

# ***Droop* metodoak: potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatzeko haririk gabeko metodoak**

*E. Planas, E. Ibarra, J. Andreu, J.L. Martin*

Elektronika eta Telekomunikazio Saila (UPV/EHU)

*J.R. Etxebarria*

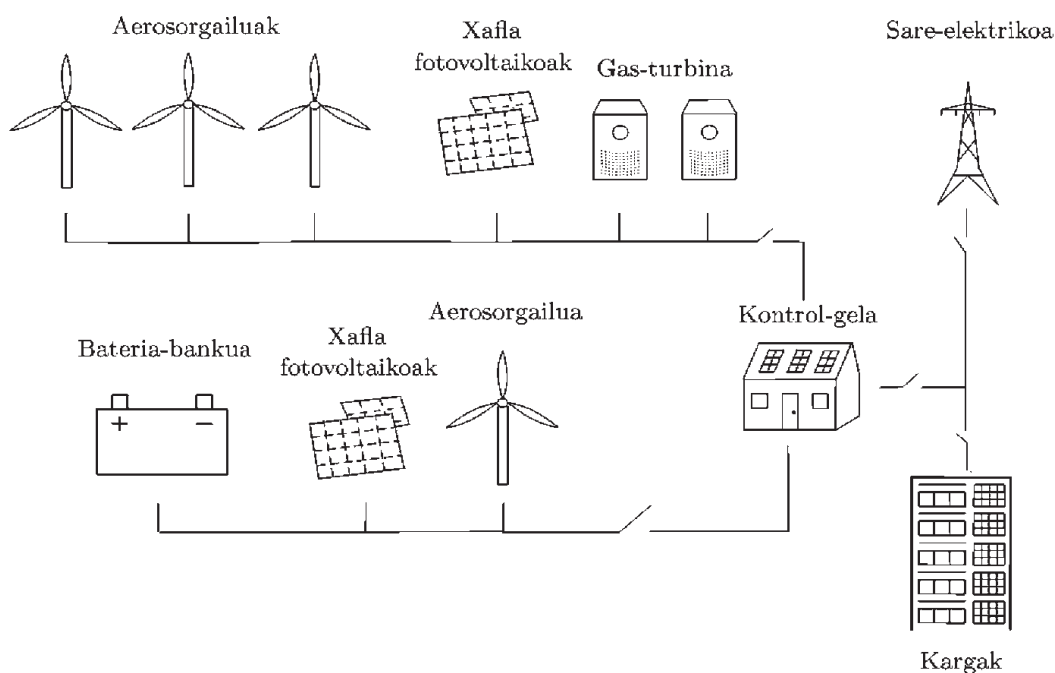
Euskal Filologia Saila (UPV/EHU)

**Laburpena:** Egun, potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatuta aurki daitezke hainbat aplikaziotan. Konexio horiek kontrol bat behar dute, bihurgailuen arteko korrante zirkulatuak saihesteko eta kargaren banaketa ona bermatzeko. Proposatutako metodo guztien artean, *droop* metodoak nabarmentzen dira, eskaintzen dituzten malgutasuna, erredundantzia eta fidagarritasunagatik. Lan honetan, jatorrizko *droop* metodoaren azterketa egingo da, eta oinarriko printzipioak azalduko dira. Alde horretatik, jatorrizko *droop* metodoak dituen funtsezko abantailak eta desabantailak deskribatuko dira, baita bibliografiako jatorrizko metodoa hobetzen duten aldaera batzuk ere. Azkenik, sistema baten diseinua *droop* metodoa erabiliz aurkeztuko da, baita simulazioetako emaitzak ere.

**Abstract:** Today, the power converters connected in parallel can be found in various applications. These connection must be controlled to avoid the load current between the power converters and ensure a good distribution. Among all the proposed methods, droop methods are highlighted, providing flexibility, redundancy and reliability. In this work the original droop method is analyzed, and the basic principles are explained. In this sense, advantages and disadvantages of the method are described, as well as a bibliography with some variations that improve the original method. Finally, the design of a system using droop method is presented, as well as the results of simulations.

## **1. Sarrera**

Egun, sorkuntza sakabanatua da energia elektriko eraginkorra eta kalitate onekoa lortzeko gailentzen ari den aukera [1]. Besteak beste, mikrosare elektrikoak (1. irudia) aukera ona dira mota ezberdinetako sorkuntza-sistemak integratzeko [2]; era horretara, erabilgarri dauden haizea, eguzkia edo biomasa bezalako baliabideak erabil daitezke. Sorgailuez eta kargez osatutako mikrosare horiei esker, eraginkortasun handia, eta kalitate oneko hornidura lortzen dira eta era berean ingururako isuri kaltegarriak murriz-



**1. irudia.** Mikrosare elektriko batzuen lotura, sare elektrikorako sarbidearekin.

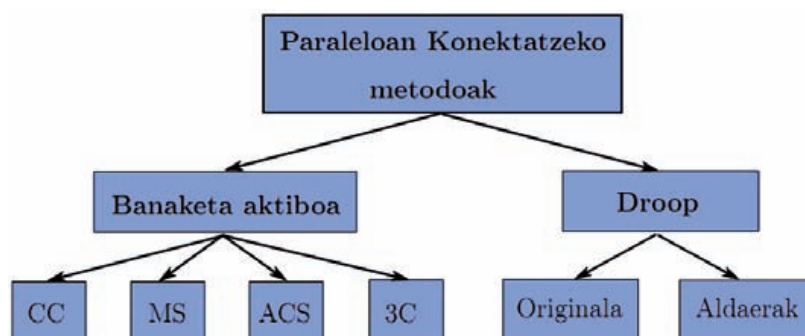
tea ere [3]. Trenak edo sare-zerbitzariak bezalako beste hainbat aplikazioetan bezala mikrosare elektrikoetan, potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatzen dira eta honek berez, abantaila ugari dakartza:

- *Fidagarritasun handia.* Erreduantzia handitu egiten da; beraz, sistemaren fidagarritasuna hobetzen da. Azken hori funtsezkoa da aplikazio kritikoetan, hala nola hegazkinetan edo itsasontzietan.
- *Sortutako potentzia handitu egiten da,* bihurtailu kopurua handitzen delako.
- *Mikrosareak sortzeko aukera.* Bihurtailuak paraleloan konektatzea ezinbestekoa da mikrosareak eraikitzeko.
- *Errendimendu handiagoa.* Potentzia zenbat eta handiagoa izan, hainbat eta tamaina handiagoa dute bihurtailuek, potentzia asko galtzen (bero-disipazioa eta tolerantzia handiagoak direla-eta). Ondorioz, bihurtailu txikiagoak erabilia, sistemaren etekin hobetzen da.
- *Teknologia berriak erabiltzeko aukera.* Elikadura oso zehatzak eta txikiak baina korrante handikoak behar dituzte teknologia berrietako dispositibo batzuek. Adibidez, erregai-pilak korrante altuko bihurtailuak behar ditu eta FPGAk eta DSPak elikadura gero eta doituagoak eta txikiagoak baina korrante altukoak behar dituzte. Ezaugarri horiek erraz lor daitezke bihurtailu estandarrek paraleloan konektatuz. Horri esker, garapen-denborak laburtu egiten dira.

Potentzia-bihurgailu batzuk paraleloan konektatuta, korrante zirkulazioa ager daitezke bihurgailuen arteko tentsio-diferentziak direla-eta. Korrante horiek kaltegarriak izan daitezke bihurgailuetarako, karga gutxi dagoeneko kasuetan batez ere. Korrante horiek saihesteko eta sistemaren funtzionamendu ona bermatzeko, hainbat kontrol-metodo daude. Metodoak bi taldetan sailka daitezke (2. irudia), komunikazioekiko menpekotasunaren arabera [4]:

- *Banaketa aktiboko metodoak.* Potentziaren banaketa zehatza eta irteerako tentsioaren THD txikia (*Total Harmonic Distortion*, ingelesez) lortzen dira metodo hauen bidez. Hala ere, komunikazioak behar dira potentzia-bihurgailuen artean. Beraz, sistemaren malgutasuna mugatzen da, eta mardultasunak txarrera egiten du komunikazio horiek direla-eta.
- *Droop metodoak.* Komunikazio kritikoak saihesten dira, *droop* metodoak erabiltzen direnean. Horrela, sistema malguagoa eta mardulagoa da, ez baitago puntu kritikorik. Aldi berean, ez dago komunikazioengatik fisikoki mugatuta.

Lan honetan, banaketa aktiboko metodoak zerrendatuko dira. Halaber, jatorrizko *droop* metodoa sakon aztertuko da, bere abantailak ikusteko.



**2. irudia.** Potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatzeko metodoen sailkapena.

Izan ere, jatorrizko *droop* metodoaren oinarriak, eta bere abantailak eta desabantailak azalduko dira. *Droop* metodoaren azterketa sakona egin ostean, jatorrizko metodoaren desabantaila batzuei aurre egiteko egin izan diren aldaera batzuk aurkeztuko dira. Azkenik, *droop* metodoaren bidez kontrolatutako sistema baten inplementazioa eta emaitzak aurkeztuko dira, metodoaren portaera ona erakusteko.

## 2. PARALELOAN KONEKTATZEKO METODOAK: BANAKETA AKTIBOKO METODOAK

Banaketa aktiboko metodoek komunikazio-sistemak erabiltzen dituzte bihurgailuen artean. Kontrolerako Metodo horiek lau taldetan sailka daitezke [4] (2. irudia):

- *Kontrol zentralizatua (CC)*. Metodo hauetan modulu zentral bat diseinatzen da korrante eta tentsio kontsignak kalkulatzeko. Modulu zentralak kalkulaturako kontsignak komunikazioen bidez bidaltzen dira potentzia-bihurgailu bakoitzera [5].
- *Maisu-morroi kontrola (MS)*. Kasu honetan, paraleloan dauden bihurgailuetako batek maisuaren funtzioa betetzen du. Maisu delako horrek kontrolaren kontsignak kalkulatu ditu, eta beste bihurgailuei (morroi direlakoei) bidaltzen dizkie kontsignak, komunikazioen bidez [6]. Horrela, maisu bihurgailuak sistemaren kontrola egiten du; era berean, energia sortzen du.
- *Batez besteko korrante-banaketako kontrola (ACS)*. Metodo hauek komunikazio-bus bat erabiltzen dute bihurgailuen artean. Bus horrek sistemaren batez besteko korrantearen balioa eramaten dio bihurgailu bakoitzari. Horrela, bihurgailu bakoitzak bere kontsignak kalkulatu ditu, bus horren neurritik abiatuta [7].
- *Korrante-kateko kontrola (3C)*. Bihurgailu bakoitzak aurreko bihurgailutik hartzen ditu kontsignak [8]. Azken bihurgailuak lehenengo bihurgailutik hartzen du kontsigna; era horretan, kontrol-eraztun bat osatzen da.

Kontuan hartu behar da sistema hauek komunikazioekiko menpekotasuna dutela. Telekomunikazioen aurrerapen bikaina gorabehera, komunikazioak erabiltzeak sistemaren akatsekiko tolerantzia murrizten du. Horrez gain, sistemaren inplementazioa konplexuagoa da, komunikazioek kalte egiten dietelako sistemaren malgutasunari eta modularitateari. Alde horretatik, *droop* metodoak [9], [10] daude komunikazioak erabiltzearen eragozpenei aurre egiteko. Modulu zentralak eta ezinbesteko komunikazioak saihesten dira metodo horietan; horrela, sistemaren kontrola errazagoa eta malguagoa da. Gainera, karga eta bihurgailu kopurua handitu daiteke, sistemaren kontrola aldatu gabe. Era berean, sistemaren kokapena malguagoa da, ez baitago kokapena mugatzen duen komunikaziorik. Abantaila horiek guztiak ikusita, *droop* metodoen azterketa sakona aurkeztuko da jarraian.

### 3. POTENTZIA-BIHURGAILUAK PARALELOAN DROOP METODOEN BIDEZ

#### 3.1. Droop metodoen oinarriak

Droop metodoak sorgailu sinkronoen portaeran oinarrituta daude. 3(a). irudian aurkezten da potentzia mugagabeko AC (Alternating Current) bus bati batera konektatutako sorgailu sinkrono baten zirkuitu baliokidea. Sorgailuak ematen duen itxurazko potentzia honela adierazten da:

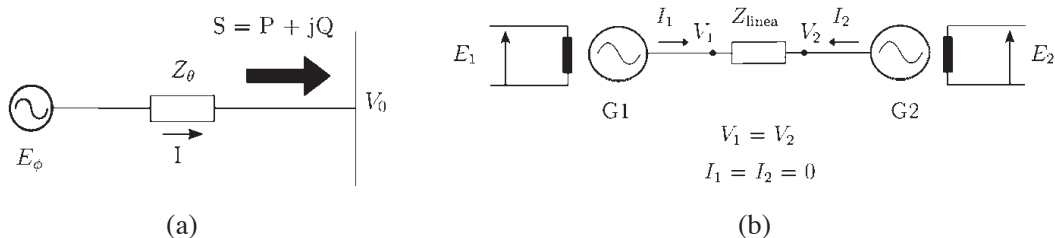
$$S = P + jQ. \quad (1).$$

P eta Q potentzia aktiboa eta erreaktiboa dira hurrenez hurren. Potentzia horiek honelaxe deskribatzen dira [11]:

$$P = \frac{EV}{Z} \cos(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \cos \theta, \quad (2).$$

$$Q = \frac{EV}{Z} \sin(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \sin \theta, \quad (3).$$

non E eta V sorgailuaren irteerako tentsioaren eta AC busaren tentsioaren amplitudeak diren hurrenez hurren. Beste alde batetik,  $\Phi$  delakoa kargaren eta sarearen arteko desplazamendu-angelua da, eta Z eta  $\theta$ , irteera-inpedantziaren modulua eta angelua hurrenez hurren.



**3. irudia.** Sorgailu sinkronoen bi zirkuitu baliokide. a) AC bus batera konektatutako sorgailu sinkrono baten zirkuitu baliokidea, b) Bi sorgailu sinkrono, paraleloan konektatuta eta kargarik gabe.

3(a) irudian erakusten da sorgailu sinkronoaren eta sarearen artean dagoen inpedantzia. Inpedantzia sinkronoaz, edo sorgailuaren barruko inpedantziatz, eta sorgailuaren eta linearen artekoa den linea-inpedantziatz osatuta dago inpedantzia hori. Alde batetik, sorgailuaren inpedantzia sinkronoak izaera induktiboa dauka, oro har. Beste aldetik, sorgailu sinkronoak goi tentsioko lineei konektatzen zaizkie normalean, eta lineek izaera induktiboa daukate. Ondorioz, inpedantzia baliokidearen izaera indukti-

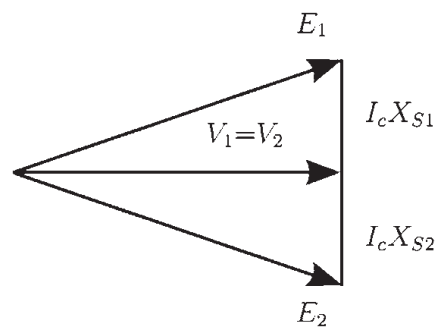
botzat hartzen da. Inpedantzia baliokidearen izaera induktibo hori kontuan hartuta, ( $Z = X$ ), (2) eta (3) honela laburbil daitezke:

$$P = \frac{EV}{X} \sin \phi, \quad (4).$$

$$Q = \frac{EV \cos \phi - V^2}{X}. \quad (5).$$

E-ren eta V-ren arteko aldeak txikitzat hartuz ( $\sin \Phi \approx \Phi$  eta  $\cos \Phi \approx 1$ ), eta (4) eta (5) aintzakotzat hartuz, ikus daiteke P  $\phi$ -ren menpe eta Q V-ren menpe daudela. Horrek esan nahi du P eta Q potentziak kontrola daitezkeela irteerako tentsioaren angeluaren eta anplitudearen bidez.

Beste alde batetik, paraleloan konektatutako bi sorgailu sinkronoren portaera ere interesgarria da. Portaera hau aztertzeko, paraleloan konektatutako bi sorgailu sinkrono hartzen dira, eszitazio-tentsio berarekin eta kargarik gabe (3(b) irudia). G1 sorgailua G2 sorgailua baino azkarrago biratzen saiatzen denean,  $I_c$  korronea agertzen da (4. irudia). G1 eta G2 sorgailuen XS1 eta XS2 inpedantzia sinkronoen izaera induktiboa dela medio,  $I_c$  ia induktiboa da. G1 sorgailurako  $I_c$  delakoa karga da, eta G2 bihurgailurako, berriz, potentzia-elikadura. Hori-dela eta, G1 sorgailuaren abiadura txikiagotu egiten da eta, era berean, G2 sorgailuarena, handiagotzen da. Egoera hori mantentzen da, bi sorgailuen abiadurak berdindu arte; horrela, funtzionamendu sinkronoa berreskuratzen da. Zirkuitua linea batez itxiz gero, portaera hori linea- inpedantziak induktiboak direnean bakarrik azaltzen da [12], [13].



**4. irudia.** Paraleloan konektatutako bi sorgailuren diagrama bektoriala, bata bestek baino abiadura handiagoa izanik.

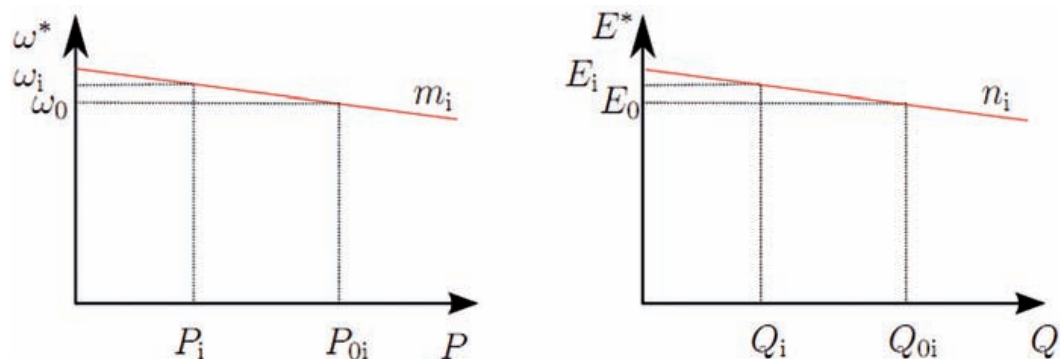
Beraz, sorgailuen inpedantzia sinkronoen izaera induktiboa garrantzi handikoa da, eta bi abantaila dakartza. Alde batetik, aukera ematen du tentsioaren maiztasuna eta anplitudea P eta Q potentzien bidez kontrolatzeko.

Bestetik, sorgailuen funtzionamendu sinkronoari laguntzen dio. Aipatutako azken abantailez baliatzeko, potentzia-bihurgailuetan sorgailu sinkronoen portaera erreproduzitzea proposatzen da [14] lanean. Lan horretan potentzia-bihurgailuak induktoreen bidez konektatzen dira lineara. Induktore horiei akoplamendu-induktantzia deritze, eta horiei esker, bihurtailuek emandako potentziek (4) eta (5) ekuazioak betetzen dituzte. Horrez gain, bina *droop* ezaugarri ezartzen dira bihurtailu bakoitzean. Batek irteerako tentsioaren maiztasunarekin lotzen du sortutako P potentzia; besteak, irteerako tentsioaren anplitudearekin lotzen du sortutako Q potentzia. *Droop* ezaugarri errazten honela adierazten dira [14] (5. irudia):

$$f_i^* = f_0 - m_i (P_i - P_{oi}), \quad (6)$$

$$E_i^* = E_0 - n_i (Q_i - Q_{oi}), \quad (7)$$

non i-k bihurtailu bakoitza adierazten duen, eta  $f_0$  eta  $E_0$ , eta  $P_i$  eta  $Q_i$ , hurrenez hurren sistemaren maiztasuna eta anplitude nominalak, eta oraingo potentzia aktiboa eta erreaktiboa diren.



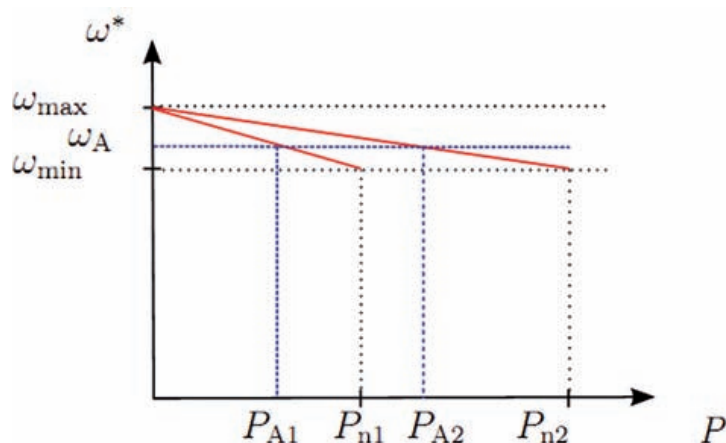
**5. irudia.** Maiztasunaren eta anplitudearen *droop* ezaugarriak

Beste alde batetik, kontuan hartu behar da potentzia-bihurgailuek potentzia-tarte desberdinak izan ditzaketela. Potentzia-bihurgailu guztiek *droop* ezaugarri bera izanez gero, guztiek potentzia bera ematen dute. Malda desberdinetako *droop* ezaugarriak diseinatzen dira, bihurtailu bakoitzak bere potentzia tartearen arabera sortzeko. Ondoko adierazpenen bidez kalkulatu dira malda horiek [14]:

$$m_1 P_{o1} = m_2 P_{o2} = \dots = m_n P_{on} \quad (8)$$

$$n_1 Q_{o1} = n_2 Q_{o2} = \dots = n_n Q_{on} \quad (9)$$

Adibidez, A operazio-punturako potentzia-bihurgailu batek sortutako potentzia  $P_{A1}$  da, eta beste baterakoa  $P_{A2}$  (6. irudia).  $P_{n1}$ -en eta  $P_{A1}$ -en



6. irudia. Potentzia tarte ezberdinetako droop ezaugarriak

arteko erlazioa  $P_{n2}$ -ren eta  $P_{A2}$ -ren artekoarekin bat dator; horrela, potentzia-bihurgailu bakoitzaren droop maldak bihurgailuaren potentzia tartea zehazten du.

### 3.2. Potentzia-bihurgailuen irteera-impedantziaren analisia

Droop metodoak sorgailu sinkronoen impedantzia sinkronoaren izaera inductiboan oinarrituta daude, III-A atalean esan den moduan. Izaera inductibo horri esker, potentzia-fluxuak (4) eta (5) ekuazioak betetzen ditu. Potentzia-bihurgailuen kasuan, irteera-impedantziek mugatzen dute potentzia-fluxua. Potentzia-fluxuaren portaera hori erakusten da I. taulan, potentzia-bihurgailuen irteera- impedantziaren arabera.

Sistemaren izaera inductiboa eragile batzuen menpe dago. Alde batetik, potentzia-bihurgailuen irteera-impedantzia dago, eta impedantzia hau ira-

I taula. Potentzia-fluxua bihurgailuaren irteera-impedantziaren arabera.

$Z_o$	$X$	$R$
$P$	$\frac{EV}{X} \sin\theta$	$\frac{EV \cos\delta - V^2}{R}$
$Q$	$\frac{EV \cos\delta - V^2}{X}$	$-\frac{EV}{R} \sin\theta$
droop $\omega$	$\omega = \omega^* - mP$	$\omega = \omega^* + mQ$
droop $E$	$E = E^* - nQ$	$E = E^* - nP$

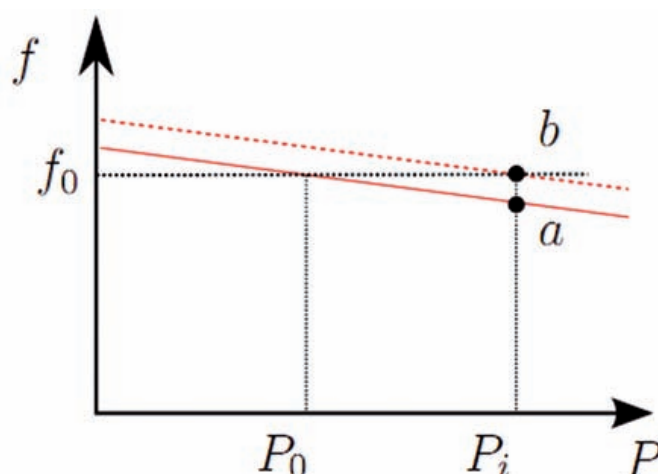


gazkiaren menpe dago, batez ere. Potentzia-bihurgailuen irteera-impedantzia hau, sarri, inductibotzat hartzen da, iragazkiek inductoreak izaten baitituzte [15]. Horrez gain, potentzia-bihurgailuen kontrolak eta kontrolerako neurketa-iragazkiek (tentsioak, korranteak eta abar) potentzia-bihurgailuen irteera-impedantziari ere eragiten diote. Beraz, haien portaera ere kontuan hartu behar da irteera-impedantzia aztertzeke unean.

**II taula.** Linea elektrikoaren ohiko parametroak

Linea-mota	R ( $\Omega/\text{km}$ )	X ( $\Omega/\text{km}$ )
Marra gabe Behe-tentsioa (BT)	0.642	0.083
Erdi-tentsioa (ET)	0.161	0.190
Marra gabe Goi-tentsioa (GT)	0.06	0.191

Beste alde batetik, bihurgailuen eta linearen artean badago impedantzia bat, linea-impedantzia deritzona. Linearen tentsio tartearen arabera, aldatu egiten da linea-impedantziaren portaera. II. Taulan erakusten dira goi-tentsio (GT), erdi-tentsio (ET) eta behe-tentsio (BT) lineetako impedantziak [16]. Linea-impedantzia hauek potentzia-fluxuari ere eragiten diote, III-A atalean esan den moduan. Orduan, irteera-impedantziak eta linea-impedantziak, kontuan hartzea komeni da potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatzean. Horrela, ahalik eta gehien murrizten da *droop* metodoaren funtzionamendu ona bermatzeko behar den akoplamendu-induktantzia.



**7. irudia.** Bigarren mailako kontrolaren ezaugarria.

### 3.3. Jatorrizko Droop metodoaren ezaugarriak

Jatorrizko *Droop* metodoaren abantaila nagusiak erakusten dira III. taulan [17], [18], [19]. Hala ere, metodo honek ere baditu aztertu beharreko desabantaila batzuk, eta haiek ere aztertzea komeni da [15], [19], [20] (III. taula).

**III taula.** Jatorrizko *droop* metodoaren abantaila eta desabantaila nagusiak.

Abantailak	Desabantailak
<i>Komunikazio eza.</i> Bihurgailu bakoitzaren kontrolak tentsioaren kontsignak sortzen ditu bere irteeran neurtutako P eta Q potentzien bidez.	<i>Tentsio-erregulazioaren eta potentzia-banaketaren arteko konpromisoa.</i> Zenbat eta potentziaren banaketa hobe izan (hau da, zenbat eta <i>droop</i> ezaugarriaren malda handiagoa izan), hainbat eta handiagoa da bihurgailu-tentsioaren eta tentsio nominalaren arteko aldea (5. irudia).
<i>Malgutasun handia.</i> Bihurgailuak banaka kontrolatzen dira. Hori dela-eta, ez dago sistemaren egitura aldatzeko beharrik, bihurgailuak gehitu edo kenduta ere.	<i>Harmonikoekiko portaera txarra.</i> <i>Droop</i> metodoan ez da kontuan hartzen karga ezlinealek sortutako harmonikoen banaketa.
<i>Fidagarritasun handia.</i> Ez dago kontrolerako modulu zentralik, ezta ezinbesteko komunikaziorik ere.	<i>Akoplamendu-induktantzien beharra.</i> Erabiltzen diren akoplamendu-induktantziek sistemaren pisua, tamaina eta kostea igotzen dituzte.
<i>Mugarik gabeko antolamendua.</i> Komunikazioen eta modulu zentralen kopapena kontuan izan gabe aukeratu daitezke potentzia-bihurgailuen kokagunerik egokiena.	<i>Linea-inpedantziaren menpekotasuna.</i> Linea-inpedantziek tentsio-jauskerak eragiten dituzte, eta Q potentziaren banaketari eta sistemaren tentsioari eragiten die horrek.
<i>Potentzia tarte ezberdinetako bihurgailuak.</i> Potentzia-bihurgailu bakoitzak bere potentzia tartearen arabera sortzen du energia, (8) eta (9) erlazioei esker.	<i>Erantzun dinamiko motela.</i> Metodo honetan behar diren neurketetarako iragazkiek atzerapen bat eragiten dute. Hori dela-eta, erantzun dinamikoa motela da.
<i>Inplementazio erraza.</i> <i>Droop</i> metodoak erabiltzean, ez da kontuan hartu behar bihurgailuen kopurua, eta kontrolaren implementazioa erraza da.	<i>Energia berriztagarrien integrazioa.</i> <i>Droop</i> ezaugarriek ez dituzte kontuan hartzen eguzkia, haizea edo itsasaldiak bezalako energia berriztagarriei eragiten dieten kanpoko faktoreak.

Dena den, jatorrizko *droop* metodoaren aldaera anitz daude, deskribatutako desabantaileri aurre egiteko. Jarraian, jatorrizko *droop* metodoan gertatzen diren eragozpenak konpontzen dituzten proposamen garratzitsuenak aurkeztuko dira.

### 3.4. Jatorrizko droop metodoaren aldaerak

Jatorrizko *droop* metodoaren desabantailen artean, tentsio-erregulazioaren eta potentzia-banaketaren arteko konpromisoa aurkeztu da (III. taula). Konpromiso hori dela-eta, tentsioaren anplitudea eta maiztasuna kargaren menpe daude; horrela, zenbat eta karga handiagoak egon, hainbat eta anplitude eta maiztasun-desberdintasun handiagoak gertatzen dira (5. irudia). Desberdintasunak saihesteko, bigarren mailako kontrola proposatu zen [17] lanean. Kontrol honek tentsioaren anplitudearen eta maiztasunaren balio nominalak berreskuratzea ahalbideratzen du integratzaileen bidez; horrela, errore estatikoa deuseztatzeko kontsignak sortzen dira (6. irudia). Era berean, kontuan izan behar da aldeak egon daitezkeela bihurgailuetako neurketen artean. Horrez gain, integratzaileen hasierako balioak ezberdinak dira potentzia-bihurgailuak une desberdinetan konektatuz gero. Beraz, bigarren mailako kontrola ez da nahi den moduan ibiliko, kontsignak ezberdinak izango baitira potentzia-bihurgailu bakoitzean. Arazo honi aurre egiteko, bigarren mailako kontrola zentralizatuta egon behar da, bihurgailu guztiek berreskuratzeke kontsignak berak izateko. Berreskuratzeke kontsigna hauek komunikazioen bidez bidaltzen zaizkie bihurgailuei eta banda-zabalera txikikoak dira. Horrez gain, ez diote eragiten gainerako kontrolari; horrela, gainerako kontrolari ez zaio kalte egiten komunikazioa sistema gaizki ibiliz gero.

Hasierako proposamen horren ostean, lan anitz proposatu dira arazo berari aurre egiteko. Esate baterako, *droop* ezaugarrien maldak moldatzen dituen kontrol bat proposatu zen [22] lanean. Sistemaren erantzun iragan-korra ere hobesten da lan horretan, tentsioaren maiztasuna eta anplitudea berreskuratzeaz gain. Beste proposamen bat aurkeztu egiten da [10] lanean. Metodo honetan, *droop* ezaugarriak aldatu egiten dira, potentzia-bihurgailu bakoitzaren irteerako korranteak ezarritako muga bat gainditzen duenean.

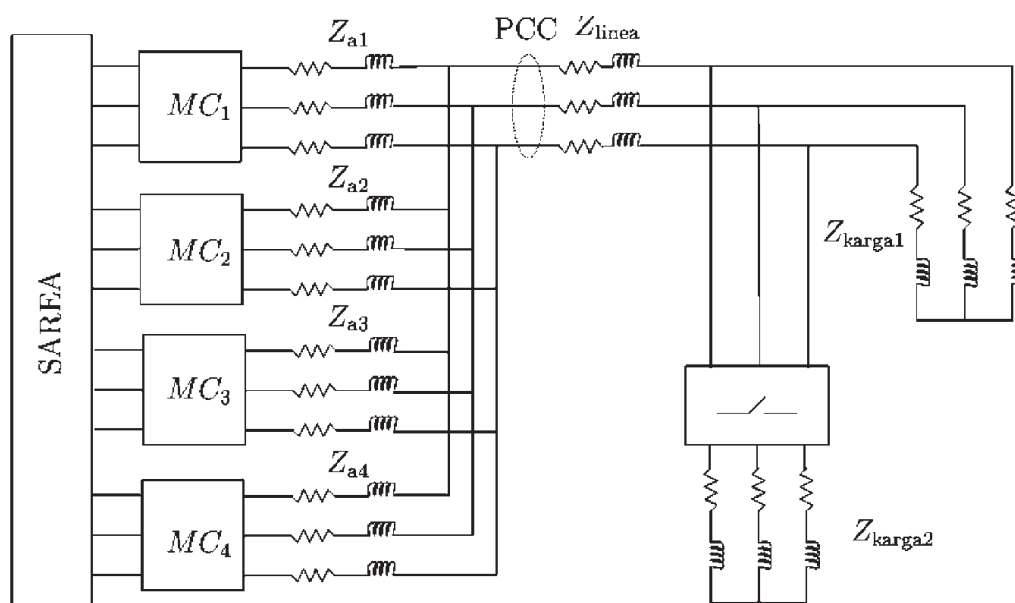
Beste alde batetik, jatorrizko *droop* metodoak P eta Q potentzien banaketa ona bermatzen du. Hala ere, *ez du* zirkuituan egon daitekeen potentzia harmonikoa banatzeko ahalmenik. Arazo horri begira, [23] lanean proposatu zen tentsio-kontsignaren banda-zabalera potentzia harmonikoaren arabera kalkulatzeko; horrela, kontrolak ahalmena du potentzia harmonikoa banatzeko. Haatik, metodo honek sistemaren egonkortasunari eragiten dio, tentsio-kontsigna potentzia harmonikaren menpe baitago. Inpedantzia baten emulazioa kontrol-begiztaren barruan inplementatzen da beste lan batean [24]. Izan ere, proposatu da erresistentzia goi maiztasunetan emulatzea eta induktantzia behe maiztasunetan emulatzea; horrela, potentzia harmonikoaren banaketa egokia lortzen da. Gainera, akoplamendu-induktan-

tziaren beharra ekiditen da, inpedantzia emulatu hori erabiliz; beraz, pisua, espazioa eta kostua aurrezten dira. Beste inpedantzia emulatu mota batzuk ere aurki daitezke hainbat lanetan, hala nola [15], [25] eta [26].

Akoplamendu-induktantziaren erabilerak sistemaren pisua, tamaina eta kostua handitzen ditu. Horrez gain, THDa handitzen du, induktoreen inpedantzia handitzen baita maiztasunarekin batera. Akoplamendu-induktantzia saihesteko, inpedantzia horren emulazioa proposatzen da [24] lanean. Beste proposamen batzuk aurki daitezke [15], [25] eta [26] lanetan, aurreko paragrafoan esan den moduan. Lan horiek egonkortasuna edo erantzun dinamikoa bezalako beste ezaugarri batzuk ere hobetzen dituzte.

Potentzia-bihurgailuen eta kargen artean linea-inpedantzia dago, III. taulan esan den moduan. Linea-inpedantzia horrek *droop* metodoaren portaerari eragiten dio, sistemaren tentsioa aldatzen baitu. Linea-inpedantziaren balioa ezezaguna da, oro har, baina haren estimazioa egiten duten hainbat metodo garatu dira. Esate baterako, [27] eta [28] lanetan aurki daitezke PCCn (*Point of Common Coupling* delakoan) dauden tentsioaren eta korrontearen faseetan oinarrituta dauden linea-inpedantzien estimaziorako metodoak (8. irudia). Linea-inpedantziaren estimazioaren bidez, *droop* metodoaren portaera hobetzea proposatu zen [29] lanean. Lan horretan, hain zuzen P, eta Q potentzien banaketa zehatza lortzen duen *droop* moldatzaile bat proposatu zen.

Jatorrizko *droop* metodoaren erantzun dinamikoa motela da (III. taula). Erantzun dinamikoa hobetzeko asmoarekin, *droop* ezau garriei osagai iragankorrek sartzea proposatu zen [30] lanean. Lan horre-



8. irudia. Bigarren mailako kontrolaren ezaugarria

tan, erantzun iragankor kontrolagarria lor dezakeen *droop* aldatu bat garatzen da; horrela, egoera iragankorraren irabaziaz dinamikoki doitu daitezke oszilazioak leuntzeko. Beste proposamen bat aurkeztu zen [31] lanean, non jatorrizko *droop* metodoaren ezaugarriari osagai eratorriak gehitzen zaizkien. Osagai eratorri hauek estatu iragankorrean baino ez daukate eraginik; beraz, ez dute aldatzen sistemaren erantzun estatikoa. Horrela, bihurgailuaren inertzia alda daiteke, adibidez, inertzia gehien duten bihurgailuek energia gehiago sortzeko iragankorrean.

Azkenik, jatorrizko *droop* metodoak energia berriztagarriekiko portaera eskasa dauka (III. taula). *Droop* ezlineal bat aurkeztu zen [32] lanean portaera hori hobetzeko. Proposatuko *droop* ezlineal horrek lehenetsun jakin bat ematen dio bihurgailu bakoitzari; horrela, energia berriztagarriak lehenesten dira beste energia mota batzuen aurrean. Beste alde batetik, [33] lanean proposatu zen *droop* eta MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) ezaugarriak bateratzea [33] lanean. Horrela, potentzia-bihurgailu bakoitzak *droop* ezaugarri bati jarraitzen dio, tentsio-puntu jakin batera heldu arte; puntu horretatik aurrera, MPPT ezaugarriari jarraitzen dio.

### 3.5. Droop metodoaren inplementazioa

Atal honetan, lau potentzia-bihurgailu paraleloan konektatuko simulazioa aurkeztuko da. Kasu honetan, bihurgailu matrizialak (MC, *Matrix Converter*) simulatuko dira, haien abantaila ugari direla-eta. MCak AC-AC bihurgailu dira, eta haien abantailen artean kalitate oneko uhinak eta elementu erreaktibo handien gabezia nabarmentzen dira [34], [35]. Sistemaren parametro garrantzitsuenak IV. Taulan aurkezten dira, eta eskema elektrikoa, 8. irudian. Hala ere, MCaren simulazioa denbora luzea behar duen ataza da. Alde batetik, modulazio- eta kommutazio-maiztasun handietan funtzionatzen du MCak; bestetik, MCaren kommutazio-eskemak oso korapilatsuak dira. Ondorioz, egin ahal diren testak izugarri murrizten dira beharrezko simulazio-denboraren luzera dela-eta. MC bat baino gehiago simulatuz gero, arazo hori larria bilakatzen da, simulazio honetan bezala.

Simulazio-denbora murrizteko, simulazio-metodo berria erabili da, SSMA (*Switching State Matrix Averaging*) [36] deritzona. Metodo honi esker, MC baterako beharrezko simulazio-denbora izugarri murrizten da eta, horrela, simulatutako MCen kopurua handitu daiteke. *Droop* kontrol-bloke bat jartzen da MC bakoitzean; horrela, MC bakoitzak bere tentsioaren maiztasuna eta anplitudearen erreferentziak lortzen ditu. MCen potentzia tarteak eta kargen tentsioen balio nominalak hartu dira aintzakotzat, *droop* ezaugarriak kalkulatzeko. Horrez gain, P eta Q potentzien arteko desakoplamendua bermatzen duen akoplamendu-induktantzia ahalik eta txikiena jarri da. Erabilitako balioak IV. taulan aurkezten dira. Horrez gain, bigarren

**IV taula.** Simulatutako MCen ezaugarriak

Sarrerako iragazkia	MCen parametroak	Karga
$C_F$ 26.2 $\mu$ F	$V_{in}$ 220 Vrms	$Z_{karga1}$ 11.45 $\Omega$ , 18.2 mH
$L_F$ 0.95 mH		$Z_{karga2}$ 8.5 $\Omega$ , 13.5 mH
$R_d$ 33 $\Omega$	$F_{sw}$ 12.5 kHz	$f_{karga}$ 60 Hz
$f_c$ 1 kHz		$V_{nom}$ 110 Vrms

mailako kontrol bat inplementatu da, kargaren tentsioaren maiztasuna eta anplitudea hobetzeko helburuarekin. Kargaren saltoen detekzioan oinarrituta dago, eta *droop* ezaugarriak aldatzen ditu, kargaren saltoen bat detektatuz gero. Kargaren saltoak detektatzeko, honako ekuazio hauek erabiltzen dira:

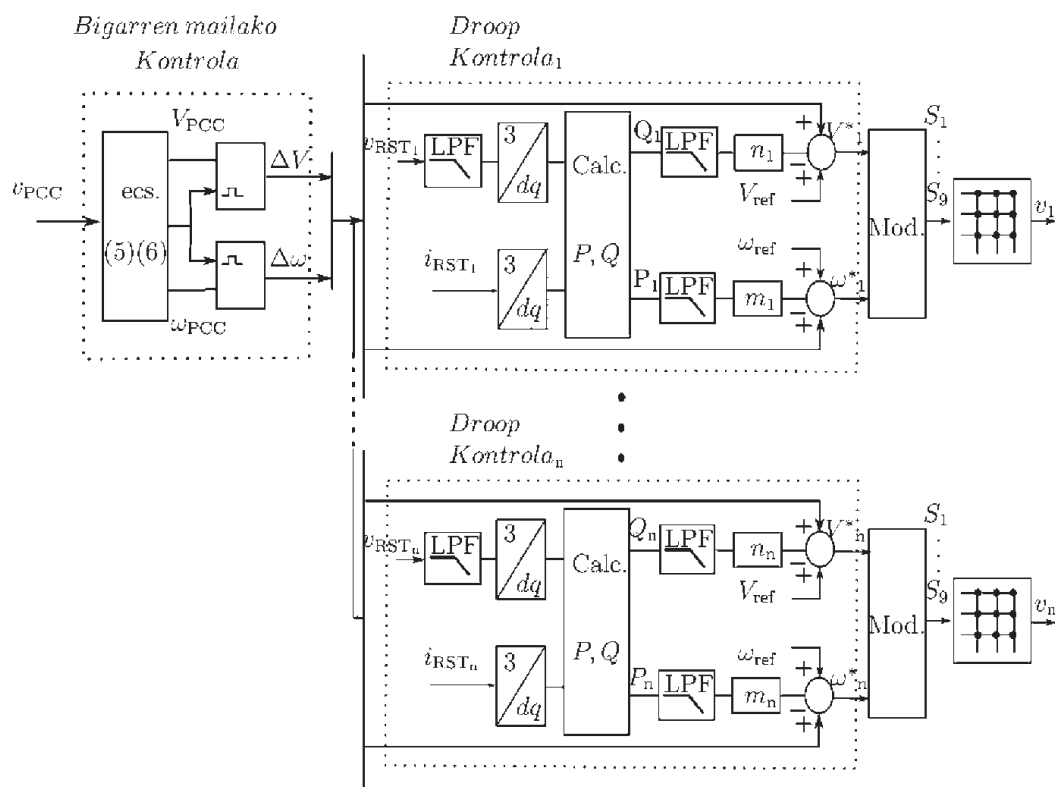
$$(V_{PCC} - V_{PCC} \cdot z^{-t_{rest}}) > rest_{lim} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\omega_{i+1} = \omega_{refi} - \omega_{PCC1} \\ \Delta V_{i+1} = V_{refi} - V_{PCC1} \end{cases}, \quad (10).$$

$$(V_{PCC} - V_{PCC} \cdot z^{-t_{rest}}) \leq rest_{lim} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\omega_{i+1} = \Delta\omega_i \\ \Delta V_{i+1} = \Delta V_i \end{cases}, \quad (11).$$

non  $V_{PCC}$  eta  $V_{PCC}$  direlakoak hurrenez hurren PCCko tentsioaren anplitudea eta maiztasuna dira (8. irudia), eta  $t_{rest}$  eta  $rest_{lim}$ , karga detektatzeko behar diren parametroak dira. Kargaren detekzioa  $V_{PCC}$ -ren aldaeretan oinarrituta dago.  $V_{PCC}$  neurtzen da eta erkatu egiten da bere  $t_{rest}$  lehenagoko balioarekin. Alde hori  $rest_{lim}$  baino handiagoa denean, kargaren salto bat gertatu dela onartzen da. Kargaren salto bat detektatuz gero,  $V_{PCC}$ -ren eta  $f_{PCC}$ -ren neurketak alderatzen dira beren balio nominalekin. Ondoren, neurketen eta balio nominalen arteko aldeak gehitzen zaizkie lehenengo kontrolaren *droop* ezaugarriari, banda zabaleko komunikazioen bidez; horrela, *droop* ezaugarriak mugitzen dira tentsioaren anplitudearen eta maiztasunaren balio nominalak berreskuratzeko. 9. irudian aurkezten da kontrolaren eskema osoa.

**V taula.** *Droop* parametroak.

<i>Droop</i> ezaugarriak	Beste parametro batzuk
$m_1$ 26.2 $\mu$ F	$Z_{a1,2,3,4}$ 0.4 $\Omega$ 0.5 mH
$m_2$ 0.95 mH	$Z_{linea}$ 0.1 $\Omega$ , 1 $\mu$ H
$m_3$ 33 $\Omega$	$V_{tol}$ 1 %
$m_4$ 1 kHz	$f_{tol}$ 1%
$n_{1,2,3,4}$ 0.0026	

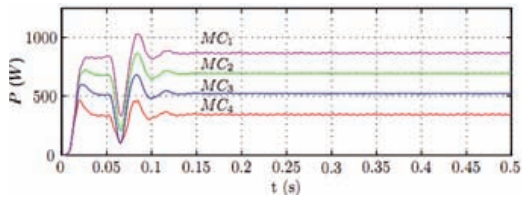


9. irudia. MCak paraleloan konektatzeko kontrol-eskema.

10(a) eta 11(d) bitarteko irudietan jasotzen dira lortutako emaitzak. Ikusten den bezala, kargaren P banaketa ona lortzen da hasieratik (10(a) eta 10(c) irudiak), IV. taulan agertzen diren baliotetan ikus daitekeen bezala; hau da, bihurgailu bakoitzaren potentzia tartearen arabera sortzen da energia elektrikoa. Horrez gain, banaketa hori mantentzen da bigarren karga bat konektatutakoan (10(b) eta 10(d) irudiak). Linea-inpedantzia dela-eta, Q potentziaren banaketa ez da hain ona (10(c) eta 10(d) irudiak), guztiek Q bera eman beharko lukete-eta (IV. taula). Era berean, kargaren tentsioaren maiztasuna eta anplitudea ikusten dira 11(a) eta 11(b) irudietan. Irudi horietan ikusten da kargaren tentsioaren anplitudea eta maiztasuna hobetzen direla inplementatutako kontrolari esker. Azkenik, lortutako PCCko tentsioak eta korronteak aurkezten dira (11(c) eta 11(d) irudiak).

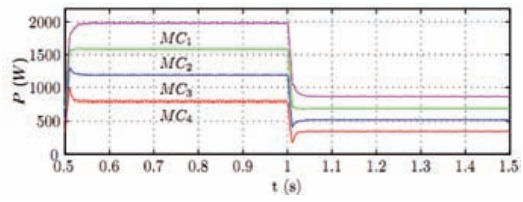
#### 4. ONDORIOAK

Potentzia-bihurgailuak paraleloan konektatzeko *droop* metodoa azaldu da artikulu honetan. Horrela, zehatz aztertu dira jatorrizko *droop* metodoaren oinarriko printzipioak, baita abantaila nagusiak ere. Ondorioz, *droop*



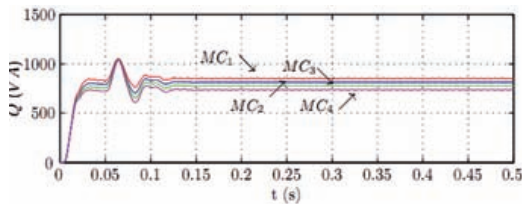
(a)

(a) Karga ~~aktiboaren~~ ~~braketa~~ ~~lsieran~~



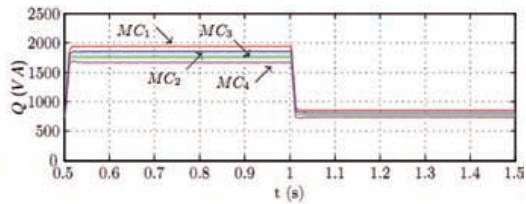
(b)

(b) Karga ~~aktiboaren~~ ~~banaketa~~ ~~kgaren~~ ~~ldaketa~~ ~~taan~~



(c)

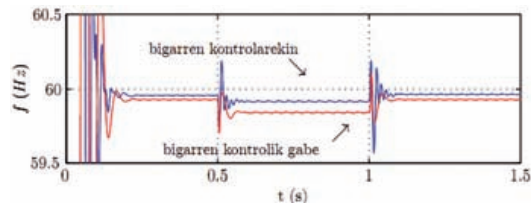
(c) Karga ~~reaktiboaren~~ ~~braketa~~ ~~lsieran~~



(d)

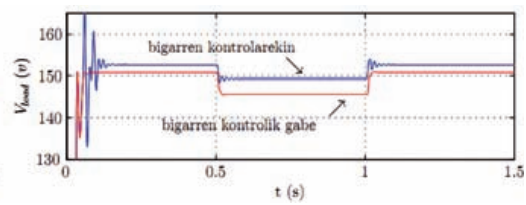
(d) Karga ~~reaktiboaren~~ ~~banaketa~~ ~~kargaren~~ ~~ldaketa~~ ~~taan~~

**10. irudia.** Kargaren banaketa kasu desberdinetan.



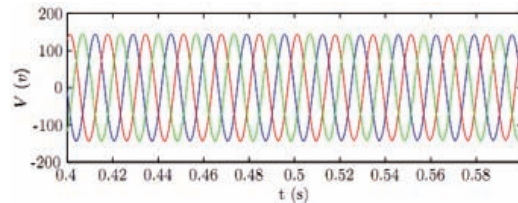
(a)

(a) Tentsioaren ~~niztasuna~~ ~~kgetan~~



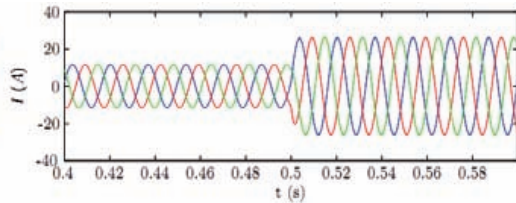
(b)

(b) tentsioaren ~~mplitudea~~ ~~kargetan~~



(c)

(c) Lortutako ~~entsioak~~ ~~PCn~~



(d)

(d) Lortutako ~~korrentak~~ ~~PCn~~

**11. irudia.** Kargaren anplitudea eta maiztasuna, eta PCC-ko tentsioak eta korronteak.



metodoek eskainitako margultasuna, mardultasuna eta modularitatea egiaztatu dira; potentzia-bihurgailuen arteko komunikazio faltari esker lortzen dira ezaugarri horiek. Horrez gain, desabantaila garrantzitsuenak ere aurkeztu dira: akoplamendu-induktantziaren beharra, erantzun dinamiko motela eta harmonikoekiko portaera eskasa. Hala ere, jatorrizko *droop* metodoaren arazo gehienak konpondu dira aldaera anitzetan, III-D atalean ikusi den bezala. Azkenik, *droop* metodoaren bidez kontrolatutako sistema baten inplementazioa eta simulazioa aurkeztu dira. *Droop* metodoaren portaera ona egiaztatzen dute aurkeztutako emaitzek.

## ESKERRAK

Lan hau Euskal Herriko Unibertsitateak, Eusko Jaurlaritzak (IT394-10 proiektuaren barne) eta «Ministerio de Ciencia e Innovación»-ek (IPT-370000-2010-28 proiektuaren barne) finantziatu dute.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J.M. GUERRERO, F. BLAABJERG, T. ZHELEV, K. HEMMES, E. MONMASSON, S. JEMEI, M.P. COMECH, R. GRANADINO and J.I. FRAU (2010). «Distributed generation: Toward a new energy paradigm». *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1): 52-64.
- [2] T. ACKERMANN, E. TRÖSTER, R. SHORT and S. TESKE (2009). *Escenario global de la energía eléctrica*. Technical report, Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC), Greenpeace International.
- [3] R.K. RIETZ and S. SURYANARAYANAN (2008). *A review of the application of analytic hierarchy process to the planning and operation of electric power microgrids*. North American Power Symposium (NAPS), page 6.
- [4] J.M. GUERRERO, L. HANG and J. UCEDA (2008). «Control of distributed uninterruptible power supply systems». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8): 2845-2859.
- [5] T. IWADA, S. KOMIYAMA, Y. TANIMURA, M. YAMANAKA, M. SAKANE and K. HIRACHI (2003). *A novel small-scale ups using a parallel redundant operation system*. International Telecommunications Energy (INTELEC), pages 480-484.
- [6] W. LEE, T. LEE, S. LEE, K. KIM, D. HYUN and I. SUH (2004). «A master and slave control strategy for parallel operation of three-phase ups systems with different ratings». *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1: 456-462.
- [7] X. SUN, L. WONG, Y. LEE and D. XU (2006). «Design and analysis of an optimal controller for parallel multi-inverter systems». *IEEE Transactions*

- on *Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 53(1): 56-61.
- [8] T. WU, Y. CHEN and Y. HUANG (2000). «3c strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(2): 273-281.
- [9] A. TULADHAR, H. JIN, T. UNGER and K. MAUCH (2000). «Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of line impedance effect». *IEEE Transactions of Industrial Applications*, 36(1): 52-59.
- [10] J. KIM, H. CHOI and B. HYUNG CHO (2002). «A novel droop method for converter parallel operation». *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(1): 25-32.
- [11] A.R. BERGEN (1986). *Power System Analysis*. Englewood Cliffs.
- [12] M.G. SAY (1976). *Alternating current machines*.
- [13] R.L. AMES (1990). *AC generators*.
- [14] M. CHANDORKAR, D. DIVAN and R. ADAPA (1993). «Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems». *IEEE Transactions on Industry Application*, 29(1): 8.
- [15] J. GUERRERO, L. GARCÍA DE VICUÑA, J. MATAS, M. CASTILLA and J. MIRET (2005). «Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control». *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, 52(4): 1126-1135.
- [16] A. ENGLER (2005). «Applicability of droops in low voltage grids». *Distributed Energy Resources DER*, 1(1): pp. -6.
- [17] M.C. CHANDORKAR, D.M. DIVAN and B. BANERJEE (1994). «Control of distributed ups systems». *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 1: 197-204.
- [18] M.C. CHANDORKAR and D.M. DIVAN (1995). «Decentralized operation of distributed ups systems». *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1: 565-571.
- [19] J.M. GUERRERO, N. BERBEL, L.G. DE VICUNA, J. MATAS, J. MIRET and M. CASTILLA (2006). «Droop control method for the parallel operation of online uninterruptible power systems using resistive output impedance». *Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, page 7.
- [20] S.J. CHIANG and J.M. CHANG (2001). «Parallel control of the ups inverters with frequency-dependent droop scheme». *Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2: 957-961.
- [21] J.C. VASQUEZ QUINTERO (2009). *Decentralized Control Techniques Applied to Electric Power Distributed Generation in Microgrids*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [22] S.Y. YANG, C.W. ZHANG, X. ZHANG, R.X. CAO and W.X. SHEN (2006). «Study on the control strategy for parallel operation of inverters based on adaptive droop method». *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pages 27-31.

- [23] A. TULADHAR, H. JIN, T. UNGER and K. MAUCH (1997). «Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections». *IEEE*, pages 94-100.
- [24] S.J. CHIANG and J.M. CHANG (2001). «Parallel operation of series-connected pwm voltage regulators without control interconnection». *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 148(2): 141-147.
- [25] Xiaotian ZHANG, Hao ZHANG, J.M. GUERRERO and Xikui MA (2008). «Reactive power compensation for parallel inverters without control interconnections in microgrid». *Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pages 922-925.
- [26] K. BRABANDERE, B. BOLSENS, J. VAN DEN KEYBUS, A. WOYTE, J. DRIESEN and R. BELMANS (2004). «A voltage and frequency droop control method for parallel inverters». *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(4): 1107-1115.
- [27] L. ASIMINOAEI, R. TEODORESCU, F. BLAABJERG and U. BORUP (2005). «Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for pv inverters». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4): 1136-1144.
- [28] F. BERTLING and S. SOTER (2006). «A novel converter integrable impedance measuring method for islanding detection in grids with widespread use of decentral generation». *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pages 12-17.
- [29] J.C. VASQUEZ, J.M. GUERRERO, A. LUNA, P. RODRIGUEZ and R. TEODORESCU (2009). «Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10): 4088-4096.
- [30] Y. IBRAHIM and E. SAADANY (2008). «Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids». *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(6): 2806-2816, november.
- [31] Guan YAJUAN, Wu WEIYANG, Guo XIAOQIANG and Gu HERONG (2010). *An improved droop controller for grid-connected voltage source inverter in microgrid*, pages 823-828, Piscataway, NJ, USA.
- [32] J. BRYAN, R. DUKE and S. ROUND (2004). «Decentralized generator scheduling in a nanogrid using dc bus signaling». In *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 977-982.
- [33] J. SCHONBERGER, R. DUKE and S.D. ROUND (2006). «Dc-bus signaling: a distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5): 1453-1460. 13.
- [34] J. ANDREU, J.M. DE DIEGO, I. MARTÍNEZ DE ALEGRÍA, I. KORTABARRIA, J.L. MARTÍN and S. CEBALLOS (2008). «New protection circuit for high speed switching and start-up of a practical matrix converter». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8): 3100-3114.

- [35] E. IBARRA, J. ANDREU, E. ORMAETXEA, I. KORTABARRIA, I. MARTINEZ DE ALGRIA, J.L. MARTÍN and J.R. ETXEABARRIA (2010). «Potentzia-bihurgailu matriziala: teknologia eraginkor eta konpaktua». *Ekaia Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzi eta Teknologi Aldizkaria*, 23: 173-198.
- [36] E. IBARRA, I. KORTABARRIA, J. ANDREU, E. PLANAS and I. MARTÍNEZ DE ALGRÍA (2010). «A fast and accurate simulation method for matrix converters». In *Proc. of the Power Electronics, Machines and Drives Conference (PEMD)*, april.