

## تنظیم ولتاژ و فرکانس در یک ریزشبکه مجهر به سیستم فتوولتائیک در حالت جزیره‌ای

محمد مؤذن<sup>۱\*</sup>، افشین لشکرآرا محمراه<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، آدرس پست الکترونیکی

۲- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، آدرس پست الکترونیکی

**چکیده:** در این مقاله، روشی برای کنترل سیستم فتوولتائیک دارای کنترلر دنبال کننده نقطه توان بیشینه (MPPT) و ذخیره باطری، جهت فراهم سازی پشتیبانی ولتاژ - فرکانس (v-f) در یک ریزشبکه جزیره‌ای، ارائه شده است. یک الگوریتم جدید برای کنترل MPPT نیز معرفی گردیده است. راهکارهای کنترلی، هماهنگی موثر میان کنترل  $f$ -v در اینورتر، کنترل MPPT و کنترل ذخیره باطری را نشان می‌دهد. مطالعات شبیه سازی بر روی فیدر توزیع IEEE ۱۳ شینه در حالت جزیره‌ای بررسی شده است. نتایج حاصل شده، به وضوح از کارایی روش‌های کنترلی ارائه شده حکایت دارد. شبیه سازی‌ها در محیط نرم افزار متلب و Simpowersystem انجام شده است.

**واژه‌های کلیدی:** منابع انرژی پراکنده (DER)، تولید پراکنده (DG)، دنبال کننده نقطه توان بیشینه (MPPT)، کنترل ولتاژ - فرکانس (v-f)، سیستم فتوولتائیک (PV).

یک سیستم مستقل و کنترل پذیر، بهره برداری شده و توانایی فراهم سازی توان و گرما را برای مشترکان محلی دارد [۲].

ریزشبکه در نقطه اتصال مشترک (PCC)<sup>۳</sup> از طریق مدارشکن‌های قدرت به شبکه ولتاژ متوسط متصل شده است. در حالت جزیره‌ای، ریزشبکه باید به صورت مستقل از شبکه، توانایی کنترل ولتاژ و فرکانس را داشته باشد و لذا به صورت یک شین P-V (تون-ولتاژ) عملکرد خواهد داشت.

مشابه با روش سنتی کنترل فرکانس در ژنراتور سنکرون [۳]، کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه نیز می‌تواند با استفاده از روش‌های کنترل افتی انجام پذیرد [۴]-[۸]. تحقیق حاضر در مقایسه با کنترل ثانویه بررسی شده در [۸]، پاسخ سریعتری برای کنترل ولتاژ و فرکانس فراهم آورد. مقایسه میان کنترل اینورتر و کنترل ژنراتور

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به بحران انرژی نظری افزایش مصرف انرژی، طبیعت فناپذیر سوخت‌های فسیلی و نیز آلودگی‌های زیست محیطی، گرایش به سمت انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، بیش از پیش اهمیت یافته است. در این راستا، استفاده از انرژی خورشیدی بدليل مزایای بسیار از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و سیستم‌های فتوولتائیک (PV<sup>۱</sup>) به طور گستردگی به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده (DG<sup>۲</sup>) در ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند [۱].

ریزشبکه مجموعه‌ای شامل واحدهای تولید پراکنده و ریزمنابع، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای الکتریکی است که به صورت

<sup>1</sup>- Photovoltaic

<sup>2</sup>-Distributed Generation

<sup>3</sup>- Point of Common Coupling

داده شده، بهره گرفته است. مشخصه I-V یک آرایه خورشیدی، مطابق شکل (۱)، از معادله ریاضی زیر بدست می‌آید:

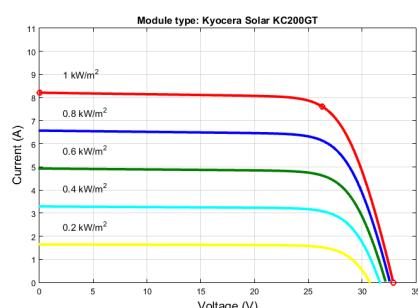
$$I = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_{therm} \alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

که در آن  $I_{PV}$  و  $I_0$  به ترتیب نشان‌دهنده جریان فتوون و جریان اشباع دیود می‌باشد.  $V_{therm}$  حرارتی آرایه،  $R_s$  و  $R_{sh}$  به ترتیب مقاومت معادل سری و موازی، و ضریب ایده‌ئال بودن است که معمولًا بین ۱ و ۱.۵ انتخاب می‌شود و در اینجا برابر ۱ فرض شده است. مشخصه I-V<sup>۲</sup> برای سطوح مختلف تابش در دمای سلول ۲۵°C بدست آمده از شبیه‌سازی در شکل (۲) نمایش داده شده است. همخوانی نمودارهای مذکور با دیتا شیت، اعتبار مدل به کاررفته را تایید می‌کند. پارامترهای پنل خورشیدی مذکور در جدول (۱) آمده است.

پنل PV تحت مطالعه، دارای ۱۲۵ رشته در ۴ سری می‌باشد. نقطه توان بیشینه (MPP) برای یک پنل در سطح تابش<sup>۳</sup>  $W/m^2$  و دمای  $25^\circ C$  (STC) برابر  $200$  وات بوده و لذا برای کل سیستم  $100$  کیلووات خواهد بود. MPP با تغییرات سطح تابش و دمای سلول، تغییر خواهد کرد.

جدول (۱): پارامترهای پنل PV در STC

مدل	Kyocera KC200GT
$P_{MPP}$	200 W
$V_{MPP}$	26.30 V
$I_{MPP}$	7.61 A
$V_{OC}$	32.90 V
$I_{SC}$	8.21 A



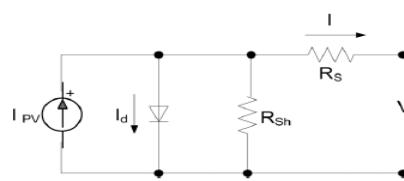
شکل (۲): مشخصه I-V پنل GT۲۰۰-KC200 که حاصل از شبیه‌سازی برای سطوح مختلف تابش

سنکرون در یک ریزشبکه جزیره‌ای به صورت دقیق و با ذکر جزیيات در [۹] ارائه شده است. بهره برداری و کنترل واسطه اینورتر منابع انرژی پراکنده (DERs<sup>۱</sup>) از نوع تجدیدپذیر مانند سیستم PV در یک ریزشبکه، به خصوص جهت حفظ ولتاژ - فرکانس در محدوده قابل قبول، بسیار چالش برانگیز است. روش کنترل ولتاژ مبتنی بر کنترل افتی کلاسیک جهت افت ولتاژ در [۱۰] مطالعه شده است.

در زمینه کنترل ولتاژ فرکانس با استفاده از سیستم PV به همراه کنترل MPPT و ذخیره باطری در ریزشبکه، کمبود پژوهشی احساس می‌شود. در [۱۱]، تنظیم فرکانس به کمک سیستم PV در ریزشبکه مطالعه شده، هرچند کنترل ولتاژ، هدف مقاله نبوده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی در آن وجود ندارد.

به طور خلاصه، تحقیق‌های قبلی در این زمینه از نظر مشارکت ادوات ذخیره‌ساز انرژی، هدف کنترل ولتاژ به همراه تنظیم فرکانس و یا لحظه‌گیردن حالات انتقال کنترل در سناریوهای مختلف، عملکرد مناسبی نداشته‌اند. تحقیق حاضر، با درنظر گرفتن این کمبودها و نیز، حذف محاسبات مربوط به انتقال میان چارچوب مرجع  $dq0$  به  $abc$  بر عکس، سعی در ارائه نتایج بهتری نسبت به گذشته دارد.

ادامه این مقاله بدین صورت سازماندهی شده که در بخش دوم، مدلسازی تحلیلی آرایه خورشیدی، پیکربندی سیستم PV و مدلسازی باطری به طور خلاصه بیان شده، سپس بخش سوم، به تشرییف الگوریتم‌های کنترلی مربوطه پرداخته، بخش چهارم دربردارنده توصیف ریزشبکه تحت مطالعه به همراه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بوده و در پایان، نتیجه‌گیری کلی در بخش پنجم ارائه شده است.



شکل (۱): مدار معادل تک دیودی سلول PV

## ۲- توصیف سیستم مورد مطالعه

در این قسمت اجزای مختلف سیستم مورد مطالعه، با ذکر جزیيات آن‌ها ارائه خواهد شد.

### ۲-۱- مدلسازی PV خورشیدی

مدل عمومی پذیرفته شده برای سلول خورشیدی، مدل تک دیودی است [۱۲]. مقاله حاضر از مدل تک دیودی برای سلول خورشیدی در آرایه خورشیدی مدل Kyocera KC200GT که در شکل (۱) نشان

<sup>۱</sup>- Distributed Energy Resources

<sup>۲</sup>- Maximum Power Point

<sup>۳</sup>- Standard Test Condition

شارژ باطری نیز برای دشارژ ۲۰٪ و برای شارژ ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. جزییات دقیق مدل باطری در [۱۴] داده شده که از نوع تحلیلی با دو معادله برای حالت دشارژ و شارژ می‌باشد. در این مدل، جهت مدلسازی ولتاژ مدار باز، عبارتی برای پلاریزاسیون ولتاژ و مقاومت در نظر گرفته شده که آن را بسیار دقیق تر می‌سازد.

روابط دشارژ و شارژ باطری به ترتیب در (۶) و (۷) بیان شده است :

$$V_{batt} = Vo - R.i - K \frac{Q}{Q - it} (it + t^*) + Exp(t) \quad (6)$$

$$= Vo - R.i - \left[ K \frac{Q}{it - 0.1Q} \right] i^* - \left[ K \frac{Q}{Q - it} \right] it + Exp(t) \quad (7)$$

که در روابط بالا داریم :

$V_{batt}$  : ولتاژ باطری (V)،  $i$  : ولتاژ ثابت باطری (V)،  $K$  ثابت پلاریزاسیون ( $V/Ah$ ) یا مقاومت پلاریزاسیون ( $\Omega$ )،  $Q$  ظرفیت باطری (Ah)،  $t$  شارژ حقیقی باطری (Ah)  $= \int I dt$ ،  $A$  دامنه ناحیه نمایی (V)،  $I$  معکوس ثابت زمانی ناحیه نمایی ( $Ah^{-1}$ )،  $R$  مقاومت داخلی ( $\Omega$ )،  $Exp(t)$  جریان باطری (A) و  $i^*$  جریان فیلترشده (A).

در (۷)، برآکت اول و دوم به ترتیب بیانگر مقاومت پلاریزاسیون و ولتاژ پلاریزاسیون می‌باشند. اندازه باطری به گونه ای انتخاب شده که توانایی جبران عدم تولید سیستم PV در شرایط تابش خیلی کم و یا صفر و فراهم سازی توان پشتیبان بیشینه را داشته باشد. در این کار، STC در ۱۰۰ کیلووات بوده و لذا باطری باید بتواند این مقدار توان را برای حداقل ۱ ساعت فراهم کند.

از آنجا که باطری برای شرکت در کاربردهای کوتاه مدت مانند کنترل فرکانس و یا تامین بارهای بحرانی در موقع اضطراری در نظر گرفته شده، پشتیبانی یک ساعته آن جهت ورود هر ژنراتور دیگری برای عهده دار شدن مسئولیت کنترل فرکانس و یا ایجاد تعادل توان اکتیو در ریز شبکه، کافی خواهد بود.

### ۳- بیان روش‌های کنترلی

در این قسمت روش‌های کنترلی اتخاذ شده برای سیستم فتوولتائیک در تحقیق حاضر بررسی خواهد شد.

#### ۱-۳- الگوریتم کنترل MPPPT

با توجه به هزینه بالا و بازده پایین سیستم PV مطلوب است که آرایه خورشیدی همیشه در یک سطح تابش و دمای مشخص و در بیشترین توان ممکن بهره برداری شود. این کنترل به نام دنبال کننده نقطه توان بیشینه (MPPT) شناخته می‌شود. بهره برداری از سیستم PV در نقطه بیشینه توان (MPP) می‌تواند در زمان اتصال به شبکه و در راستای پشتیبانی از شبکه با تامین انرژی پاک و اجتناب از نصب سیستم‌های ذخیره انرژی پرهزینه باشد. به این ترتیب، بارهای با

#### ۲-۲- پیکربندی سیستم PV

همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، سیستم دارای پیکربندی DC-DC برای کنترل MPPT استفاده شده است. یک پشتیبانی باطری می‌باشد. در این مدل، جهت اضطراری و حفظ ولتاژ و فرکانس ریز شبکه یا تامین بارهای بحرانی وجود دارد. باطری جهت تزریق یا جذب توان اکتیو از طریق یک مبدل دوپلیفه DC-DC به صورت موازی به PV متصل شده است. وقتی باطری توان را جذب می‌کند، مبدل در حالت کاهنده و زمانی که توان را به شبکه تزریق کرده، در حالت افزاینده عملکرد دارد.

سیستم PV از طریق اندوکتانس Lc به شبکه متصل شده است. این اندوکتانس باعث حذف اعوجاج‌های جریان خروجی PV می‌شود. نقطه اتصال را PCC نامیده و ولتاژ آن  $Vc(t)$  است. بقیه سیستم نیز فیدر توزیع IEEE ۱۳ شینه بوده که به صورت یک ایستگاه با امپدانس معادل  $R+jwLs$  مدل شده است. منبع PV از طریق خازن Cdc به لینک DC اینورتر متصل شده است. PV منبع توان اکتیو و خازن منبع توان راکتیو محاسبه می‌شود.

طبق تعاریف توان لحظه‌ای برای یک سیستم سه فاز متعادل با فرض عدم وجود هارمونیک، اگر  $P(t)$  و  $Vc(t)$  به ترتیب بیانگر ولتاژ لحظه‌ای PCC و ولتاژ خروجی اینورتر باشد، آن‌گاه توان متوسط اکتیو و راکتیو سیستم PV یعنی  $P(t)$  و  $Q(t)$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد [۱۳] :

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t v_i(\tau) ic(\tau) d\tau = \frac{Vt(t)Vc(t)}{\omega Lc} \sin \alpha \quad (2)$$

$$Q(t) = \frac{Vt(t)}{\omega Lc} (Vc(t) \cos \alpha - Vt(t)) \quad (3)$$

که  $\alpha$  زاویه فاز  $Vc(t)$  نسبت به ولتاژ PCC است. اگر زاویه کوچک باشد  $P(t)$  و  $Q(t)$  در (۲) و (۳) را می‌توان با اولین جزء از سری تیلور تخمین زد و به روابط زیر رسید :

$$P(t) \approx \frac{Vt(t)Vc(t)}{\omega Lc} \alpha \quad (4)$$

$$Q(t) \approx \frac{Vt(t)}{\omega Lc} (Vt(t) - Vc(t)) \quad (5)$$

#### ۳-۲- مدلسازی باطری

در این مقاله، مدل باطری از کتابخانه SimPowerSystem Matlab با اتخاذ پارامترهای مناسب، استخراج شده است. با توجه به طبیعت متغیر و عدم قطعیت در تولید توان خورشیدی و نیز نوسانات شدید بار، از باطری‌های اسید سربی با چرخه کامل استفاده می‌شود. قیود حالت

همیشه در نقطه مرجع بهره برداری خواهد شد. معادله این حلقه کنترلی در (۸) داده شده که در آن  $P_{ppv}$  و  $K_p$  به ترتیب بهره های تناسی و انتگرالی کنترلر می باشند.

$$\delta^* = K_p(P_{mppref} - P_{ppv}) + K_i \int_0^t (P_{mppref} - P_{ppv}) dt \quad (8)$$

به منظور کنترل ولتاژ در سمت AC از یک کنترلر پسخور (فیدبک) PI دیگر،  $PI_2$  استفاده شده است. همانطور که در شکل (۸) (حلقه ۲) دیده می شود، ولتاژ PCC اندازه گیری و مقدار موثر (rms)  $V_t^*(t)$  محاسبه شده، سپس این مقدار موثر با ولتاژ مرجع  $V_t^*(t)$  که می تواند توسط شبکه تعیین شود، مقایسه شده و خطای مربوطه به کنترلر PI داده می شود. ولتاژ خروجی اینورتر،  $(V_c^*(t))$ ، به گونه ای کنترل شده که با ولتاژ PCC هم فاز باشد و اندازه آن نیز کنترل شده تا ولتاژ PCC در سطح داده شده  $V_t^*(t)$  تنظیم شود. این طرح کنترلی می تواند به طور خاص با (۹) بیان شود :

$$V_c^* = v_t(t) \left[ 1 + K_p 2(V_t^*(t) - V_t(t)) + K_i 2 \int_0^t (V_t^*(t) - V_t(t)) dt \right] \quad (9)$$

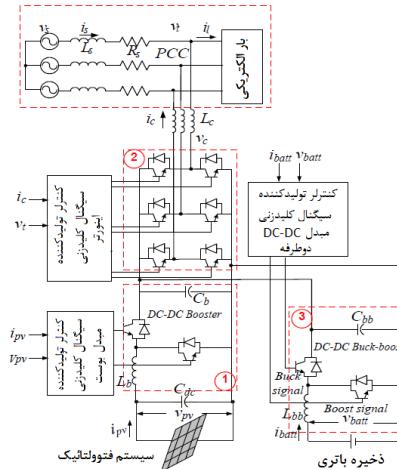
که در آن  $K_{i2}$  و  $K_{p2}$  به ترتیب بهره های تناسی و انتگرالی کنترلر می باشند. در (۹) علت افزوده شدن ۱ به سمت راست معادله این است که وقتی هیچ توانی از سیستم PV تزریق نشود، ولتاژ خروجی PV دقیقاً مشابه ولتاژ ترمیمال شود. کنترل فرکانس همانگونه که در حلقة ۳ نشان داده شده با کنترل توان اکتیو خروجی سمت اینورتر انجام می شود. فرکانس مرجع ریزشبکه یعنی ۶۰ هرتز با مقدار اندازه گیری شده مقایسه شده و خطای آن به کنترلر  $PI_3$  داده می شود که این کنترلر تغییر فاز  $\alpha_1^*$  را جهت جابجایی مقیاس زمانی شکل موج ولتاژ برای تزریق توان اکتیو کافی به منظور حفظ فرکانس در مقدار نامی ۶۰ هرتز، تولید می کند. معادله این کنترلر در زیر آمده است:

$$\zeta p_3(f_{ref} - f_{measured}) + K_i 3 \int_0^t (f_{ref} - f_{measured}) dt \quad (10)$$

در حلقة ۳ یک کنترلر دیگر یعنی  $PI_4$  نیز وجود دارد. این کنترلر، باعث حفظ تعادل توان اکتیو میان سمت AC و DC اینورتر می شود. سیگنال مرجع آن از تغییرات دینامیکی تزریق توان اکتیو از سمت AC اینورتر که توسط خروجی  $PI_3$  تعیین شده، بدست می آید. توان اکتیو اندازه گیری شده سمت AC،  $P_{AC\ measured}$ ، در ضریب ۱۰۰٪ ضرب شده تا کارایی اینورتر برابر ۹۸٪ فرض شود به طوری که توان اکتیو سمت DC برابر ۱۰۲٪ توان اکتیو سمت AC باشد. این دو توان با یکدیگر مقایسه شده و خطای مربوطه به  $PI_4$  داده شده تا تغییر فاز  $\alpha_2^*$  از این حلقة حاصل شود که رابطه آن در زیر آمده:

$$a^{2*} = K_p 4 (1.02 P_{AC} - P_{DC}) + K_i 4 \int_0^t (1.02 P_{AC} - P_{DC}) dt \quad (11)$$

اندازه PV سیستم MPP نصب شده، توسط انرژی خورشیدی، و فقط قسمت باقیمانده بارهای الکتریکی را شبکه قدرت تامین خواهد کرد. منحنی های P-V و  $KC$  برای سطوح مختلف تابش و دمای متغیر، به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است. شکل های (۶) و (۷) نیز به ترتیب نشان دهنده رابطه میان نقطه بیشینه توان (MPP) پنل خورشیدی با سطح تابش و دمای سلول است. واضح است که MPP با سطح تابش، رابطه مستقیم و با دمای سلول رابطه معکوس داشته و در هر دو حالت رابطه به صورت خطی است. لذا به کارگیری یک جدول به کمک تخمین خطی جهت یافتن داده های غیر موجود، منطقی است.



شکل (۳): پیکربندی سیستم PV به همراه MPPT و باطری [۱۵]

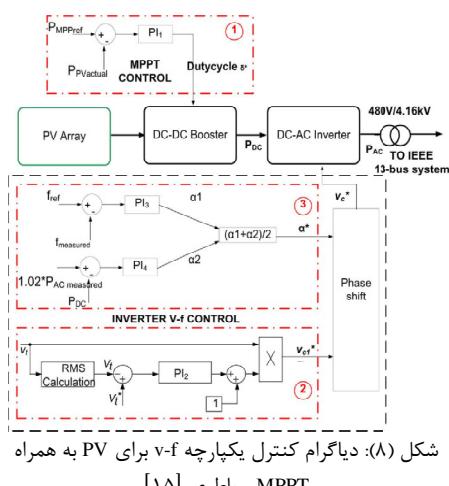
## ۲-۳- روش کنترل یکپارچه ولتاژ-فرکانس (v-f) و MPPT باطری

دیاگرام کنترل یکپارچه ولتاژ-فرکانس (v-f) و MPPT و باطری به ترتیب در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است [۱۵]. این روش از یک حلقة کنترلی برای کنترل MPPT، دو حلقة مختلف برای کنترل v-f در سمت اینورتر و یک حلقة دیگر برای مدیریت توان باطری تشکیل شده است. حلقة ۱ در شکل (۸)، کنترل MPPT در سمت آرایه PV بوده و از نقطه توان بیشینه (MPP) مرجع،  $P_{MPPref}$ ، که از جدول میزان تابش بر حسب MPP بدست آمده، استفاده و آن را با توان واقعی خروجی PV،  $P_{PV}$ ، مقایسه کرده و خطای مربوطه را به کنترلر  $PI_1$ ، فرستاده که خروجی آن، چرخه کاری مبدل افزاینده DC/DC ( $\delta^*$ ) است. لذا با تغییر این چرخه کاری، آرایه خورشیدی

میانگین تغییرفاز بدست آمده از سمت های AC و DC و  $\alpha_1^*$ ،  $\alpha_2^*$ ، طبق رابطه (۱۲) جهت رسیدن به تغییر فاز نهایی،  $\alpha^*$  برای شکل موج ولتاژ  $V_{c1}^*$  محاسبه شده که سپس سیگنال مرجع ولتاژ، را برای طرح کلیدزنی PWM اینورتر تولید می کند.

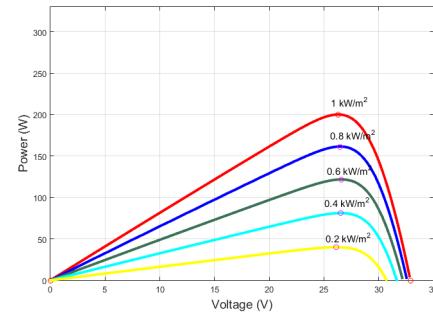
$$\alpha^* = \frac{(\alpha_1^* + \alpha_2^*)}{2} \quad (12)$$

در اینجا هدف درنظر گرفتن تغییرفاز از توان اکتیو هر دو سمت DC و AC، کنترل ولتاژ سمت DC و حصول مقدار مطلوب بوده است. اگر  $\alpha_1^*$  و  $\alpha_2^*$  مقادیر نزدیک به بهره های کنترل داشته باشند، می توان تضمین کرد که توان اکتیو سمت های DC و AC در تعادل هستند. این موضوع با حلقه کنترل ولتاژ کوپل بوده که اطمینان می دهد تا ولتاژ سمت DC توسط ولتاژ سمت AC در مقدار مطلوب حفظ شود. کنترلرهای مذکور و نیز موارد توصیف شده در بالا، با کنترل توان باطری، شکل (۹)، ادغام شده اند. جهت تامین یا جذب توان اکتیو و پشتیبانی از هدف کنترل فرکانس توسط سیستم PV، از باطری در پیکربندی سیستم PV استفاده شده است. اگر توان خورشیدی زیاد باشد، و توان اکتیو مورد نیاز جهت کنترل فرکانس از  $P_{MPP}$  کمتر باشد، باطری شارژ خواهد شد. اگر توان خورشیدی موجود کافی نبوده و توان اکتیو موردنیاز جهت کنترل فرکانس بیشتر از  $P_{MPP}$  باشد، جهت حفظ فرکانس ریزشکه در مقدار ۶۰ هرتز، باطری کاستی توان مربوطه را تامین خواهد کرد.

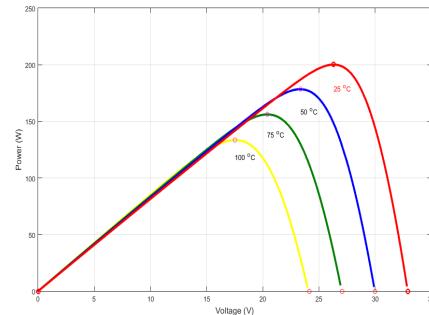


شکل (۸): دیاگرام کنترل یکپارچه v-f برای PV به همراه MPPT و باطری [۱۵]

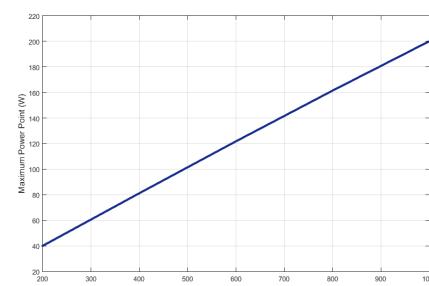
روش کنترل شارژ/دشارژ باطری طبق موارد فوق الذکر و نیز انتخاب حالت شارژ و دشارژ که قیود حالت شارژ (SOC) باطری را در نظر گرفته، در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل، توان مرجع باطری،  $P_{Battref}$  به طور دینامیکی از تفاصل میان توان اکتیو



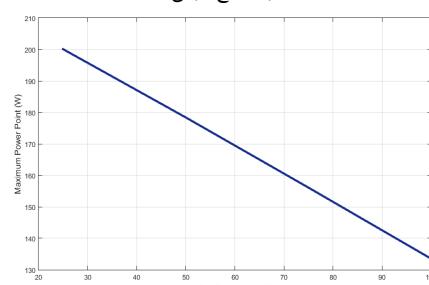
شکل (۴): منحنی PV پنل خورشیدی KC200GT در اثر تغییر سطح تابش



شکل (۵): منحنی PV پنل خورشیدی KC200GT در اثر تغییر دمای سلول



شکل (۶): رابطه نقطه توان بیشینه (MPP) پنل KC200GT با سطح تابش



شکل (۷): رابطه نقطه توان بیشینه (MPP) پنل KC200GT با دمای سلول

#### ۴- پیکربندی ریزشبکه و نتایج شبیه سازی

دیاگرام سیستم مربوط به فیدر توزیع ۱۳ شینه IEEE و محل قرارگرفتن آرایه PV در شکل (۱۰) نشان داده است. این فیدر توزیع، از یک زیرایستگاه، ۱۳ شین، ۱۱ خط و ۸ بار تشکیل شده است. بارها شامل انواع امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت (ZIP) بوده که بیشتر آن ها از نوع توان ثابت می باشند. در حالت متصل به شبکه، ایستگاه در شین ۶۵۰ و سطح ۱۱۵ کیلوولت به عنوان منبع تلقی می شود. در حالت جزیره ای، یک دیزل ژنراتور در همان شین به عنوان مرجع تعیین شده توسط کنترلر مرکزی (CC) ریزشبکه برای تامین توان اکتیو در مقدار ثابت، قرار می گیرد.

جدول (۲): بهره های کنترل برای کنترل v-f [۱۵]

$6 \times 10^{-8}$	$K_{p1}$	کنترل MPPT
$6 \times 10^{-6}$	$K_{i1}$	
0.0004	$K_{p2}$	کنترل ولتاژ
0.005	$K_{i2}$	
$9.9 \times 10^{-4}$	$K_{p3}$	کنترل فرکانس
$5 \times 10^{-3}$	$K_{i3}$	
$0.8 \times 10^{-9}$	$K_{p4}$	$P_{DC}$
$0.8 \times 10^{-8}$	$K_{i4}$	
$1.5 \times 10^{-8}$	$K_{p5}$	کنترل باطری
$1.5 \times 10^{-5}$	$K_{i5}$	

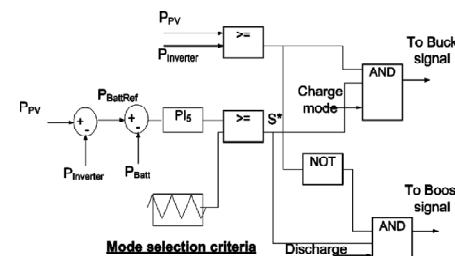
#### ۴- سنجش کنترل v-f در ریزشبکه جزیره ای

برای نمایش الگوریتم کنترل v-f در سطح تابش مختلف در نظر گرفته شده، سناریو ۱ و سناریو ۲ به ترتیب با سطح تابش ۱۰۰۰ و ۷۵۰ وات بر مترمربع، بهره های کنترلرهای PI در جدول (۲) آمده است. حین گذر از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره ای، جهت تولید مقدار مشخص و ثابتی از توان اکتیو طبق فرمان کنترلر مرکزی، دیزل ژنراتور کنترل شده است.

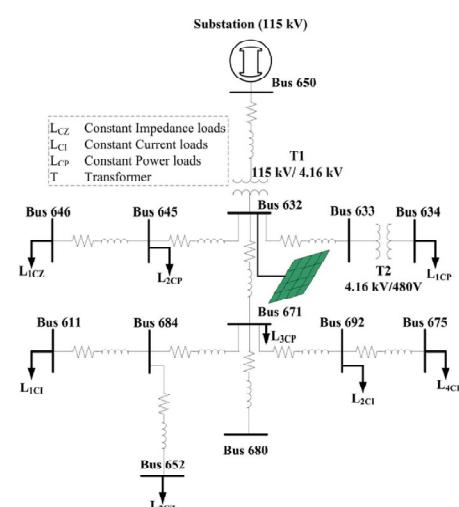
تزریقی اینورتر،  $P_{inverter}$ ،  $P_{PV}$  و توان تولیدی  $P_{batt}$ ، ایجاد می شود. کنترلر شامل یک کنترلر PI<sub>5</sub> بوده که سیگنال خطای حاصل شده بعد از تفاضل توان اکتیو باطری از توان مرجع را دریافت می کند. جهت تولید سیگنال  $S^*$ ، سیگنال بدست آمده از PI<sub>5</sub> با یک شکل موج مثنی با اندازه واحد، مقایسه شده که مشابه مدولاسیون پهنه ای پالس (PWM) در کنترل اینورتر است.  $K_{p5}$  و  $K_{i5}$  به ترتیب بهره های نسبی و انتگرالی کنترلر بوده و معادله این طرح کنترلی از رابطه زیر بدست می آید:

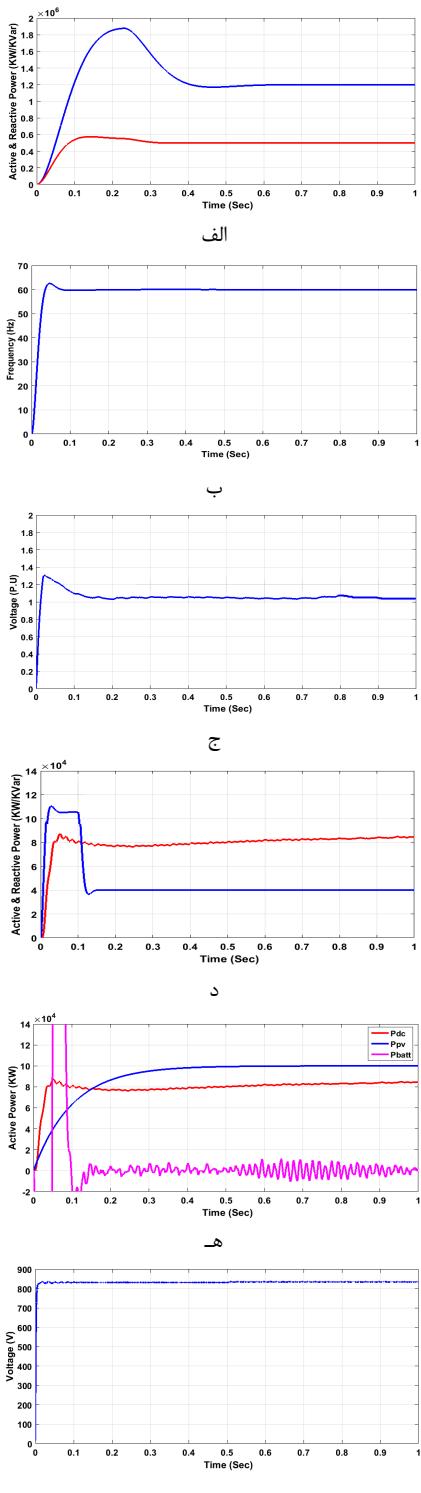
$$S^* = K_{p5} \left( P_{battref} - P_{batt} \right) + K_{i5} \int_0^t \left( P_{battref} - P_{batt} \right) dt \quad (13)$$

مرحله بعدی مربوط به تمایز میان حالت شارژ و دشارژ باطری  $P_{PV}$  بوده که از مقایسه  $P_{PV}$  با  $P_{inverter}$  حاصل می شود. اگر  $P_{PV} \geq P_{inverter}$  باشد، باطری در حالت شارژ بوده و لذا جهت تولید سیگنال کلیدزنی که حالت کاهنده مبدل DC-DC را فعال کند، سیگنال حاصل شده از PWM و  $S^*$ ، از یک AND منطقی عبور می کند. اگر  $P_{PV} \geq P_{inverter}$  نادرست باشد، جهت تولید سیگنال کلیدزنی که حالت افزاینده مبدل DC-DC را فعال کند، مخالف این سیگنال و  $S^*$ ، از یک AND منطقی عبور می کند. با این منطق کنترلی، مبدل توانایی عملکرد در هردو جهت را داشته و به طور موثر در هر زمان که نیاز باشد باطری را شارژ یا دشارژ می کند.



شکل (۹): دیاگرام کنترل توان باطری [۱۵]





شکل (۱۱): نتایج کنترل یکپارچه f-v (ستاریو ۱)

۶۰ هرتز ثابت می شود. واضح است که دیزل ژنراتور برای بازیابی فرکانس نسبت به ترکیب PV و باتری به زمان بیشتری نیاز دارد.

مطابق شکل (۱۱) الف و (۱۲) الف، حین دوره شبیه سازی، دیزل ژنراتور مقدار ثابت ۱.۲۵ مگاوات را تولید می کند. این شکل ها، توان راکتیو تولیدی دیزل ژنراتور را نیز نشان می دهند. در حالت جزیره ای، توان اکتیو تولیدی دیزل ژنراتور برای تامین تقاضای توان ریزشبکه کافی نیست.

شکل (۱۱) ب و (۱۲) ب، فرکانس ریزشبکه را نمایش داده که در ابتدا بدليل عدم تعادل میان بار-تولید به ۵۷.۸ هرتز افت کرده است. کنترل فرکانس سیستم PV در زمان ۰.۱ ثانیه شروع شده که به سرعت فرکانس را تنظیم کرده و آن را طی ۰.۲ ثانیه به مقدار ۶۰ هرتز بازمی گرداند. شکل (۱۱) ج و (۱۲) ج، ولتاژ PCC را به صورت (۱۳) (الف، شکل (۱۱) ج و (۱۲) ج، ولتاژ به سرعت در مقدار ۱ پریونیت تنظیم شده است.

شکل (۱۱) د و (۱۲) د، توان اکتیو و راکتیو تزریقی از اینورتر PV را که ولتاژ و فرکانس ریزشبکه را تنظیم می کند، نشان می دهد. توان اکتیو تزریقی از اینورتر مورد نیاز جهت فرکانس در ۶۰ هرتز در هر دو سناریو حدود ۸۰ کیلووات است. حین فراهم سازی این مقدار توان موردنیاز برای ریزشبکه، در تقسیم سهم توان PV و ذخیره انرژی باطری اختلافی وجود داشته که در شکل (۱۱) ه و (۱۲) ه دیده می شود.

در سناریو ۱، تابش خورشید فراوان بوده و مقدار ۱۰۰۰ وات بر مترمربع داشته و لذا PV توان بیشینه ۱۰۰ کیلووات را تولید کرده که از مقدار موردنیاز برای حفظ فرکانس بیشتر است. ۲۰ کیلووات اضافی برای شارژ باتری استفاده می شود. علامت منفی در توان باطری به معنای شارژ بوده و اینکه توان جذب می کند.

در سناریو ۲، بدليل کاهش سطح تابش، PV فقط حدود ۷۵ کیلووات در MPP تولید کرده که برای حفظ فرکانس ریزشبکه در مقدار ۶۰ هرتز کافی نیست. لذا کمبود توان حدود ۵ کیلووات توسط باطری تامین شده که در شکل ۲-۴ ه نشان داده شده است. علامت مثبت در توان باطری به معنای تزریق توان اکتیو به ریزشبکه است.

شکل (۱۱) و، (۱۲) و، ولتاژ DC را برای دو سناریو فوق الذکر نشان می دهند. می توان مشاهده کرد که ولتاژ برای دو مورد مطالعه به ترتیب در حدود ۸۵۰ و ۶۵۰ ولت حفظ شده است.

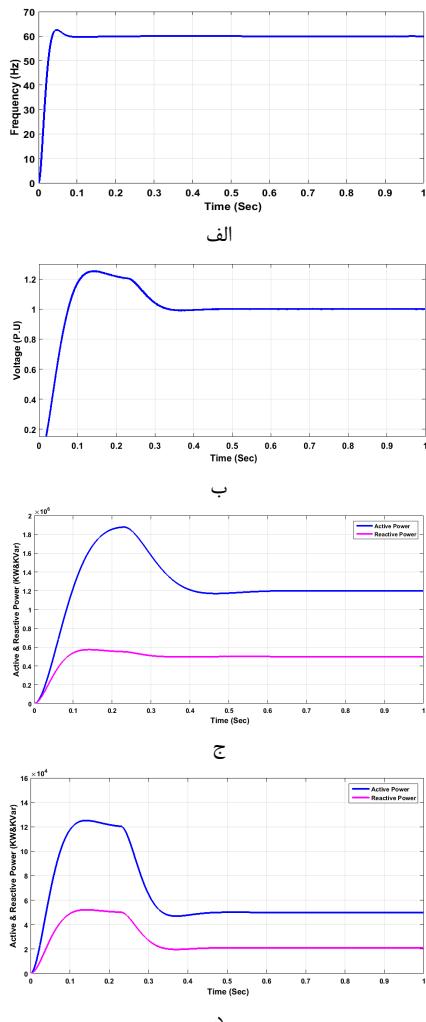
توان اکتیو به طورکلی به واسطه وجود کنترلرها متعادل است. این تعادل توان کوپل شده با کنترل ولتاژ سمت AC باعث حفظ ولتاژ سمت DC در یک مقدار پایدار شده که همان ویژگی منحصر به فرد کنترل هماهنگ اینورتر و MPPT پیشنهادی می باشد.

#### ۲-۴- مشارکت دیزل ژنراتور در کنترل v-f

شکل های (۱۳) الف تا د، نتایج حاصل در زمان حضور دیزل ژنراتور در تنظیم ولتاژ و فرکانس ریزشبکه و کنترل سیستم PV برای تولید توان اکتیو و راکتیو ثابت را نشان می دهند. کنترل v-f دیزل

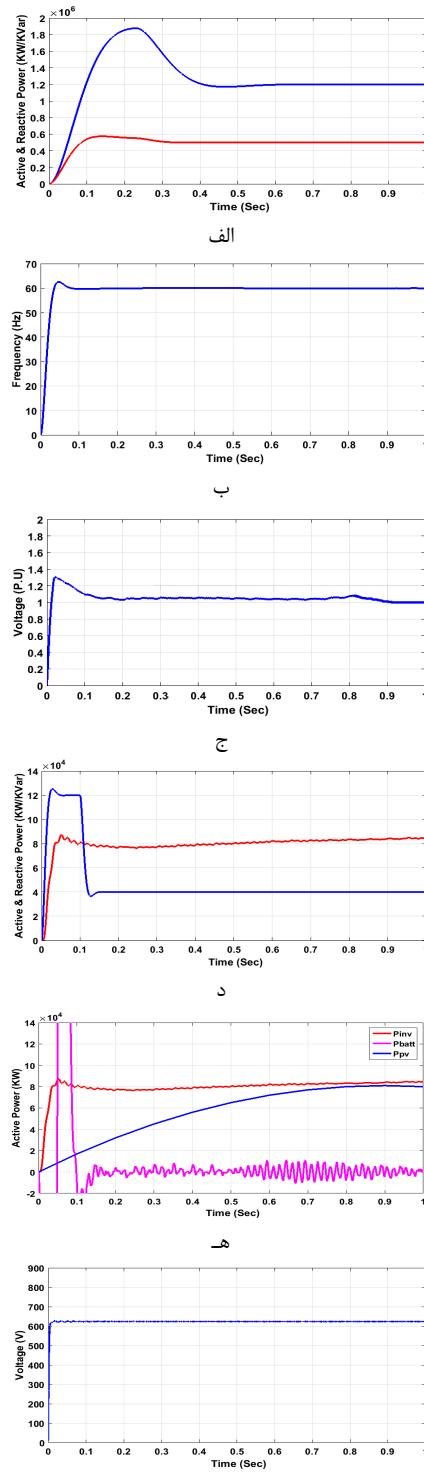
برای همه توان های تزریق شده در حدود ۰.۵ ثانیه زمان نیاز است تا پایدار شده و به مقادیر مطلوب برسند. لازم به ذکر است که تزریق توان از اینورتر PV نیز در ثانیه های ابتدایی و قبل از رسیدن به حالت پایدار تحت تأثیر نوسانات توان خروجی دیزل ژنراتور قرار گرفته است.

لذا به خوبی اثبات می شود که باطری و سیستم PV بدون اینرسی نسبت به دیزل ژنراتور با وجود اینرسی، توانایی کنترل سریع و موثر ولتاژ و فرکانس ریز شبکه را دارد.



شکل (۱۳): نتایج کنترل  $f$ - $v$  با مشارکت دیزل ژنراتور

شکل (۱۳) ب، ولتاژ ریز شبکه بوده که در حدود ۰.۵ ثانیه در مقدار ۱ پریونیت پایدار شده است. شکل (۱۳) ج، توان تولیدی دیزل ژنراتور و شکل (۱۳) د، توان اکتیو و راکتیو تزریقی اینورتر PV را که در حالت PQ ثابت بهره برداری شده، نشان می دهد.



شکل (۱۲): نتایج کنترل یکپارچه  $v$ - $f$  (ستاریو ۲)

- [10] J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero, and M. Liserre, Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, pp.4510–4519, 2009.
- [11] L. D.Watson and J.W. Kimball, —Frequency regulation of a microgrid using solar power, in *Proc. 2011 IEEE APEC*, pp. 321–326.
- [12] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [13] Y. Xu, H. Li, D. T. Rizy, F. Li, and J. D. Kueck, “Instantaneous active and nonactive power control of distributed energy resources with a current limiter,” in *Proc. IEEE Energy Conversion Congr.Expo.2010*.pp.3855–3861.
- [14] O. Tremblay and L. A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *World Electric Vehicle J.*, vol. 3,2009.
- [15] S.Adhikari,2014, " Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators With MPPT and Battery Storage in Microgrids ", *IEEE Transaction on SMART GRID*, VOL. 5, NO. .3

### روزمه

محمد مؤذن در اهواز متولد شده است (۱۳۶۱). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد (۱۳۸۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول(۱۳۹۴) سپری کرده است. فعالیت- های پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه کنترل ریز شبکه، سیستم فتوولتائیک، و بهره برداری از سیستم های قدرت است و در حال حاضر در واحد گازهای صنعتی فولاد خوزستان مشغول به خدمت می باشد.



افشین لشکر آرا در سال (۱۳۵۲) در تهران متولد شد. مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای خود را در سال های (۱۳۷۴)، (۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) بترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشگاه مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نموده است. ایشان هم اکنون عضو IEEE Senior Member (Member) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم های قدرت، شبکه های هوشمند، بهینه سازی، پایداری و کنترل سیستم های قدرت و ادوات FACTS می باشد.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، راهکار کنترل ولتاژ- فرکانس برای سیستم PV به همراه ذخیره باطری، در ریز شبکه جزیره ای بهره برداری شده و ذخیره روش، سیستم PV در نقطه توان بیشینه بهره برداری شده و ذخیره باطری جهت تزریق یا جذب توان به کمک چرخه شارژ/ دشوار، مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج بدست آمده، هماهنگی موثر میان کنترل v-f سمت اینورتر، کنترل MPPT و کنترل ذخیره باطری را نشان می دهد.

انتقال کنترل سیستم PV از حالت کنترل v-f به حالت توان ثابت و نیز انتقال کنترل دیزل ژنراتور از حالت توان ثابت به کنترل فرکانس با نتایج راضی کننده، اعتبارسنجی شده است. این ویژگی به کنترل کمک می کند که خود را با تغییرات سطح تابش و نیز وجود ذخیره باطری، منطبق نماید. کنترل v-f مذکور به کمک سیستم PV در بازگرداندن ولتاژ و فرکانس به مقادیر نامی، نسبت به دیzel ژنراتور از عملکرد بسیار سریعتری برخوردار است. ضمن اینکه انجام محاسبات در چارچوب مرجع abc باعث سادگی و سرعت بیشتر گردیده است. لذا، به طور کلی، نصب سیستم PV به همراه ذخیره باطری در آینده، می تواند در حفظ ولتاژ و فرکانس ریز شبکه بسیار کارآمد باشد.

### مراجع

- [1] J Morrison, J. Holt, E. Torrero, and M.A. Ralls (Aug. 2007). White paper on Distributed Generation, National Rural Electric Cooperative Association,[Online].
- [2] R. H. Lasseter, “MicroGrids,” in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002, vol. 1, pp. 305–308.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*, 2nd ed. New York, NY, USA:Mc- Graw Hill, 2002.
- [4] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, “Defining control strategies for MicroGrids islanded operation,”*IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, pp. 916–924, 2006.
- [5] B. Awad, J.Wu, and N. Jenkins, —Control of distributed generation, *Electrotechn. Info.*, vol. 125/12, pp. 409–414,2008.
- [6] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, E. Gregorio, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and F.Blaabjerg, Adaptive droop control applied to distributed generation inverters connected to the grid, in *Proc. 2008 IEEE ISIE*, pp. 2420–2425.
- [7] H. Bevrani and S. Shokoohi, An intelligent droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in islanded microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1505–1513, Sep. 2013.
- [8] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, and R. Teodorescu, Modelling, analysis and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters, in *Proc. IEEE 8th ICPE & ECCE*, pp. 272–279,2011.R. J. Vidmar. (1992, Aug.)
- [9] T. L. Vandoorn, B. Meersman, J. D. M. De Kooning, and L. Vandervelde, Analogy between conventional grid control and islanded microgrid control based on a global DC-link voltage droop, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.27, no. 3, pp. 1405–1414, Jul. 2012.