

طراحی سیستم جدید هوشمند فتوولتائیک، به منظور انتقال ماکزیمم توان در شرایط عدم تطابق تابش روی پنل‌ها

حسین علی اصغری^۱، عبدالرضا اسماعیلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

^۲ عضو هیئت علمی پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

چکیده

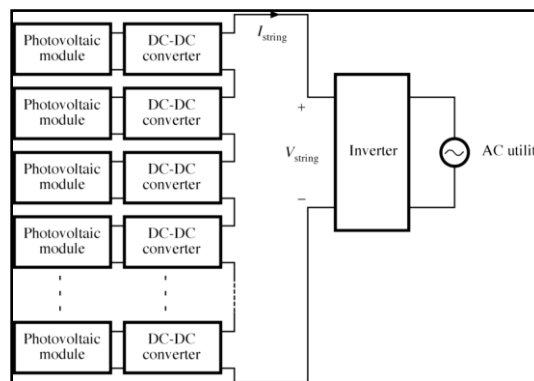
این مقاله به تاثیر تابش نامتعادل روی پنل‌های فتوولتائیک، در یک آرایه پرداخته است. تغییر شدت تابش میان پنل‌های یک آرایه به دلیل اتصالات مداری موجب انحراف نقطه ماکزیمم توان، عدم ردیابی صحیح آن، و در نتیجه کاهش راندمان در ساختارهای متداول فتوولتائیک می‌شود. با پیشرفت حوزه الکترونیک قدرت و ورود آن به حوزه فتوولتائیک، ساختارهای مختلفی با استفاده از کانوترهای الکترونیک قدرت و پنل‌های فتوولتائیک پیشنهاد شده است. در این تحقیق با بررسی ساختارهای مختلف روی یک نمونه واقعی، ساختار هوشمند به عنوان بهترین ساختار در شرایط تابش نامتعادل میان پنلهای یک آرایه پیشنهاد شده است. از مزایای این ساختار تبدیل نقطه ماکزیمم توان به بازه ماکزیمم توان، و عملکرد مستقل هر پنل نسبت به پنل‌های مجاور در شرایط تابش نامتعادل است. به منظور پایداری ساختار پیشنهادی در بازه ماکزیمم توان، الگوریتم P&O پیشنهاد شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخلاف ساختارهای متداول، ولتاژ متغیر مناسبی برای P&O در ساختار هوشمند نبوده و موجب ناپایداری ساختار می‌شود. به منظور رفع مشکل پایداری، متغیرهای کندوکنانس و مقاومت پیشنهاد و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در نهایت مقاومت به عنوان بهترین متغیر به لحاظ سرعت و دقت ردیابی انتخاب شده است. برای راستا آزمایی طرح پیشنهادی از نرم افزار سیمولینک متلب استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از ساختار هوشمند راندمان سیستم فتوولتائیک در شرایط تغییرات شدت تابش، ۱۴ درصد نسبت به ساختارهای متداول بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: ساختار فتوولتائیک- نقطه ماکزیمم توان-الگوریتم ردیابی

۱. دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه ، HosseinAliasghari@gmail.com

۲. پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای aesmaeli@aeoi.org.ir

افزایش علاقه جهانی به صنعت فتوولتائیک موجب گسترش بیش از پیش تحقیقات در این زمینه شده است. این تحقیقات بیشتر در زمینه تولید ارزان قیمت پنل فتوولتائیک، انتقال بهینه توان در شرایط تغییرات شدت تابش، نحوه سیاست گذاری دولت‌ها در استفاده از این انرژی، متمرکز شده است. توسعه تکنولوژی‌های جدید فیلم نازک به دلیل حذف سیستم نگهدارنده و انعطاف پذیری آن باعث تولید ارزان قیمت این انرژی خصوصاً برای مصارف مسکونی شده است. در کنار توسعه صنعت ساخت پنل‌ها، با پیشرفت الکترونیک قدرت و ورود آن به حوزه فتوولتائیک، موجب توسعه بیش از پیش آن شده و ساختارهای متنوعی از کانورترهای الکترونیک قدرت و پنل‌های فتوولتائیک پیشنهاد شده است. این تحقیق ضمن بررسی و مطالعه دقیق ساختارهای متداول، روی ساختار شکل ۱ متمرکز شده است. در این ساختار هر یک از پنل‌ها پس اتصال به کانورتر^۲ به صورت سری متصل شده و در شاخه‌هایی موازی آرایش یافته‌اند. نتیجه استفاده از این سیستم قابلیت اطمینان بالا به دلیل عملکرد مستقل هر پنل در شرایط مختلف آب و هوایی نسبت به پنل‌های مجاور خود است. کانورتر مورد استفاده در این ساختار بر اساس کانورتر پیشنهادی در مرجع [۱] بوده و از یک مبدل باک و بوست که صورت آبخاری به هم متصل هستند تشکیل شده است [۵-۲].



شکل ۱. شماتیک ساختار هوشمند

این کانورتر حسب نیاز در یکی از سه مد باک، بوست، و مستقیم عمل می‌نماید. با استفاده از چنین کانورتری نقطه ماکزیمم توان به یک بازه گسترش یافته و در صورتی که شدت تابش تغییرات زیادی نداشته باشد می‌توان با تنظیم کانورترها موجب تثبیت ولتاژ شاخه شده که در این صورت اضافه کردن شاخه‌های موازی و طراحی اینورتر در اندازه‌ی کوچکتر و هزینه کمتر امکان پذیر خواهد بود. در شرایط تغییرات شدید تابش نیاز به کانورتر بوست ثانویه خواهد بود. این کانورتر تضمین کننده عملکرد شاخه‌ها در ولتاژ ثابت است. در این شرایط در صورتی که در کانورتر ثانویه از الگوریتم‌های ردیابی متداول ماکزیمم توان استفاده شود مساله ناپایداری وجود خواهد داشت. این مقاله پس از معرفی و بیان برتری ساختار هوشمند؛ به بررسی مساله ناپایداری پرداخته و کنترل توسط مقاومت به عنوان بهترین گزینه به لحاظ دقت و سرعت ردیابی پیشنهاد شده است.

۲- ساختارهای فتوولتائیک^۳

در ساختار متمرکز پنل‌ها ابتدا در شاخه‌هایی به صورت سری، و سپس موازی آرایش، و در نهایت به یک کانورتر مرکزی متصل شده‌اند. این ساختار به لحاظ هزینه مقرون به صرفه بوده و از معایب آن کاهش راندمان آرایه در شرایط عدم تطبیق تابش میان پنل‌ها است. ساختار شاخه‌ای گرچه نسبت به ساختار متمرکز راندمان بهتری دارد ولی به دلیل اتصال سری پنل‌ها، مشکل ناسازگاری مانند حالت قبل وجود خواهد داشت.

^۲. DC-DC Converter

^۳. Photovoltaic configuration

2. shade

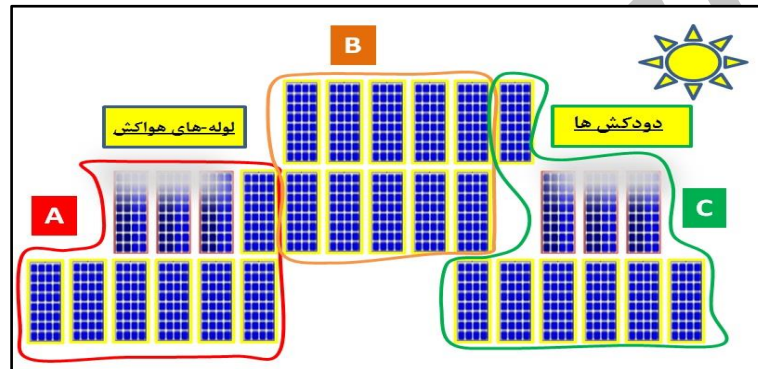
در میکرو کانتورترها اگرچه به ظاهر مشکلات ناشی از عملکرد در شرایط عدم تطبیق تابش را ندارند؛ ولی با توجه به اینکه هر پنل به صورت مستقل به خط DC متصل است، کانتورتر می‌بایست بسیار افزایش یافته باشد. این به معنی استفاده از کانتورترهای ترانسفورمیری خواهد بود که هزینه بالا و راندمان پایین‌تری به نسبت کانتورترهای سوئیچینگ دارند. ساختار هوشمند به دلیل عملکرد کانتورتر در بهره‌ واحد امکان گسترش سری و موازی این ساختار به آسانی خواهد بود. همچنین عملکرد مستقل هر پنل در نقطه ماکزیمم توان و گسترش نقطه ماکزیمم توان از یک نقطه به یک بازه از دیگر مزایای این ساختار است [۶].

۳- نمونه مورد مطالعه

به منظور بررسی و بیان برتری ساختار هوشمند یک نمونه ساده مطابق شکل ۲ مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. نمونه شامل ۳۰ پنل ۱۷۰ وات است که در مجموع ۵ کیلووات توان مصرفی یک منزل مسکونی را تامین می‌نماید. پنل‌ها در شاخه های A, B, C به گونه‌ای آرایش یافته‌اند که بهترین میزان جذب تابش را داشته باشند. دمای کلیه پنل‌ها ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. به دلیل سایه ناشی از دودکش‌ها و هواکش‌ها، شدت تابش تعدادی از پنل‌های شاخه‌های A و C کاهش می‌یابد. به منظور کمی ساختن محاسبات، متوسط شدت تابش پنل‌های نرمال و پنل‌هایی که در سایه قرار دارند بر حسب وات بر متر مربع به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱. پنل‌های نرمال ۱۰۰۰

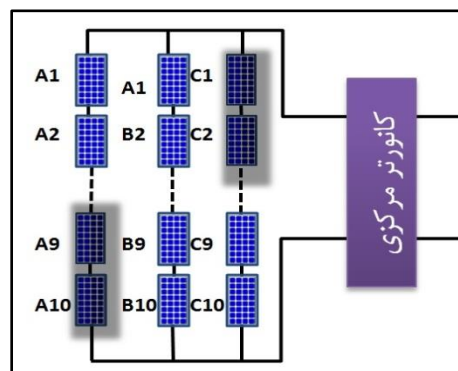
۲. پنل‌های سایه (A₈:800; A₉:600; A₁₀:850; C₁:500; C₂:200; C₅:700)



شکل ۲. نمونه مورد مطالعه شامل ۳۰ پنل ۱۷۰ وات

۳-۱ - ساختار متمرکز^۴

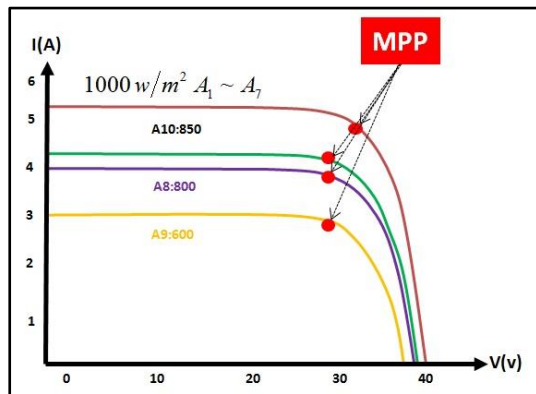
در این حالت پنل‌ها به صورت شکل ۳ آرایش یافته‌اند. به عنوان نمونه مشخصه خروجی جریان-ولتاژ پنل‌های شاخه A در شکل ۴ نشان داده شده است.



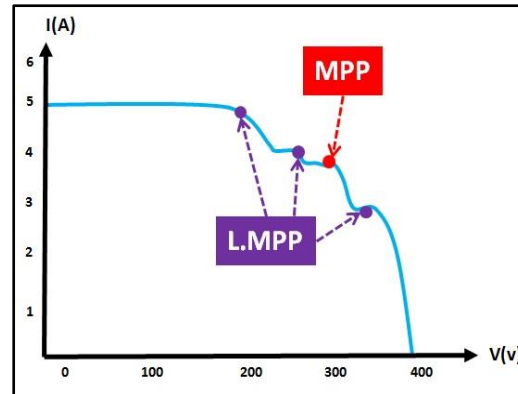
شکل ۳. آرایش نمونه مورد مطالعه در ساختار متمرکز

^۴.Central

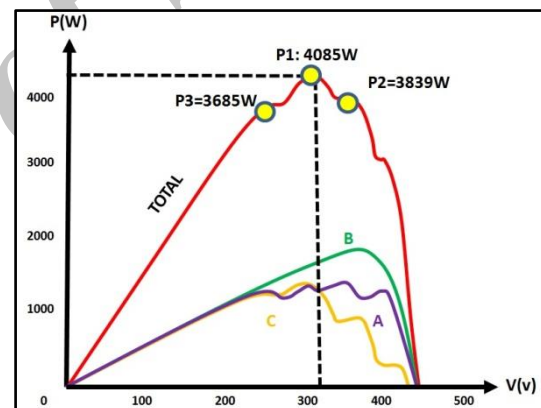
به دلیل وجود ۴ سطح تابش متفاوت در شاخه A، ۴ مشخصه متفاوت وجود دارد. مشخصه کل به دلیل اتصال سری پنل‌ها از جمع تک تک مشخصه‌ها در راستای ولتاژ مطابق شکل ۵ است. به دلیل وجود ۴ سطح تابش متفاوت ۴ نقطه قله در مشخصه وجود دارد. مشخصه‌های توان ولتاژ شاخه‌ها و مشخصه کل در شکل ۶ رسم شده است. ملاحظه می‌شود در اطراف نقطه ماکزیمم توان دو نقطه ماکزیمم محلی وجود دارد. در این شرایط با فرض ردیابی نقطه ماکزیمم توان P_1 تنها ۸۷/۵ درصد از انرژی (در مقایسه با ساختار هوشمند) قابل استحصال بوده که نشان دهنده سهم بالای تلفات در این ساختار است که مورد قبول محسوب نمی‌شود.



شکل ۴. مشخصه جریان ولتاژ پنل‌های شاخه A



شکل ۵. مشخصه جریان ولتاژ شاخه A

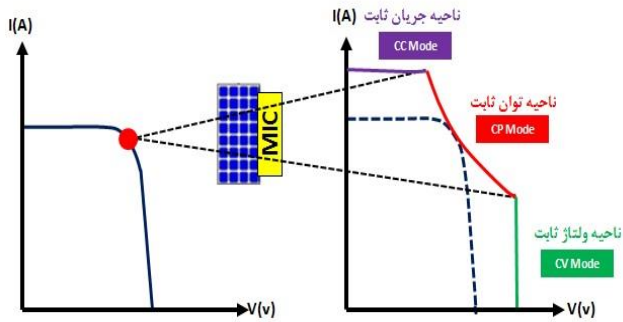


شکل ۶. مشخصه توان ولتاژ شاخه‌ها و کل آرایه

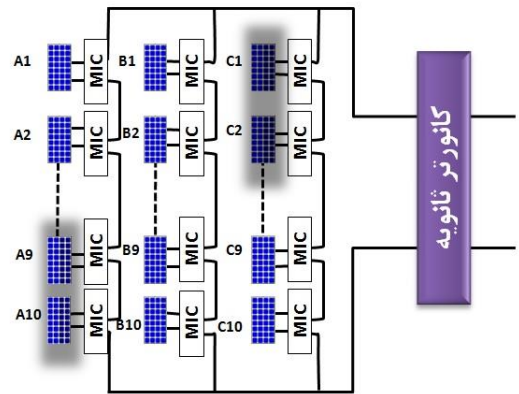
۳-۲- ساختار هوشمند

نحوه قرارگیری پنل‌ها در ساختار هوشمند مطابق شکل ۷ است. نقش کانورترهای داخلی (MIC)^۵ ردیابی پیوسته نقطه ماکزیمم توان و تنظیمی عملکرد پنل در توان ثابت در بازه ماکزیمم توان می‌باشد. ماکزیمم ولتاژ و جریان قابل تحمل کانورتر با توجه به توان آن، مشخص کننده حد ولتاژ و جریان است. بر این اساس مطابق شکل ۸ مشخصه کانورتر هوشمند از سه قسمت محدوده ولتاژ، محدوده جریان و محدوده توان ثابت تشکیل شده است. ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن شرایط قبل، با استفاده از ساختار هوشمند راندمان سیستم افزایش می‌یابد.

⁵ . Module integrated Converter

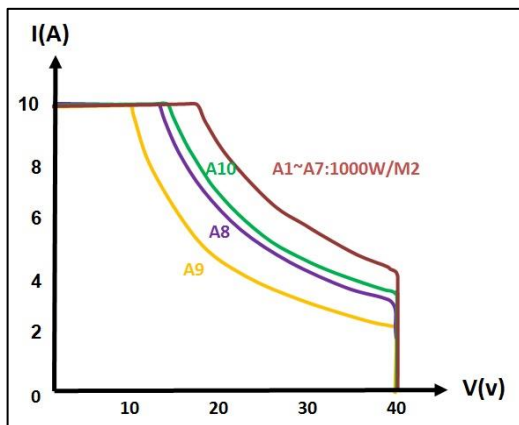


شکل ۸. مشخصه عملکردی کانورتور در ساختار هوشمند

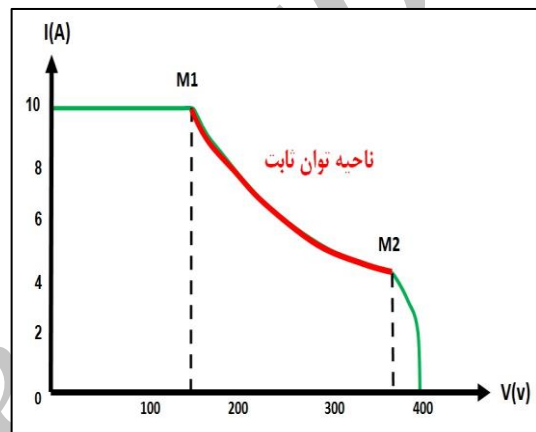


شکل ۷. نمونه مورد مطالعه در ساختار هوشمند

تحت شرایطی مشابه قبل مشخصه پنل‌های شاخه A در شکل ۹ رسم شده است. مشخصه کل از جمع تک تک مشخصه‌ها در راستای محور ولتاژ مطابق شکل ۱۰ است. با توجه به شکل تا زمانی که نقطه کار میان دو نقطه M_1 و M_2 باشد تضمین کننده عملکرد کلیه پنل‌ها در ماکزیمم توان خود است.

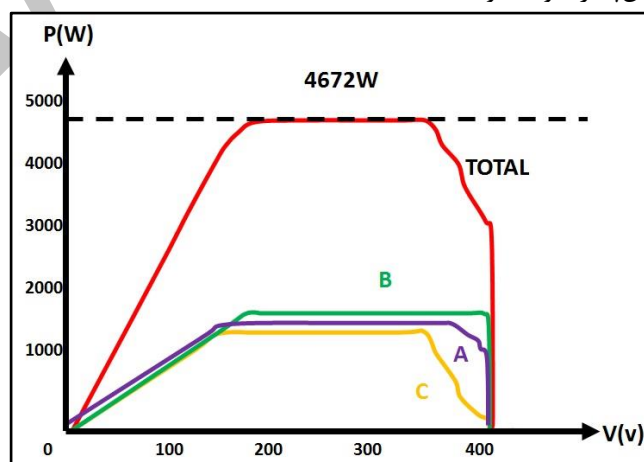


شکل ۹. مشخصه پنل‌های شاخه A در ساختار هوشمند



شکل ۱۰. مشخصه کل شاخه A در ساختار هوشمند

مشخصه توان-ولتاژ شاخه‌های A, B و C و مشخصه کل مطابق شکل ۱۱ است. با توجه به شکل، برتری این ساختار کاملاً مشهود است؛ چرا که نقطه ماکزیمم توان به یک بازه گسترش یافته و عملکرد در این ناحیه تضمین کننده عملکرد کلیه پنل‌ها در ماکزیمم در شرایط تغییرات شدت تابش است. همچنین به دلیل همپوشانی مشخصه‌ها یافتن بازه ماکزیمم توان حتی در شرایط کاهش شدید تابش امکان پذیر خواهد بود.



شکل ۱۱. مشخصه توان ولتاژ شاخه‌ها و مشخصه کل

با توجه به شکل ملاحظه می‌شود در این شرایط که توان خروجی با ۱۴ درصد افزایش نسب به قبل به ۴۶۷۲ وات رسیده است. نکته قابل توجه در خصوص این ساختار وجود افت توان در اطراف ناحیه توان ثابت است. از آنجائیکه محدوده توان ثابت توسط حد ولتاژ، جریان و تغییرات میزان تابش مشخص می‌شود به منظور عملکرد مطمئن در ناحیه ماکزیمم توان نیاز به کانورتر ثانویه ای خواهیم داشت که تضمین کننده عملکرد در ناحیه توان ثابت است.

۴-ردیابی نقطه ماکزیمم توان

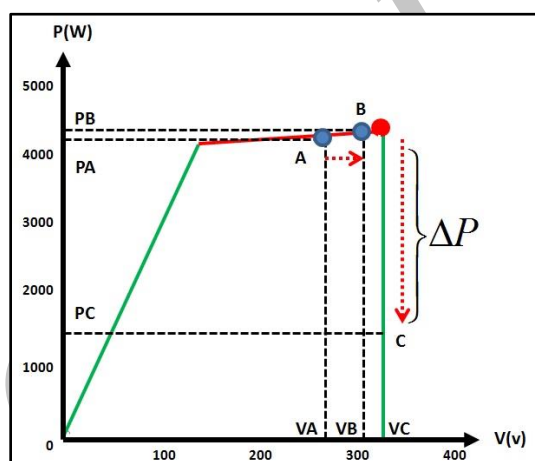
۴-۱- ساختار متمرکز

الگوریتم‌های ردیابی که عموماً در ردیابی ماکزیمم توان استفاده می‌شوند بر مبنای اغتشاش و مشاهده بوده و عبارتند از P&O، و کندوکتانس کنترل. در این روش‌ها با ایجاد اغتشاش در متغیر ورودی و اندازه‌گیری تغییرات توان جهت حرکت مشخص شده و پس از یافتن نقطه ماکزیمم توان نوساناتی حول نقطه ماکزیمم توان وجود خواهد داشت. جریان و ولتاژ هر یک می‌تواند به عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته شود. از آنجائیکه جریان به شدت وابسته به میران تابش است؛ در صورت تغییرات شدید تابش با مشکل مواجه خواهیم شد در حالی که چنین مشکلی برای متغیر ولتاژ وجود ندارد.

۴-۲- ساختار هوشمند

۴-۲-۱- مشکل ناپایداری محدوده ماکزیمم توان

در صورت استفاده از ولتاژ کنترل در ساختار هوشمند، بر خلاف ساختار متمرکز مشکل ناپایداری مشاهده می‌شود. در شرایط واقعی به دلیل اتصالات مسی، تلفات حرارتی با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. در این صورت مشخصه در ناحیه توان ثابت شیب مثبت کمی نسبت به ولتاژ دارد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



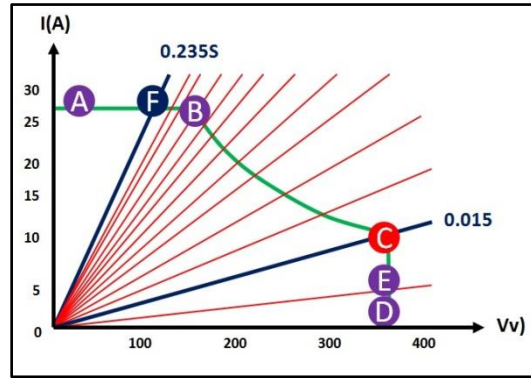
شکل ۱۲. مشخصه توان ولتاژ با کنترل ولتاژ

با توجه به شکل با استفاده از الگوریتم ردیابی P&O جهت ردیابی، هنگامی که نقطه کار به نقطه ماکزیمم توان رسید افزایش دیگری در ولتاژ موجب افت توان شدید و ناپایداری می‌شود. بر این اساس بر خلاف ساختار متمرکز ولتاژ متغیر مناسبی نمی‌باشد.

۴-۲-۲- کنترل کندوکتانس

ولتاژ و جریان متغیرهایی نامناسب به منظور ردیابی توسط الگوریتم P&O می‌باشند. بر این اساس کنترل کندوکتانس به منظور مشکل ناپایداری پیشنهاد می‌شود. به جای تغییرات ولتاژ، تغییرات جریان نسبت به ولتاژ به عنوان متغیر کنترلی پیشنهاد شده است. کندوکتانس مرجع در نقطه کار برابر G و هر افزایش و کاهش کندوکتانس به مقدار مشخص ΔG خواهد

بود. مشخصه نمونه با فرض $\Delta G=0.02$ در شکل ۱۳ رسم شده است. با توجه به شکل به دلیل شیب محدوده اطراف نقطه ماکزیمم توان، مشکل ناپایداری مانند ولتاژ وجود ندارد ولی می‌بایست افت توان ایجاد شده اندازه‌گیری شود.



شکل ۱۳. مشخصه جریان ولتاژ و خطوط کندوکنانس ثابت

۴-۲-۲-۱- ضریب بهره

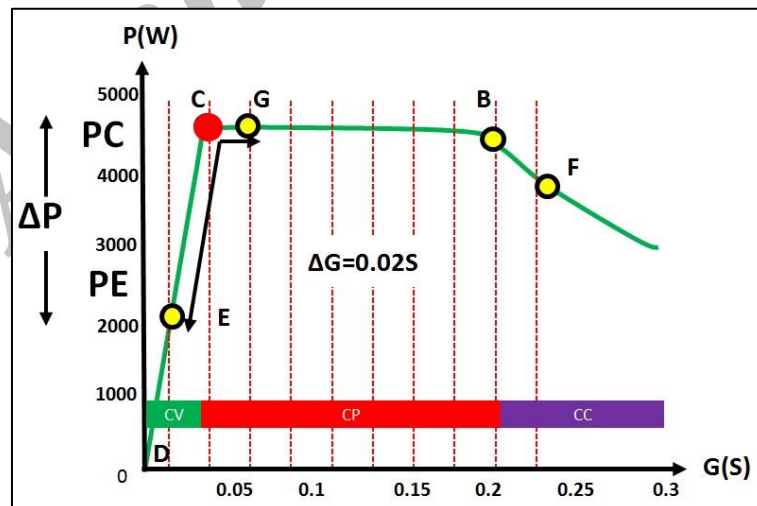
به منظور کمی ساختن محاسبات، ضریبی تحت عنوان ضریب بهره به صورت نسبت توان متوسط تولیدی به توان نقطه ماکزیمم به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$K_u : \frac{P_{avg}}{P_m} \quad (1)$$

۴-۲-۲-۲- فرآیند کنترل کندوکناسی

به منظور بررسی عملکرد با توجه به مشخصه توان- کندوکنانس فرض بر این است که نقطه کار در نقطه F قرار دارد. نقطه کار واقعی نقطه C است که می‌بایست ردیابی شود. زمان نمونه برداری برابر T_m در نظر گرفته شده است. به دلیل افزایش توان تا نقطه C نقطه کار پیوسته به سمت چپ منتقل می‌شود. با رسیدن به نقطه C کاهش مجدد کندوکنانس موجب سقوط نقطه کار به E، افت توان ΔP ، و نوسان حول نقطه ماکزیمم توان می‌شود. از آنجائیکه نقاط C و G در ناحیه توان ثابت قرار دارند ضریب بهره بر اساس رابطه ۲ برابر است با:

$$K_u : 1 - \frac{\Delta P}{3P_m} \quad (2)$$



شکل ۱۴. مشخصه توان کندوکنانس

ضریب بهره مورد قبول برابر ۹۸ درصد در نظر گرفته شده است. با این فرض ماکزیمم مقدار افت توان میان نقاط C و E برابر است با ۲۷۶ وات است. نقاط C و E در ناحیه ولتاژ ثابت قرار دارند. بنابراین حداقل مقدار ΔG برای ضریب بهره ۹۸٪ و ولتاژ خط ۳۶۰ ولت از رابطه ۳ به مقدار ۰,۰۰۲۱ دست می‌آید.

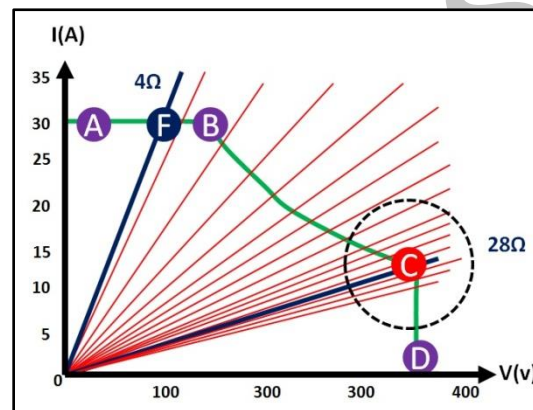
$$\Delta G = \frac{\Delta P}{V_L^2} \quad (۳)$$

با توجه به اینکه کندوکتانس در نقاط F و C به ترتیب برابر 0.235S و 0.035S می‌باشند. حداقل زمان جهت رسیدن از F به C برابر زمان ۹۴ نمونه برداری بوده که زمان زیادی است و مقبول نمی‌باشد.

۴-۲-۳- کنترل مقاومتی

کنترل مقاومتی عکس کندوکتانس کنترل بوده و به صورت نسبت تغییرات ولتاژ به جریان تعریف می‌شود. مشابه قبل نسبت ولتاژ به جریان در نقطه ماکزیمم توان بر اساس رابطه ۴ برابر مقاومت مرجع در نظر گرفته و هر افزایش و کاهش مقاومت به میزان ΔR خواهد بود. مشخصه جریان-ولتاژ از 4Ω تا 28Ω با $\Delta R=2\Omega$ در شکل ۱۴ رسم شده است. در این شرایط حول ماکزیمم توان فشردگی خطوط مقاومت ثابت دیده می‌شود.

$$R_s = \frac{V}{I} \quad (۴)$$



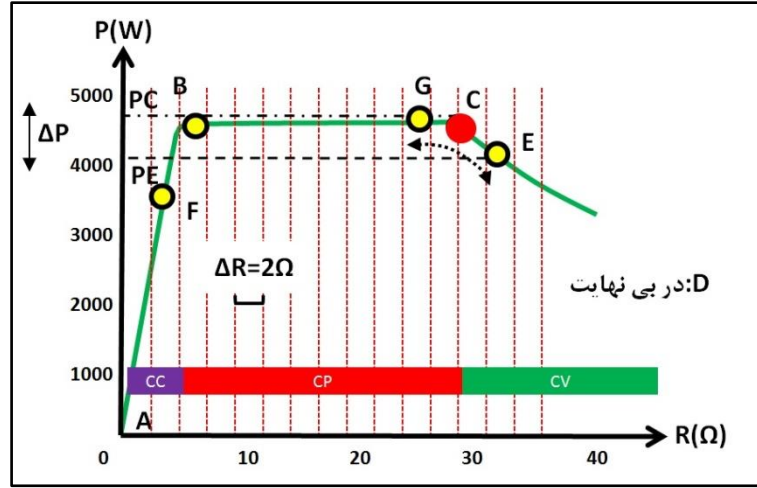
شکل ۱۴. مشخصه جریان ولتاژ و خطوط مقاومت ثابت

۴-۳-۲-۱- بررسی کنترل مقاومتی

به منظور مقایسه کمی مشابه قبل برای ضریب بهره تعریف می‌شود. در شکل ۱۵ مشخصه توان مقاومت رسم شده است. مشابه قبل نقاط C و G در ناحیه توان ثابت قرار داشته و رابطه ۳ برای این حالت قابل تعمیم است. نقاط C و E در ناحیه ولتاژ ثابت قرار دارند بنابراین برای اساس رابطه ۵ داریم:

$$\Delta R = \frac{\Delta P * V_L^2}{P_m^2 - P_m \Delta P} \quad (۵)$$

بر اساس رابطه حداقل ΔR مجاز برای داشتن ضریب بهره ۹۸ درصد برابر ۱,۸۱ اهم است. مقاومت در نقاط F و C به ترتیب برابر ۴ و ۲۸ بوده و زمان نمونه برداری T_m است. در این صورت حداقل زمان نمونه برداری مورد نیاز جهت ردیابی از نقطه F تا C برابر ۱۳ است که افزایش ۷ برابری سرعت نسبت به کندوکتانس کنترل است.



شکل ۱۵. مشخصه توان مقاومت

بحث و نتیجه گیری:

از معایب سیستم‌های فتوولتائیک کاهش توان تولیدی در شرایط نامتعادل تابش است. در این پروژه به منظور بهبود مشکل فوق ساختاری جدید پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی‌ها افزایش ۱۴ درصدی در توان خروجی این ساختار را نسبت به ساختارهای متداول نشان می‌دهد. در ادامه ضمن بیان ناتوانی متغیرهای کنترلی متداول کنترل مقاومتی به عنوان بهترین گزینه از نظر پایداری و سرعت ردیابی پیشنهاد شده که موجب افزایش ۷ برابری سرعت شده است.

مراجع:

- [1] Miodrag Forcan, Jovana Tuševljak, Slobodan Lubura, Milimir Šoja "Analyzing and Modeling the Power Optimizer for Boosting Efficiency of PV Panel" IX Symposium Industrial Electronics INDEL 2012, Banja Luka, November 01_03, 2012
- [2] G. R. Walker, J. Xue, and P. Sernia, "PV String Per-Module Maximum Power Point Enabling Converters," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2003.
- [3] G. R. Walker and P. C. Sernia, "Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139, July 2004.
- [4] G. R. Walker and J. C. Pierce, "Photovoltaic DC-DC Module Integrated Converter for Novel Cascaded and Bypass Grid Connection Topologies – Design and Optimization," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006 Record, June 2006.
- [5] E. Román, V. Martínez, J.C. Jimeno, R. Alonso, P. Ibañez, S. Elorduizapatarietxe, "Experimental results of controlled PV module for building integrated PV systems," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 471-480, 2008.
- [6] M Poornima Mazumdar "Analysis and design of smart PV module", Master of Science of Texas A&M University, December 2012