

بهره‌برداری ترکیبی کارآمد از شبکه DC مستقل و سیستم‌های PV جهت تغذیه

بارهای نامتعادل AC

رضا نوروزیان^۱، حسین محمدی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

noroozian@znu.ac.ir

۲- دانشجوی، دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

h-mohamadi@znu.ac.ir

چکیده

در این مقاله استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی خورشیدی برای تغذیه بارهای نامتعادل AC مستقل از شبکه بررسی شده است. برای اینکه با تغییر شرایط محیطی، PV همواره نقطه توان ماکزیمم را دنبال کند، نقطه کار PV با الگوریتم Perturb and Observe کنترل شده است. برای تأمین توان با کیفیت برق بالا برای هر کدام از بارها، PVها و بارهای نامتعادل AC با یک شبکه DC حلقوی، به یکدیگر متصل شده‌اند. برای کنترل سیلان توان در شبکه DC، یک بانک باتری با کنترل‌کننده شیبی، بین بارها و PVها به اشتراک گذاشته شده است. با هدف صرفه‌جویی در هزینه اولیه و کاهش تلفات در شبکه DC، بهترین مکان برای قرارگرفتن بانک باتری پیدا شده است. همچنین پس از به‌دست‌آوردن مدل دینامیکی قسمت DC شبکه و براساس نتایج حاصل از آن، نتایج شبیه‌سازی مقایسه و تأیید شده است. برای اطمینان از نتایج الگوریتم Perturb and Observe، به کمک معادلات ریاضی، مکان دقیق نقطه توان ماکزیمم به دست آمده است و از آن برای تصدیق نتایج الگوریتم استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: آرایه خورشیدی، بار نامتعادل، بانک باتری، دنبال‌کننده نقطه توان ماکزیمم، شبکه DC مستقل.

۱- مقدمه

سیستم‌های PV جدا از شبکه، با ترکیبی از ماژول‌های PV، باتری و بار تشکیل شده‌اند. این سیستم‌ها به‌صورت گسترده در مناطق دور از شبکه استفاده می‌شوند. در این سیستم‌ها، توان تولیدشده تنها به بار مربوط به خود اعمال می‌شود؛ بنابراین هر سیستم دارای یک باتری مجزا است تا تفاوت بین توان تولیدی و توان بار را جبران کند. هنگامی که توان مورد نیاز بار بیشتر از توان تولیدی است، در طول روز هم باتری دشارژ می‌شود که این امر باعث کاهش عمر مفید باتری می‌شود. همچنین اگر توان تولیدی بیشتر از تقاضای بار باشد، توان اضافه تلف خواهد شد [۲] و [۳].

ازطرفی با توجه به گسترش روزافزون استفاده از منابع تولید پراکنده به خصوص سلول‌های خورشیدی که

در مناطقی که امکان اتصال به شبکه برق ممکن نیست و یا هزینه اتصال زیاد است، منابع انرژی تجدیدپذیر برای تغذیه بارها به کار برده می‌شوند [۱]. در حالت کلی سیستم‌های PV به یکی از روش‌های جدا از شبکه، متصل به شبکه و یا سیستم هیبریدی بهره‌برداری می‌شوند.

* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

نام نویسنده مسئول: رضا نوروزیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - دانشگاه زنجان -

دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

ماکزیمم استفاده شده است [۸]. کنترل توان خروجی PV با یک مبدل DC/DC بوست انجام شده است [۹]. برای تغذیه بار نامتعادل AC، از یک مبدل بار DC/AC با سیستم کنترلی مبتنی بر تبدیل پارک استفاده شده است [۴]. در این مقاله یک شبکه مستقل DC با ساختار حلقوی با کیفیت برق بالا پیشنهاد شده است؛ به صورتی که یک بانک باتری بین چهار آرایه خورشیدی و بار AC به اشتراک گذاشته شده است. به منظور کم کردن هزینه اولیه و کاهش تلفات در شبکه DC پیشنهادی، یک مکان بهینه برای بانک باتری پیدا شده است. همچنین با استفاده از معادلات ریاضی، مکان دقیق نقطه توان ماکزیمم به دست آمده است که از آن برای تصدیق نتایج الگوریتم استفاده شده است.

۲- ساختار شبکه مستقل DC پیشنهادی

در شکل (۱)، شبکه حلقوی مورد مطالعه از یک انباره بانک باتری، چهار واحد تولید آرایه خورشیدی و چهار واحد بار نامتعادل AC تشکیل یافته است. تمامی واحدها به باس DC وصل شده است و به صورت موازی بهره‌برداری شده‌اند. شبکه نمونه از چهار باس تشکیل شده است که از طریق کابل DC به یکدیگر متصل شده‌اند. واحدهای تولید به باس‌های شماره یک، دو، سه و چهار متصل می‌شوند و بارهای نامتعادل AC به باس‌های شماره یک، دو، سه و چهار متصل می‌شوند. نکته‌ای که در اینجا باید به آن توجه شود، مکان بانک باتری است. مسئله جایابی بهینه بانک باتری از دیدگاه کاهش هزینه تلفات انرژی و هزینه اولیه به لحاظ ریاضی به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

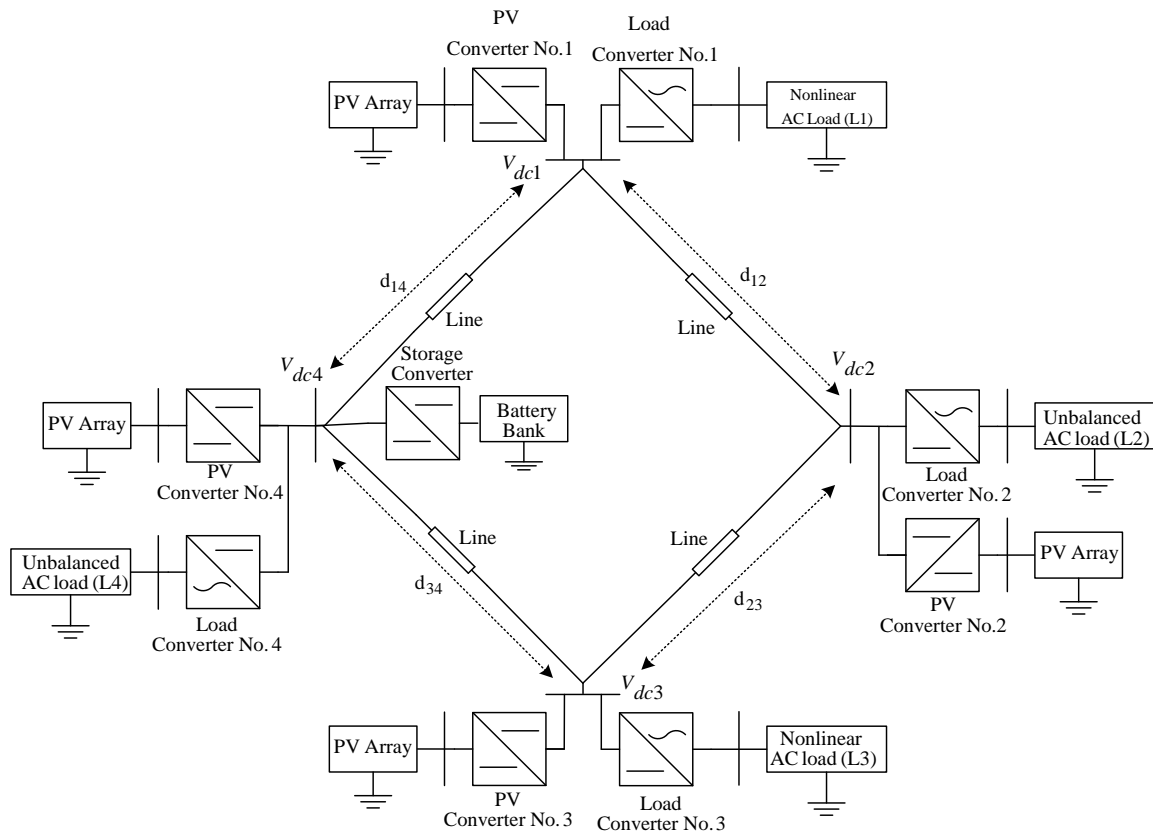
$$\text{Min} \left[\sum_{i=1}^n (P_{ib1} \cdot d_{ib1} + P_{ib2} \cdot d_{ib2}) \cdot \beta_1 \right] \quad (1)$$

در رابطه بالا d_{ib1} و d_{ib2} فاصله بانک باتری از باس شماره i روی خطوط DC، در دو مسیر موازی هستند. در رابطه (۱)، P_{ib1} و P_{ib2} میزان تلفات روزانه در هر متر از کابل اتصالی از باس شماره یک به باس شماره i در دو مسیر موازی است. همچنین β_1 هزینه تلفات توان در یک سال است که این مقدار از مرجع [۱۰] اقتباس شده است. با مینیمم کردن تابع هدف ارائه شده در رابطه (۱)، بهترین مکان برای قراردادن بانک باتری در شبکه حلقوی مورد مطالعه به دست آورده شده است.

خروجی DC تولید می‌کند، استفاده از شبکه توزیع DC در آینده نزدیک یا ترکیب این شبکه‌ها با شبکه‌های AC یک امری ضروری خواهد بود [۴]. در سال‌های اخیر با گسترش سریع ادوات الکترونیک قدرت، تبدیل ولتاژ DC با بازده بالایی انجام می‌شود. همچنین اکثر بارهای الکتریکی که دارای سیستم‌های کنترلی و الکترونیکی هستند، از قبیل بارهای الکترونیکی حساس و محرکه‌های الکتریکی موتورها، نیازمند برق DC هستند. بدین ترتیب، با استفاده از یک شبکه DC، اتصال منابع DG و بارهای الکتریکی مختلف به شبکه به نحو ساده‌تری امکان‌پذیر است [۴ و ۵]. برای شبکه DC ساختارهای متفاوتی از قبیل حلقوی، ستاره و شعاعی جهت اتصال منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. منابع تولید پراکنده از قبیل آرایه‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی، انباره‌ها جهت اتصال به شبکه توزیع DC در بهره‌برداری مختلف از قبیل مستقل از شبکه و متصل به شبکه نیار به شبکه‌های DC به صورت ستاره، حلقوی و شعاعی دارند.

مبدلی که شبکه DC را به بانک باتری متصل می‌کند اصطلاحاً مبدل ذخیره‌سازی^۱ نامیده می‌شوند. مبدل‌هایی که بارهای AC و DC از شبکه DC تغذیه می‌کند، اصطلاحاً مبدل بار^۲ نامیده می‌شوند. مبدلی که توان تولیدی منابع DG را به سیستم توزیع DC تزریق می‌کند، اصطلاحاً مبدل^۳ DG () نامیده می‌شوند. در طراحی مبدل ذخیره انرژی از کنترل‌کننده شبیبی^۴ استفاده شده است؛ به طوری که اگر ولتاژ شبکه DC از ۱/۰۵ برابر ولتاژ مرجع بالاتر شود، بانک باتری شارژ و اگر از ۰/۹۵ برابر ولتاژ مرجع کمتر باشد، بانک باتری دشارژ می‌شود و اگر ولتاژ شبکه بین این دو مقدار قرار داشته باشد، بانک باتری با شبکه DC تبادل انرژی نخواهد داشت [۴]. تثبیت ولتاژ در شبکه DC در محدوده مجاز، با توجه به پایداری سیستم، عملکرد پایدار مبدل‌ها الکترونیک قدرت و تغذیه مناسب بارها، ضروری است [۴ و ۶].

از آنجاکه توان تولیدی PV به تابش خورشید و دما وابسته است، کنترل نقطه کار PV به نحوی که ماکزیمم توان را دنبال کند، ضروری است [۷]. در این مقاله از روش Perturb and Observe برای دنبال کردن نقطه توان



شکل (۱): ساختار شبکه توزیع مستقل DC پیشنهادی

۳- مدل دینامیکی شبکه DC پیشنهادی

شکل (۲) مدل دینامیکی طرف DC شبکه حلقوی پیشنهادی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۲)، مبدل ذخیره‌سازی همانند منبع جریان کنترل‌شده با سیگنال کنترل‌کننده ولتاژ DC رفتار می‌کند. مبدل‌های بار و PV در مد کنترل جریان عمل می‌کنند.

کابل‌های DC به ترتیب با اندوکتانس‌های $(L_{12}, L_{23}, L_{34}, L_{14})$ و مقاومت‌های $(R_{12}, R_{23}, R_{34}, R_{14})$ مدل شده‌است. C_1, C_2, C_3 و C_4 به ترتیب ظرفیت خازنی معادل مبدل‌های متصل‌شده به باس‌های DC هستند. با توجه به شکل (۲) روابط ذیل به دست می‌آید:

$$I_b(s) = \frac{V_{dc,refb}(s) - \frac{\omega}{s + \omega} V_{dc4}(s)}{R_b} \quad (2)$$

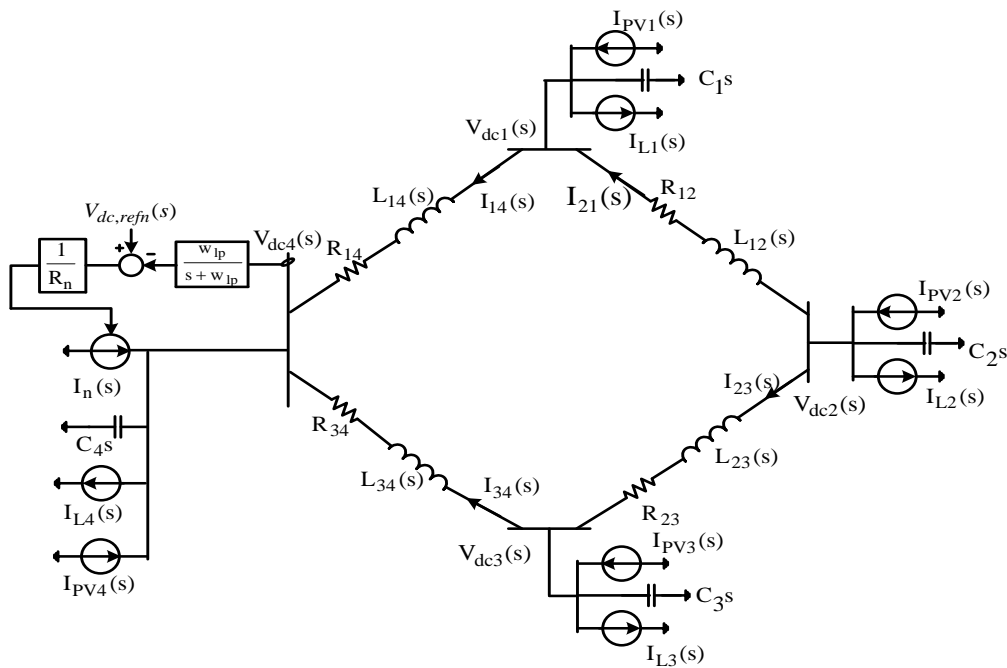
$$I_b(s) + I_{PV4}(s) - I_{L4}(s) = C_4 s V_{dc4}(s) + \frac{V_{dc4}(s) - V_{dc1}(s)}{R_{14} + L_{14}s} + \frac{V_{dc4}(s) - V_{dc3}(s)}{R_{34} + L_{34}s} \quad (3)$$

$$I_{PV1}(s) - I_{L1}(s) = C_1 s V_{dc1}(s) + \frac{V_{dc1}(s) - V_{dc4}(s)}{R_{14} + L_{14}s} + \frac{V_{dc1}(s) - V_{dc2}(s)}{R_{12} + L_{12}s} \quad (4)$$

$$I_{PV2}(s) - I_{L2}(s) = C_2 s V_{dc2}(s) + \frac{V_{dc2}(s) - V_{dc1}(s)}{R_{12} + L_{12}s} + \frac{V_{dc2}(s) - V_{dc3}(s)}{R_{23} + L_{23}s} \quad (5)$$

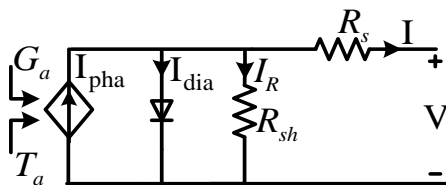
$$I_{PV3}(s) - I_{L3}(s) = C_3 s V_{dc3}(s) + \frac{V_{dc3}(s) - V_{dc2}(s)}{R_{23} + L_{23}s} + \frac{V_{dc3}(s) - V_{dc4}(s)}{R_{34} + L_{34}s} \quad (6)$$

فلسفه کنترلی مبدل ذخیره‌سازی براساس یک سیگنال فیدبک از ولتاژ باس DC، یعنی V_{dc4} و مقدار مرجع برای ولتاژ باس DC کار می‌کند. اگر ولتاژ DC بیشتر از مقدار مرجع، یعنی $750V$ باشد، توان اضافی در شبکه DC، باید از طریق مبدل ذخیره‌سازی، بانک باتری را شارژ کند.



شکل (۲): مدل دینامیکی طرف DC شبکه مستقل با ساختار حلقوی

تبادل انرژی نخواهد داشت [۱۱ و ۱۲]. ولتاژ مرجع برای شبکه DC پیشنهادی 750 V در نظر گرفته شده است. در شکل (۴)، مدار معادل یک PV ارائه شده است. به ترتیب مقاومت سری و مقاومت موازی R_s و R_{sh} هم جریان نوری و هم جریان دیودی PV هستند. روش‌های دنبال‌کننده نقطه ماکزیمم توان (MPPT) معمولاً در سیستم‌های PV استفاده می‌شوند تا توان خروجی آرایه PV را که وابسته به دمای ماژول و شرایط تابشی است به‌طور پیوسته دنبال کنند و آن را در مقدار ماکزیمم نگه دارند [۴ و ۱۳]. در این مقاله از روش Perturb and Observe برای MPPT استفاده شده است.



شکل (۳): مدل الکتریکی PV

اگر ولتاژ DC کمتر از مقدار مرجع، یعنی 750 V باشد، توان مورد نیاز در شبکه DC، باید از طریق مبدل ذخیره‌سازی، بانک باتری را دشارژ کند. با استفاده از رابطه‌های (۲) تا (۶) ساختار کنترل‌کننده شیب افقی ولتاژ باس‌های DC در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل مذکور ارتباط بین ولتاژ باس‌ها و جریان مصرفی بارها و جریان تولیدی آرایه‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. از شکل (۳) در تأیید مدل‌سازی دینامیکی شبکه توزیع DC استفاده شده است.

۵- استراتژی کنترلی مبدل‌ها

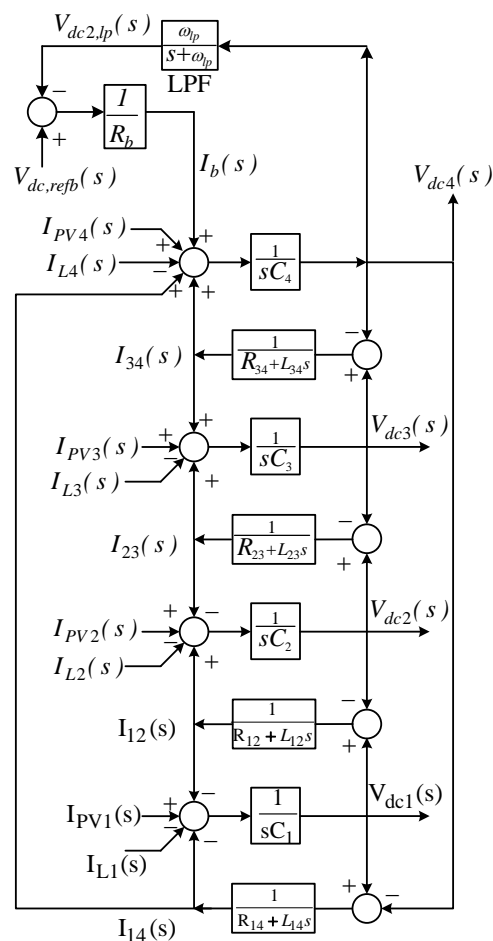
در این مقاله از استراتژی کنترلی ارائه‌شده در [۴] برای کنترل مبدل ذخیره‌کننده انرژی و مبدل DC/AC استفاده شده است. مدیریت تبادل توان در شبکه توسط مبدل ذخیره انرژی انجام می‌شود که این مبدل با یک کنترل‌کننده شیبی کنترل می‌شود که اگر ولتاژ شبکه DC از ۱/۰۵ برابر ولتاژ مرجع بالاتر شود، بانک باتری شارژ و اگر از ۰/۹۵ برابر ولتاژ مرجع کمتر شود، بانک باتری دشارژ شده است و نیاز بار را تأمین می‌کند و اگر ولتاژ شبکه بین این دو مقدار قرار داشته باشد، بانک باتری با شبکه DC

کار می‌کند.

$$P = V \cdot I \quad (۷)$$

در این الگوریتم، ابتدا ولتاژ و جریان آرایه اندازه‌گیری می‌شود و سپس توان خروجی آرایه محاسبه می‌شود. با مقایسه توان خروجی با مقدار ذخیره‌شده قبلی آن، تغییرات توان ΔP ، به دست می‌آید. مطابق شکل (۵) اگر ولتاژ آرایه افزایش پیدا کند، $V(K) - V(K-1) > 0$ ، و این افزایش ولتاژ، افزایش توان آرایه را به همراه داشته باشد، توان خروجی با مقدار ذخیره‌شده قبلی آن، تغییرات توان ΔP ، به دست می‌آید. مطابق شکل (۵) اگر ولتاژ آرایه افزایش پیدا کند، $V(K) - V(K-1) > 0$ ، و این افزایش ولتاژ، افزایش توان آرایه را به همراه داشته باشد، $\Delta P > 0$ ، به معنای نزدیکی نقطه کار به MPP است؛ بنابراین ولتاژ MPP، باید افزایش پیدا کند؛ درحالی‌که افزایش ولتاژ باعث کاهش توان آرایه شود، $\Delta P < 0$ ، به معنای دوری نقطه کار از MPP بوده است و باید V_{MPP} کاهش یابد. در حالتی که کاهش ولتاژ آرایه، $V(K) - V(K-1) < 0$ ، منجر به کاهش توان می‌شود، $\Delta P < 0$ ، نقطه کار به MPP نزدیک‌تر می‌شود؛ بنابراین V_{MPP} افزایش پیدا خواهد کرد؛ اما اگر کاهش ولتاژ آرایه باعث افزایش توان آرایه شود، $\Delta P > 0$ ، به معنای نزدیک‌تر شدن نقطه کار به MPP است؛ بنابراین V_{MPP} باید افزایش پیدا کند. در شکل ۶ فلوجارت این الگوریتم نشان داده شده است.

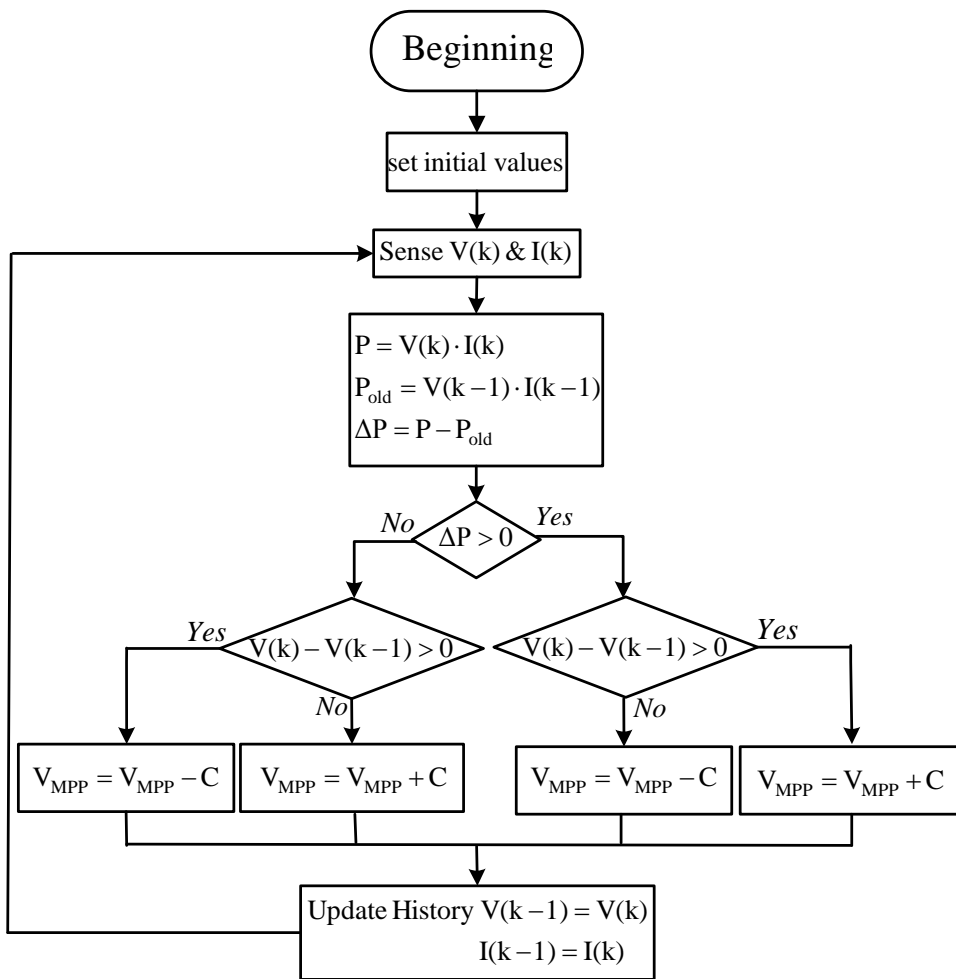
در رابطه (۹)، D_i ضریب ایدئال‌سازی دیود، N_{sm} تعداد ماژول‌های سری در هر شاخه از آرایه، N_{sc} تعداد سلول‌های سری در هر شاخه از ماژول، D_i ضریب ایدئال‌سازی دیود، K ثابت بولتزمن و q بار یک الکترون است.



شکل (۸): ساختار کنترل‌کننده شیب افقی ولتاژ باس‌های DC

۵-۱- الگوریتم Perturb and Observe

به دلیل سادگی الگوریتم و سهولت در اجرا، روش Perturb and Observe در اکثر کاربردهای انرژی خورشیدی استفاده می‌شوند. Perturb and Observe یک روش تکراری برای به‌دست‌آوردن MPP است؛ به‌صورتی که ابتدا مشخصات آرایه فتوولتائیک را اندازه‌گیری می‌کند و سپس در نقطه کار آرایه فتوولتائیک یک اغتشاش وارد می‌کند تا جهت تغییر به دست آید. شکل (۵) منحنی توان خروجی آرایه فتوولتائیک را براساس تابعی از ولتاژ آرایه نشان می‌دهد (منحنی P-V) که در یک تابش و دمای ثابت



شکل (۵): فلوجارت الگوریتم Perturb and Observe

طبق قضیه اکسترمم $\frac{dP}{dV}$ را مساوی با صفر قرار داده است و از آنجا که R_{sh} بسیار بزرگ و R_s بسیار کوچک است، با تقریبی پذیرفتنی می‌توان نوشت:

$$I_{pha} - \frac{d}{dV} (V \cdot N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A \cdot (V+R_s I)} - 1)) = 0 \quad (13)$$

رابطه (۱۳) یک معادله غیر خطی است که برای حل آن از روش‌های عددی استفاده می‌شود. به ازای مقادیر مختلف تابش و دمای آرایه، رابطه (۱۳) حل می‌شود و به کمک رابطه زیر مقدار جریان نوری آرایه را، در شرایط ماکزیمم توان به دست آورد:

$$I_{pha-MPP} = \frac{N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (1 + A \cdot V_{MPP}) \cdot e^{A \cdot V_{MPP}}}{-N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os}} \quad (13)$$

$$I_{MPP} = \frac{I_{pha-MPP}}{-N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A \cdot V_{MPP}} - 1)} \quad (14)$$

$$I \cdot (1 + \frac{R_s}{R_{sh}}) = I_{pha} - N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A \cdot (V+R_s I)} - 1) \cdot \frac{V}{R_{sh}} \quad (10)$$

$$P \cdot (1 + \frac{R_s}{R_{sh}}) = V \cdot I_{pha} - N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A \cdot (V+R_s I)} - 1) \cdot \frac{V^2}{R_{sh}} \quad (11)$$

اگر طرفین رابطه (۱۰) را در V ضرب شود رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

اگر از رابطه (۱۱) نسبت به ولتاژ مشتق گرفته شود، رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$\frac{dP}{dV} \cdot (1 + \frac{R_s}{R_{sh}}) = I_{pha} - \frac{d}{dV} (V \cdot N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A \cdot (V+R_s I)} - 1)) - \frac{2V}{R_{sh}} \quad (12)$$

۵-۳- کنترل مبدل DC/DC افزایشنده

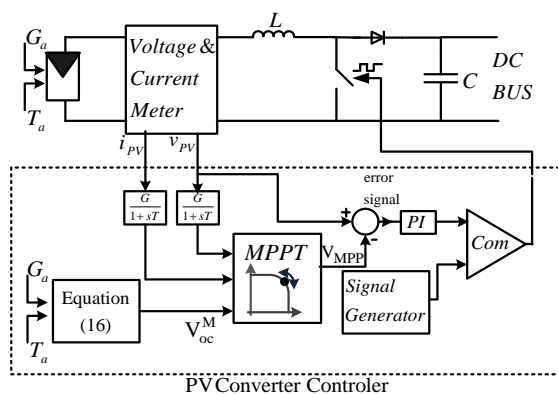
همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، ولتاژ و جریان PV پس از عبور از یک فیلتر، به الگوریتم اجراکننده MPPT اعمال شده است و از مقایسه V_{MPPT} به دست آمده با ولتاژ PV سیکل کاری مبدل بوست تولید شده است. به کمک رابطه زیر ولتاژ مدار باز مازول در شرایط مختلف محیطی به دست می‌آید:

$$V_{oc}^M = [V_{oc,0}^M + c_1(T_a - T_{ref}) + c_r(\log(G_a + 1) - \log(G_{ref}))] \quad (16)$$

c_r ضریب تابشی ولتاژ مدار باز و c_1 ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه است. مطابق شکل (۷) از رابطه (۱۶) برای بهبود عملکرد الگوریتم MPPT استفاده شده است. به صورتی که V_{MPPT} را بین دو مقدار $k_1 V_{MPPT}$ و $k_2 V_{MPPT}$ محدود می‌کنیم. به عبارت دیگر داریم:

$$k_1 V_{MPPT} \leq V_{MPPT} \leq k_2 V_{MPPT} \quad (17)$$

با انتخابی مناسب برای ضرایب k_1 و k_2 به کمک سعی و خطا از نوسان اضافی حول MPP کاسته می‌شود.



شکل (۷): مبدل بوست PV و روش کنترلی آن

۶- نتایج شبیه سازی

سیستم نشان داده شده در شکل ۱ مدل شده است و به منظور مطالعه عکس‌العمل شبکه DC مستقل به مسائل کیفیت توان، با نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی قادر به تأمین ولتاژ DC و AC با کیفیت بهتر

رابطه (۱۴) مقدار جریان خروجی آرایه را در شرایط ماکزیمم توان به دست می‌دهد. به کمک رابطه (۷)، توان خروجی آرایه را به ازای ولتاژ و جریان MPP به دست می‌آید:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot A \cdot I_{os} \cdot V_{MPP}^2 \cdot e^{A \cdot V_{MPP}} \quad (15)$$

۵-۲- روش ریاضی برای به دست آوردن مکان دقیق MPP

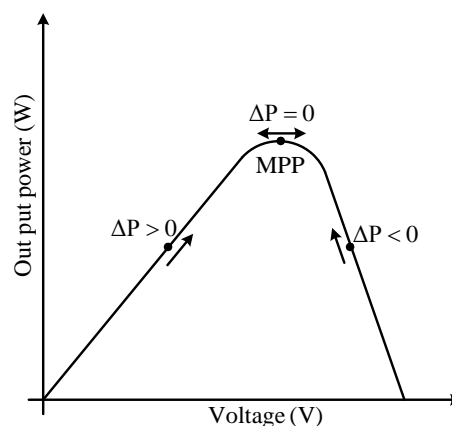
در این بخش محاسبه کننده نقطه ماکزیمم توان را به صورت ریاضی مدل می‌کنیم. برای اجرای محاسبه کننده نقطه ماکزیمم توان از مشتق توان نسبت به ولتاژ کمک می‌گیریم. به این صورت که مقدار $\frac{dP}{dV}$ را محاسبه می‌کنیم و مقدار به دست آمده را مساوی صفر قرار می‌دهیم (طبق قضیه اکسترمم). بدین صورت ولتاژ نقطه‌ای به دست می‌آید که می‌توان در آن ولتاژ، ماکزیمم توان را از آرایه فتوولتائیک دریافت کرد. با توجه به شکل ۴ خواهیم داشت:

$$I = I_{pha} - I_{dia} - I_R \quad (8)$$

$$I = I_{pha} - N_{pm} \cdot N_{pc} \cdot I_{os} \cdot (e^{A(V+R_s I)} - 1) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (9)$$

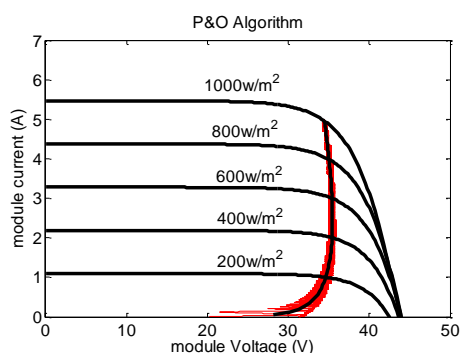
برای سادگی در رابطه ۹،

$$A = \frac{q}{N_{sm} \cdot N_{sc} \cdot D_i \cdot K \cdot T_a} \text{ است.}$$



شکل (۶): نحوه عملکرد الگوریتم Perturb and Observe

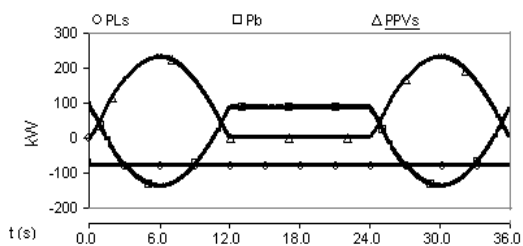
در منحنی P-V



شکل (۱۰): عملکرد صحیح الگوریتم Perturb and Observe در دنبال کردن نقطه MPP

در شکل (۹) مکان دقیق نقطه توان ماکزیمم هر کدام از ماژول‌ها در منحنی P-V نشان داده شده است. در شکل (۱۰) نشان داده شده است که الگوریتم Perturb and Observe نقطه دقیق توان ماکزیمم را در منحنی I-V به درستی دنبال می‌کند. در شکل (۱۰) نشان داده شده است که طرح کنترلی مبدل DC/DC عملکرد صحیحی دارد و هر PV (به عنوان نمونه PV شماره چهار) ماکزیمم توان قابل تولید خود را با کمترین نوسان‌ها، حول نقطه ماکزیمم توان تولید می‌کند.

در شکل (۱۱)، PPVs برابر با مجموع توان تولیدی آرایه‌های فتوولتائیک ($P_{PVs} = P_{PV1} + P_{PV2} + P_{PV3} + P_{PV4}$)، PLs برابر با مجموع توان مصرفی بارهای نامتعادل ($P_{Ls} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} + P_{L4}$) و توان خروجی بانک باتری است.



شکل (۱۱): تغییرات لحظه‌ای توان

در صورت تغییر توان تولیدی، توان شارژ و دشارژ شده در بانک باتری تغییر می‌کند. این امر بخاطر این است که مبدل ذخیره‌سازی مجهز به کنترل‌کننده ولتاژ باس DC است. با توجه به شکل (۱۱)، توان مصرفی بارها ثابت نگه

برای همه بارهای شبکه است. در جدول (۱) مکان هر کدام از باس‌ها در صفحه مختصات، ماکزیمم توان تولیدی و توان مصرفی هر کدام از باس‌ها ارائه شده است. نتایج حاصل از مینیمم کردن تابع هدف ارائه‌شده در رابطه (۱)، در جدول (۲) ارائه شده است.

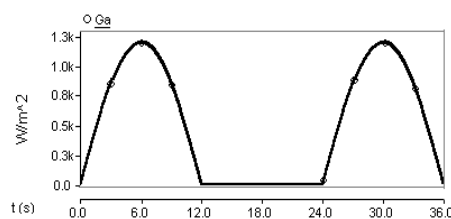
جدول (۱): مشخصات باس‌های شبکه پیشنهادی

	$P_{PV}(kW)$	$P_L(k)$	$x_i(m)$	$y_i(m)$
BUS.1	49.5	17	222	33
BUS.2	57	19.5	0	222
BUS.3	42	14.5	333	480
BUS.3	64	22	544	180

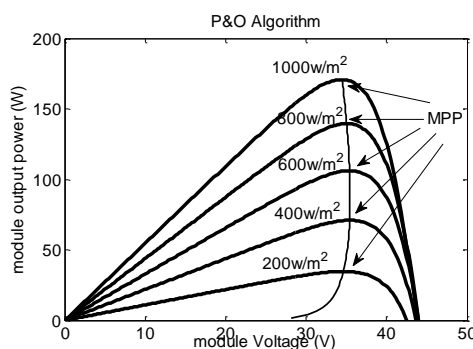
جدول (۲): مشخصات مکان بانک باتری

(xb,yb)	d1 (m)	d2 (m)	d3 (m)	d1 (m)
(544,180)	291.56	421.25	365.95	345.38

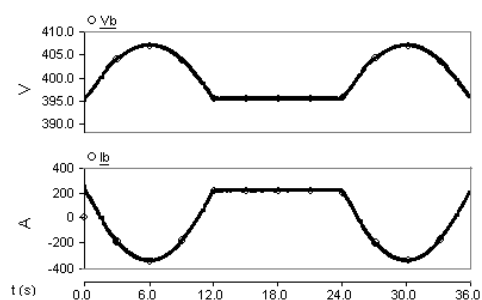
شکل (۸) مقادیر تابش آفتاب را در طول یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. در فاصله‌های زمانی $0 < t < 12s$ و $24 < t < 36s$ همه آرایه‌های خورشیدی در مد روز کار می‌کنند. در فاصله زمانی $12 < t < 24s$ همه آرایه‌های خورشیدی در مد شب کار می‌کنند. دمای آرایه برابر با $27^\circ C$ است.



شکل (۸): تابش آفتاب



شکل (۹): مکان دقیق نقطه توان ماکزیمم



شکل (۱۳): ولتاژ و جریان لحظه‌ای بانک باتری

مدار کنترلی پیشنهادی $V-f$ برای اینورتر DC/AC

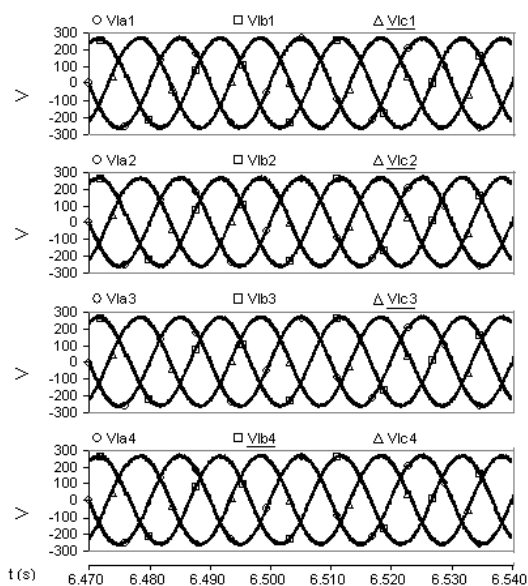
ولتاژ دو سر بار (مبدل بار) از [۴] استفاده شده است.

در شکل (۱۶) $V_{dc1,dy}$ ، $V_{dc2,dy}$ ، $V_{dc3,dy}$ و ولتاژ باس‌های DC به دست آمده از مدل دینامیکی هستند که با توجه به یکسان بودن ولتاژهای مدل دینامیکی و شبیه‌سازی، صحت جواب‌های به دست آمده تأیید می‌شود.

. با توجه به شکل (۱۶)، در مد روز آرایه‌های

خورشیدی به علت افزایش توان در باس DC ولتاژ باس‌ها

افزایش یافته است.



شکل (۱۴): ولتاژ فازی بارهای متصل به شبکه DC

داشته شده است. شکل (۱۲) توان‌های جاری شده در خطوط شبکه DC را نشان می‌دهند. شکل (۱۳) ولتاژ و جریان بانک باتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳)، جریان باتری در اثر تغییرات توان تولیدی تغییر می‌یابد و ولتاژ ترمینال بخاطر شارژ باتری افزایش می‌یابد و همچنین بخاطر دشارژ باتری کاهش می‌یابد.

شکل (۱۴) ولتاژهای لحظه‌ای سه فاز و جریان‌های خط

ترمینال‌های بار را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۱۵)

جریان فازی بارهای نامتعادل نشان داده شده است.

اینورتر DC/AC ولتاژ دو سر بار متعادل در مقدار

مرجع با فرکانس ۵۰ هرتز نگه می‌دارد؛ بنابراین سیستم PV،

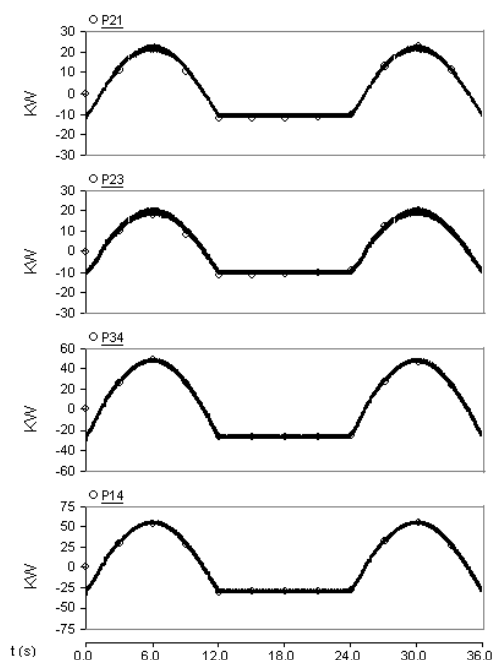
ولتاژ متعادل شده را برای بارهای نامتعادل AC مهیا می‌کند.

درحالی‌که جریان بار نامتعادل است. نتایج شبیه‌سازی

توانایی مدار کنترلی پیشنهادی $V-f$ را در تغذیه انواع

بارهای خطی و غیرخطی و متعادل و نامتعادل را تصدیق

می‌کند.

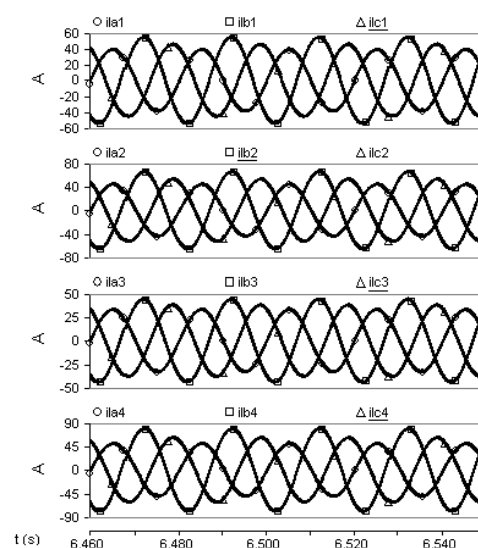


شکل (۱۲): توان‌های جاری شده در شبکه DC

بالاست. در تمام طول شبانه‌روز ولتاژ شبکه در سطح قابل قبولی باقی می‌ماند. یکسان بودن نتایج مدل دینامیکی با شبیه‌سازی انجام‌شده، این امر را تصدیق می‌کند. همچنین شبکه پیشنهادی می‌تواند بار نامتعادل AC را با ولتاژ متعادل تغذیه کند. با پیدا کردن بهترین مکان برای بانک باتری، هزینه تلفات انرژی و هزینه اولیه شبکه کاهش پیدا کرده است. این نوع از شبکه‌های DC نیازی به مرکز کنترل و ارتباطات مخابراتی بین عناصر شبکه ندارند. کنترل مبدل DC/DC آرایه خورشیدی با استفاده از الگوریتم Perturb and Observe باعث می‌شود که PVها نقطه توان ماکزیمم را به خوبی دنبال کنند. مقایسه نتایج الگوریتم P&O و مکان دقیقی نقطه توان ماکزیمم، نشان می‌دهد این الگوریتم به درستی نقطه MPP را دنبال می‌کند. برای تغذیه مناطق دور از شبکه برق، شبکه DC پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راه حل مناسب در نظر گرفته شود.

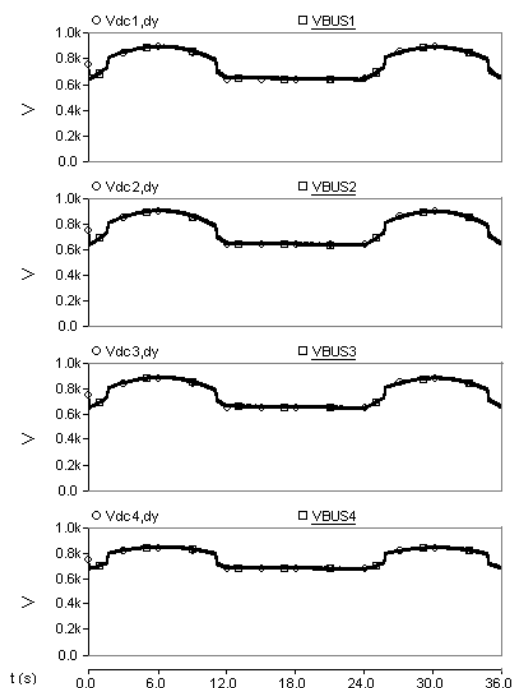
مراجع

- [1] V.Azbe and R.Mihalic, "Distributed generation from renewable source in an isolated DC network," *Renewable Energy*; Vol. 31, No. 14, pp 2370-84, 2006.
- [2] M.Dakkak, A.Hirate, R.Muhida, and Z.Kawasaki, "Operation strategy of residential centralized photovoltaic system in remote areas," *Renewable Energy*, Vol.28, No.7, pp.997-1012, 2003.
- [3] M.Dakkak, R.Uchida and T.Ise, "Study on low-level voltage of Distributed Flexible Network PV System", IEEE 35th, PESC04, Aachen, Germany, 2004.
- [4] R.Noroozian, M.Abedi, G.B.Gharehpetian, S.H.Hosseini, "Combined operation of DC isolated distribution and PV systems for supplying unbalanced AC loads", *Renewable Energy* Vol. 34 pp.899-908, 2009.
- [5] N. Eghtedarpour, E. Farjah, "Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids" *Renewable Energy* Vol.45, pp. 96e-110, 2012.
- [6] M.M. Amin, FL Miami, M.A. Elshaer, O.A. Mohammed, "DC bus voltage control for PV sources in a DC distribution system infrastructure", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 25-29 July, p. 1 - 5, 2010.
- [7] V.Salas, E.Olias, A.Barrado and A.Lazaro,



شکل (۱۵): جریان فازی بارهای نامتعادل AC متصل به شبکه

DC



شکل (۱۶): ولتاژ باس‌های شبکه DC

۷- نتیجه گیری

در این مقاله بهره‌برداری از منبع انرژی خورشیدی برای تغذیه بارهای نامتعادل AC مستقل از شبکه بررسی شد و نشان داده شد که شبکه حلقوی DC پیشنهادی قادر به تأمین تقاضای بار نامتعادل AC با کیفیت مناسب و قابلیت اطمینان

- “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Solar Energy Materials & solar Cells* Vol. 90, pp. 1555-1578, 2006.
- [8] N.Femia, G.Petrone, G.Spagnuolo, and M.Vitelli, “A Technique for improving P&O MPPT Performance of Double-Stage Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, November 2009.
- [9] D.Lu and G.Agelidis, “Photovoltaic-Battery-Powered DC Bus System for Common Portable Electronic Divices,” *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 24, No. 3, 2009.
- [10] M.Dakkak, K.Hatori, Y.Miura and T.Ise “A Study on Network Configuration of Distributed Flexible Network PV System,” *IEEJ Trans. PE*, Vol. 125. No.12, 2005.
- [11] M. Mahmoodi, GB.Gharehpetian, M.Abedi and R.Noroozian, “A suitable control strategy for source converters and a novel load generation voltage control scheme for DC voltage determination in DC distribution,” *First international power and energy conference, PECon 2006, Putrajaya, Malaysia*, p. 363-67, 2006.
- [12] B. Indu Rani, G. Saravana Ilango, C. Nagamani, “Power flow management algorithm for photovoltaic systems feeding DC/AC loads” *Renewable Energy* Vol. 45 pp. 96-110, 2012.
- [13] M. Niroomand, M. Sherkat , M. Soheili, “A high performance DC-DC converter with intelligent control for photovoltaic applications” *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 4. No.2, pp. 88-73, 2013.

¹ Storage Converter

² Load Converter

³ DG Converter

⁴ Droop Controller