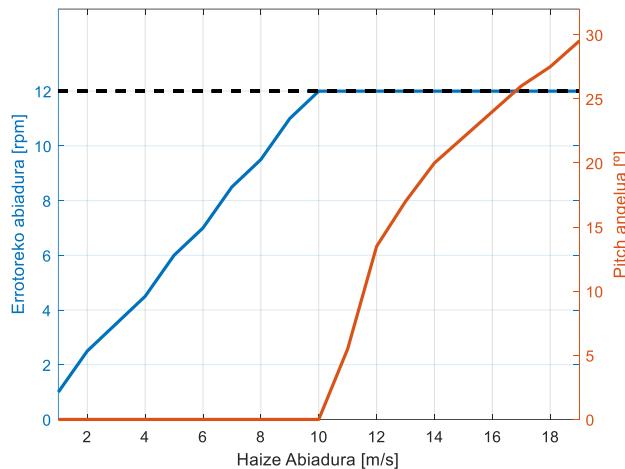
Reinolds honekin eta potentzia baxukoarekin jarraitutako prozesu bera jarraituz, kasu honetarako erabiliko den *airfoil*-a NACA 6412 izango dela erabaki da, 5° -ko eraso angeluaz.

C. Pitch kontrola

Turbina eoliko batek bere puntu izendatua gainditzen duten haize-abiaduretan jarduten duenean, osagaiei, sorgailuari barne, kalte egiteko arriskua nabarmen handitzen da. Palen pitch angelua doitza erabakigarria da puntu horretan. Haize handiko baldintzetan energia eolikoaren bilketa mugatzean, ekipoa babesten da eta turbina diseinu nominaleko parametroen barruan mantentzen da, haren osotasuna eta errendimendu optimoa ziurtatuz.



Irudia 3. Potentzia pitch kontrolarekin.



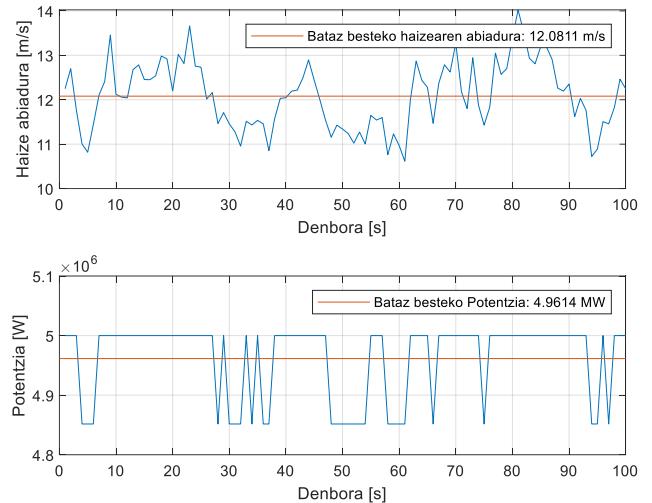
Irudia 4. Abiadura pitch kontrolarekin.

Goiko irudietan [Irudia 3. Potentzia pitch kontrolarekin. eta Irudia 4. Abiadura pitch kontrolarekin.] ikusten den moduan eta aurretik aipatuta bezala, sorgailuaren potentzia nominala (5 MW) lortzen denean, *pitch* angeluaren kontrola sartzen da jokoan. Sorgailuaren ahalmen izendatua ez gainditzeko, haizearen abiadura handitzen den heinean, jaitsi egiten da haizetik lortutako momentua, eta horrek eragin negatiboa du errendimendu aerodinamikoan. Hala ere, biraketa abiadura 12 m/s-tan mantentzen da, eta beraz, potentzia bere 5 MW nominaletan. Garranzitsua da azpimarratzea haizearen abiadura handitzen den heinean *pitch* angelua norabide negatiboan handitzen dela, nahiz eta grafikoetan balio absolutuan agertzen den.

D. Haize patroien analisia denboran zehar

Aurreko simulazioetan kontuan hartu ez den aldagai bat dago: haizearen gorabeherak errealityean, bai denbora bai espazio aldakortasunean. Aurreko kasuetan, haizearentzako balio espezifikoak ezarri dira. Orain, helburua denboran zehar potentzia lortzea izan da; izan ere, haizearen portaera aurreikustean errealityean bat-bateko sorkuntza zenbatestea ahalbidetuko luke. Hurrengo irudian [Irudia 5. Haize eta potentzia profil temporalak.] ikus daitekeenez, potentzia 5

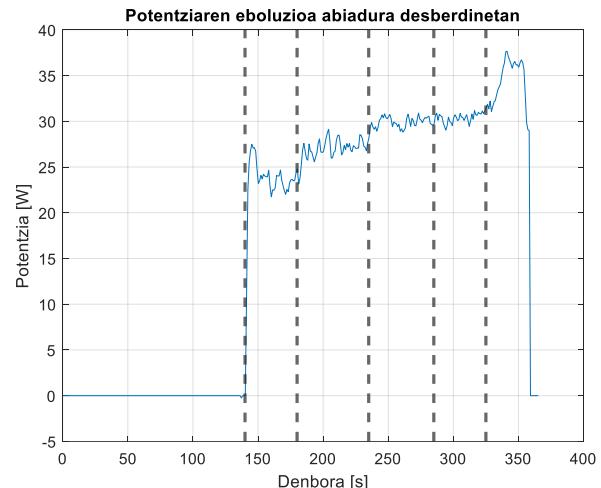
MW-ra mugatzen da haizearen abiadurak 12 m/s-ko langa gainditzean.



Irudia 5. Haize eta potentzia profil temporalak.

E. Haize tuneleko froga experimentalak

Behin potentzia txikiko palak SolidWorks-en diseinatu eta inprimatuta, MGEP-ek garatutako haize tunelean frogak esperimentalak egin dira, haize-abiadura desberdinak jasanez nola biratzen duten palek eta zenbat potentzia sortzeko gai diren ikusiz.



Irudia 6. Potentziaren eboluzioa abiadura desberdinetan.

Goiko irudian [Irudia 6. Potentziaren eboluzioa abiadura desberdinetan] ikus daiteke potentziaren eboluzioa. Ikus daitekeenez, abiadura ezberdinako etapatan banatuta dago frogak: Lehenengo etapako tunela geldirik dago, bigarren etapako, berriz, 5,565 m/s (20Hz)-ko abiadura du, hurrengoan 6.121 m/s (22Hz), laugarrenean 7,23 m/s (25Hz), ondorengoan 9 m/s (30Hz) eta azkenik 10 m/s (35Hz), 37 W-tara iritsiz.

III. NEURKETEN EGOKITZAPENAK

MPPT eta inbertsorearen kontrolak egin ahal izateko, korronte eta tentsio neurketak MyRio kontrolagailuan sartu

behar dira. MyRioak 0-5V sarrera duenez, irakurritako tentsio eta korronteak balio horietara egokitu behar dira ondoren kontrola aplikatu ahal izateko. Horretarako bi egokitzapen zirkuitu prestatu dira, bat korrontearentzat eta bestea tentsioarentzat.

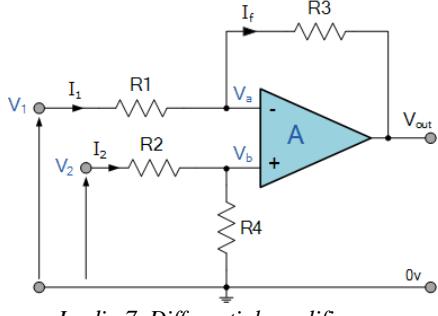
A. Korrontearen egokitzapena

Lehenik 0,01 ohm-ko shunt erresistentzia bat jarrita erortzen den tentsioa irakurtzen dugu. Horrek 200mV-ko tentsio bat sortuko du, eta tentsio hori optoakopladorrean sartzen da. Irteeran 1,5V-ko tentsio differentzia bat sortuko digu horrek, eta hemendik aurrera operacionalekin hasten gara lanean.

B. Tentsioaren egokitzapena

Optoakopladorera sartuko den tentsioa 0-2V artean egon behar da. Hori kontuan izanda, eta tentsio differentziala markatuko duen erresistentzia 10K ohm dela finkaturik, goiko erresistentzia 200K ohm dela definitu dugu. Horrela, gure tentsio maximoa 42V izango da mikroan 5V sartzeko, eta hortik aurrera irteerako tentsio differentziala dugunean, berriro ere operacionalekin lan egingo dugu korronte egokitzapenean bezala.

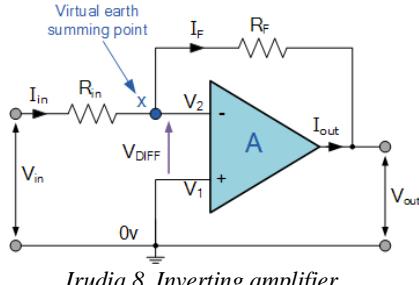
Lehenik differential amplifier bat aplikatuz, tentsio differentzia hori GND-rekiko 5V tentsio bat sortzeko.



Irudia 7. Differential amplifier.

$$R_1 = R_2 / R_3 = R_4 / V_{\text{out}} = \frac{R_3}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (3)$$

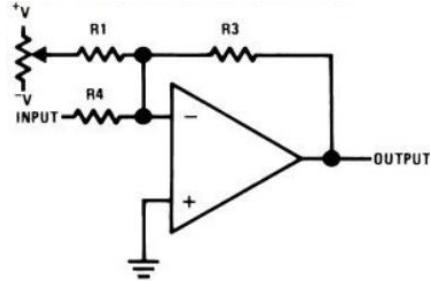
Ondoren, inverting bat aplikatzen zaio, hurrengo zirkuitua jarraituz.



Irudia 8. Inverting amplifier

$$V_{\text{out}} = -V_{\text{in}} \frac{R_f}{R_{\text{in}}} \quad (4)$$

Azkenik, zirkuituan egon daitezkeen offsetak etab. Konpentsatzeko, inverting+offset irabazpen bat aplikatzen zaio gure seinalea 0-5V artean dagoela eta beharrezko balio zehatzta duela ziurtatzeko.



Irudia 9. Inverting+offset amplifier.

$$V_{\text{out}} = -\left(\frac{R_3}{R_1} V_1 + \frac{R_3}{R_4'} V_2\right) \quad (5)$$

IV. ENERGIA ELEKTRIKOAREN SORKUNTZA

A. Aurreprestaketa

1) PMSG sorgailuaren karakterizazioa

Generadore eoliko baten karakterizazioa ez da soilik potentzia kurbaren determinazioa, baita parametro elektriko funtsezkoak estimatzea ere, hala nola erresistentzia, induktantzia, fluxu magnetikoa eta polo pareak. Jarraian, parametro hauek estimatzeko erabiltzen diren metodoak azaltzen dira:

- Korronte Zuzena (DC): Erresistentzia (R) Ohmen Legea erabiliz kalkulatzen da sorgailuaren 2 fasetan.
- Zirkuitu irekia: Polo pareak (p) kalkulatzeko abiadura (N_m) eta sorgailuko zati elektrikoaren frekuentzia (f_s) neurten dira:

$$N_m = \frac{60f_s}{p} \quad (6)$$

Aldiz, fluxu magnetikoa (Ψ_{pm}) kalkulatzeko, tentsioa (E_o) ere neurten da:

$$\Psi_{pm} = \frac{E_o}{p\Omega_m} \quad (7)$$

- Zirkuitu itxia: Irteerako korrontea, frekuentzia eta abiadura neurten dira zirkuitu irekiko baldintza berdineta (E_o tentsioa berdina izateko), eta horrekin batera, tentsioa eta korrontearekin inpendantzia (Z_l) jakin harilaren erreaktantzia (X_l) jakin daiteke:

$$X_l = \sqrt{R^2 - Z_l^2} \quad (8)$$

eta azkenik neurutako frekuentziaren abiadura angeluarretik (ω) abiatuz, induktantzia (L) ater daiteke:

$$L = \frac{X_l}{\omega} \quad (9)$$

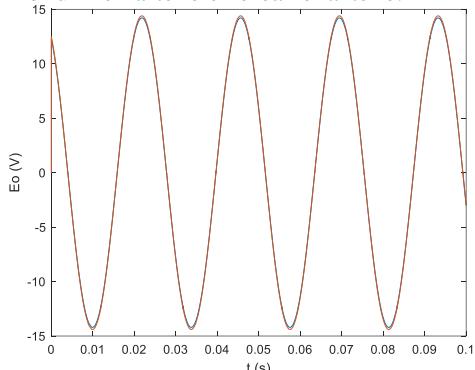
Beraz, lortutako parametroen balioak ondorengoak dira:

TAULA I

Parametroa	Balioa
p	6
ψ	0,03108 Wb
L_s	1,804 mH
R_s	0,605 Ω

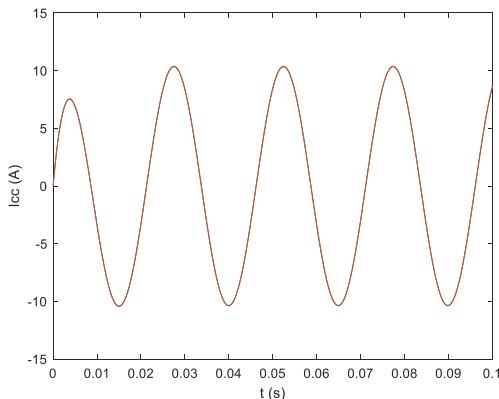
Bestalde, parametroak ondo daudela ziurtatzeko, entsegu berdinak simulatu dira Simulinkeko PMSG bloke batekin, lortutako parametroak sartuta:

- Zirkuitu irekia: Egoera zehatz batean Simulinken lortutako tentsio uhina eta errealitateko uhina bateratu dira ondorengo Irudia-n ageri den bezala, bi uhinen arteko errorea zehazteko.



Irudia 10. Zirkuitu irekiko testean lortutako seinale sinusoidala agertzen dira. Urdinez, Simulinkeko tentsioa agertzen da eta laranjaz, errealitatean 420rpm-tan neurtutako tentsioa (tentsio pikoan oinarrituta). Tentsio pikoan differentzia 0.0785V-koa da hain zuzen ere, eta errorea %1.335-koa da.

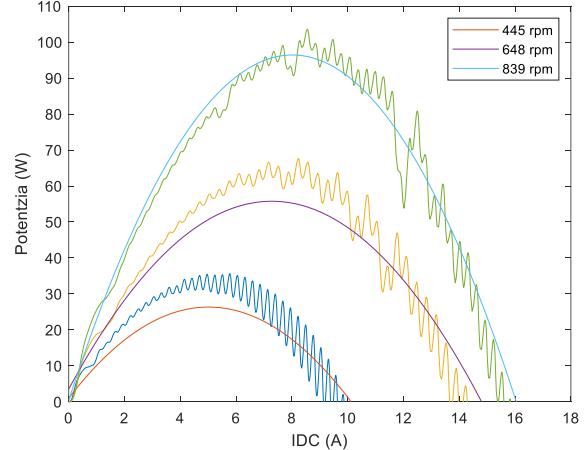
- Zirkuitu itxia: Egoera zehatz batean Simulinken lortutako korronte uhina eta errealitateko uhina bateratu dira ondorengo Irudia-n ageri den bezala, bi uhinen arteko errorea zehazteko.



Irudia 11. Zirkuitu itxiko testean lortutako seinale sinusoidala agertzen dira. Urdinez, Simulinkeko tentsioa agertzen da eta laranjaz, errealitatean 401rpm-tan neurtutako korrontea (korronte pikoan oinarrituta). Korronte pikoan differentzia, begi-bistakoa ez

izan arren, 0.0327A-koa da hain zuzen ere, eta errorea %0.315-koa da.

Azkenik, sorgailua modu optimo eta eraginkorrean funtzionatzen duela bermatzeko hainbat frogak egin dira, abiadura desberdinetara eta karga egoera desberdinetara, sorgailuaren 3 faseetan artegailu bat jarri eta irteerako tentsio monofasikoa karga elektronikora eta kondensadore batera konektatuz. Honela, kondensadorearen bidez, modu egonkor batean kontrolatu da karga elektronikoko korrontea. Hurrengo pausua, kargako korronte puntu bakoitzeko potentzia aztertzea izan da, gero simulinken ere potentzia kurbak ateratzeko grafikoak alderatzeko, jarraian ageri den Irudian ikusi daitekeen bezala.



Irudia 12. Korronte karga desberdinetara sorgailua 445, 648 eta 839 rpm-ean jarriz lortutako potentzia kurbak. Distorsionatutako kurbak Simulinkekoak direlarik eta curba garbiak errealitatekoak direlarik. Errealitateko kurbak ateratzeko egoera bakoitzean hainbat punturen interpolazioa egin da. Konparatutako curba guztien artean aurkitutako errore maximoa %18.8-koa da.

B. MPPT kontrolaren implementazioa

FPGA arduratzentz da sistemaren sarrerako tentsioa eta korrontea neurtezeaz. Neurri horiek prozesamendu azkarra eta zehatz eskatzen dute, eta FPGA-k eraginkortasunez erabil ditzake, eragiketa ugari paraleloan egiteko duen gaitasunari esker. FPGA-k sarrerako portuen bidez jasotzen ditu seinale analogiko horiek, balio digitaletara bihurtzen ditu eta prozesatzen egiten ditu denbora errealeko tentsio eta korronte irakurketa zehatzak lortzeko. Datu horiek funtsezkoak dira energia-sistemaren funtzionamendu optimorako, ondoren mikrokontrolagailuan ezarritako MPPT prozesuan erabiltzen baitira.

Datu horiek FPGA-tik mikrokontrolagailura transferitzeko, FIFO (First-In, First-Out) ilarak erabiltzen dira. FIFOek FPGArean eta mikrokontrolagailuaren arteko komunikazioa errazten duen zubi gisa jokatzen dute, datuak galdu eta desordenearik gabe harrapatu ziren ordenan transferitzen direla ziurtatuz. FPGA-k FIFO-n jartzen ditu tentsio eta korronte irakurketak, eta bertan gordetzen dira aldi baterako, mikrokontrolagailua prozesatzeko prest egon arte. Mikrokontrolagailuak, FIFO-en datuak irakurtzean, MPPT algoritmoa exekutatu dezake, sistemaren baldintzak doitz eraginkortasun energetikoa maximizatzeko. Datu-fluxu

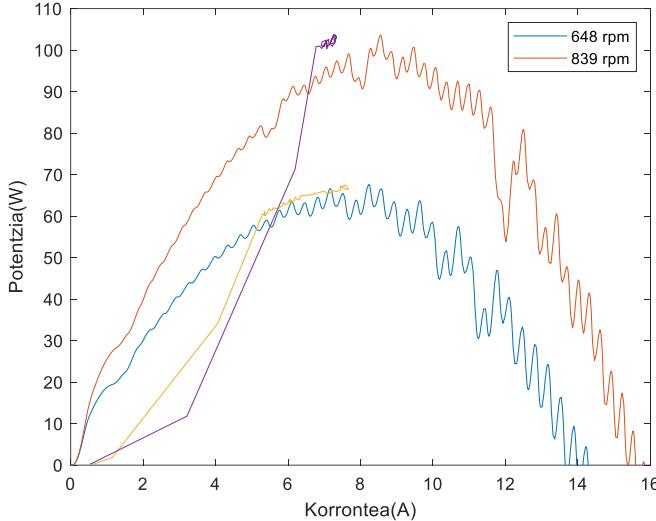
ordenatu eta sinkronizatu horrek ziurtatzen du mikrokontrolagailuak informazio eguneratuenarekin eta zehatzenarekin lan egiten duela beti, sistemaren erregulazio optimoa ahalbidetuz.

Turbina eoliko batek sortzen duen potentzia haizearen abiadurarekin aldatzen da. MPPT-a turbinaren karga doitzeko eta haizearen abiadura desberdinatarako eraginkortasun handieneko puntuaren lan egiteko erabiltzen da. Kasu honetan, *conventional hill-climbing search* estrategia erabili da. Optimizazio algoritmo bat da, funtzioko baten maximoa edo minimoa aurkitzea bilatzen duena, ondoko soluzioak modu iteratiboan ebaluatz eta doitzu. Kasu honetan, *duty-a* ajustatu da eta hau aldatzen irteerako korrontea eta tentsioa aldatu daiteke.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1 - \delta)} \quad (10)$$

$$I_{out} = I_{in}(1 - \delta) \quad (11)$$

Teoria eta praktika kontrastatzeko, karakterizazioko abiadura baldintza berdineta, hain zuen ere, 648 rpm eta 839 rpm-tan, korrontea eta potentzia kurba garatu da. Behin MPPT-a implementatuta desberdintasunak ikusi dira, hurrengo Irudia 13 ikusi daitezkeen bezala:



Irudia 13. Potentzia kurbak ageri dira. Bertan, simulatutako potentzia kurbak (urdinez eta laranjaz) eta MPPT-arekin lortutako potentzia kurbak (horiz eta morez) ageri dira. Ikusi daitekeenez, errore maximoa %4.32-koa da potentzia puntu maximoan beraz esan daiteke MPPT-ak puntu optimoan lan egiten duela. Bestalde, aipagarria da, neurketak egiterakoan korrontean salto handia egon dela. Horregatik, egokitzapenen bidez neur tutako korronteak ez du antza handirik simulatutako korrontearekin potentzia puntu maximora iritsi arte.

V. INTEGRAZIOA SAREAREKIN

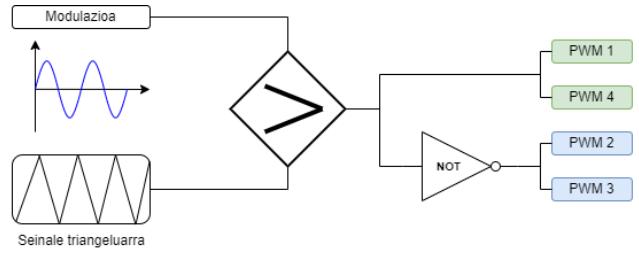
Inbertsoreak arteztutako DC seinaleak AC transformatzen du sorgailuak sortutako potentzia, sarean txertatzeko. Gainera, kontrola implementatuz, sarera txertatutako potentzia aktiboa erregulatu daiteke, baita korrontea eta tentsioa ere, sarearekin sinkronizatzea bermatuz.

A. Inbertsorea

Inbertsore modelatzeko V_{BUS} tentsioa kalkulatu da ondorengo ekuazioarekin:

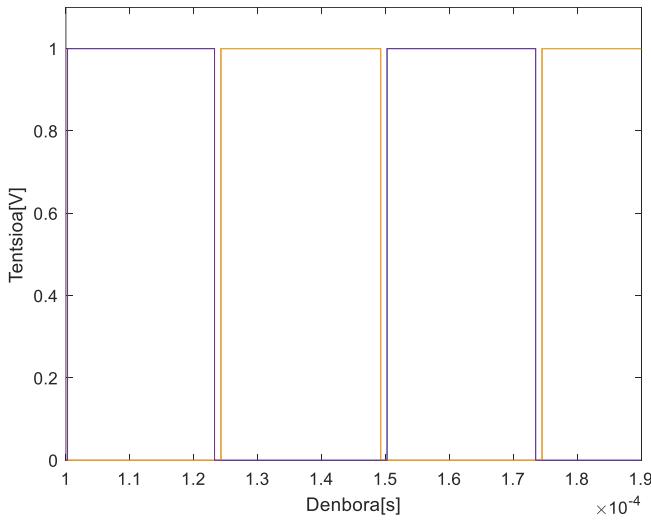
$$V_{BUS} = \frac{V_g \sqrt{2}}{m} = \frac{24 \sqrt{2}}{0.8} = 42.42V \quad (12)$$

Modulazio indizari m 0.8 balioa eman zaio. Lehenik eta behin, erabilitako gailua ezagutu behar da: Half-Bridge motako inbertsore monofasikoa. Etengailu gisa jarduten duten 4 MOSFETek osatzen dute inbertsore hori. MOSFET horien kommutazioa edo aktibazioa bikote diagonaletan egiten da: 1 eta 4 MOSFETak alde batetik, eta 2 eta 3 MOSFETak bestetik. Gainera, zirkuitu laburrak saihesteko, hutsartea, 'dead time', gehitu behar da MOSFET diagonalen kommutazioaren artean, bat itzaltzeko prozesua ez dadin bat etorri bestea pizteko prozesuarekin. Kasu honetan, hutsartea 2.6 μ s da, Irudia 14. Kommutazio hori lortzeko, eskema espezifiko bat jarraitu zaio. Lehenik eta behin, software egokia erabiliz simulatu da, eta, ondoren, LabView-rekin implementatu da.



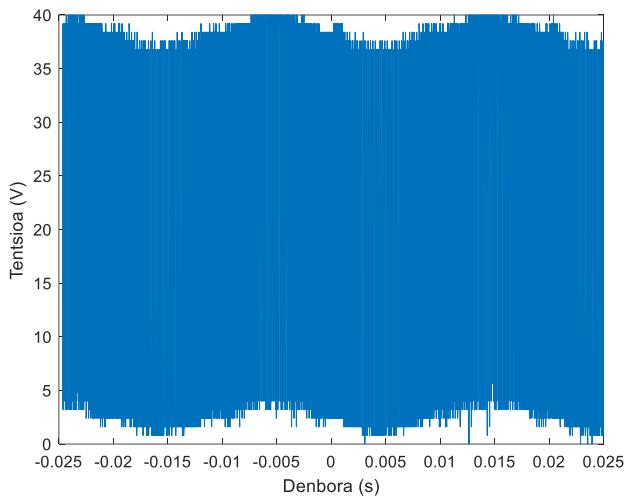
Irudia 14. Modulazioa garatzeko erabilitako estrategia. Honek modulazioa seinale triangularra baina handiagoa ez izateko saturatuko du, 2 PWM sortuz, bata bestearen aurkakoa.

Seinale triangeluarra eta modulazioak erabiliko dira; amplitudetako bera [-1,1] izango dute, baina maiztasun desberdinak. Modulazio-seinaleak 50 Hz-eko maiztasuna izango du, hau da, sarearen maiztasuna Europar Batasunean; seinale triangeluarrek, berriz, 20 kHz-eko maiztasun finkoa izango dute. Emaitzazko seinaleei hutsartea gehitzean, Irudia erakusten duen seinalea lortzen da.

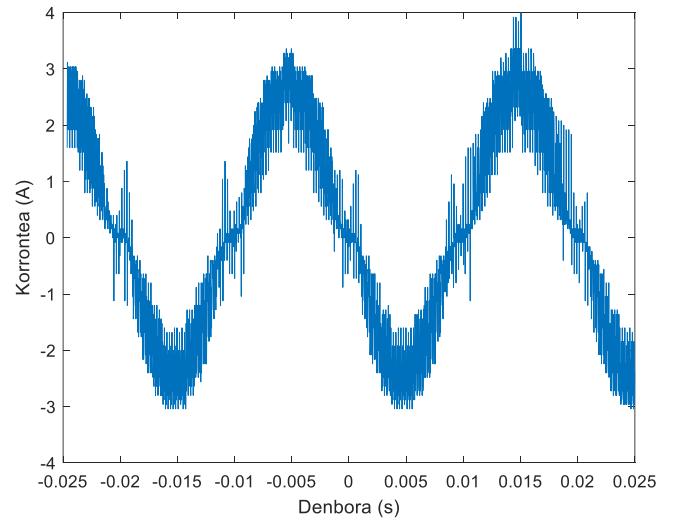


Irudia.15. Simulazioen modulazioitik lortutako PWM seinalea.

Kontrol-begiztekin hasi aurretik, inbertsorea begizta irekian implementatu da 20 kHz eta 4 V piko-piko den seinale modulatzaila batekin iturri sinusoidalaren bidez. Hortaz, seinale triangeluarra sortu da LabViewen. 42.42 V-eko bus tentsioa aplikatu zaio RL kargaren irteerari.



Irudia.16. Inbertsorearen irteerako tensio seinale sinusoidalra begizta irekian.

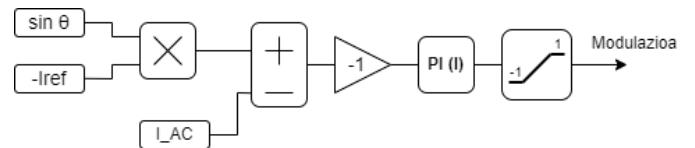


Irudia 17. Inbertsorearen irteerako korronte seinale sinusoidalra .

RL filtro hori diseinatzean, UNE 50160 araudiak zehazten duen bezala [2], erabateko distortsio harmonikoak ezin du % 8 gainditu. Simulazioan eta implementazioan ikusi da araudiaren arabera ez duela % 2ko segurtasun-marjina betetzen. Iragazki hori diseinatu ondoren, bus tentsioa baliozkotu da, eta ikusi da gutxi gorabeherako kalkulua ez dela modularra.

B. Korronte kontrola

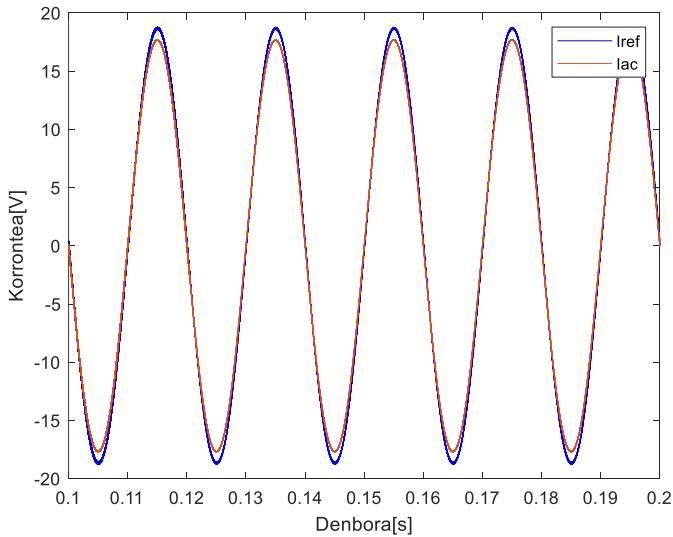
Lehen aipatutako modulazio-indizea lortzeko, korronte-kontrola garatzea eta implementatzea izan da hurrengo urratsa. Horretarako, lehenik -23,6 A-ko erreferentzia konstante bat aplikatu da. Erreferentzia negatiboa da, sorgailuak energia ekoizten ari delako. Ondoren, amplitude hori seinale sinusoidal batekin biderkatzen da fasea lortzeko. Fase hori zehazteko, PLL monofasikoa erabili da, sistemaren sinkronizazio egokia ziurtatzeko.



Irudia 18. Irteerako korrontearen PI kontrol egitura.

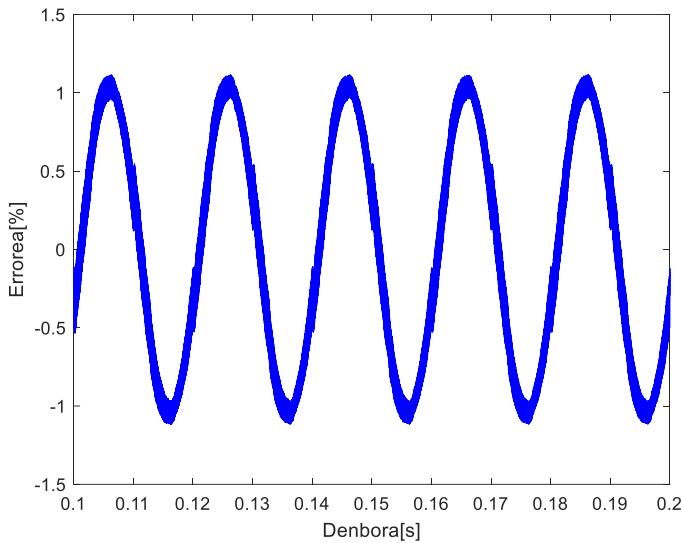
Poloak deuseztatzeko metodoaren bidez, (13) ekuazioa erabili da PI kontrolagailuaren parametroak kalkulatzeko. Korronte-kontrolaren funtzionamendu egokia baliozkotu ondoren, adierazten den bezala, erreferentzia konstantearren ordez kontrol dinamikoa jarri da. Erantsitako irudian ikus daitekeenez, sistemak behar bezala erantzuten die sarrerako aldaketei, eta korrontearen kontrol zehatza eta egonkorra ziurtatzen du.

$$\frac{Ki_i}{Kp_i} = \frac{R_f}{L_f} \quad (13)$$



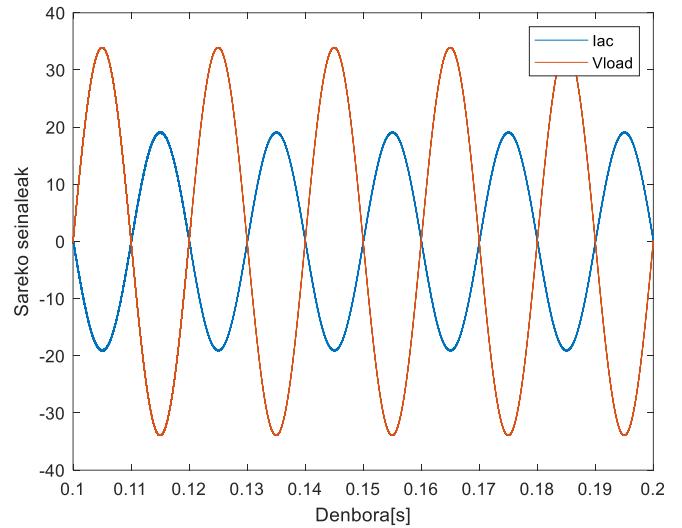
Irudia 19. Irteerako korrontea eta erreferentzia begizta itxian simulatuak.

Kontrol eskalarra erabili denez, erregimen iraunkorrean errorea zero izatea ezinezkoa da, eta ondorioz, ikus daitekeen bezala, %1-ko errorea eskuratu da, Irudia .



Irudia 20 Irteerako korrontearen eta erreferentiaren arteko errorea simulazioan.

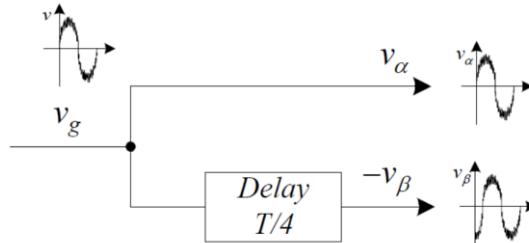
Konfigurazio honekin sarera bidalitako tentsio eta korronteak ikus daitezke simulatuak, Irudia .



Irudia 21. Inbertsorearen begizta itxiko irteerako tentsio eta korrontea. Kontrafasean daude eta anplitudeko balioak ikusten dira, sarera bidaltzen direnak.

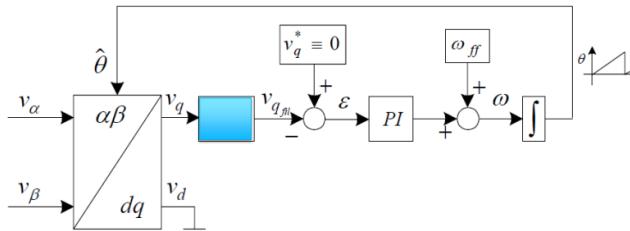
C. PLL monofasikoa

PLL-a (Phase-Locked Loop) sarera konektatutako inbertsore batean erabiltzen da beharrezko hainbat funtziogiteko. PLL diseinua garatzeko Irudia 22 eskemaren egitura erabili da.



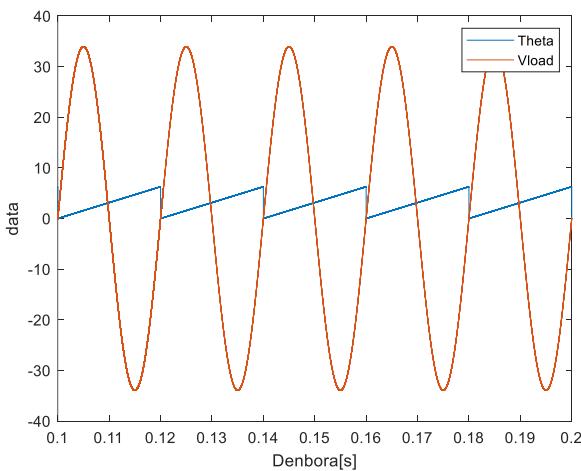
Irudia 22 PLL-aren alpha eta beta lortzeko egitura. Beta alpharen aurkakoa izango da eta atzerapena izango da.

Alpha Beta kontrola erabiliz [3], 90 graduko desfasean dauden Alpha eta Beta tentsioak lortzen dira, denbora-laurden bateko atzerapen bidez lortua. Desoreka hori funtsezko da sistemak behar bezala funtziona dezan. Gainera, egitura horretatik lortutako Beta tentsioa, eskeman horrela deitzen dena, behar bezala aldatu behar da desoreka hori bermatzeko eta mantentzeko. Doikuntza horrek ziurtatzen du sistemak modu eraginkor eta zehatzean jarduten duela, zehaztutako baldintzetan. Behin tentsioaren Alpha eta Beta proiekzioak lortuta, Irudia 23-n ikusten den kontrol egitura aplikatu da.



Irudia 23. PLL monofasikoaren PI kontrolaren egitura.

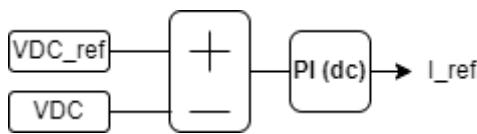
Kontrol estrategia V_q aldagaia zerora kontrolatzea eta V_d tentsioaren balio maximora kontrolatzean datza. Azkenik, PLL-tik lortutako fasea periodo bakoitzaren amaieran berrabiarazi behar da, erreferentziarekiko sinkronismo hori mantentzeko.



Irudia.24 Sareko tentsioa eta thetaren sinkronizazioa simulazioan.

D. Tentsio kontrola

Behin korronte kontrola balioztatuta, tentsio kontrola gauzatu da. Tentsio kontrol hau inbertsorearen sarrerako tentsioa edo buseko tentsioa kontrolatzean datza. Horretarako inbertsorearen sarreran erabilitako tentsio iturria, korronte iturri batengatik ordezkatzen da, horrela tentsio kontrolaren prezisioa aztertu daiteke. Tentsio kontrolak Irudia 25 eskema jarraitzen du.



Irudia 25. Bus tentsioaren erregulazioaren PI kontrola.

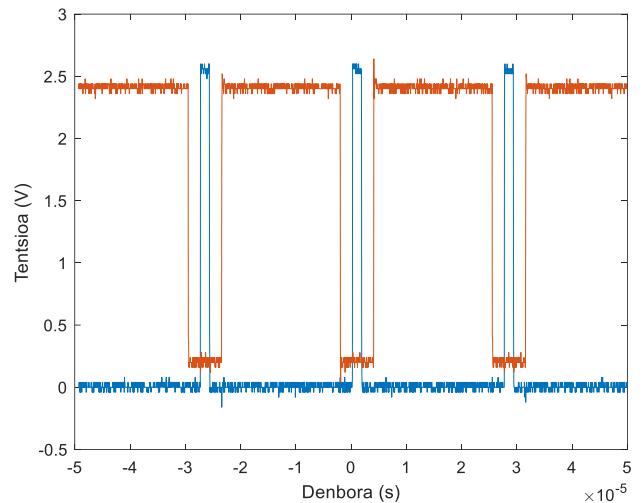
VI. DATUAK ESKURATZEKO ETA MONITORIZATZEKO SISTEMAK

Sistemaren kontrola bermatzeko, datuak eta seinaleak egokitu eta monitorizatu dira LabView tresnaren bidez. Neurketak irakurtzeko, National Instruments enpresaren myRio gailua erabili da sarrera eta irteera digital eta analogikoak eskaintzen dituena. Korronte kontrola egiteko dena FPGAn egin da, bai PWM generazioa eta PLLa.

FPGA mikroprozesadoreak baino askoz azkarago exekutatzen da, 25 nanosegundo arteko zehaztasunarekin tick bakoitzeko. Hala ere, FPGArein mugetako bat memoria-ahalmena da, sistema osoa memori horren barruan gordetzea eragozten baitu.

PWM seinaleak sortzeko, seinale modulatzale triangeluar bat eta erreferentzia-seinale bat alderatzen dira. Triangeluarrak sortzeko -10 +10 amplitudeko seinalea sortu da Labview-n. Seinale modulatzalea erreferentziazko seinalea baino handiagoa denean, '1' logiko bat lortzen da, eta txikiagoa denean, '0' logiko bat. Gure inbertsorearen kasuan, lau PWM seinale erabiltzen dira MOSFETak kontrolatzeko, eta horiek elkarren aurkako bikoteetan komutatzen dira.

Hori lortzeko, PWM seinale bat sortzen da, eta, hortik abiatuta, alderantzizko seinalea sortzen da, NOT eragiketa logiko bat aplikatuta.



Irudia 26. Inbertsoreko MOSFET-en PWMA eta PWMB eta haien arteko 'Deadtime'-a. Bi PWM seinale pare horien kommutazioen artean "dead time" izeneko denbora hila ezartzen da, aldi berean gurutzatzea saihesteko eta MOSFETak kaltetzea saihesteko. Gure diseinuan, 2.5 mikroseundoko hutsartea ezarri da.

Gainera, PWM seinaleetarako 20 kHz-ko komutazio-frekuentzia lortzeko, PWM seinalearen ziklo oso bakoitza FPGArein 50 tikt izateko sistema konfiguratu da. Horrek ziurtatzen du inbertsorean MOSFETen komutazio zehatza eta eraginkorra egitea, sistemaren errendimendua optimizatzeko.

PWM seinaleak sortu ondoren, inbertsorearen kontrola egiten da FPGAn. Zehazki, diseinuan deskribatutako tentsio- eta korronte-begiztak aplikatzen dira. Korronte-erreferentzia sortzeko, PLL monofasiko bat ere implementatu da, theta-angelua lortzeko. Kontrol horiek doitzeko, hasieran aldagaia kontrol moduan konfiguratzeko dira, eta horrek kontrola praktikan ikusitako emaitzen arabera doitzea ahalbidetzen du.

Azkenik, alderantzikagailuaren kontroletik lortutako seinalea aurrez sortutako seinale triangeluarrarekin alderatu da (gutxi gorabehera 10 aldiz handitua). Konparazio horretatik, PWM seinale osagarri bat ateratzen da, inbertsore osoa kontrolatzeko.

FPGAn erabilitako aldagaiei dagokienez, uint edo int motako datuak erabili dira. Datu hamartarretarako, oro har, puntu finkoak erabili dira (fixed points). Datu mota horri esker, aldagaien tamaina eta puntu hamartarraren kokapena zehaztu daitezke, double motako aldagaiek baino leku gutxiago hartuz memoria bete ez dadin.

VII. ONDORIOAK

Proiektua amaiturik, esan dezakegu ez dugula gure helburu nagusia betetza lortu, aerosorgailua bere osotasunean martxan jartzea. Hala ere, badira zenbait azpihelburu lortu ditugunak, nahiz eta beste batzuk ezin izan ditugun lortu.

Palen diseinua egin ostean 37W sortzea lortu dugu, gure helburua baina 7W gehiago, beraz esan dezakegu atal horretan soberan bete dugula.

Sorgailu osoaren potentziari dagokionez, ezin izan dugu frogatu zenbateko potentzia sortzeko gai garen. Hala ere, boostean eta inbertsorean dauden galera txikiak ikusita, baliteke 300W sortzera iristea.

Boostari dagokionez MPPT kontrola aplikatzea lortu dugu, irteeran finkatuta daukagun 42Vko kontsigna jarraituz, beraz, esan daiteke helburu hori betetza lortu dugula.

Inbertsoreari dagokionez, modulazioak lana behar bezala egiten badu ere, korronte kontrola aplikatzerako garaian korronteak ez du kontrola ondo jarraitzen eta erotu egiten da, beraz, helburu hori ezin izan dugu bete.

Sorgailuaren karakterizazioari dagokionez, frogatu dugu motorraren erantzuna eta simulazioetako bat datozena, beraz, karakterizazioan errore oso txikia egin dugula esan dezakegu, eta % 10 errore marjin horretan sartu garela esan dezakegu.

VIII. ETORKIZUNEKO HOBEKUNTZAK POTENTZIA BAXUKO HAIZE SORGAILUARENTZAT

Gure potentzia baxuko haize-sorgailua garatzeko eta optimizatzeko, hainbat hobekuntza eta ezarpen berri proposatzen ditugu, horiek eraginkortasuna eta errrendimendua areagotu ditzaketenak. Hobekuntza hauek diseinu eta sorgailuaren kontrola hainbat arlotan zentratzen dira, baita teknologia gehigarriak integratzean ere.

A. Pala Diseinuaren Optimizazioa

Gaur egungo pala diseinuarekin 37W-ko potentzia lortu badugu ere, optimizazio handiago batek energia-sorkuntza handitzea ekar dezake. Ondorengo ekintzak egin daitezke:

- Material Berritzaileak: Material berriak ikertzea eta probatzea, palen iraunkortasuna eta eraginkortasun aerodinamikoa hobetzeko.
- Pitch Angeluaren Kontrol Egokitzalea: Pitch angelua dinamikoak egokitzen duen kontrol-sistema bat ezartzear, haizearen baldintza desberdinatan energia-eskurapena maximizatzeko.

B. Boost Sistema eta MPPT Hobekuntza

Energia bihurketako eta potentzia maximoaren jarraipen (MPPT) sistema ezinbestekoa da sorgailuaren eraginkortasunerako. Hurrengo hobekuntzek errrendimendua optimiza dezakete:

- MPPT Algoritmo Aurreratuak: Haizearen baldintzetan eta kargan aldaketetara azkarrago erantzun dezaketen MPPT algoritmo aurreratuak ikertzea eta ezartzea.

C. Inbertsorearen eta PLL Kontrola

Inbertsorearen kontrol zehatza eta PLL erabilera ezinbestekoak dira energia sortutako kalitate eta egonkortasunerako. Hurrengo hobekuntzak kontuan har daitezke:

- Kontrol Prediktiboa: Inbertsorearen erantzun dinamikoa hobetzeko kontrol prediktibo teknikak ezartzea.
- PLL Digital Hobetua: Sarea oztopoen aurrean zehaztasun eta sendotasun handiagoa eskaintzen duen PLL digital hobetua garatzea.

D. Denbora Errealeko Monitorizazioa eta Diagnostikoa

Sorgailuaren errrendimenduari buruzko informazio zehatzia ematen duten eta akats posibleak detektatzen dituzten denbora errealeko monitorizazio eta diagnostiko sistemak integratzea. Honek barne hartzen du:

- Sentsore Aurreratuak: Aldagai gakoak monitorizatzen dituzten sentsore aurreratuak instalatzea, hala nola haizearen abiadura, palen bibrazioa eta osagaien tenperatura.
- Datuen Analisi eta Machine Learning: Akatsak aurreikusteko eta mantentze prebentiboa optimizatzeko datuen analisi eta machine learning teknikak erabiltzea.

E. Energia Biltegiratzearen Integrazioa

Sortutako energiaren kudeaketa hobetzeko eta hornidura etengabea bermatzeko, energia biltegiratze sistema bat integra daiteke. Honek barne hartzen du:

- Eraginkortasun Handiko Bateriak: Sortutako energia soberakina biltegiratzeko eraginkortasun handiko eta iraupen luzeko bateriak erabiltzea.
- Energiaren Kudeaketa Adimentsua: Energiaren kudeaketa adimentsuko sistema bat ezartzear, bateriak kargatze eta deskargatze eskaeraren eta energia ekoizpenaren arabera optimizatzen duena.

F. Sistemaren Handitzea eta Eskalagarritasuna

Azkenik, sistemaren handitza kontuan har daiteke, energia sortzeko gaitasuna handitzeko:

- Modulu Gehigarriak: Sistema modulu gehigarriak gehitzeko diseinatzea, energia eolikoaren sorkuntza handitzeko.
- Beste Iturri Berriztagarrikin Integratzea: Sistema beste energia berriztagarri iturriekin, hala nola eguzki-energiarekin, integratzeko aukera ikertza, irtenbide hibrido sendoagoa sortzeko.

Hobekuntza eta teknologia berriak ezartzeak ez bakarrik sorgailu eolikoaren eraginkortasuna eta fidagarritasuna handituko ditu, baita bere merkataritza bideragarritasuna eta epe luzeko jasangarritasuna ere.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «airfoiltools,» [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/>.
- [2] I. Usunáriz, «NORMATIVAS APLICABLES A LA CALIDAD ELÉCTRICA,» 1999.
- [3] D. A. d. A. E. B. R. Asier Irigoyen Indave, «Estudio, comparación e implementación de algoritmos PLL. Nuevo algoritmo PLL robusto ante perturbaciones en la red.,» Pamplona, 2016.
- [4] «Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética,» Boletín oficial del estado, 2021.
- [5] «eSmartcity,» 1 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.esmartcity.es/2016/06/01/el-86-por-ciento-co2-emitido-movilidad-proviene-ciudades>.
- [6] «race,» 30 Mayo 2005. [En línea]. Available: <https://www.race.es/emisiones-co2-coche-que-dice-ley#:~:text=En%202019%20justo%20antes%20de,26%2C9%20%25%20del%20total..>
- [7] R. Aguilar, «xataka,» 3 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/movilidad/espana-sigue-prefiriendo-coche-barato-no-electrico-datos-matriculaciones-dejan-sabor-agridulce-para-industria>.
- [8] «corresponsables,» 29 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.corresponsables.com/actualidad/sanitas-120-toneladas-co2-politica-movilidad-sostenible>.
- [9] P. M. S. K. A. S. P. R. S. S. Gaurav Changdeo Andhale, «Design and Development of Electric scooter,» Ahmednagar, Maharashtra, 2020.
- [10] «DGT,» 16 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/viaja-seguro/en-patinete/>. [Último acceso: 22 Enero 2024].
- [11] «EEEguide,» [En línea]. Available: <https://www.eeeguide.com/four-quadrant-operation-of-motor-drive/>.
- [12] C. Cavallo, 15 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/dc-motor-controllers/>. [Último acceso: 25 Enero 2024].
- [13] M. Mazuela, «POWER LOSSES CALCULATION USING DATASHEET,» 2021.
- [14] A. K. G. T. Tako Nama, «Low Power Electric Two-Wheelers for Hilly Region».