

تنظیم ولتاژ و فرکانس در یک ریزشبهکه 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 ریزشبهکه 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

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) از طریق مدارشکن‌های قدرت به شبکه ولتاژ متوسط متصل شده است. در حالت جزیره‌ای، ریزشبهکه 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 ریزشبهکه نیز می‌تواند با استفاده از روش‌های کنترل اکتی 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

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^1) به طور گسترده به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده (DG^2) در ریزشبهکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند [۱].

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

¹ - Photovoltaic

² - Distributed Generation

³ - Point of Common Coupling

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

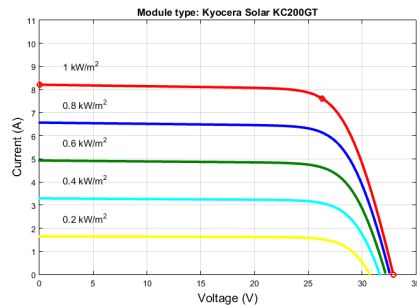
$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_{therm} \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

که در آن I_{pv} و I_0 به ترتیب نشان‌دهنده جریان 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 ایده‌ئال بودن است که معمولاً 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 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^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



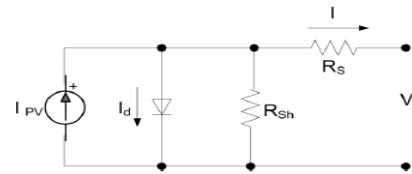
شکل (۲): مشخصه I-V پنل KC200GT حاصل از شبیه‌سازی برای سطوح مختلف تابش

سنکرون در یک ریزشبه‌جزیره‌ای به صورت دقیق و با ذکر جزئیات در [۹] ارائه شده است. بهره برداری و کنترل واسطه اینورتر منابع انرژی پراکنده ($DERs^1$) از نوع تجدیدپذیر مانند سیستم PV در یک ریزشبه‌جزیره، به خصوص جهت حفظ ولتاژ - فرکانس در محدوده قابل قبول، بسیار چالش برانگیز است. روش کنترل ولتاژ مبتنی بر کنترل افی 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 باتری در ریزشبه‌جزیره، کمبود پژوهشی احساس می‌شود. در [۱۱]، تنظیم فرکانس به کمک سیستم PV در ریزشبه‌جزیره 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 لحاظ کردن حالات انتقال کنترل در سناریوهای مختلف، عملکرد مناسبی نداشته‌اند. تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن 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 باتری به طور خلاصه بیان شده، سپس بخش سوم، به تشریح الگوریتم‌های کنترلی مربوطه پرداخته، بخش چهارم دربردارنده توصیف ریزشبه‌جزیره 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 جزئیات آن‌ها ارائه خواهد شد.

۱-۲- 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

²- Maximum Power Point
³- Standard Test Condition

¹- Distributed Energy Resources

۲-۲- پیکربندی سیستم PV

همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، سیستم دارای پیکربندی دو سطحی بوده که از یک مبدل افزایش‌دهنده DC-DC برای کنترل MPPT استفاده شده است. یک پشتیبان باتری نیز برای موارد اضطراری و حفظ ولتاژ و فرکانس ریزش‌بکه یا تامین بارهای بحرانی وجود دارد. باتری جهت تزریق یا جذب توان اکتیو از طریق یک مبدل دو طرفه DC-DC به صورت موازی به PV متصل شده است. وقتی باتری توان را جذب می‌کند، مبدل در حالت کاهنده و زمانی که توان را به شبکه تزریق کرده، در حالت افزایش‌دهنده 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 $V_c(t)$ است. بقیه سیستم نیز فیدر توزیع ۱۳ شینه IEEE بوده که به صورت یک ایستگاه با امپدانس معادل $R+j\omega L_s$ مدل شده است. منبع PV از طریق خازن C_{dc} به لینک DC اینورتر متصل شده است. PV منبع توان اکتیو و خازن منبع توان راکتیو محسوب می‌شود.

طبق تعاریف توان لحظه‌ای برای یک سیستم سه فاز متعادل با فرض عدم وجود هارمونیک، اگر $v_i(t)$ 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 خواهد شد [۱۳]:

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t v(\tau) i_c(\tau) d\tau = \frac{V_t(t)V_c(t)}{\omega L_c} \sin \alpha \quad (2)$$

$$Q(t) = \frac{V_t(t)}{\omega L_c} (V_c(t) \cos \alpha - V_t(t)) \quad (3)$$

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:

$$P(t) \approx \frac{V_t(t)V_c(t)}{\omega L_c} \alpha \quad (4)$$

$$Q(t) \approx \frac{V_t(t)}{\omega L_c} (V_t(t) - V_c(t)) \quad (5)$$

۲-۳- مدلسازی باتری

در این مقاله، مدل باتری 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 باتری‌های اسید سربی با چرخه کامل استفاده می‌شود. قیود حالت

شارژ باتری نیز برای دشارژ ۲۰٪ و برای شارژ ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. جزییات دقیق مدل باتری 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 باتری به ترتیب در (۶) و (۷) بیان شده است:

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

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

که در روابط بالا داریم:

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

در (۷)، برآکت اول و دوم به ترتیب بیانگر مقاومت پلاریزاسیون و ولتاژ پلاریزاسیون می‌باشند. اندازه باتری به گونه‌ای 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 باتری باید بتواند این مقدار توان را برای حداکثر ۱ ساعت فراهم کند.

از آنجا که باتری برای شرکت در کاربردهای کوتاه مدت مانند کنترل فرکانس و یا تامین بارهای بحرانی در مواقع 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 ریزش‌بکه، کافی خواهد بود.

۳- بیان روش‌های کنترلی

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

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) 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

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 کنترل می باشند.

$$\delta^* = K_{p1}(P_{mppref} - P_{pv}) + K_{i1} \int_0^t (P_{mppref} - P_{pv}) dt \quad (8)$$

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 کنترل 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:

$$V_c^* = v_t(t) \left[1 + K_{p2}(V_t^*(t) - V_t(t)) + K_{i2} \int_0^t (V_t^*(t) - V_t(t)) dt \right] \quad (9)$$

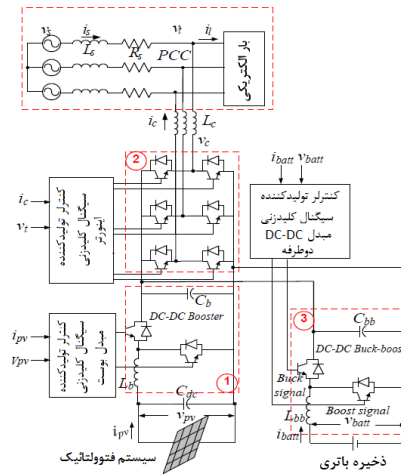
که در آن K_{i2} و K_{p2} به ترتیب بهره های تناسبی و انتگرالی کنترل می باشند. در (۹) علت افزوده شدن ۱ به سمت راست معادله این است که وقتی هیچ توانی از سیستم PV تزریق نشود، ولتاژ خروجی PV دقیقاً مشابه ولتاژ ترمینال شود. کنترل فرکانس همانگونه که در حلقه ۳ نشان داده شده با کنترل توان اکتیو خروجی سمت اینورتر انجام می شود. فرکانس مرجع ریز شبکه یعنی ۶۰ هرتز با مقدار اندازه گیری شده مقایسه شده و خطای آن به کنترل PI_3 داده می شود که این کنترل تغییر فاز 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 می کند. معادله این کنترل در زیر آمده است:

$$\alpha_1^* = \arctan \left[\frac{K_{p3}(f_{ref} - f_{measured}) + K_{i3} \int_0^t (f_{ref} - f_{measured}) dt}{f_{measured}} \right] \quad (10)$$

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 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 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 تغییر فاز α_2^* از این حلقه حاصل شود که رابطه آن در زیر آمده:

$$\alpha_2^* = K_{p4}(1.02P_{AC} - P_{DC}) + K_{i4} \int_0^t (1.02P_{AC} - P_{DC}) dt \quad (11)$$

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 $GT_{20} \cdot KC$ 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 غیرموجود، منطقی است.



شکل (۳): پیگردی سیستم PV به همراه MPPT و باطری

[۱۵]

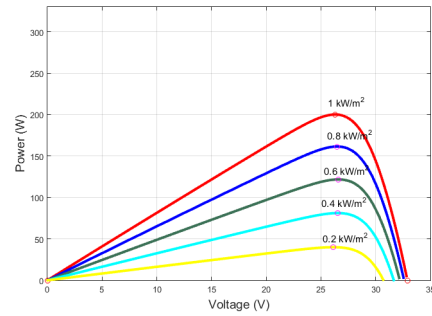
۲-۳- روش کنترل یکپارچه ولتاژ-فرکانس (v-f) و MPPT و باطری

دیگرام 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 P_{pv} ، مقایسه کرده و خطای مربوطه را به کنترل PI_1 ، فرستاده که خروجی آن، چرخه کاری مبدل افزایش دهنده DC/DC، δ^* ، است. لذا با تغییر این چرخه کاری، آرایه خورشیدی

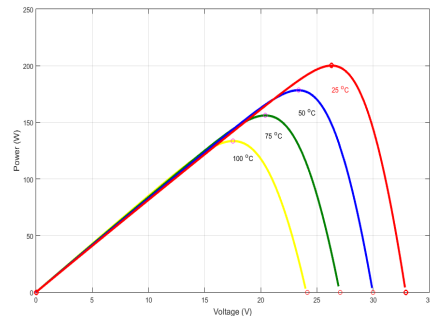
میانگین تغییر فاز بدست آمده از سمت های DC و AC، α_1^* و α_2^* ، طبق رابطه (۱۲) جهت رسیدن به تغییر فاز نهایی، برای شکل موج ولتاژ V_{c1}^* محاسبه شده که سپس سیگنال مرجع ولتاژ، V_c^* را برای طرح کلیدزنی PWM اینورتر تولید می کند.

$$\alpha^* = \frac{(a_1^* + a_2^*)}{2} \quad (12)$$

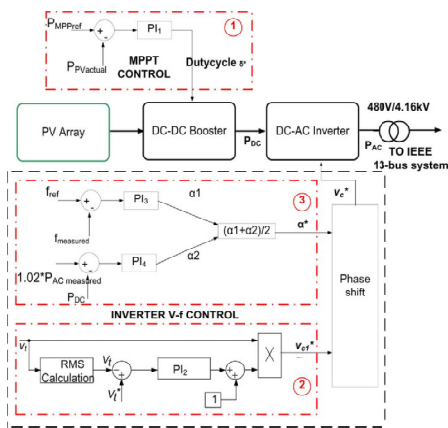
در اینجا هدف در نظر گرفتن تغییر فاز از توان اکتیو هر دو سمت DC و AC، کنترل ولتاژ سمت DC و حصول مقدار مطلوب بوده است. اگر α_1^* و α_2^* مقادیر نزدیک به بهره های کنترلر داشته باشند، می توان تضمین کرد که توان اکتیو سمت های DC و AC در تعادل هستند. این موضوع با حلقه کنترل ولتاژ کوپل بوده که اطمینان می دهد 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 باتری، شکل (۹)، ادغام شده اند. جهت تامین یا جذب توان اکتیو و پشتیبانی از هدف کنترل فرکانس توسط سیستم PV، از باتری 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، باتری شارژ خواهد شد. اگر توان خورشیدی موجود کافی نبوده و توان اکتیو مورد نیاز جهت کنترل فرکانس بیشتر از P_{MPP} باشد، جهت حفظ فرکانس ریزشیکه در مقدار ۶۰ هرتز، باتری کاستی توان مربوطه را تامین خواهد کرد.



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

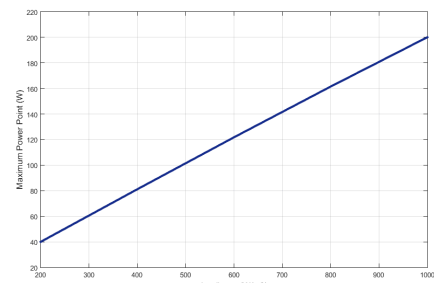


شکل (۵): منحنی PV پنل خورشیدی KC200GT در اثر تغییر دمای سلول

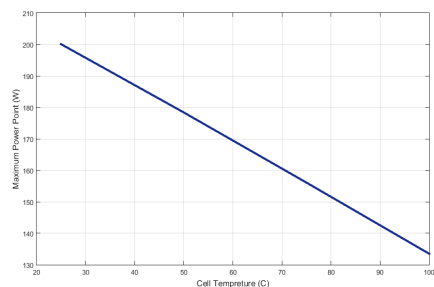


شکل (۸): دیاگرام کنترل یکپارچه v-f برای PV به همراه MPPT و باتری [۱۵]

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



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

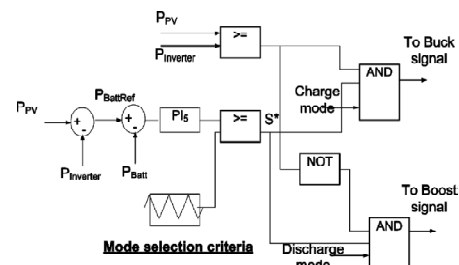


شکل (۷): رابطه نقطه توان بیشینه (MPP) پنل KC200GT با دمای سلول

تزیقی اینورتر، $P_{inverter}$ ، و توان تولیدی P_{PV} ، P_{PV} ایجاد می‌شود. کنترلر شامل یک کنترلر PI_5 ، PI_5 بوده که سیگنال خطای حاصل شده بعد از تفاضل توان اکتیو باتری 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:

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

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 $P_{PV} < P_{inverter}$ نادرست باشد، جهت تولید سیگنال کلیدزنی که حالت افزایشنده 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 هر دو 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 ریزشبه و نتایج شبیه سازی

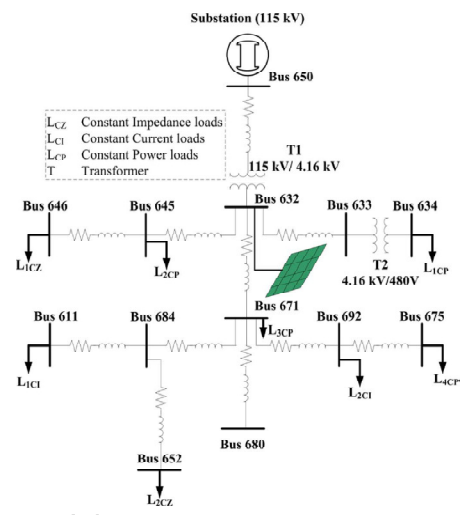
دیاگرام سیستم مربوط به فیدر توزیع ۱۳ شینه IEEE و محل قرارگرفتن آرایه PV در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این فیدر توزیع، از یک زیرایستگاه، ۱۳ شین، ۱۱ خط و ۸ بار تشکیل شده است. بارها شامل انواع امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت (ZIP) بوده که بیشتر آن ها از نوع توان ثابت می‌باشند. در حالت متصل به شبکه،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

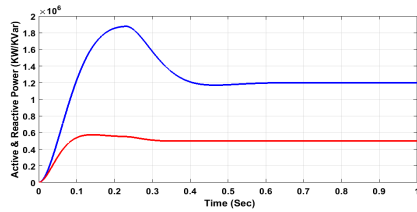
جدول (۲): بهره های کنترلر برای کنترل v-f [۱۵]

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

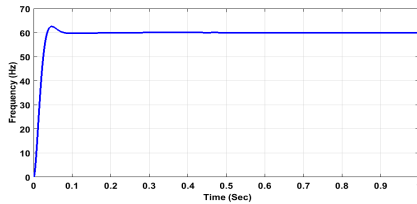
۴-۱- سنجش کنترل v-f در ریزشبه جزیره ای

برای نمایش الگوریتم کنترل v-f، دو 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.

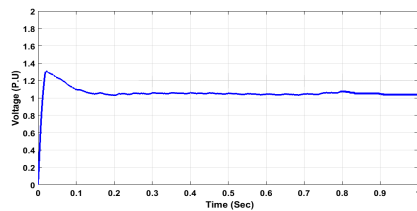




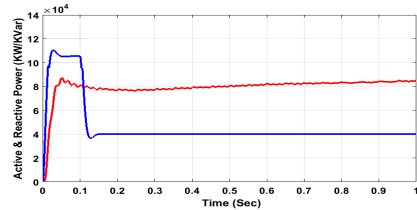
الف



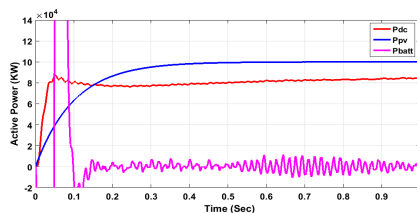
ب



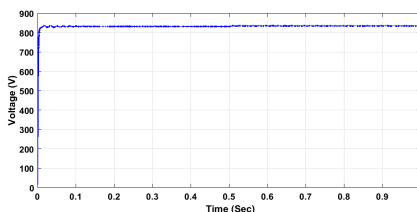
ج



د



هـ



و

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

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

ژنراتور مطابق شکل (۱۱) الف و (۱۲) ب، فرکانس ریزشکبه 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 بازمی گرداند. شکل (۱۱) ج و (۱۲) ج، ولتاژ PCC را به صورت پریونیت (pu) نشان می دهد. می توان 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 ریزشکبه 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 ریزشکبه، در تقسیم سهم توان PV و ذخیره انرژی باتری اختلافی وجود داشته که در شکل (۱۱) هـ و (۱۲) هـ 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 باتری به معنای شارژ بوده و اینکه توان جذب می کند.

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

شکل (۱۱) و، 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 طور کلی 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.

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

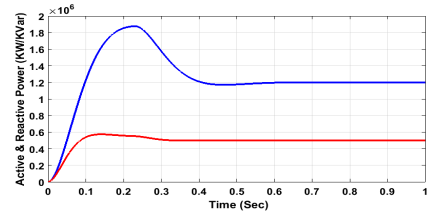
۴-۲- مشارکت دیزل ژنراتور در کنترل v-f

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

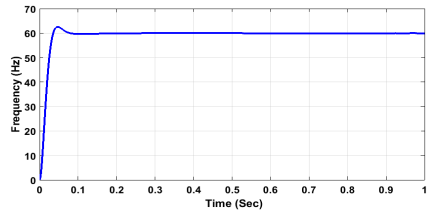
شکل (۱۳) ب، ولتاژ ریزش شبکه بوده که در حدود ۰.۵ ثانیه در مقدار ۱ پریونیت پایدار شده است. شکل (۱۳) ج، توان تولیدی دیزل ژنراتور و شکل (۱۳) د، توان اکتیو و راکتیو تزریقی اینورتر PV را که در حالت PQ ثابت بهره برداری شده، نشان می دهد.

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 قرار گرفته است.

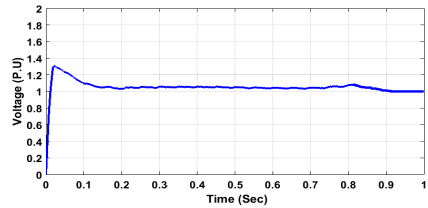
لذا به خوبی اثبات می شود که باطری و سیستم PV بدون اینرسی نسبت به دیزل ژنراتور با وجود اینرسی، توانایی کنترل سریع و موثر ولتاژ و فرکانس ریزش شبکه را دارد.



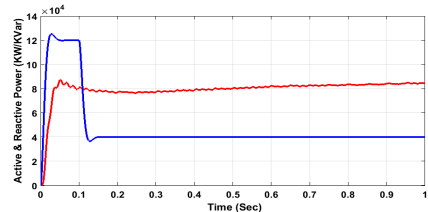
الف



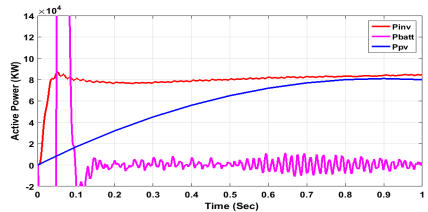
ب



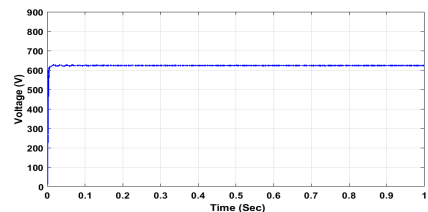
ج



د

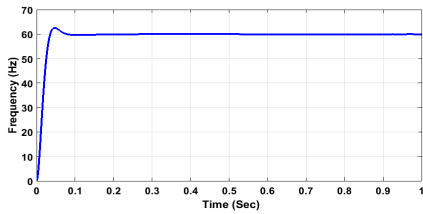


ه

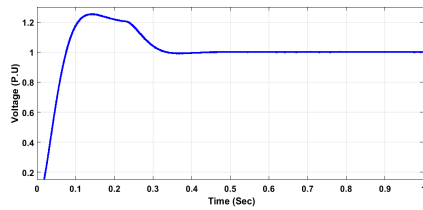


و

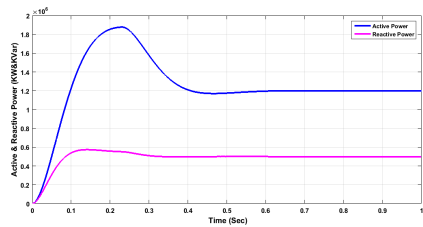
شکل (۱۲): نتایج کنترل یکپارچه V-f (سناریو ۲)



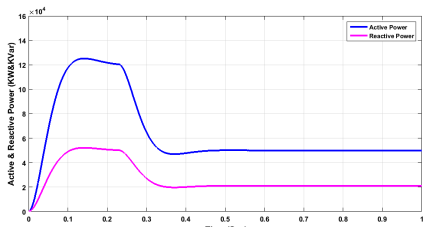
الف



ب



ج



د

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

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، راهکار کنترل ولتاژ-فرکانس برای سیستم PV به همراه ذخیره باتری، در ریزشبهه جزیره‌ای ارائه شده است. در این روش، سیستم PV در نقطه توان بیشینه بهره برداری شده و ذخیره باتری 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 باتری 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 رضی‌کننده، اعتبارسنجی شده است. این ویژگی به کنترلر کمک می‌کند که خود را با تغییرات سطح تابش و نیز وجود ذخیره باتری، 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 طور کلی، نصب سیستم PV به همراه ذخیره باتری در آینده، می‌تواند در حفظ ولتاژ و فرکانس ریزشبهه 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. 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)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۴) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل ریزشبهه، 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 هم‌اکنون عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک آمریکا (IEEE Senior Member) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند، بهینه‌سازی، پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت و ادوات FACTS می‌باشد.