

# یک طرح کنترلی هماهنگ جهت بهبود کیفیت ولتاژ توسط اینورتر واسط منابع تولید پراکنده

مرتضی افراسیابی<sup>۱</sup> اسماعیل رکرک<sup>۲</sup>

دانشجوی دکتری- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

[afrazyabi.mo@fe.lu.ac.ir](mailto:afrazyabi.mo@fe.lu.ac.ir)

دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

[rokrok.e@lu.ac.ir](mailto:rokrok.e@lu.ac.ir)

**چکیده:** امروزه افزایش بارهای غیرخطی سبب افزایش هارمونیک‌ها در سطح شبکه‌های توزیع شده است. خازنهای اصلاح ضریب قدرت و همچنین خازن‌های ذاتی کابل‌های قدرت، مشکلات هارمونیک‌ها را بیشتر می‌کنند. منابع تولید پراکنده می‌توانند با کنترل مناسب به بهبود کیفیت توان، جبران‌سازی هارمونیک‌ها و نامتعادلی ولتاژ کمک کنند. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه شناسایی هارمونیک‌ها و جبران‌سازی آنها توسط DGها انجام شده است. این مقاله یک روش کنترلی سلسله مراتبی را توسط DGهای اینورتری جهت جبران‌سازی اغتشاش‌های ولتاژ در شین بارهای حساس پیشنهاد می‌کند که شامل دو سطح کنترلی اولیه و ثانویه می‌باشد. کنترل ثانویه آن، یک روش جبران‌سازی غیریکنواخت هارمونیک و عدم تعادل ولتاژ را بصورت مناسب و بر اساس میزان تاثیر DGها در رزونانس‌های هارمونیک، ارائه می‌دهد. با انجام آنالیز امیدانس مودال شبکه و نتایج بدست آمده از تحلیل، ظرفیت رزرو DGها با ضرایب مشارکت بالاتر، برای جبران‌سازی هارمونیک‌ها استفاده می‌شود و DGها با ضرایب مشارکت کمتر، جهت جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ بکار گرفته می‌شوند. کنترل اولیه نیز شامل کنترل کننده‌های جریان، مقاومت مجازی میراساز و کنترل کننده میزان بار جبران‌سازی DGها می‌باشد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی تاثیر سیستم کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** کیفیت توان، منابع تولید پراکنده، اینورتر واسط، امیدانس مودال، میراسازی هارمونیک، عدم تعادل ولتاژ

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۲/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۴/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل رکرک

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - خرم‌آباد - کیلومتر ۵ جاده تهران - دانشگاه لرستان - دانشکده‌ی برق

یک مود دارند، سهم بیشتری برای جبران‌سازی آن هارمونیک خواهند داشت و باس‌های غیر مؤثر، سهم بیشتری در جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ و دیگر هارمونیک‌ها خواهند داشت. در کنترل کننده‌های محلی نیز بر اساس میزان ظرفیت مازاد هر DG، ضریب بار جبران‌سازی آن تعیین می‌شود. ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۳ سیستم کنترلی پیشنهادی به همراه مقاومت مجازی هارمونیک تشریح می‌شود. در بخش ۴ ضرایب اولویت جبران‌سازی یک شبکه نمونه با در نظر گرفتن اثر امیدانس خروجی اینورترها، تعیین می‌شود. در بخش ۵ پایداری دینامیکی سیستم کنترل بحث می‌شود. در بخش ۶ شبیه‌سازی شبکه مذکور انجام می‌شود. نهایتاً در بخش ۷ نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

## ۲- شناسایی مودهای بحرانی سیستم

در [۱۵] روش پیمایش فرکانس برای پیدا کردن رزنانس‌های سیستم بکارگرفته شده است، که این روش قادر به تعیین ضریب مشارکت باس‌ها نمی‌باشد. برای غلبه بر این مشکل در [۱۶] روش تحلیل امیدانس مودال برای شناسایی رزنانس‌های سیستم به کار گرفته شده است. در روش تحلیل آنالیز امیدانس مودال، ابتدا ماتریس ادمییتانس سیستم بدست می‌آید. سپس از روابط (۱) تا (۳) برای تعیین مودهای امیدانس شبکه، استفاده می‌شود. مطابق این روابط اگر ورودی بردار جریان  $I$  یک عدد محدود (مثلاً  $1p.u.$ ) در نظر گرفته شود، مقادیر بزرگ در بردار ولتاژ  $V$  زمانی اتفاق می‌افتد که مقادیر ویژه ماتریس ادمییتانس  $Y$  که همان مولفه‌های قطری  $Y_m = [A]$  هستند، به سمت صفر میل کنند.

$$[V] = [Y]^{-1}[I] \quad (1)$$

$$[V] = [L][\Lambda]^{-1}[T][I] \quad (2)$$

$$[Z_m] = [\Lambda]^{-1} \quad (3)$$

که در روابط فوق  $[L]$ ،  $[T]$  و  $[A]$  به ترتیب ماتریس‌های متشکل از بردارهای ویژه راست، بردارهای ویژه چپ و ماتریس قطری ادمییتانس شامل مقادیر ویژه سیستم، می‌باشد. با توجه به معادله (۴) که معادله آنالیز مودال شبکه هست، اگر در بعضی از فرکانس‌ها مقادیر ویژه به سمت مقادیر کوچک میل کنند، مقادیر ماتریس  $[Z_m]$  که همان امیدانس‌های مودال سیستم نامیده می‌شوند به سمت مقادیر بزرگ میل می‌کنند. امیدانس مودال بزرگ در یک فرکانس خاص، منجر به تولید ولتاژ مودال هارمونیک بزرگ به ازای همان جریان هارمونیک می‌شود، که باعث ایجاد رزنانس موازی در سیستم خواهد شد.

بارهای غیرخطی و تک‌فاز باعث افزایش هارمونیک‌ها و همچنین ایجاد نامتعادلی در سطح شبکه توزیع می‌شوند. رزنانس‌هایی که بواسطه بعضی از هارمونیک‌ها در شبکه اتفاق می‌افتند، باعث افزایش اعوجاج ولتاژ می‌شوند [۱]. شناسایی و کاهش دامنه هارمونیک‌ها در سطح شبکه، می‌تواند به کاهش اعوجاج ولتاژ شبکه کمک کند. از طرف دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر در سطح شبکه روز به روز در حال افزایش هستند. این منابع معمولاً از طریق یک اینورتر واسط به شبکه متصل می‌شوند و می‌توان از آنها برای کاهش هارمونیک‌های شبکه استفاده کرد [۲،۳]. این امر با استفاده از ظرفیت مازاد آنها صورت می‌گیرد. بطور مثال در [۴،۵] از  $DG^1$ ‌هایی که در باس انتهایی یک شبکه توزیع متصل می‌شوند، مشابه فیلتر اکتیو  $APF^2$  برای جبران‌سازی هارمونیک‌ها استفاده شده است. در [۳]، کارایی روش‌های جبران‌سازی توسط  $DG$ ‌های متصل به باس انتهایی [۴،۶] و جبران‌سازی  $DG$ ‌های توزیع شده [۷-۹]، بحث شده است. در تمام این روش‌ها، ظرفیت  $DG$ ‌ها برای جبران‌سازی مشابه هم در نظر گرفته شده است، در حالی که در یک سیستم واقعی  $DG$ ‌ها دارای ظرفیت متفاوت و در جاهای مختلف سیستم نصب می‌شوند. در [۱۱،۱۰] روش‌هایی برای جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ و هارمونیک‌ها بصورت گروهی و توسط نوعی مشخصه کنترل محلی در منابع تولید پراکنده بیان شده است، که با توجه به موقعیت قرارگیری منابع در ریز شبکه، جبران‌سازی برای هارمونیک‌های مختلف بصورت یکپارچه انجام می‌شود. به عبارت دیگر در این روش‌ها تمام  $DG$ ‌ها با یک اولویت مشابه در جبران‌سازی هارمونیک‌ها شرکت می‌کنند، در صورتی که مکان قرارگیری آنها در جبران‌سازی هارمونیک‌های مختلف تاثیر بسزائی دارد. در [۱۳،۱۲] روش‌های سلسله مراتبی برای جبران‌سازی اغتشاشات ولتاژ در ریز- شبکه ارائه شده است، که در این روش‌ها نیز  $DG$ ‌ها با اولویت‌های مشابه در جبران‌سازی اغتشاش مشارکت دارند. در [۱۴] یک روش جبران‌سازی محلی برای  $DG$ ‌ها، براساس میزان ضریب مشارکت آنها در ایجاد رزنانس‌های مختلف پیشنهاد شده است، که تاثیر امیدانس خروجی اینورترها در تشدید هارمونیک‌ها، در این روش در نظر گرفته نشده است.

در این مقاله یک روش سلسله مراتبی توسط  $DG$ ‌ها، جهت بهسازی کیفیت ولتاژ شین بارهای حساس  $SLB^3$  ریز شبکه، ارائه می‌شود. ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی دارای دو سطح کنترلی شامل: سطح کنترل اولیه و ثانویه می‌باشد که برای جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ، هارمونیک‌ها و همچنین اغتشاش ترکیبی ناشی از وجود هم زمان این دو مشکل به کار می‌رود. اساس کار کنترل ثانویه به این صورت می‌باشد که ابتدا آنالیز امیدانس مودال ریز شبکه در این سطح انجام می‌شود. سپس ضرایب مشارکت هر باس در مودهای بحرانی مشخص شده و باس‌هایی که ضرایب مشارکت بیشتری در تحریک

های ماکزیمم نشان می‌دهد و می‌توان برای بدست آوردن وزن مناسب، دامنه مدهای ماکزیمم را نسبت به دامنه بزرگترین مود نرمالیزه کرد [۱۶].

### ۳- ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی

شکل (۱) طرح سلسله مراتبی پیشنهادی جهت جبران‌سازی هارمونیک‌ها و عدم تعادل ولتاژ شین بار حساس یک ریزشیکه نمونه را، نشان می‌دهد. ریزشیکه مورد نظر شامل تعدادی  $DG$  می‌باشد که به واسطه مبدل‌های الکترونیک قدرت و خطوط توزیع به شین  $SLB$  متصل شده‌اند. علاوه بر این، تعدادی بارهای غیرخطی و نامتعادل هم - در این باس در نظر گرفته شده است. طرح کنترل سلسله مراتبی، شامل دو سطح اولیه و ثانویه می‌باشد. جزئیات بیشتر طرح کنترل ثانویه و بلوک جبران‌سازی بار در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در ابتدا مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک ولتاژ شین بار حساس در قاب مرجع سنکرون  $dq$  استخراج شده و به کنترل کننده ثانویه ارسال می‌شوند. سیگنال‌های مرجع هارمونیک و عدم تعادل ولتاژ ( $UI^e$  و  $HD_i^e$ ) برای جبران‌سازی هارمونیک  $\alpha\beta$  و عدم تعادل ولتاژ، توسط کنترل کننده ثانویه در قاب  $dq$  تعیین شده و به کنترل کننده‌های محلی  $DG$ ها ارسال می‌شوند. در کنترل کننده‌های محلی، سیگنال‌ها پس از بازگشتن مجدد به قاب مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ، به بلوک «فاکتور جبران‌سازی بار» داده شده تا سیگنال مرجع جبران‌سازی تعیین گردد. در نهایت مراجع تولید شده در هر هارمونیک، با یکدیگر جمع شده و به عنوان یک مرجع کلی برای کنترلر جریان  $DG$ ها ارسال می‌شود.

#### ۳-۱- کنترل ثانویه

نمودار بلوک کنترل کننده ثانویه در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ابتدا مقدار عدم تعادل ولتاژ ( $UI$ ) و مقادیر اغتشاش هارمونیک ( $HD_i$ ) به صورت نشان داده شده در بلوک، با مقادیر مرجع متناظر ( $UI_{ref}$  و  $HD_{i,ref}$ ) مقایسه می‌گردد و خطای حاصل به یک کنترل کننده  $PI^V$  داده می‌شود. در ادامه خروجی در  $V_{dq,i}$  ضرب می‌شود تا سیگنال مرجع جبران‌سازی مؤلفه  $\alpha\beta$ ، تولید گردد.

«بلوک Dead Zone» با این هدف در کنترل کننده ثانویه در نظر گرفته شده است که اگر خطاهای تولیدی از مقدار مرجع کمتر باشد، کنترلر  $PI$  عمل ننماید، زیرا در غیر این صورت عملکرد کنترل کننده  $PI$  باعث افزایش عدم تعادل ولتاژ می‌شود [۱۳]. اولویت جبران سازی  $DG$ ها، با استفاده از پارامترهای ماتریس ضرایب مشارکت، اندازه امیدانس بحرانی و هارمونیک‌های بار در هر باس تعیین می‌شود. ضریب مشارکت  $PF_{i,j}$ ، میزان مشارکت  $DG$  باس  $\alpha\beta$  را طبق موقعیت آن در میراسازی هارمونیک  $\alpha\beta$  تعیین می‌کند. ضریب امیدانس مودال  $Z_{i,j}$ ،

$$\begin{bmatrix} v_{m,1} \\ v_{m,2} \\ v_{m,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{m,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & Z_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m,1} \\ i_{m,2} \\ i_{m,3} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

ماتریس جریان مودال، از ضرب دو ماتریس جریان واقعی و ماتریس بردارهای ویژه سیستم تشکیل می‌شود (۵). این موضوع در مورد ماتریس ولتاژ نیز صادق است (۶). از معادله (۵) می‌توان نتیجه گرفت که اگر یک جریان مشابه در باس‌های مختلف تزریق شود، با توجه به ماتریس بردارهای ویژه، جریانهای مودال مختلفی حاصل می‌شود. به تبع این قضیه اگر جریان مودال نیز در باسهای مختلف بصورت یکسان باشد، با توجه به ماتریس امیدانس مودال، ولتاژهای مودال تولیدی می‌توانند مختلف باشند.

$$\begin{bmatrix} i_{m,1} \\ i_{m,2} \\ i_{m,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & \cdots & T_{1,3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{3,1} & \cdots & T_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$\begin{bmatrix} v_{m,1} \\ v_{m,2} \\ v_{m,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1,1} & \cdots & L_{1,3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{3,1} & \cdots & L_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

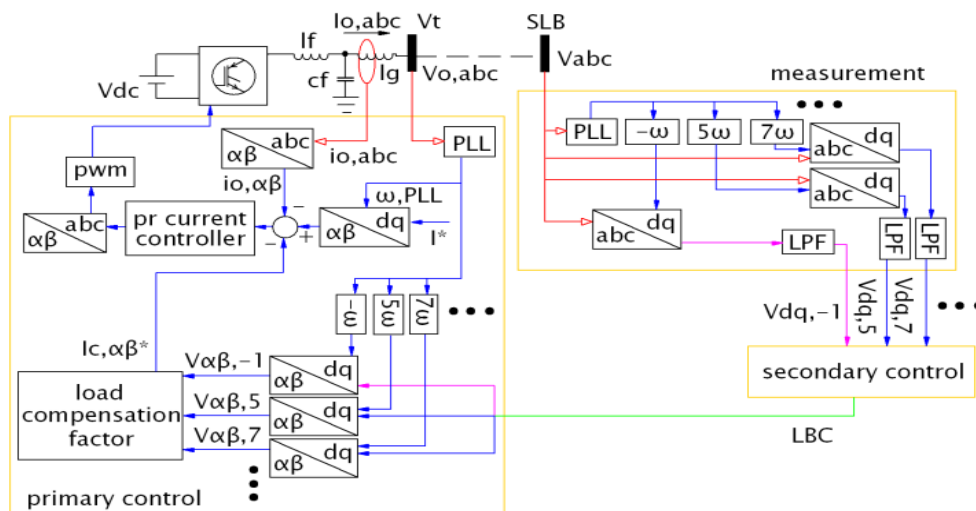
مود بحرانی  $Z_m$  مودی است که مقدار دامنه آن در فرکانس رزنانس بیشتر از دامنه بقیه مدها باشد، در حضور این چنین مودی مثلاً مود شماره یک، می‌توان ماتریس  $[Z_m]$  را به صورت زیر تقریب زد، سپس ماتریس ضرایب مشارکت  $PF^+$  را به صورت زیر بدست آورد.

$$\begin{bmatrix} Z_{m,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & Z_{m,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} Z_{m,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

با ترکیب روابط (۴) تا (۷)، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$[V] = Z_{m,1} \overbrace{\begin{bmatrix} L_{11} \cdot T_{11} & \cdots & L_{11} \cdot T_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} \cdot T_{11} & \cdots & L_{n1} \cdot T_{1n} \end{bmatrix}}^{PF} [I] \quad (۸)$$

ضرایب مشارکت در ماتریس  $PF$ ، میزان تاثیر باس‌ها را در تحریک مدهای بحرانی نشان می‌دهند. در این ماتریس شماره سطرها، نشان دهنده شماره باس‌ها می‌باشد و شماره ستون‌ها، با شماره مدهای شبکه منطبق است. ضریب  $Z_{m,i}$  نیز وزن این تأثیر را در مود-



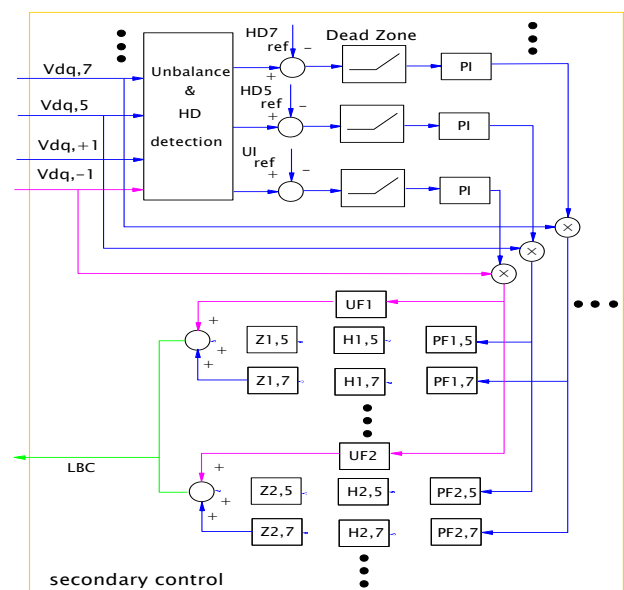
شکل (۱): ساختار کنترل و طبقه قدرت طرح سلسله مراتبی پیشنهادی

نهایتاً سیگنال‌های تولیدی با استفاده از کابل ارتباطی  $LBC^1$ ، به کنترل کننده‌های محلی DGها انتقال داده می‌شوند. لازم به ذکر است که در طرح سلسله مراتبی پیشنهادی، ارسال اطلاعات از سطح ثانویه به سطح اولیه، به علت استفاده از قاب dq نیاز به عرض باند بالایی ندارد و به خاطر همین مسئله سیستم کنترل دارای قابلیت اطمینان مناسبی می‌باشد [۱۲].

### ۳-۲- کنترل اولیه

جزئیات کنترل کننده اولیه DGها در شکل (۳) نشان داده شده - است. سیگنال‌های ارسالی از سطح کنترل ثانویه، ابتدا پس از بازگرداندن شدن به قاب مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ، به بلوک فاکتور جبران‌سازی بار وارد می‌شوند. این بلوک، سهم هر DG را با توجه به ظرفیت مازاد آن برای جبران‌سازی هارمونیک‌ها تنظیم می‌نماید. معمولاً توان بارهای خطی و غیرخطی موجود در ریزشکه به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اول توان مولفه اصلی یا همان توانی مثبت  $S_f$  که مربوط به بارهای خطی می‌باشد و توسط سیگنال مرجع در کنترل کننده‌های پایه برای هر اینورتر قابل تنظیم می‌باشد. در واقع با تنظیم سیگنال مرجع هر اینورتر می‌توان سهم توان مؤلفه اصلی آن را در ریزشکه مشخص کرد. این مقدار توان در اغلب اینورترهای جریان کنترل نظیر منابع خورشیدی و بادی توسط سیستم دنبال کننده حداکثر توان ماکزیمم  $MPPT^{10}$  مشخص می‌شود. بخش دوم توان بار، توان اعوجاجی و یا هارمونیک  $S_d$  می‌باشد که مربوط به بارهای غیرخطی و هارمونیک می‌باشد. سهم توان اعوجاجی هر اینورتر در طرح پیشنهادی بر اساس میزان ظرفیت خالی آن ( $S_r$ ) توسط بلوک جبران‌سازی بار مشخص می‌شود که در ادامه جزئیات آن تشریح می‌شود. ساختار این بلوک در شکل (۳) نشان داده شده، که در آن  $S_n$ ،  $k_f$ ،  $k_d$ ،  $k$  و  $S_r$  به ترتیب، توان نامی DG، توان توانی مثبت خروجی، توان اعوجاجی خروجی، توان کل خروجی و ظرفیت خالی DG هستند. براساس استاندارد

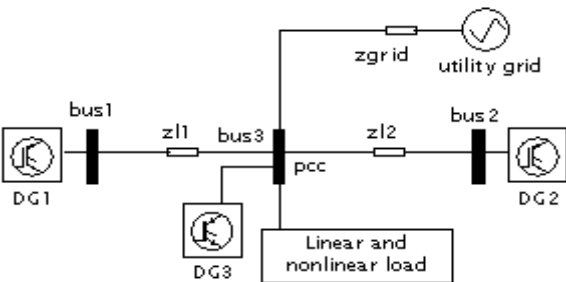
میزان تاثیر مود بحرانی نام را در هارمونیک زام نشان می‌دهد. ضریب هارمونیک بار  $H_{i,z}$ ، توسط اندازه هارمونیک زام جریان بار موجود در باس نام تعیین می‌شود. در نهایت، ضریب جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ  $UF_i^A$ ، میزان سهم هر DG را در جبران نامتعادلی ولتاژ مشخص می‌کند. در تعیین این ضرایب بایستی به این نکته توجه کرد که می‌توان ضریب جبران‌سازی ولتاژ  $UF_i$  را در باس‌هایی که مشارکت کمتری در ایجاد مدهای بحرانی دارند، بیشتر در نظر گرفت تا این باس‌ها سهم بیشتری در جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ داشته باشند. همچنین باس‌هایی که ضرایب مشارکت بالایی در تحریک هارمونیک‌ها دارند، ظرفیت جبران‌سازی آنها می‌بایست بیشتر برای میراسازی رزنانس‌های مربوطه در نظر گرفته شود.



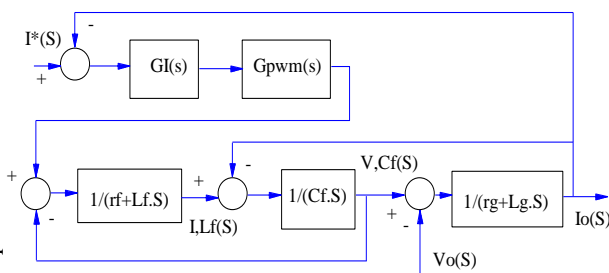
شکل (۲): جزئیات کنترل ثانویه

#### ۴- تعیین ضرایب مشارکت در یک ریز شبکه نمونه

در این قسمت آنالیز مودال برای یک ریز شبکه سه باسه نمونه، جهت تعیین ضرایب مشارکت باسها انجام می‌شود. شکل (۴) مدار معادل سیستم قدرت را نشان می‌دهد. اینورترها از نوع جریان کنترل می‌باشند. ساختار کنترلی اینورترها در شکل (۱) نشان داده شده است. خروجی اینورتر فیلتر LCL قرار دارد و حلقه کنترلی اینورتر شامل کنترل کننده PR<sup>11</sup> در دستگاه مرجع ساکن می‌باشد [۱۷]. می‌توان سیستم کنترل اینورتر را حول نقطه کار آن خطی‌سازی کرد و تابع تبدیل آن را از بلوک دیگرام شکل (۵) بدست آورد.



شکل (۴): ریز شبکه سه باسه با منابع جریان کنترل



شکل (۵): بلوک دیگرام سیستم کنترل اینورتر

$$I_o(S) = G_{cc}(S).I^*(S) - Y_{oc}(S).V_o(S) \quad (11)$$

رابطه (۱۱) مدار معادل نورتین اینورتر منبع جریان را نشان می‌دهد که  $G_{cc}(S)$ ،  $Y_{oc}(S)$ ،  $I^*$  و  $V_o$  به ترتیب تابع تبدیل حلقه بسته، ادمیتانس خروجی، جریان مرجع و ولتاژ خروجی اینورتر می‌باشند. تابع تبدیل  $G_{cc}$  و  $Y_{oc}$  نیز با توجه به سیستم کنترل اینورتر منبع جریان، بصورت زیر بدست می‌آیند:

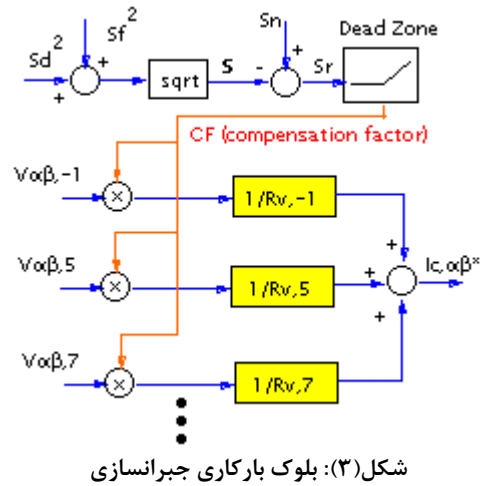
$$G_{cc}(S) = \frac{G_I(S)G_{pwm}(S). \dots}{(S.C_f)(S.L_f)(S.L_g) + \dots} \quad (12)$$

$$\dots = \frac{1}{(S.L_f) + (S.L_g) + G_I(S).G_{pwm}(S)}$$

IEEE [۱۸]، توان اعوجاجی تامین شده توسط هر DG بصورت زیر قابل محاسبه است [۱۱]:

$$S_d = S_f \cdot \sqrt{THD_I^2 + THD_V^2} \quad (9)$$

بنابراین  $S_r$  بر اساس توان نامی و مقدار توان کل خروجی بصورت نشان داده شده در شکل قابل محاسبه است. سیگنال خروجی بلوک Dead Zone نیز بصورت زیر قابل بیان است:

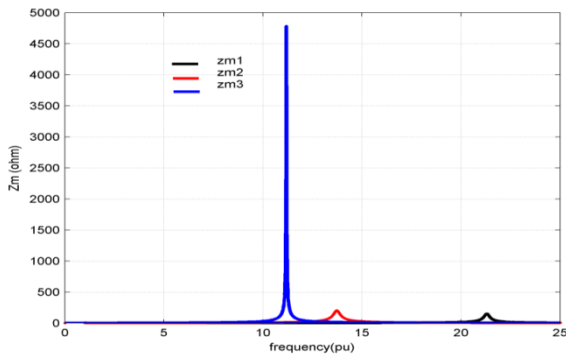


شکل (۳): بلوک بار کاری جبران سازی

$$V_{\alpha\beta,j} = \begin{cases} V_{\alpha\beta,j} \cdot \frac{S_r}{S} \cdot \left( S_n - \sqrt{S_d^2 + S_f^2} \right) & S_r > 0 \\ 0 & S_r \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

در این رابطه،  $j$  مرتبه هارمونیک ( $\delta$ ،  $\gamma$  یا ...) را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه در صورتی که  $S_r > 0$  باشد، با افزایش توان کل خروجی  $S$ ، میزان  $S_r$  کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش تلاش بار کاری DG است. به عبارت دیگر، یک فیدبک منفی ذاتی در این رابطه وجود دارد که باعث می‌شود بار جبران سازی بصورت مناسب بین DGها تقسیم شود. از سوی دیگر، اگر  $S_r$  کوچکتر از صفر باشد، بلوک Dead Zone در نظر گرفته شده باعث می‌شود تا هیچ تلاشی برای جبران سازی صورت نگیرد تا DG دچار اضافه بار نشود. مؤلفه‌های توالی منفی ولتاژ فرکانس پایه و مرتبه‌های هارمونیک ولتاژ (مرتبه‌های پنجم، هفتم و ...) تولید شده، پس از عبور از بلوک مقاومت مجازی میراساز، در ضریب  $1/R_{v,i}$  ضرب می‌شوند تا جریان هارمونیک مورد نیاز برای جبران سازی، در فرکانس نام تولید شود. این جریان‌ها به عنوان جریان‌های هارمونیک مطلوب از سیگنال مرجع اینورترها کم می‌شوند. کنترل کننده‌های جریان نیز از نوع کنترلرهای تناسبی رزونانسی هستند که فرکانس پایه و فرکانس‌های هارمونیک مرتبه پایین را در بر می‌گیرند.

اکنون شبکه فوق را با روش پیشنهادی و در نظر گرفتن اثر امپدانس خروجی اینورترها بررسی می‌کنیم. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است در این حالت به خاطر وجود خازن در فیلتر خروجی اینورترها، مدهای سیستم در فرکانس‌های پایین دارای مقادیر بحرانی می‌باشند. ماکزیمم دامنه امپدانس مربوط به مود سوم می‌باشد که در هارمونیک ۱۱،۲ اتفاق می‌افتد.



شکل (۷): مدهای شبکه با احتساب اثر امپدانس خروجی منابع

جدول (۱): امپدانس بحرانی و ضرایب مشارکت

Harmonic order	11.2136	13.7425	21.327	
Critical impedance ( $Z_{i,j}$ )	478.001	21.1372	15.139	
Participat ion Factor ( $PF_{i,j}$ )	Node 1	0.۲۵۸۳	۰.۵۷۳۴	۰.۱۶۸۱
	Node 2	۰.۵۹۸۶	۰.۳۷۲۰	۰.۰۲۷۸
	Node 3	۰.۱۴۳۱	۰.۰۵۴۶	۰.۸۰۴۱

با توجه به ضریب مشارکت باس‌ها در جدول (۱)، باس دوم بیشترین تاثیر را در خلق این رزونانس دارد، لذا برای جبران سازی بهتر، این باس می‌بایست سهم بیشتری برای جبران هارمونیک یازدهم داشته باشد.

اگر تعداد اینورترهای موازی متصل به باس‌ها افزایش یابد، این مدها به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا خواهند شد. بعنوان مثال اگر چهار اینورتر دیگر با مشخصات مشابه به باس سوم اضافه شود، نقطه تشدید مود سوم به حوالی هارمونیک هفتم انتقال می‌یابد (شکل (۸))، و این هارمونیکی است که حتی در حالت ماندگار هم در ولتاژ شبکه وجود دارد و می‌تواند ولتاژ ریزش‌بکه را بر اثر تشدید دچار اعوجاج کند. در این حالت دامنه مدها در فرکانس‌های مرتبه پایین کاهش یافته و در فرکانس‌های بالا افزایش پیدا کرده است (جدول (۲)).

$$Y_{oc}(S) = \frac{(S.C_f)(S.L_f) + \dots}{(S.C_f)(S.L_f)(S.L_g) + \dots} \dots \frac{1}{(S.L_f) + (S.L_g) + G_I(S).G_{pwm}(S)} \quad (13)$$

که در آن  $G_I$ ،  $G_{pwm}$ ،  $L_f$ ،  $L_g$  و  $C_f$  به ترتیب تابع تبدیل کنترل کننده‌های تناسبی رزونانسی، تابع تاخیر اینورتر، اندوکتانس سلف داخلی، اندوکتانس سلف خروجی و خازن اینورتر می‌باشند. توابع  $G_I$  و  $G_{pwm}$  بصورت زیر می‌باشند:

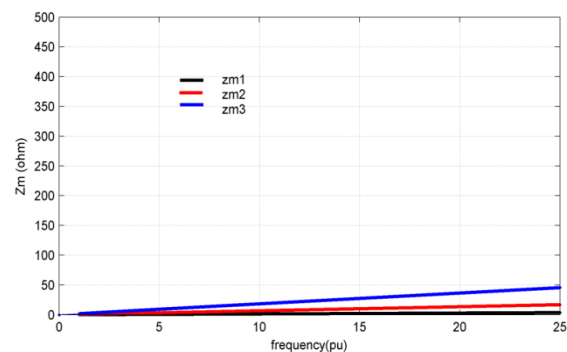
$$G_I(S) = K_{pi}I + \sum_{k=1,5,\dots,19} \frac{K_{ri}.S}{S^2 + (k.\omega_0)^2} \quad (14)$$

$$G_{pwm}(S) = \frac{1}{1 + 1.5T_s.S} \quad (15)$$

که در آن  $K_{pi}$ ،  $\omega_0$ ،  $K_{ri}$  و  $T_s$  به ترتیب ضریب رزونانسی، فرکانس پایه، ضریب تناسبی و پررود سوئیچینگ می‌باشند. برای دقت بیشتر در شناسایی مدهای سیستم، ادیتانس خروجی اینورترها در ماتریس ادیتانس شبکه در نظر گرفته شده است:

$$\begin{bmatrix} Y_{oc,1} + Y_{l,1} & 0 & -Y_{l,1} \\ 0 & Y_{oc,2} + Y_{l,2} & -Y_{l,2} \\ -Y_{l,1} & -Y_{l,2} & Y_{oc,3} + Y_{load,pcc} + \dots \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن  $Y_{l,i}$  و  $Y_{load,pcc}$  ادیتانس خطوط و بار می‌باشند. در این قسمت آنالیز مودال روی سیستم فوق بر اساس اطلاعات موجود در جدول (۳) انجام می‌شود. جهت مشخص شدن اهمیت تاثیر امپدانس خروجی اینورترها در ایجاد رزونانس‌ها، آنالیز مودال ریزش‌بکه در ابتدا بدون در نظر گرفته شدن اثر امپدانس خروجی اینورترها انجام می‌شود. در این حالت به این دلیل که امپدانس خروجی اینورترها در ماتریس ادیتانس شبکه وارد نشده است (منابع ایده‌آل)، شبکه مورد مطالعه یک شبکه اساسا سلفی تلقی می‌شود و هیچ گونه رزونانسی در سیستم مشاهده نمی‌شود (شکل (۶)).

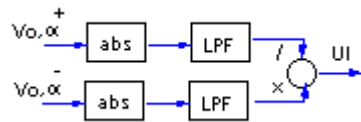


شکل (۶): اندازه مدهای شبکه بر حسب فرکانس بدون احتساب اثر امپدانس خروجی منابع



دارند [۱۹]، نیازی نیست که کنترل کننده PI پاسخ سریعی داشته باشد. همچنین به منظور حداقل سازی تاثیر منفی تاخیر فاز کنترل کننده PI بر عملکرد جبران سازی، بایستی فرکانس گوشه این کنترل کننده، حداقل یک دهه پائینتر از فرکانس تحت جبران سازی باشد [۲۰]. فرکانس گوشه بر حسب رادیان بر ثانیه، برابر نسبت ضریب انتگرالی به ضریب تناسبی است  $(K_i/K_p)$ .

به منظور محاسبه میزان عدم تعادل UI در قاب ساکن، می توان از ساختار نشان داده شده در شکل (۹) استفاده نمود [۱۰]. بر اساس این شکل، ابتدا مؤلفه های محور  $\alpha$  توالی های مثبت و منفی ولتاژ باس SLB، از بلوک های محاسبه قدر مطلق (abs) عبور داده می شوند تا یکسو شوند. سپس با استفاده از فیلترهای پایین گذر مرتبه دوم متوسط گیری شده و در نهایت UI محاسبه می شود.



شکل (۹): بلوک محاسبه شاخص عدم تعادل ولتاژ

بر اساس شکل (۹) رابطه زیر حاصل می شود:

$$UI = \frac{V_{\alpha}^{-}}{V_{\alpha}^{+}} \cdot 100 = \frac{abs(V_{\alpha}^{-}).LPF}{abs(V_{\alpha}^{+}).LPF} \cdot 100 \quad (19)$$

با صرف نظر از افت ولتاژ امپدانس خطوط بین DGها و باس SLB، داریم:

$$UI = K \cdot abs(V_{\alpha}^{-}).LPF \quad (20)$$

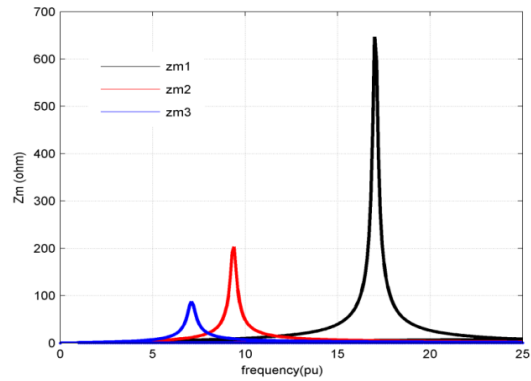
که در آن  $K = 100 \cdot \pi / (220.2\sqrt{3})$  خواهد بود. حال با جایگزینی (۲۰) در رابطه (۱۷)، رابطه زیر حاصل می شود:

$$I_{c,\alpha}^* = (UI_{ref} \cdot V_{\alpha}^{-} \pm K \cdot LPF \cdot (V_{\alpha}^{-})^2) \cdot \dots \cdot PI \cdot UF_i \cdot CF_i / R_{v,i} \quad (21)$$

از آنجاکه رابطه (۲۱) غیرخطی است، نمایش سیگنال کوچک آن به صورت زیر استخراج می شود:

$$\hat{I}_{c,\alpha}^* = (UI_{ref} \cdot \hat{V}_{\alpha}^{-} \pm 2K \cdot V_{\alpha}^{-} \cdot LPF \cdot \hat{V}_{\alpha}^{-}) \cdot \dots \cdot PI \cdot UF_i \cdot CF_i / R_{v,i} \quad (22)$$

در این رابطه، علامت  $\wedge$  نشان دهنده مقدار سیگنال کوچک است. از سوی دیگر، بر اساس تئوری مؤلفه های متقارن [۲۱]، هنگامی که یک بار تکفاز بین دو فاز یک سیستم الکتریکی سه فاز متصل می شود، مدار نشان داده شده در شکل (۱۰) را می توان برای محاسبه جریان توالی منفی به کار گرفت.



شکل (۸): مودهای شبکه با اضافه شدن ۴ اینورتر مشابه به باس ۳

جدول (۲): امپدانس بحرانی و ضرایب مشارکت با اضافه شدن

اینورترهای موازی

Harmonic order	7.1853	9.0750	17.130	
Critical impedance $(Z_{i,j})$	۸۷.۸۲۵۵	۲۰۶.۸۲۶۵	658.85	
Participation Factor $(PF_{i,j})$	Node 1	۰.۲۹۳۴	۰.۴۵۴۸	0.3321
	Node 2	۰.۵۱۸۳	۰.۴۹۳۳	۰.۰۴۴۶
	Node 3	0.6234	0.2556	0.8637

لذا با توجه به نتایج مذکور می توان گفت که صرف نظر نمودن از اثر امپدانس خروجی منابع در تحلیل امپدانس مودال، می تواند باعث ایجاد عدم دقت در محاسبه ضرایب مشارکت DGها شود. همچنین در طراحی اینورترهای موازی متصل به یک باس، می بایست وضعیت رزونانس های شبکه را نیز مد نظر قرار داد.

## ۵- تحلیل پایداری

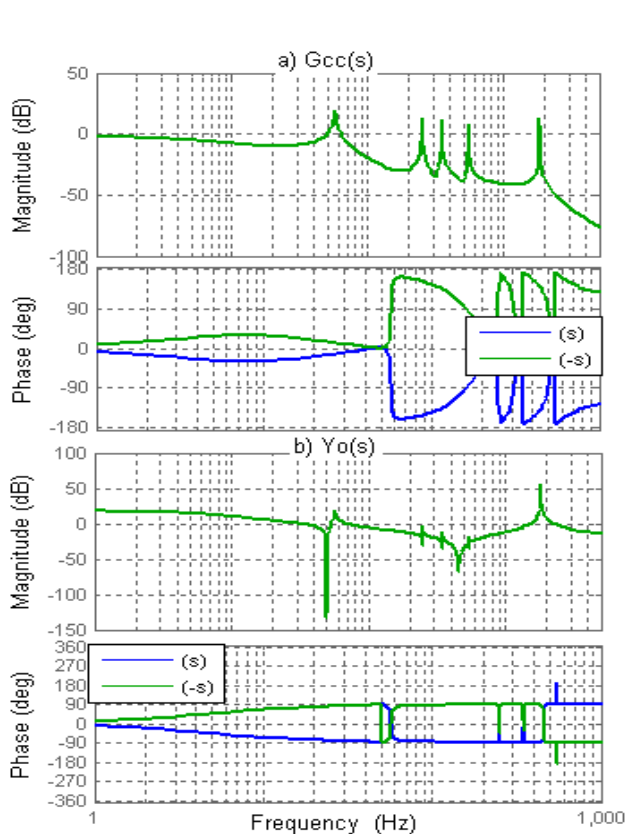
در این بخش به ارزیابی پایداری سیستم کنترل پرداخته می شود. بر اساس شکل های (۱)، (۲) و (۳)، مراجع جبران سازی ابتدا در قاب dq تولید می شوند اما نهایتاً به قاب مرجع ساکن  $\alpha\beta$  منتقل می شوند. بنابراین در این بخش، جبران سازی عدم تعادل در قاب  $\alpha\beta$  مدلسازی می گردد. بر این اساس، کنترل کننده ثانویه و اولیه در قاب ساکن، معادل رابطه زیر می باشند:

$$I_{c,\alpha}^* = (UI_{ref} - UI) \cdot PI \cdot UF_i \cdot CF_i \cdot V_{\alpha}^{-} / R_{v,i} \quad (17)$$

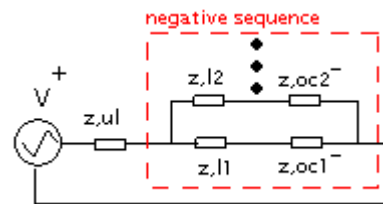
در این رابطه PI نشان دهنده کنترل کننده تناسبی انتگرالی می باشد و  $UF_i$ ،  $CF_i$  و  $R_{v,i}$  به ترتیب ضریب جبران سازی عدم تعادل ولتاژ اینورتر نام، ضریب بار کاری جبران سازی اینورتر نام ( خروجی بلوک بار کاری جبران سازی) و مقاومت مجازی میراساز اینورتر نام می باشد. کنترل کننده تناسبی انتگرالی دارای تابع انتقال زیر است.

$$PI = K_p + K_i / S \quad (18)$$

با توجه به این که در کارکرد معمول شبکه های واقعی، هارمونیکها و عدم تعادل ولتاژ در حالت Steady state تغییرات کمی



شکل (۱۱): (a) پاسخ فرکانسی تابع تبدیل  $G_{cc}(s)$  (b) پاسخ فرکانسی ادمیتانس خروجی اینورتر  $Y_{oc}(s)$



شکل (۱۰): مدار معادل توالی منفی ریز شبکه

در این شکل  $Z_{UL}$ ,  $Z_{Li}$  و  $Z_{oc}$  به ترتیب امپدانس بار نامتعادل و امپدانس خط و امپدانس خروجی توالی منفی DG می‌باشند. با توجه به مدار معادل توالی منفی شبکه، ولتاژ توالی منفی در نقطه باس SLB که بار نامتعادل به آن متصل شده است برابر است با:

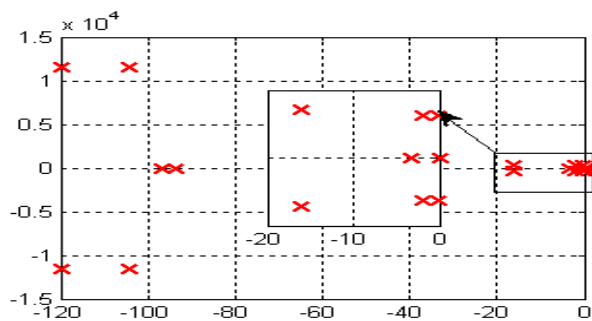
$$V_{\alpha}^{-} = \frac{Y_{UL}}{\sum_{i=1}^n Y_{ol,i}^{-}} V_{\alpha}^{+} \quad (23)$$

حال با توجه به این نکته که امپدانس توالی منفی DG ها در فرکانس پایه بسیار ناچیز است و  $Z_{Li,i} \gg Z_{oc,i}^{-}$  داریم:

$$Y_{ol,i}^{-} = \frac{1}{Z_{l,i} + Z_{oc,i}^{-}} \approx \frac{1}{Z_{l,i}} \quad (24)$$

با جایگزینی (۲۴) در (۲۳) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\hat{I}_{c,\alpha}^{*} = (UI_{ref} \cdot \hat{V}_{\alpha}^{-} \pm 2K \cdot \frac{Y_{UL}}{\sum_{i=1}^n Y_{ol,i}^{-}} \cdot V_{\alpha}^{+} \cdot LPF \cdot \hat{V}_{\alpha}^{-}) \dots \dots PI \cdot UF_i \cdot CF_i / R_{v,i} \quad (25)$$



شکل (۱۲): مکان قطب‌های حلقه بسته سیستم کنترل توالی منفی

در این بخش پایداری عملکرد سیستم میراساز هارمونیک بررسی می‌شود. عملکرد کنترل کننده ثانویه و اولیه در مسیر هارمونیک‌ها، معادل رابطه زیر می‌باشد:

$$I_{c,\alpha}^{*} = (HD_{i,ref} - HD_i) \dots \dots PI \cdot PF_{i,j} \cdot H_{i,j} \cdot Z_{i,j} \cdot CF_i \cdot V_{\alpha,i}^{+} / R_{v,i} \quad (27)$$

شاخص هارمونیک  $HD_i$  بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$HD_i = \frac{V_{\alpha,i}^{+}}{V_{\alpha}^{+}} \cdot 100 = \frac{abs(V_{\alpha,i}^{+}) \cdot LPF}{abs(V_{\alpha}^{+}) \cdot LPF} \cdot 100 \quad (28)$$

در ادامه دیاگرام‌های بود  $G_{cc}(s)$  و  $Y_{oc}(s)$  در توالی‌های مثبت و منفی با استفاده از پارامترهای ارائه شده در جدول (۳)، در شکل (۱۱) رسم شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مقدار  $Y_{oc}(s)$  در فرکانس پایه و فرکانس‌های هارمونیک بسیار کوچک خواهد بود. همچنین اندازه تابع تبدیل  $G_{cc}(s)$  در فرکانس‌های هارمونیک بزرگ می‌باشد و وظیفه تزریق جریان در این مولفه‌ها به خوبی صورت می‌گیرد. مراجع جریان مولفه اصلی و مولفه‌های هارمونیک نیز به خوبی دنبال می‌گردند. با توجه به نتایج فوق، و به علت مقدار کم ادمیتانس خروجی توالی منفی خصوصا در فرکانس اصلی، می‌توان از  $Y_{oc}^{-}$  در رابطه (۲۶) صرف‌نظر نمود تا تابع تبدیل حلقه بسته بصورت زیر ساده سازی شود:

$$\hat{I}_{c,\alpha}^{-} = G_{cc}^{-}(S) \cdot \hat{I}_{c,\alpha}^{*} - Y_{oc}^{-}(S) \cdot V_{\alpha}^{-} \approx G_{cc}^{-}(S) \cdot \hat{I}_{c,\alpha}^{*} \quad (26)$$

که در رابطه فوق تابع تبدیل توالی منفی اینورتر می‌باشد، در این توالی می‌بایست متغیر «s» با «-s» جایگزین شود [۱۰]. با استفاده از پارامترهای موجود در جدول‌های (۱)، (۳) و در نظر گرفتن مقدار شاخص عدم تعادل  $UI=0.02$ ، مکان قطب‌های تابع تبدیل رابطه (۲۶) بدست آمده است. همانطور در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، تمامی قطب‌های تابع تبدیل حلقه بسته سیستم در سمت چپ صفحه s هستند، بنابراین سیستم کنترل پایدار است.



که در آن  $i$  مرتبه هارمونیک می باشد. با جایگزینی رابطه (۲۸) در رابطه (۲۷) و اعمال اپراتور سیگنال کوچک داریم:

$$I_{c,\alpha}^* = (HD_{i,ref} \cdot V_{\alpha,i}^+ \pm K_i \cdot LPF \cdot (V_{\alpha,i}^+)^2) \cdot \dots \cdot PI \cdot PF_{i,j} \cdot H_{i,j} \cdot Z_{i,j} \cdot CF_i / R_{v,i} \quad (29)$$

$$\hat{I}_{c,\alpha}^* = (HD_{i,ref} \cdot \hat{V}_{\alpha,i}^+ \pm 2K_i \cdot V_{\alpha,i}^+ \cdot LPF \cdot \hat{V}_{\alpha,i}^+) \cdot \dots \cdot PI \cdot PF_{i,j} \cdot H_{i,j} \cdot Z_{i,j} \cdot CF_i / R_{v,i} \quad (30)$$

$$\hat{I}_{c,\alpha}^+ = G_{cc}^+(S) \cdot \hat{I}_{c,\alpha}^* - Y_{oc}^+(S) \cdot V_{o,\alpha}^+ \quad (31)$$

با توجه به پارامترهای سیستم مورد مطالعه در جدول های (۱)، (۳) و در نظر گرفتن مقدار شاخص اعوجاج هارمونیک  $HD_{i,ref} = 0.03$  برای هارمونیک های مرتبه پایین ۵، ۷ و ۱۱، پایداری تابع تبدیل رابطه (۳۱) مشابه حالت قبل انجام شد و مشاهده گردید که سیستم کنترل برای این هارمونیک ها نیز پایدار می باشد.

جدول (۳): پارامترهای ریزشبه و سیستم کنترل

Symbol	Parameter	Value	Unit
E	Grid voltage amplitude	311	V
$V_{dc}$	DC link voltage	650	V
$\omega^*$	Grid frequency	314	Rad/s
$Z_{load,pcc}$	Load impedance	$20+j6.5$	$\Omega$
$Z_{UL}$	Unbalance load	$50+j6.5$	$\Omega$
$L_g, L_{lf}$	Filter inductance	0.2, 1.8	mH
$F_s$	Switching frequency	10	kHZ
$Z_{l1}, Z_{l2}, Z_{grid}$	Line inductance	$j0.47, j0.62, j0.3$	$\Omega$
$R_{v,-1}, R_{v,5}, R_{v,7}, R_{v,11}$	Virtual resistance	9	$\Omega$
$C_f$	Filter capacitor	25	$\mu f$
$k_p, k_i$	PI controller coefficient	.2, 6	W/rd
$k_{pi}, k_{ri}$	Resonance controller coefficient	1, 100	W/rd
$H_{i,j}$	Load harmonic factor	1	-
$UF_1, UF_2, UF_3$	Unbalance factor	1, 1, .5	-
$HD_{i,ref}$	Harmonic distortion reference	.03	-
$UI_{ref}$	Unbalance index reference	.02	-

## ۶- نتایج شبیه سازی

جهت نشان دادن کارایی روش جبران سازی پیشنهادی، شبیه سازی برای دو سناریوی مختلف ودو ریز شبکه با ساختار متفاوت انجام شده است.

### ۶-۱- سناریوی اول

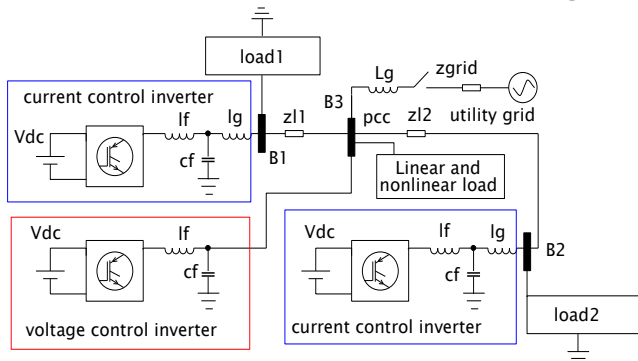
ابتدا شبیه سازی برای ریز شبکه سه باسه شکل (۴) در حالت متصل به شبکه و با توجه به پارامترهای جدول (۳)، انجام شده است.

بار غیرخطی موجود در باس سوم، یک یکسو ساز سه فاز دیودی با بار  $50\Omega$  و خازن فیلتر  $220\mu F$  می باشد. همچنین جهت ایجاد نامتعادلی، یک بار تک فاز بین فاز a و b قرار گرفته است. جبران سازی ابتدا بدون در نظر گرفتن اثر امپدانس خروجی منابع انجام می شود. در این حالت به دلیل عدم وجود هر گونه تشدید در شبکه، ضریب مشارکت منابع در جبران سازی واحد در نظر گرفته می شود (تمام DG ها با اولویت مشابه در جبران سازی هر هارمونیک شرکت می کنند. ضرایب هارمونیک بار و ضرایب جبران سازی عدم تعادل نیز واحد می باشند). سپس جبران سازی با احتساب اثر امپدانس خروجی منابع و در واقع به روش غیر یکنواخت انجام می شود (در این حالت برای ضرایب مشارکت هر DG، از مقادیر نرمالیزه شده جدول (۱) استفاده می شود و ضریب جبران سازی عدم تعادل و هارمونیک های بار مطابق جدول (۳) تنظیم شده است).

شبیه سازی در سه گام زمانی انجام شده است:

- گام اول ( $0 \leq t < 0.4s$ ): در این مرحله، بارهای خطی، غیر خطی و نامتعادل به شین PCC<sup>۱۳</sup> متصل هستند و هیچ گونه جبران سازی انجام نمی شود. شبیه سازی با شرایط اولیه صفر برای منابع شروع می شود و با گذر از شرایط گذرای اولیه به حالت ماندگار می رسد. شکل موج های THD<sup>۱۴</sup> ولتاژ، هارمونیک های ۱۱، ۷ و ولتاژ توالی منفی نقطه PCC به ترتیب در شکل های (a) ۱۳، (b) ۱۳ و (c) ۱۳ نشان داده شده است.
- گام دوم ( $0.4s \leq t < 0.9s$ ): در این مرحله DG ها بدون در نظر گرفتن اثر امپدانس خروجی اینورترها بصورت یکسان و با ظرفیت های برابر در جبران سازی هارمونیک ها و عدم تعادل ولتاژ شرکت می کنند. THD ولتاژ باس ۳ در حالت جبران سازی نشده حدود ۱۷٪ می باشد که در حالت جبران سازی یکنواخت این مقدار به ۹٪ کاهش یافته است. دامنه هارمونیک های هفتم و یازدهم ولتاژ هم به میزان قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده اند.
- گام سوم ( $0.9s \leq t < 1.5s$ ): در این حالت از جبران سازی، تاثیر امپدانس خروجی منابع و ماتریس ضرایب مشارکت در نظر گرفته می شود. در حالت جبران سازی غیر یکنواخت با استفاده از ضرایب موجود در جدول (۱)، مقدار THD ولتاژ در مقایسه با حالت قبل، به مقدار ۵٪ کاهش یافته است. با توجه به نتایج مذکور می توان گفت که در روش جبران سازی غیر یکنواخت، نتایج نسبت به روش جبران سازی یکنواخت بهبود یافته است. ولتاژهای لحظه ای باس PCC و جریان خروجی اینورتر شماره یک نیز در حالت های مختلف شبیه سازی به ترتیب در شکل های (a) ۱۴ و (b) ۱۴ نشان داده شده است.

یک و دو از نوع جریان کنترل و اینورتر باس سوم ولتاژ کنترل می‌باشد، که برای حمایت ولتاژ و فرکانس ریزشکبه در حالت جزیره‌ای استفاده می‌شود. بار غیرخطی موجود در شین‌ها، مشابه هم و شامل یکسو ساز سه فاز دیودی با بار  $100\Omega$  و خازن فیلتر  $200\mu F$  می‌باشد. همچنین جهت ایجاد نامتعادلی مشابه حالت قبل، یک بار تک فاز بین فاز a و b در شین PCC قرار گرفته است. در شبیه سازی فرض شده است که منابع جریان کنترل قادر به تغذیه کلیه بارهای ریزشکبه هستند و ظرفیت منبع ولتاژ جهت انتقال توان اکتیو به شبکه بالا دست، بکار گرفته می‌شود.

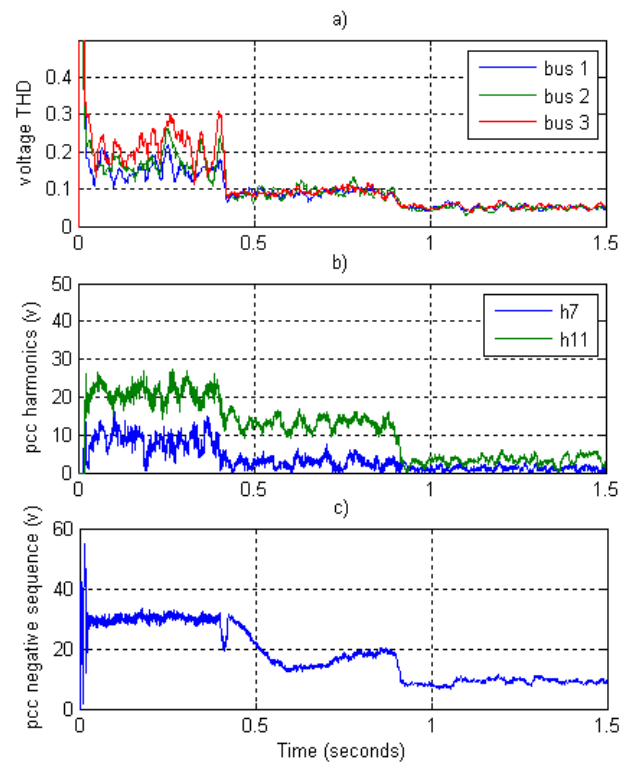


شکل (۱۵): ریزشکبه نمونه با منابع ولتاژ کنترل و جریان کنترل

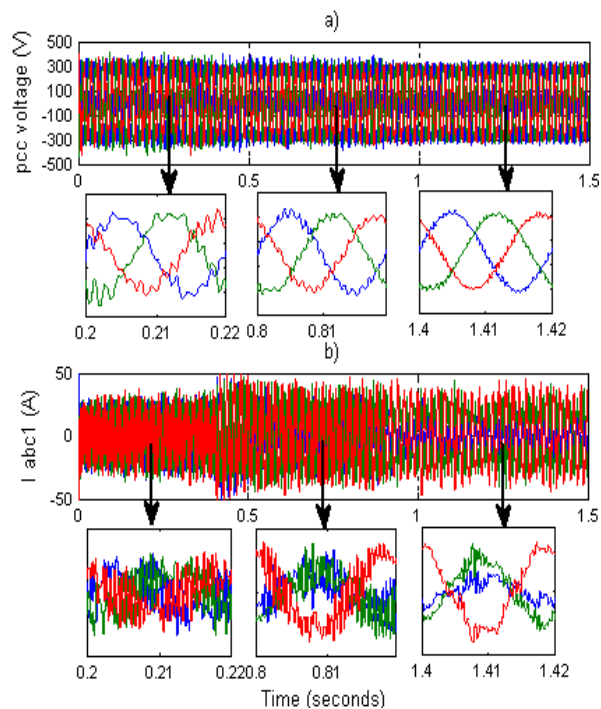
شبیه سازی در هفت گام زمانی انجام شده است و نتایج آن در

شکل (۱۶) نشان داده شده است:

- گام اول ( $0 \leq t < 0.4s$ ): در این مرحله ریزشکبه به شبکه بالادست متصل است و کلیه بارهای خطی، نامتعادل و غیر خطی موجود در شین‌ها در سرویس می‌باشند. مانند سناریوی قبل، شبیه سازی با شرایط اولیه صفر برای منابع شروع می‌شود و با گذر از شرایط گذرای اولیه به حالت ماندگار می‌رسد. مرجع جریان اینورتر یک روی  $15A$  و مرجع جریان اینورتر دو روی  $25A$  و مرجع توان اینورتر سه  $P^*=10KW$ ،  $Q=0Var$  تنظیم شده است. ریزشکبه تقریباً در حدود  $10KW$  توان به شبکه بالا دست ارسال می‌کند و هیچ نوع جبران سازی انجام نمی‌شود.
- گام دوم ( $0.4s \leq t < 0.9s$ ): در این مرحله بلوکهای جبران سازی فعال می‌شوند و DGها بصورت یکسان و با اولویت‌های برابر در جبران سازی هارمونیک‌ها و عدم تعادل ولتاژ شرکت می‌کنند.
- گام سوم ( $0.9s \leq t < 1.4s$ ): در این مرحله جبران سازی با روش غیر یکنواخت و با اعمال ضرایب مشارکت حاصل از آنالیز امپدانس مودال ریزشکبه انجام می‌شود. مقدار THD ولتاژ در شین ۳ در حالت جبران سازی نشده حدود  $17\%$  می‌باشد که در حالت جبران سازی یکنواخت این مقدار به  $9\%$  کاهش یافته است. در روش جبران سازی غیر یکنواخت، مقدار THD ولتاژ به مقدار  $4\%$  کاهش یافته است (شکل (c) ۱۶). با توجه به نتایج مذکور می‌توان دید که در روش جبران سازی غیر یکنواخت هارمونیک‌ها، نتایج نسبت به روش جبران سازی یکنواخت بهبود یافته است.



شکل (۱۳): میزان THD ولتاژ در باس‌های مختلف. (b) دامنه هارمونیک ۷ و ۱۱ ولتاژ. (c) دامنه ولتاژ توالی منفی



شکل (۱۴): (a) ولتاژهای سه فاز شین PCC. (b) جریان‌های خروجی اینورتر ۱

## ۲-۶- سناریوی دوم

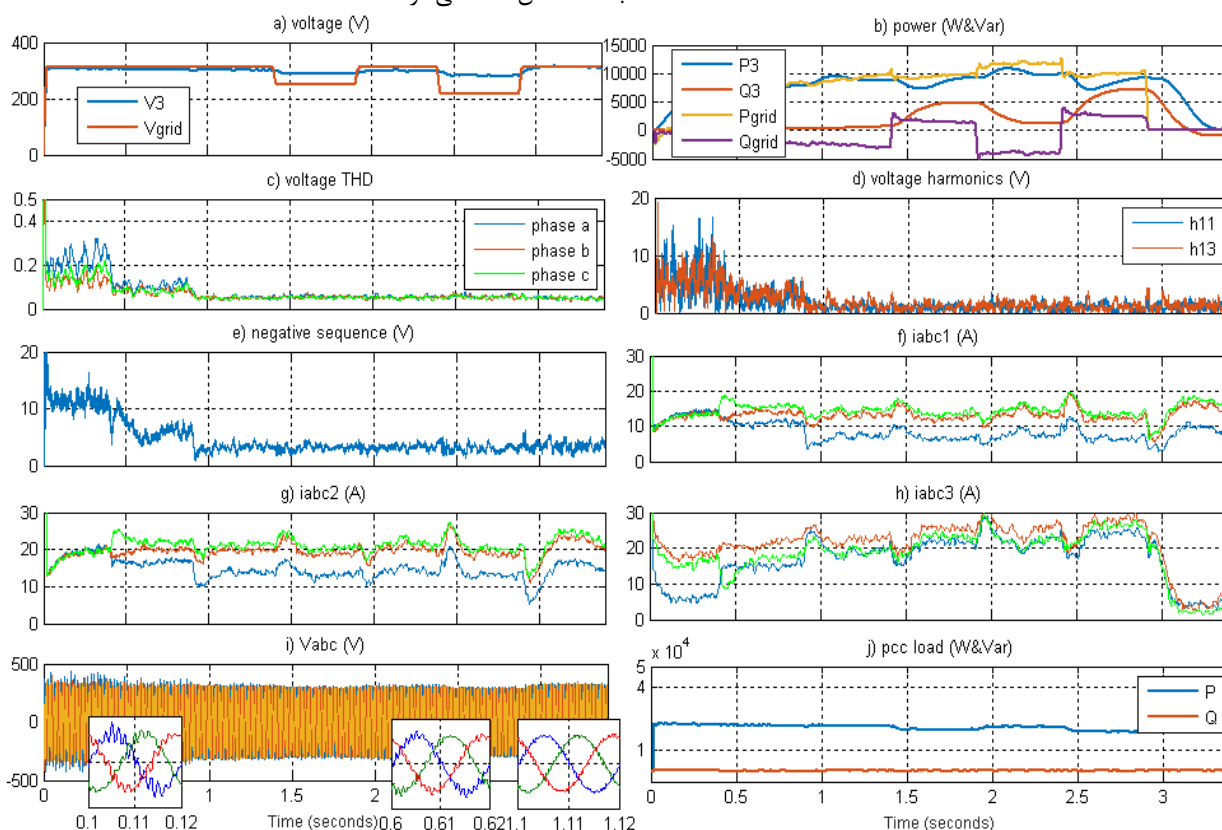
در این بخش، شبیه سازی برای ریزشکبه نمونه شکل (۱۵)، در حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه انجام شده است. اینورترهای باس

گام هفتم ( $2.9s \leq t < 3.4s$ ): در این مرحله توان راکتیو اینورتر ولتاژ کنترل، جهت تنظیم ولتاژ ریز شبکه به مقدار 1KVar کاهش می‌یابد و توان اکتیو آن به صفر می‌رسد و ریز شبکه بصورت جزیره‌ای به کار خود ادامه می‌دهد. شکل موج THD و هارمونیک‌های ولتاژ نشان می‌دهند که وظیفه جبران سازی اغتشاشات، در حالت جزیره ای نیز به خوبی صورت گرفته است.

نتایج شبیه سازیهای ارائه شده، با در نظر گرفتن تاخیر 1ms برای LBC بدست آمده‌اند. واضح است که تاخیر LBC تنها بر عملکرد جبران سازی ثانویه تاثیر می‌گذارد. طبق بررسی های انجام شده، با افزایش تاخیر، رفتار دینامیکی کنترل کننده ثانویه ضعیف تر می‌شود همچنین برای مقادیر بزرگ تاخیر، یک خطای کوچک در دنبال کردن مقدار مرجع، حتی پس از زمانهای طولانی وجود دارد. جبران سازی هارمونیکها نیز حساسیت بیشتری نسبت به تاخیر دارد که به خاطر دوره تناوب کوچک هارمونیکها می‌باشد و باعث می‌شود در مورد هارمونیکها به دقت جبران سازی بیشتری نیاز باشد، در حالی که تاخیر باعث کاهش دقت می‌شود.

شکل موجهای هارمونیکهای ۱۱ و ۱۳ ولتاژ نقطه PCC در شکل (d) نشان داده شده است. جبران سازی غیر یکنواخت از این مرحله تا پایان مراحل شبیه سازی ادامه می‌یابد.

- گام چهارم ( $1.4s \leq t < 1.9s$ ): در این مرحله یک کاهش 0.15 p.u. در دامنه ولتاژ شبکه اتفاق می‌افتد و اینورتر ولتاژ کنترل با تزریق توان راکتیو در حدود 4KVar موفق می‌شود ولتاژ ریز شبکه را حفظ کند.
- گام پنجم ( $1.9s \leq t < 2.4s$ ): در این مرحله ولتاژ شبکه مجدداً به حالت نرمال بر می‌گردد.
- گام ششم ( $2.4s \leq t < 2.9s$ ): در این مرحله یک کاهش 0.25 p.u. در دامنه ولتاژ شبکه اتفاق می‌افتد و اینورتر ولتاژ کنترل با تزریق توان راکتیو در حدود 7KVar ولتاژ ریز شبکه را حفظ می‌کند ولی به دلیل اینکه این توان بیش از ظرفیت اینورتر می‌باشد، ریز شبکه در لحظه 2.9s جدا می‌شود و اینورتر ولتاژ کنترل بصورت مستقل تامین ولتاژ و فرکانس ریز شبکه را به عهده می‌گیرد.



شکل (۱۶): (a) دامنه پیک ولتاژ فاز شبکه و شین PCC. (b) توان شبکه و توان اینورتر منبع ولتاژ. (c) میزان THD ولتاژ در شین PCC. (d) دامنه هارمونیک ۱۳ و ۱۱ ولتاژ شین PCC. (e) دامنه ولتاژ توالی منفی شین PCC. (f) جریانهای مؤثر خروجی اینورتر ۱. (g) جریانهای مؤثر خروجی اینورتر ۲. (h) جریانهای مؤثر خروجی اینورتر ۳. (i) ولتاژهای لحظه‌ای شین PCC. (j) توان بارهای شین PCC

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جبران سازی سلسله مراتبی، جهت بهبود کیفیت ولتاژ شین بار حساس ریز شبکه های اینورتری، پیشنهاد شده است. روش جبران سازی بصورت غیر یکنواخت و با ضرایب اولویت بندی می باشد. در ابتدا با انجام آنالیز امپدانس مودال، ضرایب مشارکت DGها در رزنانس های هارمونیکی مشخص می شود. سپس با اختصاص ضرایب مشارکت مناسب به DGها، بار کاری جبران سازی هارمونیکی ها و عدم تعادل ولتاژ به شکلی مناسب بین DGها تقسیم می شود. روش کنترلی شامل دو سطح کنترلی اولیه و ثانویه می باشد. در سطح کنترل ثانویه، برای جبران سازی اغتشاشهای ولتاژ شین بار حساس برنامه ریزی می شود. در سطح کنترل اولیه، میزان بار کاری جبران سازی هر DG با توجه به ظرفیت مازادش تعیین می شود. نتایج شبیه سازی در یک ریز شبکه نمونه، کارایی روش پیشنهادی را به خوبی نشان می دهد.

## مراجع

- Inverters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, April 2013.
- [10] Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J. C., and Guerrero J. M., “Autonomous Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, April 2013.
- [11] Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J. C., Guerrero J. M., and Lee T. L., “Selective Compensation of Voltage Harmonics in Grid-Connected Microgrids,” Mathematics and Computers in Simulation 91 (2013) 211–228.
- [12] Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J. C., and Guerrero J. M., “Hierarchical Control Scheme for Voltage Harmonics Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid,” IEEE PEDS 2011, Singapore, 5-8 December 2011.
- [13] Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J. C., and Guerrero J. M., “Hierarchical Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in Islanded Microgrids,” IEEE PEDS 2011, Singapore, 5-8 December 2011.
- [14] Munir M. S., Li Y. W., and Tian H., “Improved Residential Distribution System Harmonic Compensation Scheme Using Power Electronics Interfaced DGs,” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 3, May 2016.
- [15] Bradt M., and et al., “Harmonics and Resonance Issues in Wind Power Plants,” in Proc. IEEE PES Gen. Meeting, San Diego, CA, USA, Jul. 2011, pp. 1–8.
- [16] Xu W., Huang Z., Cui Y., and Wang H., “Harmonic Resonance Mode Analysis,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No. 2, pp. 1182–1190, Apr. 2005.
- [17] Wang X., Blaabjerg F., and Wu W., “Modeling and Analysis of Harmonic Stability in an AC Power-Electronics-Based Power System,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 12, December 2014.
- [18] IEEE Standard, Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, NonSinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459-2010.
- [19] Jintakosonwitt P., Akagi H., Fujita H. and Ogasawara S., “Implementation and Performance of Automatic Gain Adjustment in a Shunt Active Filter for Harmonic Damping Throughout a Power Distribution System,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 3, May 2002.
- [20] Lee T. L., Li J. Ch., Cheng P. T., “Discrete Frequency Tuning Active Filter for Power System Harmonics,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 5, May 2009.
- [21] Glover J. D., and Sarma M., Power System Analysis and Design- 2nd Edition, Boston: PWS Publishing Company, 1993.
- [1] Arrillaga J., and Watson N. R., Power System Harmonics, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003, pp. 176–180.
- [2] Zhe C., Blaabjerg F., and Pedersen J. K., “Hybrid Compensation Arrangement in Dispersed Generation Systems,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No. 2, pp. 1719–1727, Apr. 2005.
- [3] Munir S., and Li Y. W., “Residential Distribution System Harmonic Compensation Using PV Interfacing Inverter,” IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 4, No. 2, pp. 816–827, Jun. 2013.
- [4] Akagi H., “Control Strategy and Site Selection of a Shunt Active Filter for Damping of Harmonic Propagation in Power Distribution Systems,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 12, No. 1, pp. 354–363, Jan. 1997.
- [5] Akagi H., Fujita H., and Wada K., “A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of a Radial Power Distribution Line,” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 35, No. 3, pp. 638–645, May/June 1999.
- [6] Wada K., Fujita H., and Akagi H., “Considerations of a Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Installation on a Long Distribution Feeder,” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 38, No. 4, pp. 1123–1130, Jul./Aug. 2002.
- [7] Cheng P.T., and Lee T.L., “Distributed Active Filter Systems (Dafss): A New Approach to Power System Harmonics,” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 42, No. 5, pp. 1301–1309, Sep./Oct. 2006.
- [8] Lee T.L., Li J.C., and Cheng P.T., “Discrete Frequency Tuning Active Filter for Power System Harmonics,” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 24, No. 5, pp. 1209–1217, May 2009.
- [9] Vasquez J. C., Guerrero J. M., Savaghebi M., Garcia J. E., and Teodorescu R., “Modeling, Analysis, and Design of Stationary-Reference-Frame Droop-Controlled Parallel Three-Phase Voltage Source

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup>Distributed Generations  
<sup>2</sup>Active Power Filter  
<sup>3</sup>Sensitive Load Bus  
<sup>4</sup>Participation Factor  
<sup>5</sup>Harmonic Distortion  
<sup>6</sup>Unbalance Index  
<sup>7</sup>Proportional Integral