

# ارائه یک ساختار جدید به عنوان منبع تولید پراکنده بر مبنای سیستم ابرسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی و سیستم فتوولتائیک با طراحی کنترل کننده های مربوطه

پیمان نادری

## چکیده

سیستم تولید پراکنده مرکب از سیستم ابرسانای ذخیره ساز انرژی (SMES) و سیستم فتوولتائیک، در این پژوهش ارائه گردیده است. هر دو منبع تولید انرژی، به یکدیگر متصل گردیده و توان کشیده شده از هر یک، توسط مبدل ها و کنترل کننده های لازم تنظیم می گردد. به نحوی که سیستم ذخیره ساز قابلیت شارژ شدن از طریق سیستم فتوولتائیک و همچنین شبکه سراسری را دارا بوده و همچنین تزریق انرژی به شبکه سراسری با مشارکت هر دو منبع به نحو کنترل شونده ای امکان پذیر می باشد. به همین منظور، سیستم فتوولتائیک از طریق یک مبدل DC/DC و سیستم ابرسانا از طریق یک چاپر سه سطحی دوطرفه، به یک اینورتر سه سطحی متصل بوده و خروجی اینورتر نیز پس از اتصال به فیلتر، به شبکه سراسری متصل می گردد. کنترل توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک از طریق کنترل مبدل DC/DC و کنترل ولتاژ لینک DC اینورتر از طریق کنترل چاپر سه سطحی انجام شده است. کنترل توان های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه نیز از طریق کنترل امواج مدولاسیون اینورتر، فراهم شده است. ارائه ساختار جدید منبع تولید پراکنده و همچنین الگوریتم های کنترلی مطروحه که برای اولین بار در این مقاله مطرح گردیده، از نقاط قوت این تحقیق است. در پایان، نتایج شبیه سازی، توانایی ساختار. کنترل کننده های پیشنهادی را اثبات می کند.

## کلیدواژه

سیستم فتوولتائیک، سیستم ابرسانای ذخیره ساز، چاپر سه سطحی دوطرفه، الگوریتم سوچینگ چاپر، اینورتر سه سطحی، کنترل توان تزریقی

## مقدمه

شبکه، برای تشخیص خطاهای گذرا از خاموشی کلی سیستم طراحی گردیده است. در [۴] که استاندارد IEEE 929-2000 می باشد، شرایط جزیره سازی سیستم تولید پراکنده از شبکه سراسری تشریح گردیده لیکن مسئله اصلی در رعایت این استاندارد، تشخیص خطاهای گذرا و اغتشاشات ناشی از تغییرات بار محلی، از خاموشی کلی شبکه سراسری است [۵]. در [۶] یک تکنیک کنترلی به منظور تشخیص لزوم جزیره سازی معرفی شده که در آن فقط اندازه گیری پارامترهای محلی و در دسترس انجام شده و از سیگنال های دور دست استفاده نشده است. در [۷] بدون استفاده از سیگنال های مخابراتی، اتصال سیستم تولید پراکنده و شبکه سراسری با استفاده از یک تکنیک هیبرید بر مبنای عملکرد چند اینورتر طراحی گردیده است. در [۸] از یک متد برای تشخیص مطمئن لزوم جزیره سازی بر مبنای توان راکتیو جاری شده در شرایط عادی، و بررسی آن به هنگام تغییرات ناگهانی

تولیدات پراکنده بعنوان منابع تغذیه کننده بارهای محلی و همچنین بهره برداری پیوسته و اقتصادی،<sup>۱</sup> مورد توجه محققین در سالیان اخیر قرار گرفته است. به همین دلیل ساختارهای متفاوت به همراه الگوریتم های کنترلی متعددی در غالب تحقیقات مختلف ارائه گردیده است. در برخی تحقیقات مسئله جزیره سازی و تشخیص لزوم جزیره سازی به منظور تغذیه مداوم بار محلی مورد توجه بوده است [۱-۳] که در آنها مسئله جزیره سازی در شرایطی که شبکه سراسری دچار خاموشی می شود بررسی گردیده و جزیره سازی سیستم تولید پراکنده به صورت هوشمندانه، از روی ولتاژ ترمینال و همچنین فرکانس

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده برق دانشگاه شهید رجایی p.naderi@srrtu.edu

تاریخ دریافت: ۱۷ آبان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۱ اسفند ۱۳۹۲

ارائه گردیده است و همین روش در [۹] با تاثیر ضریب قدرت و تغییرات ناگهانی آن بررسی شده است که در آن پس از تصمیم به جزیره سازی، فرمان قطع به کلید ارسال می گردد. در [۱۰] نیز با در نظر گرفتن لحظه افت شدید در توان های اکتیو و راکتیو، مسئله جزیره سازی مورد آنالیز قرار گرفته است. در [۱۱] یک سیستم تولید پراکنده مبتنی بر سیستم فتوولتائیک و باتری توسط نویسنده همین مقاله ارائه گردیده که در آن توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک روی بیشینه مقدار ممکن تنظیم و کنترل توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه بر اساس حالت شارژ باتری انجام شده است لیکن در آن هیچ کنترلی روی توان راکتیو انجام نشده و از اینورتر دوسطی نیز استفاده گردیده است. به طور کلی وجود عناصر ذخیره ساز از قبیل باتری، خازن، و یا سیم پیچ، جزء لازم و ضروری سیستم های قدرت تجدید پذیر هستند [۱۵] و لذا در تمامی این سیستم ها، یک یا تعداد بیشتری از عناصر ذخیره ساز به طور حتم وجود دارد. انتخاب عنصر ذخیره ساز، با توجه به اهداف و نظر محققین انجام شده و نسبت به یکدیگر مزایا و معایبی دارند. در [۱۶] نشان داده شده که استفاده از ابررسانای ذخیره ساز به عنوان عنصر ذخیره ساز، مزایای فراوانی از جمله تعداد دفعات نامحدود قابلیت شارژ و دشارژ، طول عمر بالا و همچنین سرعت پاسخ دهی و دینامیک سریع را بدنبال دارد. در [۱۷]، این عنصر ذخیره ساز تحلیل دمایی گردیده و در دو محدوده دمایی پایین و دمایی بالا تقسیم بندی و جهت کاربردهای مختلف از جمله استفاده در سیستم های قدرت تجدید پذیر مطالعه گردیده است. وجود عناصر ذخیره ساز در ساختار سیستم های تجدید پذیر، استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و مبدل های مختلف از جمله چارپ و اینورتر را بدنبال دارد و لذا کاربرد الکترونیک قدرت و مطالعه آن در این سیستم ها نیز ضروری است. در [۱۸] به معرفی مبدل های مستقیم به متناوب در انواع منبع ولتاژ و منبع جریان جهت کاربرد در سیستم های تجدیدپذیر پرداخته شده و نشان داده شده است که با حضور چارپ در کنار مبدل مستقیم به متناوب، نوع منبع ولتاژ آن، از پیچیدگی بیشتری در اصول کنترلی برخوردار خواهد بود. اکنون در این مقاله مسئله تولیدات پراکنده و معرفی یک ساختار برای انرژی های تجدیدپذیر، با استفاده از یک آرایه فتوولتائیک به همراه سیستم ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی پیشنهاد داده شده است. به همین منظور در بخش دوم، ساختار مورد نظر تشریح و در بخش سوم مدل سیستم فتوولتائیک و نحوه کنترل توان آن از طریق یک مبدل، بیان می گردد. در بخش چهارم نحوه کنترل ابررسانای ذخیره ساز از طریق یک چارپ بیان گردیده و در بخش پنجم مبدل مستقیم به متناوب به کار رفته تشریح می گردد. در بخش ششم فیلتر هارمونیک، و در بخش هفتم کنترل کننده فازی جهت کنترل

توان های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه سراسری طراحی می شود. در بخش هشتم نتایج شبیه سازی، توانایی ساختار پیشنهادی را اثبات خواهد نمود. به طور کلی، نقاط قوت این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه را به صورت زیر می توان برشمرد: الف) استفاده از سیستم مرکب فتوولتائیک / ابر رسانای انرژی مغناطیسی به عنوان منبع تولید پراکنده که برای اولین بار مطرح گردیده است.

ب) ارائه یک ساختار جدید جهت کنترل چارپ سه سطحی دوطرفه متصل به ابررسانا که برای اولین بار توسط نویسنده همین مقاله مطرح گردیده است. این ساختار علاوه بر کنترل دقیق و سریع، قابلیت اتصال مستقیم چارپ به سیم پیچ ابررسانا را نیز فراهم می کند

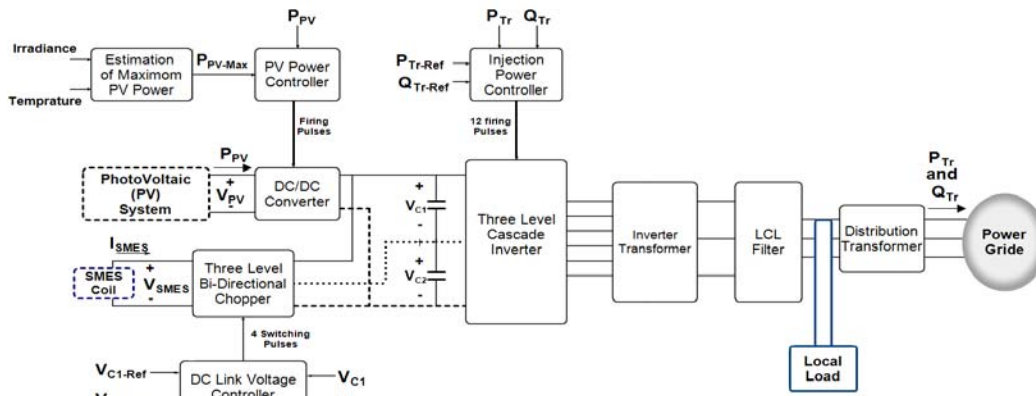
### ساختار پیشنهادی

ساختار پیشنهادی مبتنی بر سیستم ابر رسانای ذخیره ساز مغناطیسی و سیستم فتوولتائیک که برای اولین بار در این تحقیق پیشنهاد گردیده، در شکل ۱ نشان داده شده است. توان قابل دریافت از سیستم فتوولتائیک متناسب با میزان دما متغیر است و لذا پس از تخمین این توان، یک مبدل جریان مستقیم توان دریافتی آن را روی مقدار بیشینه تنظیم می کند. سیستم ابررسانا نیز به یک چارپ دو طرفه متصل و ولتاژ مستقیم خروجی آن و همچنین بانک خازنی متصل، از طریق کلید زنی چارپ تنظیم می گردد. با توجه به اتصال یک مبدل مستقیم به متناوب سه سطحی، به مجموعه مرکب از ابررسانای ذخیره ساز و فتوولتائیک، لازم است که ولتاژ خازن های بانک خازنی بطور برابر کنترل شود. کنترل توان های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه نیز از طریق کنترل کلیدزنی مبدل مستقیم به متناوب انجام گردیده و خروجی آن پس از اتصال به یک ترانسفورماتور و یک فیلتر، به ترانسفورماتور پست زمینی شبکه توزیع متصل می گردد. کنترل بخش های مختلف سیستم، که شامل کنترل ولتاژ مستقیم خروجی چارپ، توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک، توان های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه و همچنین تخمین توان قابل دریافت از سیستم فتوولتائیک است، به شرح زیر انجام می گردد.

الف) توان قابل دسترس از سیستم فتوولتائیک در هر دما و تابش معین، توسط یک شبکه فازی-عصبی تخمین زده می شود.

ب) توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک، توسط یک مبدل ولتاژ مستقیم کنترل می گردد.

ج) ولتاژ مستقیم بانک خازنی، از طریق کنترل کلیدزنی چارپ انجام می گردد.



شکل ۱. ساختار سیستم تولید پراکنده معرفی شده در این مقاله مبتنی بر ابررسانای ذخیره ساز مغناطیسی و فتوولتائیک

$$I_{PH} = [I_{sc} + K_I(T_c - T_{ref})]. \lambda \quad (1)$$

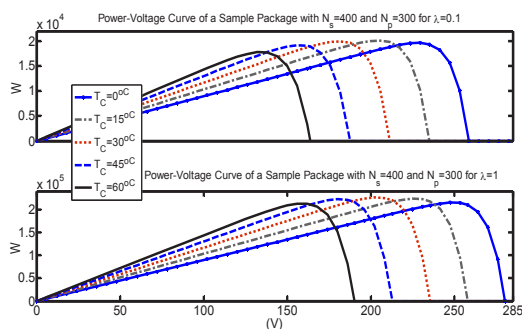
$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q.V_{oc}}{N_s.k.A.T_c}} - 1} \quad (2)$$

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\frac{q.E.G. \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c}\right)}{k.A}} \quad (3)$$

$$I = N_p \cdot I_{PH} - N_p \cdot I_s \left[ e^{\frac{q \left(\frac{V + R_s I}{N_s} + R_s I\right)}{k.T_c.A}} - 1 \right] - \frac{N_p V_i}{R_{sh}} + R_s I \quad (4)$$

جدول ۱. مشخصات یک آرایه نمونه فتوولتائیک

واحد	مقدار	سمبل	تعریف
---	400	$N_s$	تعداد سلول‌های سری
---	300	$N_p$	تعداد سلول‌های موازی
A/Celsius	0.03	$K_I$	ضریب دمایی جریان
V	$400 \times 0.6 = 240$	$V_{oc}$	ولتاژ مدار باز نامی
A	$300 \times 3.6 = 1090$	$I_{sc}$	جریان اتصال کوتاه سلول
Celsius	27	$T_{ref}$	دمای مرجع
KΩ	10	$R_{sh}$	مقاومت موازی سلول
$\mu\Omega$	10	$R_s$	مقاومت سری سلول
---	3.3	$A$	ضریب ایده آلی سلول

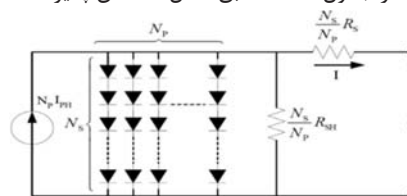


شکل ۳. الف. منحنی ولتاژ-توان یک سیستم فتوولتائیک نمونه جهت استفاده در شبیه‌سازی

د) توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه، از طریق کنترل کلیدزنی میدل مستقیم به متناوب انجام می‌گیرد. دو کنترل کننده فازی حلقه بسته زاویه فاز امواج مدولاسیون و همچنین شاخص مدولاسیون را تنظیم می‌کنند.

### سیستم فتوولتائیک، تخمین توان بیشینه و دریافت آن

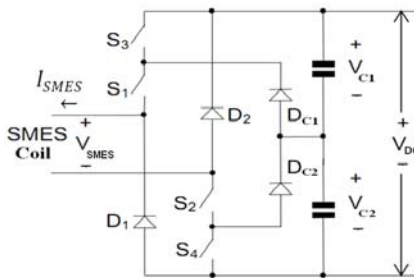
یک آرایه فتوولتائیک متشکل از تعدادی سلول سری/موازی مانند شکل ۲ می‌باشد که در [۱۲ و ۱۱] نحوه مدل‌سازی آن‌ها تشریح گردیده است. در مدل‌سازی این سیستم یک منبع جریان که مقدار آن به تابش خورشید وابسته است، مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود که روابط حاکم بر ولتاژ و جریان این سیستم مطابق معادلات (۱) تا (۴) می‌باشد. در شکل ۳ الف منحنی ولتاژ و جریان یک آرایه نمونه با مشخصات درج شده در جدول ۱، و در شکل ۳ ب نیز منحنی حداکثر توان قابل دریافت از آن در تابش‌ها و دماهای مختلف نشان داده شده است که از روی آن‌ها وابستگی توان آرایه به دما و تابش محیط کاملاً مشخص می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۳ ب مشخص است، بیشینه توان قابل دریافت از آرایه، در هر دما و تابشی، به ازای یک شرایط خاص رخ می‌دهد و جهت استفاده بهینه از آرایه لازم است که بیشینه توان قابل دریافت ردیابی گردیده و از سیستم فتوولتائیک دریافت گردد. منحنی‌های شکل ۳ و همچنین مشخصات درج شده در جدول ۱ در بخش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. و از روی داده‌های شکل ۳ ب، ردیابی حداکثر توان قابل دریافت با استفاده از جدول داده، مطابق شکل ۴ امکان پذیر است.



شکل ۲. مدل یک آرایه فتوولتائیک متشکل از سلول‌های سری/موازی

## سیستم ابرسانای ذخیره ساز انرژی، چاپ سه سطحی دو طرفه و کنترل ولتاژ مستقیم خروجی چاپ

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، از سیستم ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی و سیستم فتوولتائیک در کنار هم به‌عنوان منبع ترکیبی تولید پراکنده استفاده می‌شود. اکنون در این بخش به نحوه کنترل ولتاژ مستقیم که خروجی مشترک چاپ سه سطحی دوطرفه و همچنین مبدل مستقیم به مستقیم است، پرداخته می‌شود. شکل ۶ این چاپ را نشان می‌دهد که ورودی آن به ابرسانای ذخیره ساز انرژی و خروجی آن به بانک خازنی متصل است. این چاپ دارای چهار کلید و در نتیجه ۱۶ حالت کلیدزنی است که تنها ۷ حالت آن مطابق جدول ۲ استفاده شده و رابطه ورودی-خروجی آن نیز مطابق با جدول مذکور می‌باشد.



شکل ۶ چاپ سه سطحی دوطرفه

جدول ۲. مدها و وضعیت عملکرد هفت‌گانه چاپ سه سطحی دوطرفه

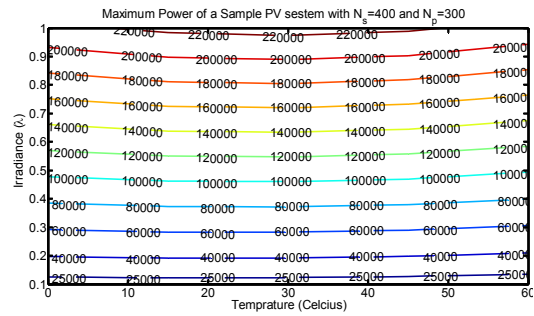
شماره مد	$V_{SMES}$	S1 S2 S3 S4	حالت عملکرد
۱	$V_{c1} + V_{c2}$	۱۱۱۱	شارژ
۲	$V_{c2}$	۱۱۰۱	شارژ
۳	$V_{c1}$	۱۱۱۰	شارژ
۴	0	۱۱۰۰	وضعیت ثابت
۵	$-V_{c2}$	۰۱۰۰	دشارژ
۶	$-V_{c1}$	۱۰۰۰	دشارژ
۷	$-(V_{c1} + V_{c2})$	۰۰۰۰	دشارژ

عملکرد کنترلی چاپ می‌بایست به نحوی باشد که ولتاژ خروجی چاپ که همان ولتاژ شاخه مستقیم سیستم تولید پراکنده است، روی مقدار دلخواه تثبیت گردیده و ولتاژ خازن‌ها نیز با یکدیگر برابر DC باشد به نحوی که روابط (۱) و (۲) برقرار شود.

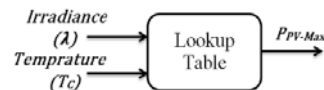
$$V_{DC} = V_{DC-Ref} \quad (1)$$

$$V_{c1} = V_{c2} = \frac{V_{DC-Ref}}{2} \quad (2)$$

با توجه به مدهای عملکرد چاپ که در جدول ۲ لیست گردیده است، با تغییر مدهای عملکرد این چاپ، شارژ و دشارژ بین عنصر ذخیره‌ساز و خازن‌های شاخه مستقیم، انجام گردیده و ولتاژ این شاخه برای برقراری روابط (۱) و (۲)، کنترل‌شونده خواهد بود به

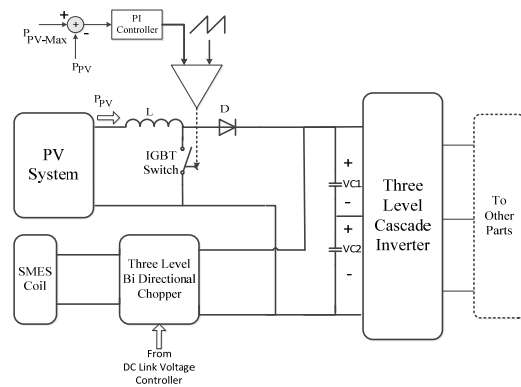


شکل ۳. ب. منحنی حداکثر توان قابل دریافت برحسب تابش و دما یک سیستم فتوولتائیک نمونه جهت استفاده در شبیه‌سازی



شکل ۴. جدول داده‌ها، جهت تخمین حداکثر توان قابل دریافت از سیستم فتوولتائیک

اکنون با توجه به ساختار ارائه شده در شکل ۱، لازم است که بتوان بیشینه از سیستم فتوولتائیک دریافت گردد. به همین منظور از یک مبدل مستقیم به مستقیم افزایشده مطابق شکل ۵ استفاده، و در یک فرکانس کلیدزنی مشخص، پهنای پالس کلیدزنی، از طریق یک کنترل‌کننده تناسبی-انترگرالی تعیین می‌گردد. این کنترل‌کننده مقدار ثابتی را برای مقایسه با موج دندان اره‌ای با فرکانس کلیدزنی معین، مطابق شکل ۵، تعیین نموده و توان دریافتی از سیستم فتوولتائیک مطابق با مقدار تعیین شده از جدول داده‌ها تنظیم می‌گردد. چنانچه ولتاژ خروجی چاپ متصل به ابرسانا کمتر از ولتاژ سیستم فتوولتائیک باشد، کنترل‌کننده مبدل مستقیم به مستقیم، امکان کنترل جریان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک را فراهم نموده و لذا از این مبدل می‌توان برای کنترل توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک استفاده نمود [۱۴]. از این‌رو، با تنظیم ولتاژ خروجی چاپ متصل به ابرسانا، می‌توان کنترل‌کننده مبدل مستقیم به مستقیم را با هدف کنترل توان این سیستم کلیدزنی نمود.

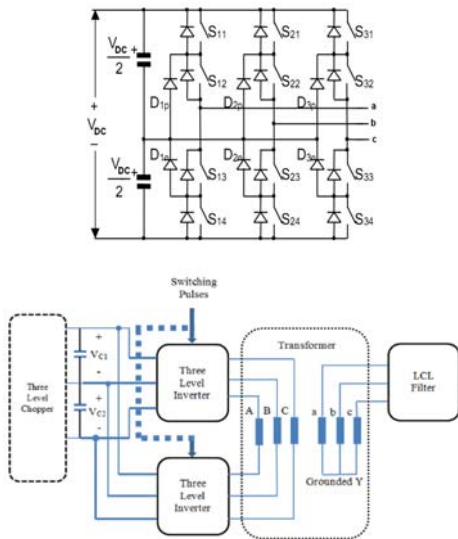


شکل ۵. نحوه کنترل توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک

امواج مدولاسیون مطابق با (۳) در نظر گرفته شوند، مولفه اصلی در امواج سه فاز خروجی مبدل، هم فاز و هم فرکانس با امواج مدولاسیون خواهد بود. لیکن هر چه فرکانس موج حامل بیشتر باشد، خروجی مبدل از طیف هارمونیکهای بهتری برخوردار خواهد بود. در واقع، با مقایسه امواج مدولاسیون و حامل، پالس‌های آتش کلیدهای این مبدل به نحوی تعیین می‌شوند که مولفه اصلی خروجی آن هم فاز و هم فرکانس با امواج مدولاسیون باشد.

$$\begin{aligned} V_{ma} &= A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) \\ V_{mb} &= A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + 120 + \varphi) \\ V_{mc} &= A \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 120 + \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

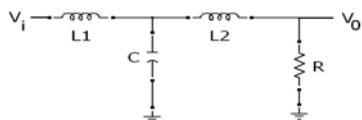
با در نظر گرفتن مقدار ۰/۹ برای دامنه موج حامل، ضریب A دامنه امواج مدولاسیون تعیین می‌شود. روش کلید زنی مبدل مستقیم به متناوب سه سطحی و همچنین کنترل آن نیز در [۱۴] توسط نویسنده ارائه گردیده است.



شکل ۸. ساختار مبدل مستقیم به متناوب سه سطحی استفاده شده در مقاله

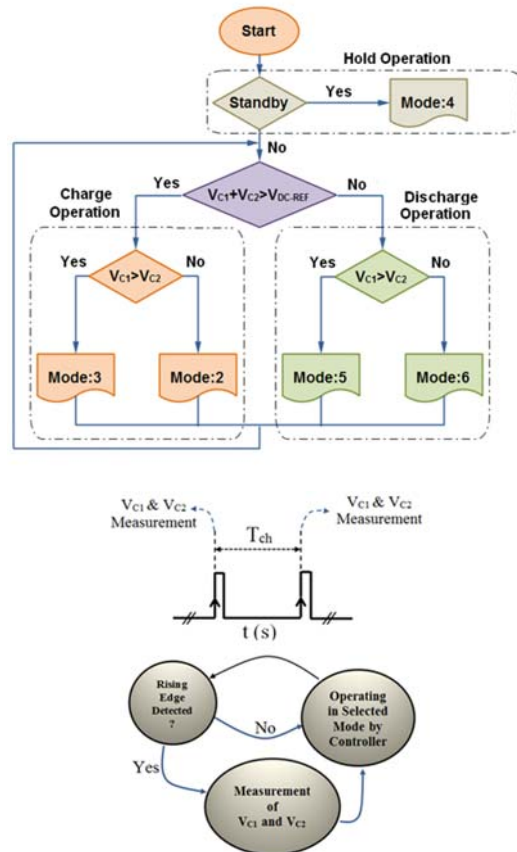
### فیلتر القایی-خازنی جهت حذف مولفه‌های هارمونیک

جهت فیلتر شدن خروجی اینورتر، لازم است که از یک فیلتر هارمونیک در خروجی آن استفاده شود و یک گزینه مناسب استفاده از فیلتر القاگر-خازنی مطابق با شکل ۹ است. در این فیلتر تابع تبدیل و فرکانس تشدید تقریباً مستقل از مقدار بار بوده و روابط حاکم بر فیلتر مطابق روابط (۴) تا (۶) می‌باشد.



شکل ۹. شبکه تک‌خطی فیلتر القاگر-خازنی متصل به خروجی اینورتر

همین منظور، از روند کنترلی نشان داده شده در رویه شکل ۷ که برای اولین بار توسط نویسنده ارائه گردیده است، استفاده می‌شود. از مزایای این روند کنترلی، محدوده وسیع کنترل پذیری ولتاژ و همچنین سرعت پاسخ‌دهی و دینامیک بسیار مطلوب آن است. چنانچه فرکانس کلیدزنی چا پر باشد، از یک موج مرجع برای دوره کلیدزنی استفاده گردیده و همزمان با لبه بالارونده موج مرجع، مد عملکرد چا پر جهت اعمال الگوریتم کنترلی تعویض می‌شود.



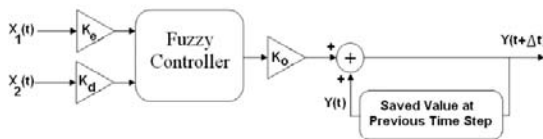
شکل ۷. روند کنترل ولتاژ شاخه مستقیم از طریق تعویض مدهای چا پر سه سطحی دوطرفه

### مبدل مستقیم به متناوب سه سطحی و ترانسفورماتور سه

#### فاز متصل به آن

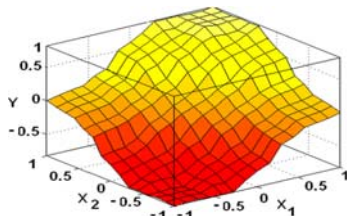
پس از کنترل و تثبیت ولتاژ شاخه مستقیم، لازم است که این ولتاژ به یک ولتاژ متناوب سه فاز تبدیل شود که در این مقاله از یک مبدل سه سطحی آنبشاری و ترانس متصل به آن مطابق شکل ۸ استفاده شده است. الگوریتم کلیدزنی این مبدل در [۱۳] تشریح گردیده که در آن دو موج دندان اره‌ای به عنوان امواج حامل و سه موج سینوسی با فرکانس پایه به عنوان امواج مدولاسیون، نحوه کلیدزنی مبدل را تعیین می‌کنند. چنانچه

طریق تنظیم زاویه فاز و دامنه امواج مدولاسیون اعمالی به اینورتر، توسط دو کنترل کننده فازی انجام می‌گردد. شماتیک ساختاری کنترل کننده‌های طراحی شده در این مقاله، در شکل ۱۱، نمایش داده شده است. با توجه به ساختار نشان داده شده در شکل ۱۱، کنترل کننده‌های فازی به صورت حلقه بسته، در هر لحظه، کمیت مورد نظر را تحت نظر داشته و برای رساندن آن به مقدار دلخواه، عمل کنترلی را در هر گام زمانی (که در این مقاله معادل با ۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است) انجام می‌دهند. در جدول ۳، ورودی‌ها که مقدار خطای کمیت و تغییرات آن‌ها می‌باشد به همراه خروجی برای هر دو کنترل کننده فازی لیست گردیده و مقادیر  $K_e$ ،  $K_d$ ،  $K_o$  نیز برای عملکرد بهینه کنترل کننده‌ها تنظیم شده‌اند.

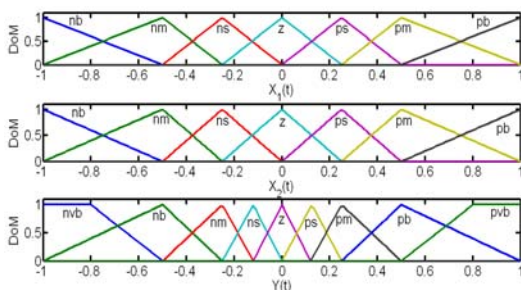


شکل ۱۱. ساختار دو کنترل کننده فازی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

برای طراحی کنترل کننده فازی، توابع عضویت و همچنین قوانین فازی مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و جدول ۴ طراحی گردیده به نحوی که علائم  $nvb$ ،  $nb$ ،  $nm$ ،  $ns$ ،  $z$ ،  $ps$ ،  $pm$ ،  $pb$ ،  $pvb$  به ترتیب دلالت بر "مثبت خیلی بزرگ"، "مثبت بزرگ"، "مثبت متوسط"، "مثبت کوچک"، "صفر"، "منفی کوچک"، "منفی متوسط"، "منفی بزرگ"، و "منفی خیلی بزرگ" دارند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، محورها به صورت درواحد بوده و لذا بین صفر و یک قرار دارند.



شکل ۱۲. سطح فازی کنترل کننده‌های فازی



شکل ۱۳. توابع عضویت کنترل کننده‌های فازی

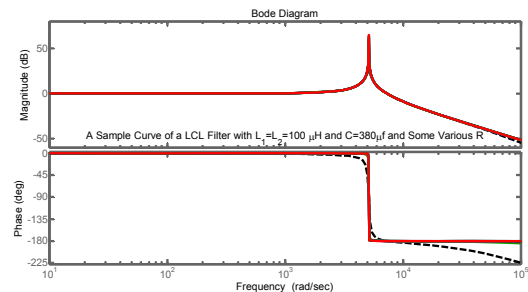
$$\frac{V_0(S)}{V_i(S)} = \frac{R}{L_1 \cdot L_2 \cdot C \cdot S^3 + L_1 \cdot R \cdot C \cdot S^2 + (L_1 + L_2)S + R} \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C}} \quad (5)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{3}{2L_2 \cdot C}} \quad (6)$$

چنانچه فرکانس قطع فیلتر  $k$  برابر فرکانس پایه منظور شود، برای برقراری  $f_0 = k \cdot f$  مقدار خازن به صورت  $(V)$  محاسبه می‌گردد. پاسخ فرکانسی این فیلتر به ازای  $k=20$ ،  $f=50\text{Hz}$  برای برخی مقادیر بار مطابق شکل ۱۰ حاصل می‌شود و کاملاً مشخص است که تابع تبدیل با تقریب بسیار خوبی، مستقل از مقدار بار است.

$$C = \frac{3}{8\pi^2 \cdot k^2 \cdot f^2 \cdot L_2} \quad (7)$$



شکل ۱۰. پاسخ فرکانسی فیلتر برای مقادیر نمونه

## کنترل کننده حلقه بسته فازی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

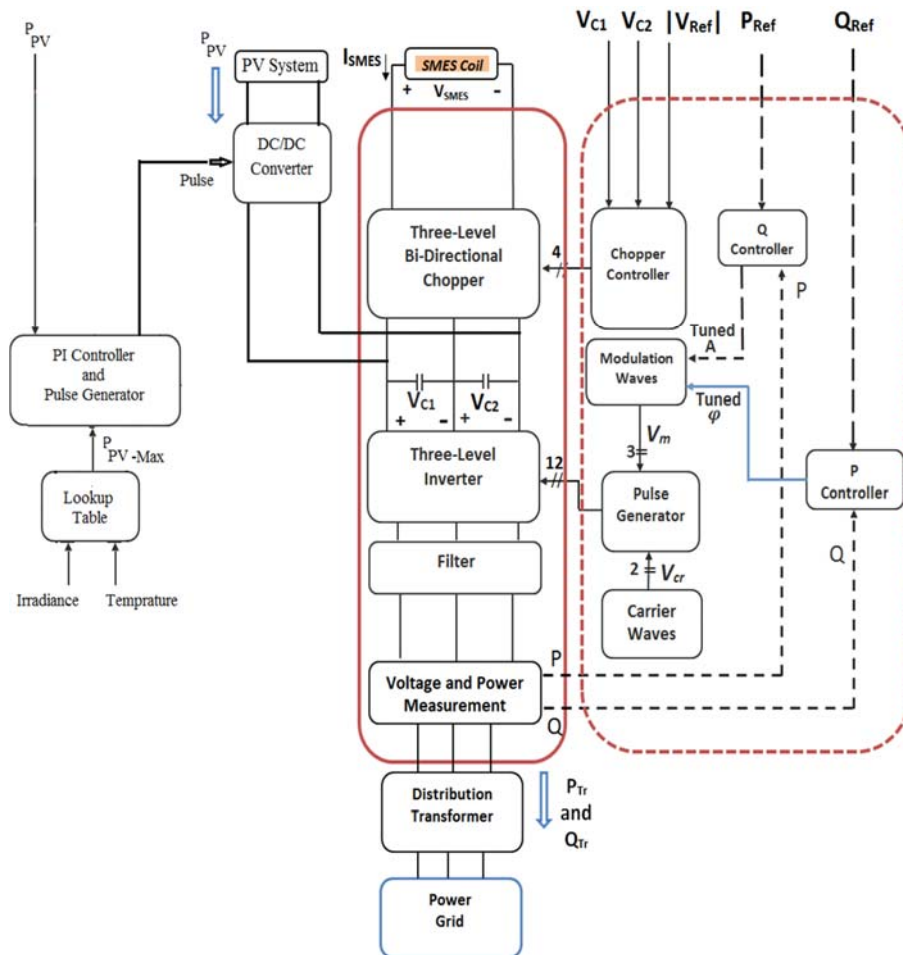
علاوه بر کنترل توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه نیز می‌بایست کنترل شوند. با توجه به ماهیت غیرخطی روابط توان‌های اکتیو و راکتیو و همچنین گستره وسیع محدوده توان مورد نیاز، نقاط کار بسیار زیادی وجود دارد و در نتیجه استفاده از کنترل کننده‌های کلاسیک در چنین شرایطی غیر منطقی خواهد بود. لذا لازم است که از کنترل کننده‌های مقاوم جهت عدم وابستگی به نقطه کار، مشخصات سیستم، و همچنین عواملی از قبیل بالازدگی و کندی پاسخ، استفاده نمود. به عنوان نمونه، چنانچه از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی با ضرایب بهینه در یک نقطه کار استفاده شود، بهینگی ضرایب در سایر نقاط کار به هم خورده و علاوه بر دینامیک نامطلوب پاسخ‌دهی، امکان عدم پایداری نیز وجود خواهد داشت. با توجه به این عوامل، برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو، از دو کنترل کننده فازی حلقه بسته استفاده شده است به نحوی که کنترل توان‌های مذکور از

جدول ۳. ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده فازی حلقه بسته برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو انتقالی

	$X_1(t)$ (Error)	$X_2(t)$ (Error Rate)	$Y(t)$ (Output)
<b>P Controller</b>	$\Delta P(t) = P_{Tr-Ref}(t) - P(t)$	$\Delta P(t) - \Delta P(t - \Delta t)$	$\varphi(t)$
<b>Q Controller</b>	$\Delta Q(t) = Q_{Tr-Ref}(t) - Q(t)$	$\Delta Q(t) - \Delta Q(t - \Delta t)$	$A$

جدول ۴. قوانین فازی به کار رفته در کنترل کننده‌های فازی توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

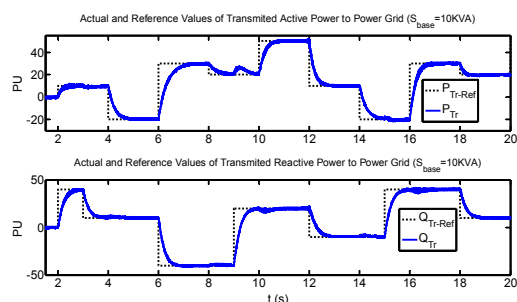
		$X_1$						
		$nb$	$nm$	$ns$	$z$	$ps$	$pm$	$Pb$
$X_2$	$nb$	nvb	nvb	nvb	nb	nm	ns	Z
	$nm$	nvb	nvb	nb	nm	ns	z	Ps
	$ns$	nvb	nb	nm	ns	z	ps	Pm
	$z$	nb	nm	ns	z	ps	pm	Pb
	$ps$	nm	ns	z	ps	pm	pb	Pvb
	$pm$	ns	z	ps	pm	pb	pvb	Pvb
	$pb$	z	ps	pm	pb	pvb	pvb	Pvb



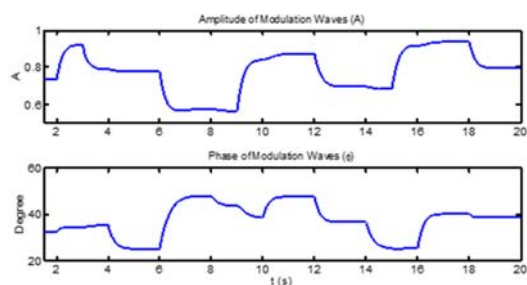
شکل ۱۴. بلوک مربوط به ساختار کنترلی

## شبیه‌سازی

سیستم فتوولتائیک، ولتاژ خروجی چار متصل به ابرسانا به میزان ۸۲۰ ولت انتخاب و توسط کنترل کننده چار، روی مقدار مذکور برای تثبیت انتخاب گردیده است بنابراین، ولتاژ ورودی مبدل DC/DC در حدود ۲۴۰ ولت که همان ولتاژ تقریبی سیستم فتوولتائیک مطابق با جدول ۱ است، و ولتاژ خروجی آن روی ۸۲۰ ولت توسط کنترل کننده چار تثبیت گردیده است و لذا کنترل کلید زنی مبدل DC/DC، امکان تثبیت توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک را روی مقدار دلخواه، فراهم می‌کند.



شکل ۱۵. چگونگی تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو تزریق شده به شبکه سراسری توسط کنترل کننده‌های فازی



شکل ۱۶. چگونگی تنظیم دامنه و فاز امواج مدولاسیون مبدل مستقیم به متناوب برای تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو

برای شبیه‌سازی ساختار ارائه شده در شکل ۱ و همچنین اثبات کارایی الگوریتم کنترلی در زیرسیستم‌های مختلف سیستم کلی، وضعیت‌های مختلفی در محیط Matlab شبیه‌سازی گردیده است. مشخصات سیستم شامل قطعات مبدل‌های الکترونیک قدرت، مطابق با جدول ۵ می‌باشد. مقادیر مربوط به سیستم فتوولتائیک نیز مطابق با جدول ۱ و شکل‌های ۳ و ۴ می‌باشد. با توجه به مشخصات سیستم به ازای جریان اولیه  $I_0=1000A$  در عنصر ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی، ظرفیت ابرسانای ذخیره‌ساز معادل با  $W_{SMES} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = 1MJ$  و توان حداکثر سیستم فتوولتائیک به ازای تابش حداکثر، بر اساس شکل‌های ۳ و ۴ حدود  $200KW$  است. بار محلی ثابتی معادل با  $80KW$  در شبکه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه توان دریافتی از سیستم فتوولتائیک توسط جدول داده‌ها، در هر دما و تابشی روی مقدار حداکثر تنظیم می‌گردد، چنانچه توان اکتیو تزریقی به شبکه سراسری، بیش از توان سیستم فتوولتائیک باشد، مابقی توان توسط عنصر ذخیره ساز تامین شده و عنصر دشارژ می‌گردد و چنانچه توان تزریقی کمتر باشد، عنصر ذخیره ساز در حالت شارژ و افزایش جریان قرار خواهد گرفت. اکنون فرض می‌شود که جریان اولیه سلف ذخیره‌ساز انرژی  $1000A$  و سیستم در دمای  $30^\circ$  درجه سانتیگراد و تابش در لحظه  $t=5s$  از  $1.00\%$  به  $50\%$  برسد (هر چند چنین تغییری در طبیعت با این سرعت انجام نمی‌شود). به‌منظور تست عملکرد کنترل کننده‌های فازی، تغییراتی برای توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه مطابق شکل ۱۵، در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی در غالب شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ آورده شده و در ادامه تفسیر خواهد شد. به منظور عملکرد مناسب مبدل مستقیم به مستقیم متصل به

جدول ۵. مشخصات سیستم برای شبیه‌سازی

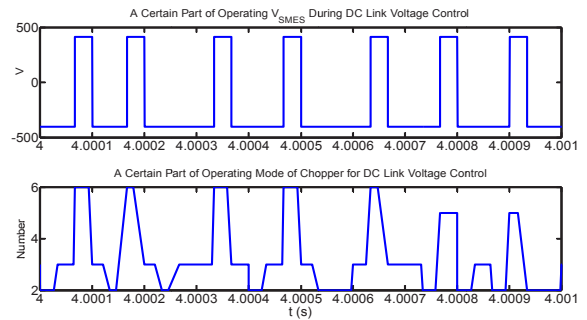
سمبل	توصیف	مقدار	واحد
L <sub>SMES</sub>	مقدار القاگر عنصر ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی	2	H
R <sub>SMES</sub>	مقاومت اهمی درونی عنصر ذخیره ساز انرژی مغناطیسی	2	$\Omega\mu$
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	خازن‌های شاخه مستقیم	0.8	f
V <sub>DC-Ref</sub>	ولتاژ مرجع شاخه مستقیم	820	v
L <sub>DC/DC</sub>	سلف به‌کاررفته در مبدل مستقیم به مستقیم	100	mH
L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub>	سلف‌های موجود در فیلتر القاگر-خازنی	100	$\mu$ H
C	خازن موجود در فیلتر القاگر-خازنی	380	$\mu$ f
R <sub>on-sw</sub>	مقاومت اهمی سوئیچ‌های بکار رفته در مبدل‌ها در حالت وصل	100	$\Omega\mu$
f	فرکانس پایه سیستم	50	Hz
S <sub>rate</sub>	قدرت نامی ترانسفورماتور متصل به شبکه و اینورتر	1	MVA
f <sub>sw-DC/DC</sub>	فرکانس سوئیچینگ مبدل متصل به سیستم فتوولتائیک	2.5	KHZ
f <sub>sw-Chopper</sub>	فرکانس سوئیچینگ چار متصل به عنصر ذخیره ساز انرژی	30	KHZ
R <sub>t</sub>	مقاومت اهمی سیم پیچ‌های ترانسفورماتورها	0.0002	Pu
L <sub>t</sub>	خاصیت سلفی سیم پیچ‌های ترانسفورماتورها	0.08	Pu
N <sub>1</sub> /N <sub>2</sub>	نسبت تبدیل ترانسفورماتور متصل به شبکه	0.4/20	Kv
N <sub>1</sub> /N <sub>2</sub>	نسبت تبدیل هرفاز ترانسفورماتور متصل به اینورتر	425/133	v

چاپر در هر دوره تناوب سوئیچینگ چاپر، عمل کنترل ولتاژ شاخه مستقیم را انجام داده است. در شکل ۱۸ نیز عملکرد کنترل کننده توان سیستم فتوولتائیک تشریح گردیده که در آن خروجی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی متصل به مبدل مستقیم به مستقیم و همچنین تنظیم توان سیستم فتوولتائیک روی مقدار حداکثر، نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، پس از تغییر میزان تابش محیط، توان حداکثر سیستم فتوولتائیک نیز تغییر نموده و کنترل کننده نیز، با تغییر خروجی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی، کلیدزنی مبدل را به نحوی تغییر داده است که توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک روی مقدار مرجع به خوبی تنظیم گردد. در شکل ۱۹ نیز بخشی از نتایج شبیه سازی برای جریان عنصر ذخیره ساز، ولتاژ شاخه مستقیم و همچنین توان اکتیو تزریقی به شبکه سراسری نمایش داده شده است. همانگونه که بخش میانی این شکل نشان می دهد، هرگاه توان دریافتی از سیستم فتوولتائیک، بیش از مجموع توان بار محلی و توان تزریقی به شبکه باشد، مابقی توان از طریق چاپر وارد عنصر ذخیره ساز گردیده و منجر به افزایش جریان آن می گردد. چنین حالتی در زمان های ۴ الی ۶ ثانیه مشخص است. در مقابل، هرگاه توان سیستم فتوولتائیک کمتر از مجموع توان های مذکور باشد، مابقی توان توسط عنصر ذخیره ساز تامین گردیده، و کاهش جریان عنصر را بدنبال خواهد داشت. چنین وضعیتی برای زمان های بزرگتر از ثانیه ششم مشهود می باشد.

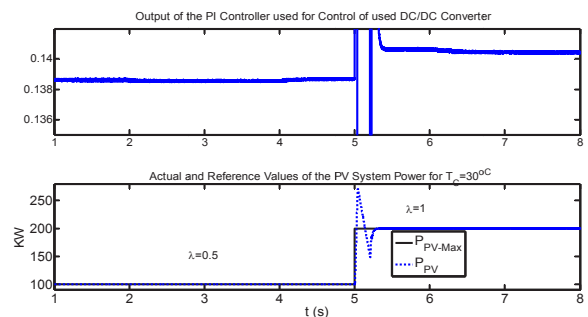
### نتیجه گیری

در این مقاله یک ساختار جدید برای سیستم تولید پراکنده مبتنی بر ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی و همچنین سیستم فتوولتائیک به همراه کنترل کننده های لازم معرفی گردید. از دو کنترل کننده فازی، برای تنظیم توان های اکتیو کنترل کننده تناسبی-انتگرالی برای تنظیم توان کشیده شده از سیستم فتوولتائیک روی حداکثر مقدار، که توسط یک جدول داده بر اساس تابش و دما تعیین می شود، استفاده گردید. کنترل ولتاژ شاخه مستقیم توسط چاپر متصل به ابررسانا انجام گردیده، و الگوریتم کنترلی جدیدی برای کنترل چاپر مذکور ارائه گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی، توانایی الگوریتم های کنترلی طراحی شده و همچنین ساختار معرفی شده را به اثبات رسانده و عملکرد دقیقی را به نمایش گذارده است. ارائه الگوریتم جدید برای کنترل چاپر سه سطحی متصل به ابررسانا، کنترل دقیق ولتاژ شاخه مستقیم با دینامیک سریع، اتصال مستقیم ابررسانا به چاپر بدون استفاده از هرگونه فیلتر، و

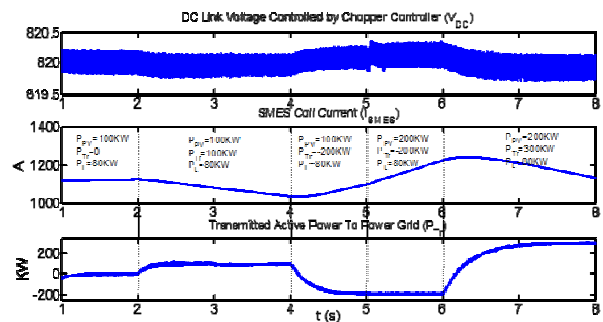
همچنین ترکیب ابررسانا و سیستم فتوولتائیک به عنوان منبع  
Electronics Industries Quarterly Vol.4 No.3 Autumn 2013



شکل ۱۷. بخشی از مدهای عملکرد چاپر به منظور کنترل ولتاژ شاخه مستقیم و همچنین ولتاژ دوسر القاگر ذخیره ساز انرژی مغناطیسی



شکل ۱۸. توان سیستم فتوولتائیک و همچنین موج مدولاسیون مبدل مستقیم به مستقیم جهت تنظیم توان سیستم فتوولتائیک در محدوده ۱ الی ۸ ثانیه



شکل ۱۹. نمایش ولتاژ شاخه مستقیم و جریان سلف ذخیره ساز انرژی مغناطیسی فتوولتائیک در محدوده ۱ الی ۸ ثانیه

در شکل ۱۵، توان های اکتیو و راکتیو مرجع با مقادیری که در هر ۲ ثانیه عوض می شوند به عنوان مرجع نشان داده شده و همانگونه که در این شکل مشخص است، کنترل کننده های فازی به خوبی توان های تزریقی را بر اساس مقادیر مرجع دنبال کرده اند. این تنظیم که از طریق کنترل کننده های فازی انجام شده است، از طریق تنظیم زاویه فاز و دامنه امواج مدولاسیون اینورتر، همانگونه که در شکل ۱۶، نمایش داده شده است، انجام گرفته است. در شکل ۱۷، به منظور نمایش عملکرد کنترل کننده چاپر، بخشی از ولتاژ دو سر سلف ذخیره ساز و همچنین مدهای عملکرد چاپر نشان داده شده است و همانگونه که مشخص است، این کنترل کننده، با تعویض مد عملکرد

Journal of Solar Engineering Science, Vol.135, No.2, 2013.

[12]- Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK". Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, October 2008, San Francisco, USA.

[13] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, N.J., 2002.

[14] P.Naderi, M.R. Alizadeh.p and M. Azizianfar,"A novel controlling method for the superconducting magnetic energy storage system as a distributed generation source; full modelling, design and simulation", International Journal of Sustainable Energy, Vol.33, No.3, 2013

[15] M.G. Molina, "Distributed energy storage Systems for applications in future smart grids," in Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, 2012.

[16] K.E. Nielsen, M. Molinas, "Superconducting magnetic energy storage (SMES) in power systems with renewable energy sources," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2010

[17] A. Morandi, L. Trevisani, F. Negrini, P. L. Ribani, and M. Fabbri, "Feasibility of superconducting magnetic energy storage on board of ground vehicles with present state-of-the-art superconductors," IEEE Trans. on applied superconductivity, vol. 22, no. 2, April 2012.

[18] F. D. González, A. Sumpera, O. G. Bellmunta, "A review of energy storage technologies for wind power applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 16, pp. 2154-2171, 2012.

### فهرست علائم اختصاری

A	ضریب ایده آلی مدل سلول فتوولتائیک
$I_{SMES}$	جریان باتری
$I_{ph}$	منبع جریان مبروز به مدل سیستم فتوولتائیک
$I_{sc}$	جریان اتصال کوتاه در دیود بکار رفته در مدل سلول فتوولتائیک
$I_{RS}$	جریان اشباع معکوس کوتاه در دیود مدل سلول فتوولتائیک
K	ثابت بولتزمن
$K_I$	ضریب تاثیر دما در جریان دیود مدل سلول فتوولتائیک
$N_s$	تعداد سلولهای سری در آرایه فتوولتائیک
$N_p$	تعداد سلولهای موازی در آرایه فتوولتائیک
$P_{PV}$	توان سیستم فتوولتائیک
$P_{Tr}$	توان اکتیو تزریق شده از سیستم تولید پراکنده به شبکه سراسری
$P_{PV-Max}$	بیشینه توان قابل دسترس از سیستم فتوولتائیک
q	مقدار عددی الکترون
$Q_{Tr}$	توان راکتیو تزرفی از سیستم تولید پراکنده
$R_s$	مقاومت سری هر دیود در آرایه فتوولتائیک
$R_{sh}$	مقاومت موازی هر دیود در آرایه فتوولتائیک
$T_c$	دمای محیط سیستم فتوولتائیک
$T_{ref}$	دمای مرجع در مدل سیستم فتوولتائیک
$V_{c1}, V_{c2}$	ولتاژ خازنهای شاخه مستقیم
$V_{DC}$	ولتاژ شاخه مستقیم معادل با مجموع ولتاژ خازن‌ها
f	فرکانس پایه (فرکانس امواج مدولاسیون اینورتر)
$f_0$	فرکانس تشدید فیلتر القاگر-خازنی
$\phi$	زاویه فاز امواج مدولاسیون معادل مستقیم به متناوب
$\lambda$	ضریب تابش در مدل سیستم فتوولتائیک

تولید پراکنده و کنترل کامل توان و ولتاژ سیستم، از نقاط قوت این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات است که بعضاً برای اولین بار در این مقاله ارائه گردید. برای ادامه تحقیقات، ارائه و مقایسه عملکرد سایر کنترل کننده‌های مقاوم با کنترل کننده‌های فازی توان‌های اکتیو و راکتیو، مدل‌سازی دقیق‌تر عنصر ابرسانا با عنصر غیرفشرده، و همچنین نحوه جزیره‌سازی ساختار معرفی شده در این مقاله، پیشنهاد می‌شود.

### مراجع

[1] K. Nigm, and Y. Hegazy, Intentional islanding of Distributed Generation for reliability enhancement, IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 208 - 213 Oct. 2003.

[2] F. Pilo, G. Celli, Improvement of reliability in active networks with intentional islanding, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technologies, pp. 474-479, April 2004.

[3] H. Zeineldin, E.F. El-Saadany, M.A. Salama, Intentional Islanding of Distributed Generation, IEEE Conference, 2005.

[4] IEEE Std. 929-2000, IEEE recommended practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, April 2000.

[5] IEEE Std. 1547-2003, IEEE Standard for interconnecting Distributed resources with electric power systems, 2003.

[6] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelachi, and D. Poli, Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply, IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 789-794, Jan, 2002.

[7] J. Liang, T. C. Green, G. Weiss, and Q. Zhong, Hybrid control of multiple inverters in an islanded mode distribution system, IEEE 34<sup>th</sup> Annual Conference on Power Electronics Specialist, pp. 61 - 66, June 2003.

[8] M. Marie, E. F. El-Saadany, M. Salama, A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems, IEEE Transactions on Power delivery, vol. 19, no. 3, July 2004.

[9] H. Zeineldin, M. I. Marie, E. El-Saadany, and M. Salama, Safe Controlled Islanding of Inverter Based Distributed Generation, IEEE Power Engineering Specialist Conference PESC04, June 20, 2004.

[10] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. Loh, Design, analysis and real time testing of a controller for multi bus micro grid system, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1195-1204, Sept. 2004.

[11] P. Naderi, Distributed Generation using Battery/Photovoltaic System: Modeling and Simulation with Relative Controller Design,