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

محمد مؤذن*[۱]، افشین لشکرآرا محمره[۲]

*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 v-f در اینورتر، کنترل MPPT و کنترل ذخیره باطری را نشان می‌دهد. مطالعات شبیه سازی بر روی فیدر توزیع ۱۳ شینه IEEE 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).

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به بحران انرژی نظیر 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 بدلیل مزایای بسیار از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و سیستم‌های فتوولتائیک (PV[۱]) به طور گسترده به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده (DG[۲]) 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 یک سیستم مستقل و کنترل‌پذیر، بهره برداری شده و توانایی فراهم سازی توان و گرما را برای مشترکان محلی دارد [۲].

ریزشبکه در نقطه اتصال مشترک (PCC[۳]) 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 (توان-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 [۸]-[۴]. 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

[1]- Photovoltaic
[2]-Distributed Generation
[3]- Point of Common Coupling

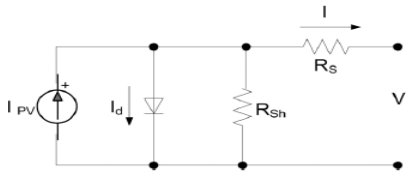
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

سنکرون در یک ریزشبکه جزیره‌ای به صورت دقیق و با ذکر جزییات در [۹] ارائه شده است. بهره برداری و کنترل واسطه اینورتر منابع انرژی پراکنده (DERs[1]) 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 لحاظ‌کردن حالات انتقال کنترل در سناریوهای مختلف، عملکرد مناسبی نداشته‌اند. تحقیق حاضر، با درنظرگرفتن این کمبودها و نیز، حذف محاسبات مربوط به انتقال میان چارچوب مرجع abc به dq0 و برعکس، 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 تشریح 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 [۱۲]

۲- توصیف سیستم مورد مطالعه

در این قسمت اجزای مختلف سیستم مورد مطالعه، با ذکر جزییات 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 داده شده، بهره گرفته است. مشخصه V-I یک آرایه خورشیدی، مطابق شکل (۱)، از معادله ریاضی زیر بدست می‌آید:

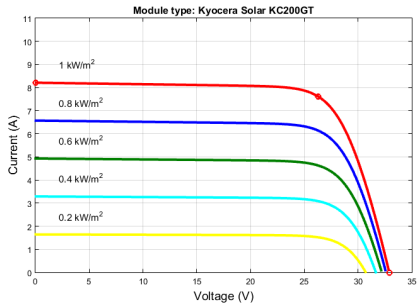
$$I = Ipv - Io\left[\exp\left(\frac{V + RsI}{Vtherm\alpha}\right) - 1\right] - \frac{V + RsI}{Rsh} \qquad (۱)$$

که در آن I_{PV} و I_o به ترتیب نشان‌دهنده جریان فوتون و جریان اشباع دیود می‌باشد. V_{therm} ولتاژ حرارتی آرایه، R_S و R_{Sh} به ترتیب مقاومت معادل سری و موازی، و α ضریب ایده ئال بودن است که معمولا بین ۱ و ۱.۵ انتخاب می‌شود و در اینجا برابر ۱ فرض شده است. مشخصه V-I، KC200GT برای سطوح مختلف تابش در دمای سلول 25°C بدست آمده از شبیه سازی 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[2]) برای یک پنل در سطح تابش W/m^2 ۱۰۰۰ و دمای 25°C (STC[3]) برابر ۲۰۰ وات بوده و لذا برای کل سیستم ۱۰۰ کیلووات خواهد بود. MPP با تغییرات سطح تابش و دمای سلول، تغییر خواهد کرد.

جدول (۱): پارامترهای پنل PV در STC [۱۵]

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 KC-Kyocera-GT۲۰۰ حاصل از شبیه سازی برای سطوح مختلف تابش

[1]- Distributed Energy Resources

[2]- Maximum Power Point

[3]- Standard Test Condition

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

۲-۲- پیکربندی سیستم PV

همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، سیستم دارای پیکربندی دو سطحی بوده که از یک مبدل افزاینده DC-DC برای کنترل MPPT استفاده شده است. یک پشتیبان باطری نیز برای موارد اضطراری و حفظ ولتاژ و فرکانس ریزشبکه یا تامین بارهای بحرانی وجود دارد. باطری جهت تزریق یا جذب توان اکتیو ازطریق یک مبدل دوطرفه DC-DC به صورت موازی به PV متصل شده است. وقتی باطری توان را جذب می کند، مبدل در حالت کاهنده و زمانی که توان را به شبکه تزریق کرده، در حالت افزاینده عملکرد دارد.

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

طبق تعاریف توان لحظه‌ای برای یک سیستم سه فاز متعادل با فرض عدم وجود هارمونیک، اگر $v_t(t)$ و $v_C(t)$ 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 خواهدشد [۱۳] :

$$P(t)=\frac{2}{T}\int_{t-T/2}^{t} v_t(\tau)ic(\tau)d\tau=\frac{Vt(t)Vc(t)}{\omega Lc}\sin\alpha \qquad (۲)$$

$$Q(t)=\frac{Vt(t)}{\omega Lc}\left(Vc(t)\cos\alpha-Vt(t)\right) \qquad (۳)$$

که α زاویه فاز $V_C(t)$ نسبت به ولتاژ PCC است. اگر زاویه α 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 :

$$P(t)\approx\frac{Vt(t)Vc(t)}{\omega Lc}\alpha \qquad (۴)$$

$$Q(t)\approx\frac{Vt(t)}{\omega Lc}\left(Vt(t)-Vc(t)\right) \qquad (۵)$$

۲-۳- 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 باطری های اسید سربی با چرخه کامل استفاده می شود. قیود حالت شارژ باطری نیز برای دشارژ ۲۰٪ و برای شارژ ۸۰٪ درنظرگرفته 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 درنظر گرفته شده که آن را بسیار دقیق تر می‌سازد.

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

$$V_{batt}=Vo-R.i-K\frac{Q}{Q-it}\left(it+t*\right)+Exp(t) \qquad (۶)$$

$$=Vo-R.i-\left[K\frac{Q}{it-0.1Q}\right]i*-\left[K\frac{Q}{Q-it}\right].it+Exp(t) \qquad (۷)$$

که در روابط بالا داریم :

V_{batt} : ولتاژ باطری (V)، V_o ولتاژ ثابت باطری (V)، K ثابت پلاریزاسیون (V/Ah) یا مقاومت پلاریزاسیون (Ω)، Q ظرفیت باطری (Ah)، it=∫I dt شارژ حقیقی باطری (Ah)، A دامنه ناحیه نمایی (V)، B معکوس ثابت زمانی ناحیه نمایی (Ah^{-1}) ، R مقاومت داخلی (Ω)، I جریان باطری (A) و i^* جریان فیلترشده (A).

در (۷)، براکت 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، MPP در STC برابر ۱۰۰ کیلووات بوده و لذا باطری باید بتواند این مقدار توان را برای حداکثر ۱ ساعت فراهم کند.

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

۳- بیان روش‌های کنترلی

در این قسمت روش های کنترلی اتخاذ شده برای سیستم فتوولتائیک در تحقیق حاضر بررسی خواهدشد.

۳-۱- الگوریتم کنترل MPPT

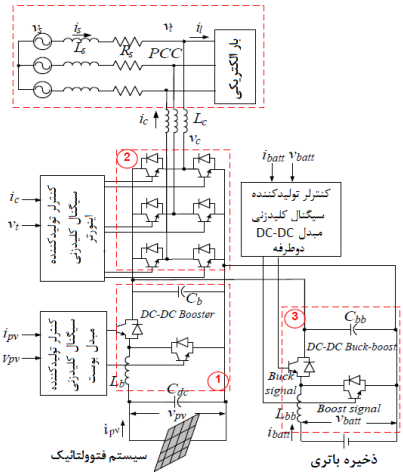
با توجه به هزینه بالا و بازده پایین سیستم PV، مطلوب است که آرایه خورشیدی همیشه در یک سطح تابش و دمای مشخص و در بیشترین توان ممکن بهره برداری شود. این کنترل به نام دنبال کننده نقطه توان بیشینه (MPPT) شناخته می‌شود. بهره برداری از سیستم PV در نقطه بیشینه توان (MPP) می تواند در زمان اتصال به شبکه و در راستای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

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

اندازه MPP سیستم PV نصب شده، توسط انرژی خورشیدی، و فقط قسمت باقیمانده بارهای الکتریکی را شبکه قدرت تامین خواهد کرد. منحنی های P-V پنل خورشیدی GT۲۰۰KC 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 نشان‌دهنده 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 غیرموجود، منطقی است.



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

۳-۲- روش کنترل یکپارچه ولتاژ-فرکانس (v-f) و MPPT و 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 حلقه کنترلی برای کنترل MPPT، دو حلقه مختلف برای کنترل v-f در سمت اینورتر و یک حلقه دیگر برای مدیریت توان باطری تشکیل شده است. حلقه 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 برحسب MPP بدست آمده، استفاده و آن را با توان واقعی خروجی PV، P_{PV}، مقایسه کرده و خطای مربوطه را به کنترلر PI، PI_1، فرستاده که خروجی آن، چرخه کاری مبدل افزاینده DC/DC، (δ^*) است. لذا با تغییر این چرخه کاری، آرایه خورشیدی همیشه در نقطه مرجع بهره برداری خواهد شد. معادله این حلقه کنترلی در (۸) داده شده که در آن K_{p1} و K_{i1} به ترتیب بهره های تناسبی و انتگرالی کنترلر می‌باشند.

$$\delta^* = Kp1(Pmppref - Ppv) + Ki1\int_0^t (Pmppref - Ppv)dt \qquad (۸)$$

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 می‌شود. 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 :

$$Vc^* = vt(t)\left[1 + Kp2\big(Vt^*(t) - Vt(t)\big) + Ki2\int_0^t \big(Vt^*(t) - Vt(t)\big)dt\right] \qquad (۹)$$

که در آن K_{p2} و K_{i2} به ترتیب بهره های تناسبی و انتگرالی کنترلر می‌باشند. در (۹) علت افزوده شدن ۱ به سمت راست معادله این است که وقتی هیچ توانی از سیستم PV تزریق نشود، ولتاژ خروجی PV دقیقا مشابه ولتاژ ترمینال شود. کنترل فرکانس همانگونه که در حلقه ۳ نشان داده شده با کنترل توان اکتیو خروجی سمت اینورتر انجام می‌شود. فرکانس مرجع ریزشبکه یعنی ۶۰ هرتز با مقدار اندازه گیری شده مقایسه شده و خطای آن به کنترلر PI_3 داده می‌شود که این کنترلر تغییرفاز α_1^* را جهت جابجایی مقیاس زمانی شکل موج ولتاژ برای تزریق توان اکتیو کافی به منظور حفظ فرکانس در مقدار نامی ۶۰ هرتز، تولید می‌کند. معادله این کنترلر در زیر آمده است:

$$\zeta p3(fref - fmeasured) + Ki3\int_0^t (fref - fmeasured)dt \qquad (۱۰)$$

در حلقه ۳ یک کنترلر دیگر یعنی PI_4 نیز وجود دارد. این کنترلر، باعث حفظ تعادل توان اکتیو میان سمت AC و DC اینورتر می‌شود. سیگنال مرجع آن از تغییرات دینامیکی تزریق توان اکتیو از سمت AC اینورتر که توسط خروجی PI_3 تعیین شده، بدست می‌آید. توان اکتیو اندازه گیری شده سمت AC، $P_{AC\ measured}$ ، در ضریب ۱.۰۲ 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 تغییرفاز α_2^* از این حلقه حاصل شود که رابطه آن در زیر آمده:

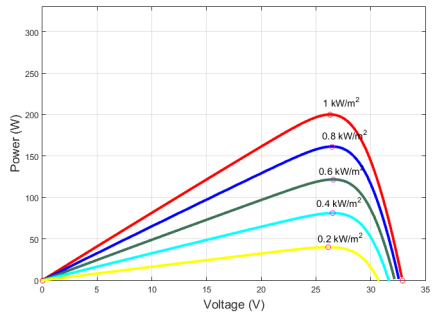
$$a2^* = Kp4\left(1.02P_{AC} - P_{DC}\right) + Ki4\int_0^t \left(1.02P_{AC} - P_{DC}\right)dt \qquad (۱۱)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

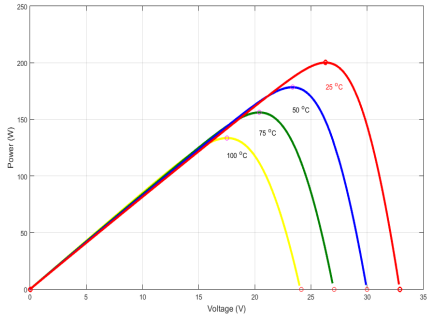
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

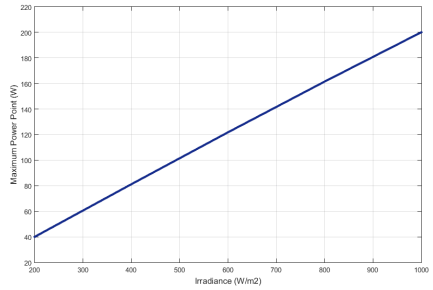
[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]



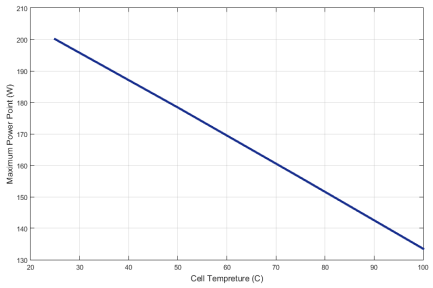
شکل (۴): منحنی PV پنل خورشیدی KC200GT در اثر تغییر سطح تابش



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



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



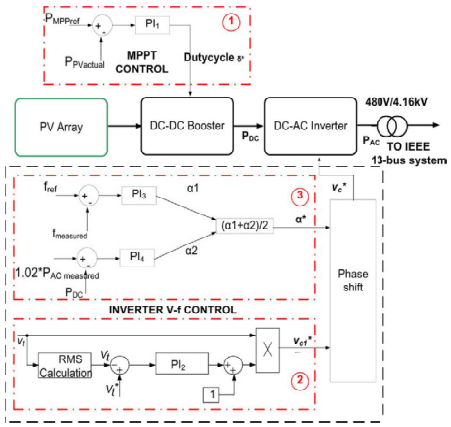
شکل (۷): رابطه نقطه توان بیشینه (MPP) پنل KC200GT با دمای سلول

میانگین تغییرفاز بدست آمده از سمت های DC و AC، α_1^* و α_2^* ، طبق رابطه (۱۲) جهت رسیدن به تغییر فاز نهایی، α^* برای شکل موج ولتاژ V_{c1}^* محاسبه شده که سپس سیگنال مرجع ولتاژ، V_c^* را برای طرح کلیدزنی PWM اینورتر تولید می‌کند.

$$a^* = \frac{\left(a_1^* + a_2^*\right)}{2} \qquad (۱۲)$$

در اینجا هدف درنظرگرفتن تغییرفاز از توان اکتیو هر دو سمت DC و AC، کنترل ولتاژ سمت DC و حصول مقدار مطلوب بوده است. اگر α_1^* و α_2^* مقادیر نزدیک به بهره های کنترلر داشته باشند، می‌توان تضمین کرد که توان اکتیو سمت های DC و AC در تعادل هستند. این موضوع با حلقه کنترل ولتاژ کوپل بوده که اطمینان می‌دهد 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 بوده 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 ریزشبکه 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]

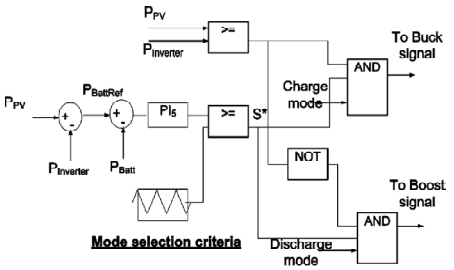
روش کنترل شارژ/ دشارژ باطری طبق موارد فوق الذکر و نیز انتخاب حالت شارژ و دشارژ که قیود حالت شارژ (SOC) باطری را درنظرگرفته، در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل، توان مرجع باطری، $P_{Battref}$، به طوردینامیکی از تفاضل میان توان اکتیو

تزریقی اینورتر، $P_{inverter}$، و توان تولیدی PV، P_{PV}، ایجاد می‌شود. کنترلر شامل یک کنترلر PI، PI_5، بوده که سیگنال خطای حاصل شده بعد از تفاضل توان اکتیو باطری از توان مرجع را دریافت می‌کند. جهت تولید سیگنال S^*، سیگنال بدست آمده از PI_5 با یک شکل موج مثلثی با اندازه واحد، مقایسه شده که مشابه مدولاسیون پهنای پالس (PWM) در کنترل اینورتر است. K_{p5} و K_{i5} به ترتیب بهره های تناسبی و انتگرالی کنترلر بوده و معادله این طرح کنترلی از رابطه زیر بدست می‌آید:

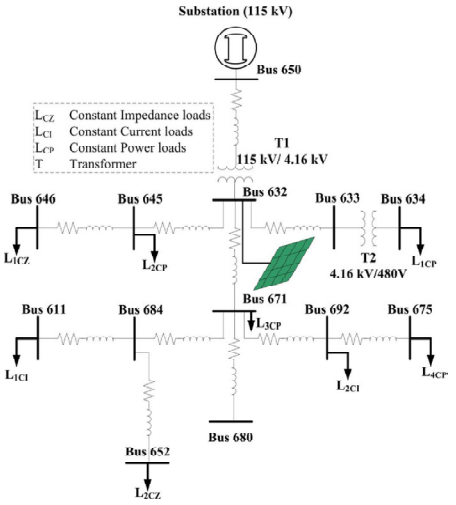
$$S^* = Kp5\left(P_{battref} - P_{batt}\right) + Ki5\int_0^t (P_{battref} - P_{batt})dt \qquad (۱۳)$$

مرحله بعدی مربوط به تمایز میان حالت شارژ و دشارژ باطری بوده که از مقایسه P_{PV} با $P_{inverter}$ حاصل می‌شود. 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 می‌کند.

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 می‌کند. 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 و یا دشارژ می‌کند.



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



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 شده 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 می‌باشند. در حالت متصل به شبکه، ایستگاه در شین ۶۵۰ و سطح ۱۱۵ کیلوولت به عنوان منبع تلقی می‌شود. 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 می‌گیرد.

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

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

۴-۱- سنجش کنترل v-f در ریزشبکه جزیره‌ای

برای نمایش الگوریتم کنترل v-f، دو سطح تابش مختلف درنظرگرفته 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.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015
[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

مطابق شکل (۱۱) الف و (۱۲) الف، حین دوره شبیه سازی، دیزل ژنراتور مقدار ثابت ۱.۲۵ مگاوات را تولید می‌کند. این شکل ها، توان راکتیو تولیدی دیزل ژنراتور را نیز نشان می‌دهند. درحالت 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 بدلیل 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 بازمی‌گرداند. شکل (۱۱) ج و (۱۲) ج، ولتاژ PCC را به صورت پریونیت (pu) نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با شروع کنترل، 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 می‌کند، نشان می‌دهد. 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) هـ و (۱۲) هـ دیده می‌شود.

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 باطری استفاده می‌شود. علامت منفی در توان باطری به معنای شارژ بوده و اینکه توان جذب می‌کند.

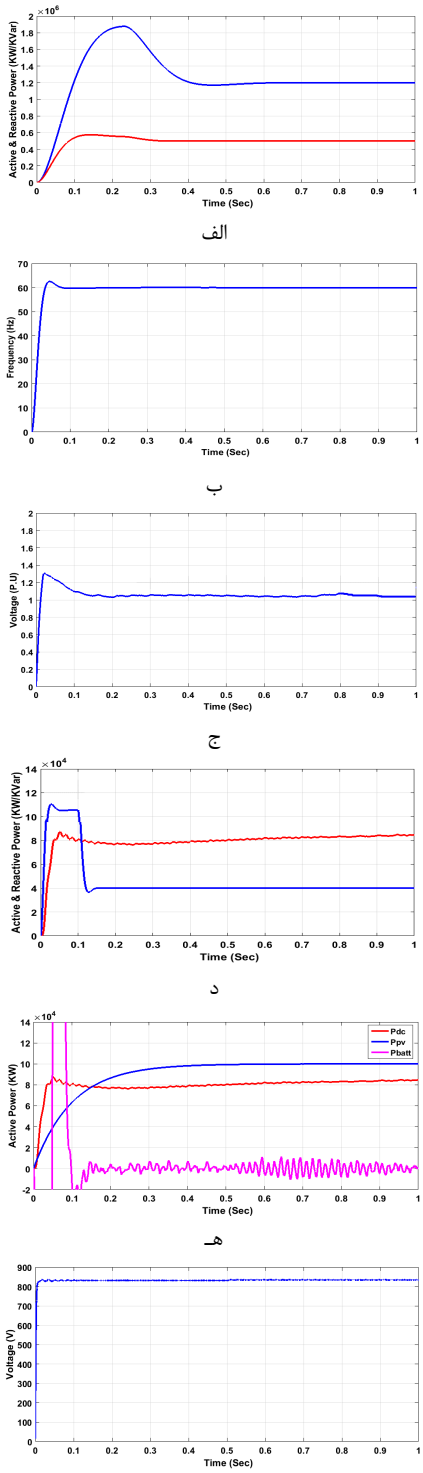
در سناریو ۲، بدلیل کاهش سطح تابش، PV فقط حدود ۷۵ کیلووات در MPP تولید کرده که برای حفظ فرکانس ریزشبکه در مقدار ۶۰ هرتز کافی نیست. لذا کمبود توان حدود ۵ کیلووات توسط باطری تامین شده که در شکل ۴-۲ هـ نشان داده شده است. علامت مثبت در توان باطری به معنی تزریق توان اکتیو به ریزشبکه است.

شکل (۱۱) و، و (۱۲) و، ولتاژ DC را برای دو سناریو فوق الذکر نشان می‌دهند. می‌توان 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 منحصربه فرد کنترل هماهنگ اینورتر و MPPT پیشنهادی می‌باشد.

۴-۲- 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 ژنراتور نیز در زمان ۰.۲ ثانیه شروع شده است. شکل (۱۳) الف، فرکانس ریزشبکه را نشان داده که در ابتدا افزایش ناگهانی داشته و سپس به تدریج کاهش یافته و در حدود ۰.۴ ثانیه در مقدار ۶۰ هرتز ثابت می شود. واضح است که دیزل ژنراتور برای بازیابی فرکانس نسبت به ترکیب PV و باطری به زمان بیشتری نیاز دارد.



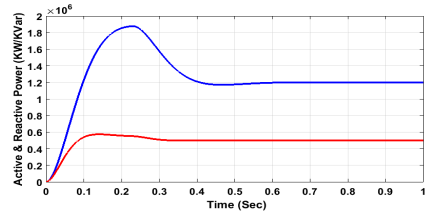
شکل (۱۱): نتایج کنترل یکپارچه v-f (سناریو ۱)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

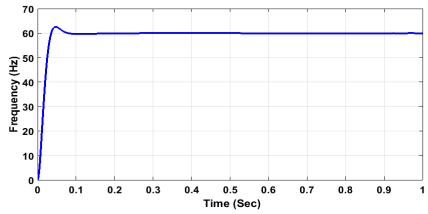
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

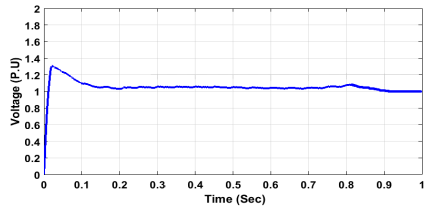
شکل (۱۳) ب، ولتاژ ریزشبکه بوده که در حدود ۰.۵ ثانیه در مقدار ۱ پریونیت پایدار شده است. شکل (۱۳) ج، توان تولیدی دیزل ژنراتور و شکل (۱۳) د، توان اکتیو و راکتیو تزریقی اینورتر PV را که در حالت PQ ثابت بهره برداری شده، نشان می دهد.



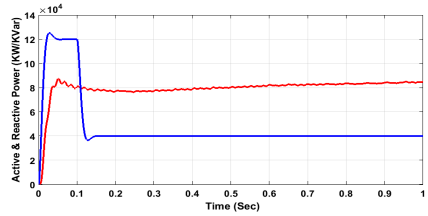
الف



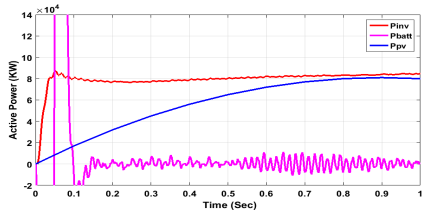
ب



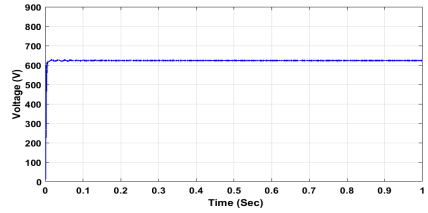
ج



د



هـ

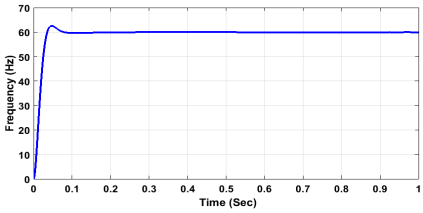


و

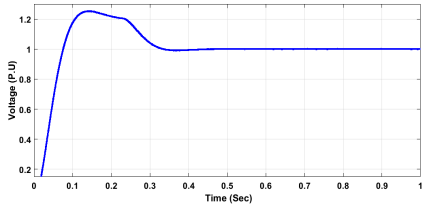
شکل (۱۲): نتایج کنترل یکپارچه v-f (سناریو ۲)

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 تاثیر نوسانات توان خروجی دیزل ژنراتور قرارگرفته است.

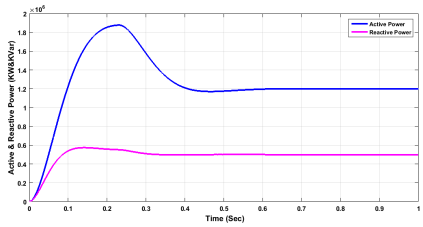
لذا به خوبی اثبات می شود که باطری و سیستم PV بدون اینرسی نسبت به دیزل ژنراتور با وجود اینرسی، توانایی کنترل سریع و موثر ولتاژ و فرکانس ریزشبکه را دارد.



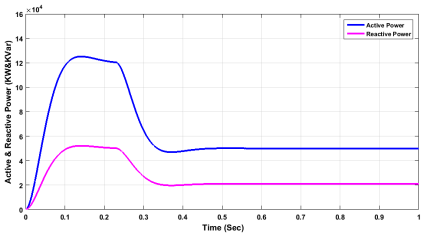
الف



ب



ج



د

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

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، راهکار کنترل ولتاژ-فرکانس برای سیستم PV به همراه ذخیره باطری، در ریزشبکه جزیره‌ای ارائه شده است. در این روش، سیستم PV در نقطه توان بیشینه بهره برداری شده و ذخیره باطری جهت تزریق یا جذب توان به کمک چرخه شارژ/دشارژ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده، هماهنگی موثر میان کنترل v-f سمت اینورتر، کنترل MPPT و کنترل ذخیره باطری را نشان می‌دهد.

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 راضی‌کننده، اعتبارسنجی شده است. این ویژگی به کنترلر کمک می‌کند 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 دیزل ژنراتور از عملکرد بسیار سریعتری برخوردار است. ضمن اینکه انجام محاسبات در چارچوب مرجع abc باعث سادگی و سرعت بیشتر گردیده است. لذا، به طورکلی، نصب سیستم PV به همراه ذخیره باطری در آینده، می‌تواند در حفظ ولتاژ و فرکانس ریزشبکه بسیار کارامد 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. Vandevelde, 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.

[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

رزومه

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)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول(۱۳۹۴) سپری کرده است. فعالیت-های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل ریزشبکه، سیستم فتوولتائیک، و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر در واحد گازهای صنعتی فولاد خوزستان مشغول به خدمت می‌باشد.

افشین لشکرآرا در سال(۱۳۵۲) در تهران متولد شد. مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای خود را در سال‌های (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 ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک آمریکا(IEEE Senior Member) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند، بهینه سازی، پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت و ادوات FACTS می-باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 3-No. 2-autumn 2014& winter 2015

[DOR: 20.1001.1.23222468.1393.3.2.1.9]