

## بهبود عملکرد پارامترهای کیفیت توان در میکروگرید در حالت نامتعادلی شبکه

هورمزد میلادپور<sup>۱</sup>، دکتر سیروس محمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، hoormazd\_miladpoor@live.com

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی دانشکده برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، [sirusjozar@gmail.com](mailto:sirusjozar@gmail.com)

چکیده - در این تحقیق یک رابط جبران کننده کیفیت توان سه سیمه بین میکروگرید و شبکه برق ارائه میشود که هم کیفیت توان میکروگرید و هم کیفیت جریان جاری شده بین میکروگرید و شبکه را بهبود می بخشد. این جبران کننده پیشنهادی شامل دو عدد اینورتر یکی بصورت موازی و دیگری بصورت سری می باشد که برای هر  $DG$  استفاده می شود. در هر اینورتر مولفه های مثبت و منفی برای جبران سازی اثرات ناشی از نامتعادلی شبکه کنترل می شوند. اینورتر موازی جهت اطمینان از متعادل بودن ولتاژ در میکروگرید و همچنین توزیع متوازن توان بین چند میکروگرید در چند  $DG$  موازی استفاده می شود در حالی که اینورتر سری وظیفه متعادل کردن جریان خط بوسیله تزریق مولفه های مناسب ولتاژ در خط را انجام می دهد. این جبران کننده توسط نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. کنترل کننده مدرن با روش آکرمن جهت کنترل اینورترهای سری و موازی بکار گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده پارامترهای کیفیت توان در میکروگرید در حالت نامتعادلی، بهبود چشمگیری پیدا کرده است.

کلید واژه- محدود کردن جریان خطا، مولفه مثبت و منفی، جبران کننده توان، آکرمن، کنترل مدرن.

نامتعادلی ولتاژ ماندگار در نقطه اتصال شبکه بوجود خواهد آمد.

این نامتعادلی ولتاژ منجر به افزایش تلفات در موتورها و عملکرد نادرست بارهای حساس میکروگرید خواهد شد. [۳]

یک راه حل مشخص جهت حل مشکل فوق متعادل کردن ولتاژ تغذیه بارهای حساس میکروگرید توسط تکنیکهای تنظیم ولتاژ می باشد. اما در صورتی که فقط ولتاژ میکروگرید متعادل شود ممکن است جریانهای نامتعادلی بزرگی بین میکروگرید و شبکه برق که امپدانس بین آنها خیلی کوچک است جاری شود [۴]. این جریانهای نامتعادل بزرگ می توانند به تجهیزات داخل

اینورتر و بقیه اجزای سیستم از قبیل خطوط انتقال و کابلها صدمه بزند. این مشکل بخصوص در زمان افت ولتاژ شدید (voltage sag) نگران کننده است. زمانی که تفاوت ولتاژهای شبکه و میکروگرید بزرگ باشد، سبب جاری شدن جریان های خطای شدیدی در طول فیدر توزیع امپدانس پایین برای چند سیکل می شود. بنابراین جهت کنترل ولتاژ بارهای حساس داخل میکروگرید و همچنین جریان جاری شده بین میکروگرید و شبکه برق بایستی یک جبران کننده کیفیت توان بین این دو

### ۱- مقدمه

میکروگریدها سیستم هایی هستند که مجموعه ای از بارها و یک یا چند منبع تولید پراکنده را در بر می گیرند. آن ها را می توان به عنوان مجموعه ای از مشترکین با بارهای مختلف، منابع انرژی پراکنده، تجهیزات کنترلی و یک سامانه ی کنترلی محلی توصیف کرد که می توانند هم در حالت اتصال به شبکه ی توزیع و هم در حالت جزیره ای و منفک از آن کار کنند. [۱] اغلب منابع تولید پراکنده در برق DC توسط اینورترهای منبع ولتاژ به شبکه وصل می شوند. نگرانی که در این سیستمها وجود دارد اثرات نامتعادلی ولتاژها روی میکروگریدها است (معمولا این نامتعادلی ها توسط خطاهای نامتعادل در شبکه و همچنین بارهای نامتعادل شبکه بوجود می آید). که عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می دهد. [۲] اگر نامتعادلی خیلی شدید باشد ارتباط بین شبکه و میکروگرید توسط کلیدهای ارتباطی بین این دو قطع می شود و میکروگرید را از شبکه جدا می کند. ولی اگر نامتعادلی زیاد نباشد کلید بسته می ماند و در نتیجه یک

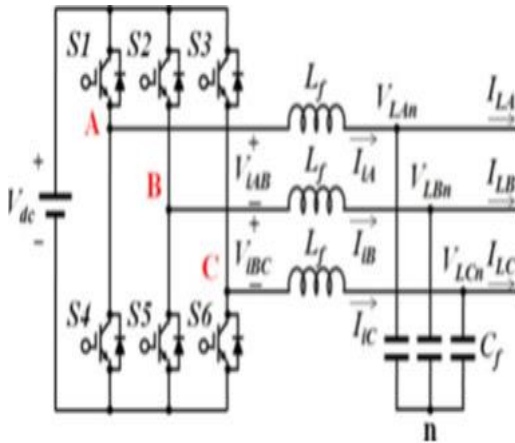
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

جهت متعادل کردن جریان جاری شده بین میکروگرید و شبکه برق نامتعادل و محدود کردن جریانهای خطای بزرگ بین دو شبکه در حالتی که ولتاژ شبکه افت شدید دارد، می باشد.

شبکه استفاده شود.

## ۲- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله از یک رابط جبران کننده کیفیت توان سه سیمه بین میکروگرید و شبکه برق استفاده می شود که سبب بهبود کیفیت توان میکروگرید و کیفیت جریان جاری شده بین میکروگرید و شبکه گردد. این جبران کننده شامل دو عدد اینورتر یکی بصورت موازی و دیگری بصورت سری می باشد که برای هر DG استفاده می شود. اینورتر موازی جهت اطمینان از متعادل بودن ولتاژ در میکروگرید و همچنین توزیع متوازن توان بین چند میکروگرید در چند موازی استفاده می شود در حالی که اینورتر سری وظیفه متعادل کردن جریان خط بوسیله تزریق مولفه های مناسب ولتاژ در خط را انجام می دهد. شماتیک سیستم مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده میشود جهت کنترل ولتاژ بارهای حساس داخل میکروگرید و همچنین جریان جاری شده بین میکروگرید و شبکه برق یک جبران کننده کیفیت توان رابط بین این دو شبکه که از دو اینورتر موازی و سری A و B تشکیل شده است در هر DG استفاده می شود.



شکل (۲): اینورتر DC به AC سه فاز ۱

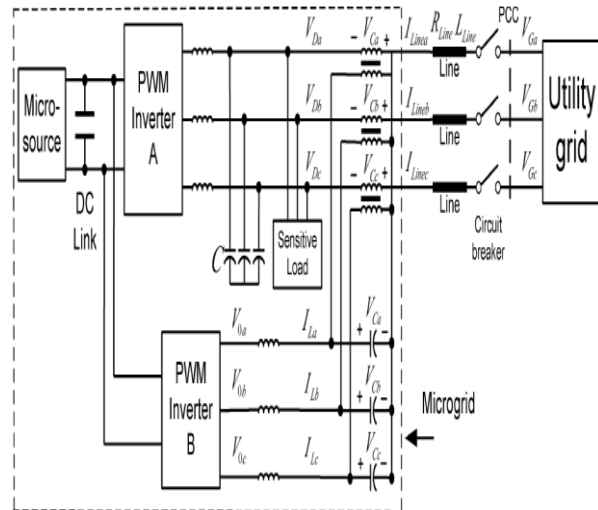
همانطور که در شکل مشاهده میشود ولتاژ اینورتر،  $V_i$  جریان اینورتر،  $V_L$  و ولتاژ و جریان بار،  $V_{dc}$  ولتاژ منبع DC، S1 تا S6 عناصر کلیدزنی و  $L_f$  و  $C_f$  راکتانس و کاپاسیتانس فیلتر می باشند. با استفاده از قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف، معادلات حاکم بر سیستم به شکل زیر می باشند:

$$\begin{cases} \frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{C_f} I_i - \frac{1}{C_f} I_L \\ T_i \frac{dI_i}{dt} = -\frac{1}{L_f} T_i V_L + \frac{1}{L_f} V_i \end{cases}$$

که ماتریس  $T_i$ ، عبارتست از:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

پس برای فاز a داریم:



شکل (۱): شماتیک سیستم

عملکرد اصلی اینورتر A متعادل کردن ولتاژ بارهای حساس داخل میکروگرید در تمام حالات و سنکرون کردن میکروگرید و شبکه در هنگام اتصال این دو شبکه می باشد. عملکرد اصلی اینورتر B تزریق مولفه های مناسب ولتاژ به فیدرهای توزیع

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

$$\varphi_C = [B \ AB] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_{DC}}{LC} \\ \frac{V_{DC}}{LC} & -\frac{1}{R_o C} \left( \frac{V_{DC}}{LC} \right) \end{bmatrix}$$

$$\alpha(A) = (A + \mu_1)(A + \mu_2)$$

برای بررسی پایداری از روش لیاپانوف استفاده می کنیم:

$$\dot{V}(x) = x\dot{x} < 0 \rightarrow$$

$$x(Ax + Bu) < 0$$

با اعمال شرایط پایداری لیاپانوف خواهیم داشت:

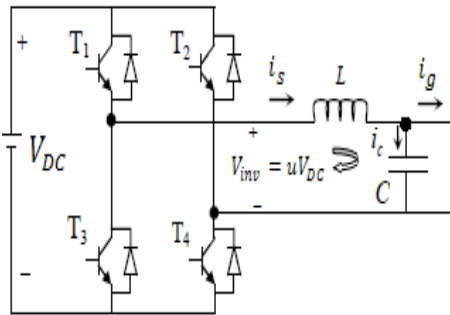
$$K_1 < \frac{1}{V_{DC}}$$

$$\frac{L}{R_o V_{DC}}$$

$$K_2 <$$

## ۲-۲-۱ اینورتر سری B

مدار اینورتر سری برای یک فاز در شکل (۳) نشان داده شده است.  $i_g$  جریان خروجی اینورتر،  $i_s$  جریان سلف،  $V_L$  ولتاژ سلف،  $V_C$  ولتاژ خازن،  $V_{inv}$  ولتاژ خروجی اینورتر و  $i_C$  جریان خازن می باشد.



شکل (۳): اینورتر تکفاز سری

روش تحلیل همانند اینورتر موازی می باشد که برای یک فاز بررسی می شود و برای دو فاز دیگر به شکل مشابه است. با اعمال قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف و مرتب سازی بر اساس ولتاژ خازن و جریان سلف خواهیم داشت:

$$x_{1a} = V_{LAn} - V_{refa}$$

$$x_{2a} = \dot{x}_1 = \frac{i_{ca}}{C} - \dot{V}_{refa}$$

برای فازهای **b** و **c** هم معادلات به همین شکل به دست می آیند. با جایگذاری و مرتب سازی معادلات بر اساس ولتاژ خازن و جریان سلف شکل نهایی معادلات بدین صورت خواهد بود:

$$\dot{x}_{1a} = x_{2a}$$

$$\dot{x}_{2a} = -\frac{x_{1a}}{LC} - \frac{x_{2a}}{RC} - \frac{V_{in}}{LC} u_a - \frac{V_{refa}}{LC}$$

$$\dot{x}_{1b} = x_{2b}$$

$$\dot{x}_{2b} = -\frac{x_{1b}}{LC} - \frac{x_{2b}}{RC} - \frac{V_{in}}{LC} u_b - \frac{V_{refb}}{LC}$$

$$\dot{x}_{1c} = x_{2c}$$

$$\dot{x}_{2c} = -\frac{x_{1c}}{LC} - \frac{x_{2c}}{RC} - \frac{V_{in}}{LC} u_c - \frac{V_{refc}}{LC}$$

و بصورت ماتریسی خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{R_o C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{DC}}{LC} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ D'(t) \end{bmatrix}$$

بر اساس خطی سازی ژاکوبین معادله به فرم زیر در می آید:

$$\dot{x}_1 = Ax + Bu$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{R_o C} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{DC}}{LC} \end{bmatrix}$$

جهت تعیین بردار بهره از روش آکرمین استفاده می

شود:

$$u = Kx$$

$$K = q_2^T * \alpha(A)$$

$$q_2^T = [0 \ 1] \varphi_C^{-1} = \frac{LC}{V_{DC}} [1 \ 0]$$

با در نظر گرفتن شرایط پایداری لیاپانوف و اعمال آن خواهیم داشت:

$$\dot{V}(x) = x\dot{x} < 0$$

$$j_x + j_u K + D < 0$$

$$K < \frac{-j_x - D}{j_u}$$

$$\mu < \frac{V_{DC}}{L} \left( \frac{-j_x - D}{j_u} \right) + \frac{R1}{L}$$

مقادیر پارامترهای مختلف سیستم به

شرح زیر می باشد:

مقدار

	پارامتر
120V	ولتاژ نامی خط به خط شبکه
50Hz	فرکانس
250V	ولتاژ منبع DC
10KHz	فرکانس سوئیچینگ برای هر دو اینورتر
10μF	ظرفیت خازنی فیلتر اینورتر سری
3.9mH	ظرفیت سلفی فیلتر اینورتر سری
1:1	نسبت تبدیل ترانس
30μF	ظرفیت خازنی فیلتر اینورتر موازی
5mH	ظرفیت سلفی فیلتر اینورتر موازی
3Ω	R_Line مقاومت خط
10mH	L_Line راکتانس خط
300W, 160Var	توان دیسپاچ شبکه
120W, 90 Var	بار میکروگرید

### ۲-۳ - نتایج شبیه سازی

در این بخش ابتدا ولتاژ شبکه بالانس است ولی در لحظه  $t=0.2$  با اضافه کردن  $pu \cdot 0.1$  مولفه توالی منفی و  $pu \cdot 0.1$  توالی صفر ولتاژ به اندازه  $pu \cdot 0.1$  نامتعادل شده است. همانطوریکه ملاحظه می شود در شکل (۴-۱ و ۴-۲) ولتاژ میکروگرید بوسیله اینورتر A متعادل شده است که نشانگر عملکرد خوب اینورتر A می باشد.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_C \\ i_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ i_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{DC}}{L} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} -i_g \\ \frac{R}{C} \\ 0 \end{bmatrix}$$

در اینجا هدف کنترل جریان می باشد بنابراین جریان واحد تولید پراکنده را به عنوان خروجی سیستم در نظر میگیریم و خطای سیگنال مرجع و خروجی سیستم به شکل زیر تعریف می شود:

$$x = i_g - i_{ref}$$

جریان مرجع  $i_{ref}$  همان جریان مصرفی بار می باشد که بصورت آنالین از جریان بار نمونه گیری می شود و جریان بعنوان جریان مرجع جهت کنترل جریان مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\dot{x} = -\frac{R}{L}x + \frac{V_{DC}}{L}u -$$

$$\frac{V_{DG1}}{L} - \frac{di_c}{dt} - \frac{di_{ref}}{dt} - \frac{R}{L}i_{ref}$$

با خطی سازی ژاکوبین خواهیم داشت:

$$\Delta \dot{x} = j_x \Delta x + j_u \Delta u$$

$$j_x = -\frac{R1}{L}$$

$$j_u = \frac{df}{du} = \frac{V_{DC}}{L}$$

در نتیجه

$$\dot{x} = -\frac{R1}{L}x + \frac{V_{DC}}{L}u$$

در اینجا جهت تعیین بردار بهره از روش آکرمن استفاده می شود:

$$\alpha(s) = \lambda + \mu \rightarrow$$

$$\alpha(A) = A + \mu = -\frac{R1}{L} + \mu$$

$$\varphi_C = [B] = \left[ \frac{V_{DC}}{L} \right]$$

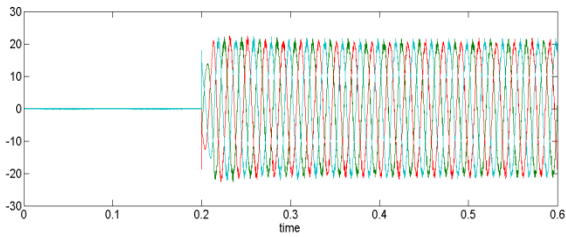
$$K = \varphi_C^{-1} * \alpha(A) =$$

$$\frac{L}{V_{DC}} \left( -\frac{R1}{L} + \mu \right)$$

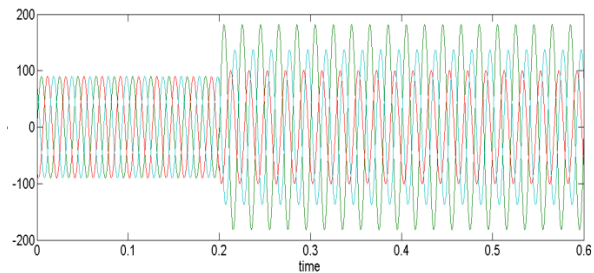
و در نهایت سیگنال کنترلی به صورت زیر خواهد بود:

$$u = Kx$$

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل (۳-۵): ولتاژ تولیدی بوسیله اینورتر B

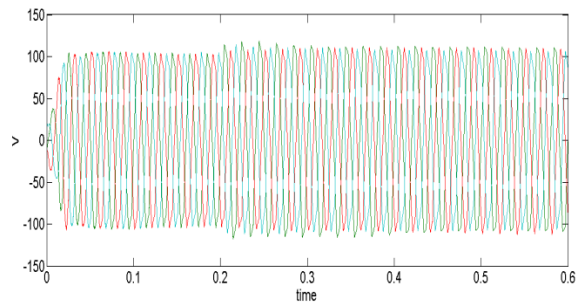


شکل (۱-۴): ولتاژ شبکه

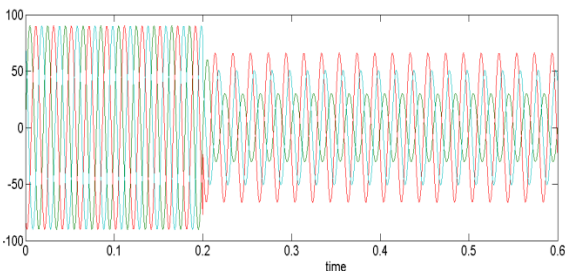
شبه سازی دیگری نیز جهت تست عملکرد جبران کننده در

حین افت ولتاژ شدید در شبکه انجام گرفته است.

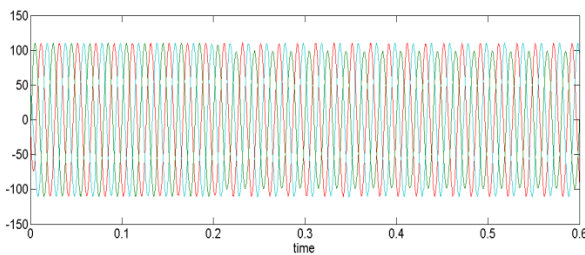
شکل (۱-۶) افت ولتاژ شدید شبکه را در زمان  $t=0.2s$  نشان می دهد. در این حالت  $V_{Ga}=32 < -44.7$  و  $V_{Gb}=66.4 < -170$   $V_{Gc}=54.3 < 39.6$  می باشد در حالی که در شکل (۲-۶) ولتاژ میکروگرید در مقدار ۹۰٪ مقدار نامی تثبیت شده است. ولتاژ سه فاز و جریان های خط جاری از اینورتر سری در شکل (۷-۱) و (۷-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴): ولتاژ های بار حساس در میکروگرید

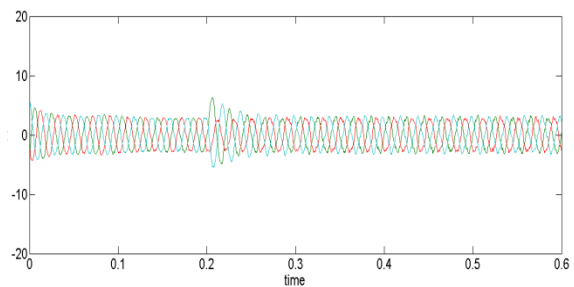


شکل (۱-۶): ولتاژ های sag در PCC

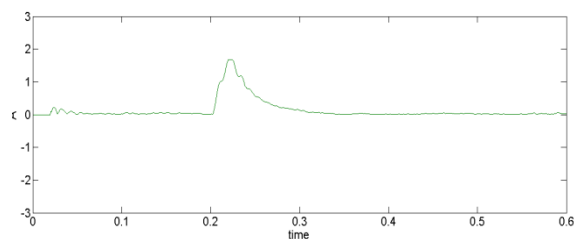


شکل (۲-۶): ولتاژ های بار حساس در میکروگرید

بطور مشابه همانطور که در شکل (۲-۵) و (۱-۵) دیده می شود با افزودن اثر اینورتر B جریان خط از حالت نامتعادل به حالت متعادل برگشته است و توالی منفی جریان خط از بین رفته است. این کار بوسیله تزریق ولتاژ توالی منفی  $\{V_{ca}^-, V_{cb}^-, V_{cc}^-\}$  توسط اینورتر B از زمان  $t=0.2s$  به بعد انجام می گیرد شکل (۳-۵).



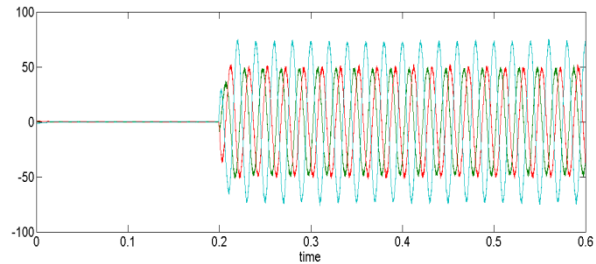
شکل (۱-۵): جریان های خط



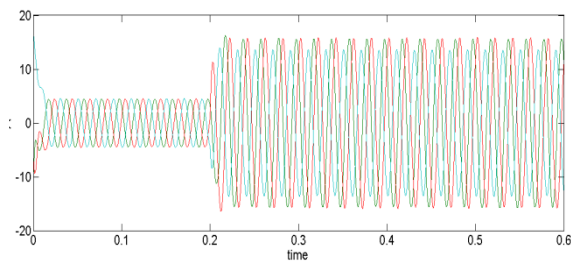
شکل (۲-۵): توالی منفی جریان خط

سنکرون کردن میکروگرید و شبکه در هنگام اتصال این دو شبکه می باشد.

مراجع



شکل (۷-۱): ولتاژ تزریقی بوسیله اینورتر B



شکل (۷-۲): جریان های خط

- [1] R. Lasseter, "Microgrids," in *Proc. Power Eng. Soc. Winter Meeting*, Jan. 27–31, 2002, pp. 305–308.
- [2] A. von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. voltage unbalance," 16, no. 4, pp. 782–790, Oct. 2001.
- [3] M. Prodanovic and T. C. Green, "Control and filter inverters for high power quality grid design of threephase *Power Electron*, vol. 18, no. 1, connection," *IEEE Trans.* pp. 373–380, Jan. 2003.
- [4] M. Prodanovic and T. C. Green, "Control and filter design of threephase inverters for high power quality grid connection," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 18, no. 1, pp. 373–380, Jan. 2003.
- [5] Kundur, Prabha. *Power system stability and control*. Edited by Neal J. York: McGraw-hill, 1994 Balu, and Mark G. Lauby. Vol. 7. New.

همانطور که مشاهده می شود عملکرد اینورتر موازی و سری در کنترل ولتاژ و جریان مناسب بوده و پارامترهای کیفیت توان به طرز چشمگیری بهبود یافته است.

### ۳- نتیجه گیری

امروزه اکثر سیستم های قدرت تحت شرایط بحرانی راه اندازی می شوند و با تهدید ناپایداری و یا فروپاشی ولتاژ روبرو هستند. به طوری که پایداری ولتاژ و میرایی نوسانات توان در سیستم های قدرت همواره به عنوان یکی از مسائل مهم در صنعت برق مطرح بوده است، به طوری که دلیل اصلی چند خاموشی بزرگ در دو دهه اخیر را ناشی از آن دانسته اند. [۵]

در این مقاله هدف بکارگیری جبران کننده کیفیت توان رابط برای یک DG در یک سیستم میکروگرید می باشد که این جبران کننده از دو اینورتر سری و موازی تشکیل شده ، جهت بهبود کیفیت توان میکروگرید و بهبود جریان جاری شده بین شبکه و میکروگرید کنترل می شوند. در حالت افت ولتاژ شدید شبکه اینورتر سری از جاری شدن جریان زیاد و در نتیجه از خرابی تجهیزات جلوگیری کند و عملکرد اینورتر موازی متعادل کردن ولتاژ بارهای حساس داخل میکروگرید در تمام حالات و