

## تقسیم توان بین منابع ولتاژ مبتنی بر اینورتر موازی در یک سیستم AC مستقل تحت شرایط بار نامتعادل و غیرخطی

اسماعیل رک رک  
دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی  
ایران

واژه‌های کلیدی: روش افتی فرکانس/ولتاژ؛ امپدانس مجازی؛  
منابع ولتاژ اینورتری؛ بار غیرخطی؛ ولتاژهای نامتعادل

### چکیده

در این مقاله یک روش تعمیم یافته تقسیم توان مبتنی بر تکنیک‌های افتی فرکانس/ولتاژ و امپدانس مجازی، جهت تقسیم توان بین منابع ولتاژ مبتنی بر اینورتر موازی، در یک سیستم AC مستقل در شرایط بارگذاری نامتعادل و غیرخطی ارائه می‌گردد. روش امپدانس مجازی به منظور بهبود عملکرد تقسیم توان مولفه اصلی براساس مشخصه‌های افتی فرکانس/ولتاژ منابع بکار گرفته شده است. همچنین از این روش برای تقسیم مولفه‌های هارمونیک توان بین منابع استفاده شده است. برای کاهش اثر نامطلوب بارگذاری نامتعادل و غیرخطی بر روی کیفیت ولتاژ سیستم، در روش امپدانس مجازی موردنظر تمهیداتی در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور بهبود رفتار دینامیکی و گذرای تقسیم توان در سیستم، یک ساختار دینامیکی به مشخصه‌های افتی فرکانس/ولتاژ منابع اضافه می‌گردد. با استفاده از نتایج شبیه سازی، عملکرد تقسیم توان در یک سیستم AC مستقل بر اساس روش موردنظر بررسی و کارایی آن نشان داده می‌شود.

### ۱- مقدمه

برای تقسیم توان بین منابع ولتاژ مبتنی بر اینورتر در یک سیستم AC مستقل در شرایطی که ارتباط مخابراتی میان آنها وجود ندارد، از روش افتی فرکانس/ولتاژ استفاده شده است [1-4]. این روش الگو برداری از تکنیک بکار رفته برای تقسیم توان بین ژنراتورهای سنکرون در یک سیستم قدرت بزرگ می‌باشد [5]. در سیستم‌های قدرت امپدانس تزویج بین ژنراتورهای سنکرون و نقطه اتصال به شبکه غالباً سلفی و زاویه انتقال توان نیز معمولاً کوچک می‌باشد. در چنین حالتی توان حقیقی ژنراتور عمدتاً وابسته به زاویه توان، و توان راکتیو آن بیشتر تحت تاثیر اندازه ولتاژ خروجی ژنراتور قرار دارد. در اینصورت از مشخصه‌های افتی فرکانس/ولتاژ کلاسیک جهت تقسیم توانهای حقیقی و راکتیو بین ژنراتورهای سنکرون موازی استفاده می‌گردد [6].

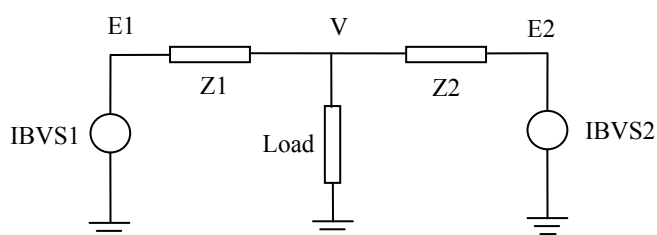
امپدانس داخلی منابع ولتاژ مبتنی بر اینورتر معمولاً کوچک و وابسته به پارامترهای سیستم کنترل و فیلتر خروجی آنهاست. این منابع غالباً به شبکه‌های ولتاژ پایین/متوسط متصل می‌گردند. امپدانس تزویج این منابع و نیز امپدانس

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

می‌شوند و توسط آنها تقسیم توان هارمونیک بین منابع انجام نمی‌گیرد. در برخی شرایط بارگذاری غیرخطی ممکن است جریانهای هارمونیک قوی از یک منبع جاری شوند و منجر به اضافه بار آن گردند. در [9] یک طرح امیدانس مجازی برای تقسیم توان هارمونیک بین منابع ولتاژ اینورتری موازی در یک سیستم AC مستقل ارائه شده است.

در این مقاله، ترکیبی از روش امیدانس مجازی تعمیم یافته و روش افتی فرکانس / ولتاژ اصلاح شده برای تقسیم توان بین منابع اینورتری موازی در یک سیستم AC مستقل ارائه شده است. در روش امیدانس مجازی تعمیم یافته راهکارهایی استفاده شده است تا تاثیر نامطلوب این روش بر روی کیفیت ولتاژ سیستم بخصوص در شرایط بار نامتعادل و غیرخطی کاهش یابد. برای کاهش جریانهای گردشی بین منابع، بهبود تقسیم توان برای مولفه اصلی و نیز مولفه‌های هارمونیک ناشی از بارهای غیرخطی، از روش امیدانس مجازی موردنظر استفاده می‌شود. به منظور کاهش اثر نامطلوب امیدانس مجازی بر روی تنظیم ولتاژ بار و جلوگیری از افزایش زاویه توان منابع، از امیدانس‌های مجازی با اندازه کوچکتر برای منابع استفاده می‌شود، از طرفی با اصلاح مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ کلاسیک از طریق اضافه نمودن جملات دینامیکی به آنها، نوسانات توان در سیستم کاهش داده می‌شود. با استفاده از نتایج شبیه سازی عملکرد روش مورد نظر جهت تقسیم توان بین منابع ولتاژ اینورتری موازی در شرایط مختلف بارگذاری بررسی و کارایی آن در یک سیستم AC مستقل نمونه نشان داده می‌شود.

### ۲- تقسیم توان بین منابع ولتاژ اینورتری موازی



شکل ۱- مدار معادل تک فاز سیستم AC مستقل مورد مطالعه.

خطوط شبکه‌های ولتاژ پایین/متوسط را نمی‌توان همواره بصورت سلفی غالب در نظر گرفت. در چنین شرایطی بین توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تزویج وجود دارد و استفاده از مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ کلاسیک برای تقسیم توان بین منابع، منجر به کنترل مستقل توانهای حقیقی و راکتیو منابع نخواهد شد [3]. یکی از اشکالات اساسی روش افتی کلاسیک برای منابع ولتاژ اینورتری موازی آنست که دقت تقسیم توان وابسته به امیدانسهای تزویج منابع می‌باشد. چنانچه منابع ولتاژ اینورتری موازی دارای امیدانس‌های خروجی کوچک باشند، بکارگیری روش افتی معمول برای آنها با توجه به پاسخ کند مشخصه‌های افتی معمول و همچنین کم بودن اندازه امیدانس موثر میان منابع موازی، می‌تواند منجر به جریانهای گردشی بزرگ بین منابع و حتی ناپایداری سیستم گردد [7]. تنظیم امیدانس خروجی منابع اینورتری موازی، می‌تواند به عنوان یکی از روشهای موثر برای کاهش جریانهای گردشی بین منابع و کاهش تزویج بین توانهای اکتیو و راکتیو یک منبع استفاده شود. بنابراین استفاده از روش امیدانس مجازی در کنار روش افتی فرکانس / ولتاژ می‌تواند عملکرد تقسیم توان بین منابع را بهبود بخشد.

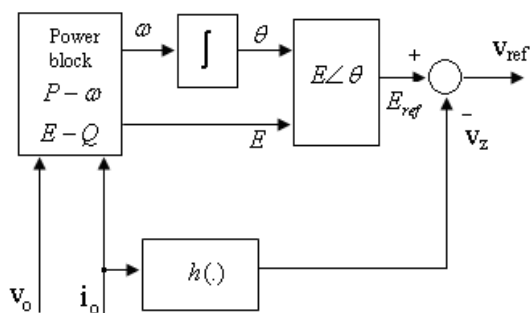
در [7]، به منظور کاهش تزویج بین توانهای حقیقی و راکتیو یک منبع و کاهش تاثیر امیدانس خط بر عملکرد تقسیم توان، از روش امیدانس مجازی برای تنظیم امیدانسهای خروجی منابع ولتاژ اینورتری موازی استفاده شده است. در [3] طرح تقسیم توان راکتیو بر اساس روش کنترل انتگرال ولتاژ بار که در آن ولتاژ مرجع نسبت به توان راکتیو خروجی منبع افت می‌یابد ارائه شده است. در این روش منابع ولتاژ اینورتری به یک باس بار مشترک متصل اند. در صورت کوچک بودن اندوکتانسهای خطوط نسبت به اندوکتانسهای خروجی منابع، توان راکتیو به نحو مطلوب بین منابع تقسیم می‌گردد. در [8] به مشخصه‌های افتی کلاسیک جملات مشتق توان اضافه شده است تا باعث بهبود عملکرد دینامیکی اینورترهای موازی گردد. مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ کلاسیک فقط به منظور تقسیم توان مولفه‌های اصلی استفاده

### بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

امپدانس تزویج آنها استفاده می‌شود. در روش امپدانس مجازی، یک ولتاژ وابسته به جریان خروجی منبع به سیگنال ولتاژ مرجع در حلقه کنترل ولتاژ اضافه می‌گردد. شکل ۲ نحوه تشکیل سیگنال ولتاژ مرجع را برای یک منبع ولتاژ اینورتری نشان می‌دهد. در این شکل، ولتاژ مرجع برای منبع اینورتری،  $v_{ref}$ ، از ترکیب ولتاژ خروجی واحد کنترل توان منبع،  $E_{ref}$ ، و ولتاژ خروجی کنترل کننده امپدانس مجازی،  $v_z$ ، ایجاد می‌گردد. در این شکل تابع انتقال  $h(\cdot)$ ، امپدانس مجازی اضافه شده به خروجی منبع را تعیین می‌کند. ساختار حلقه کنترل ولتاژ و پارامترهای آن در منابع ولتاژ اینورتری بر اساس مراجع [10-11] انتخاب شده است.

### ۳- تنظیم امپدانس خروجی منبع ولتاژ اینورتری

برای بهبود تقسیم توان مولفه‌های اصلی، یک اندوکتانس مجازی به خروجی هر یک از منابع اضافه می‌شود. در اینصورت خاصیت سلفی امپدانس تزویج منابع و اندازه امپدانس موثر بین آنها افزایش می‌یابد. در شرایط بارگذاری غیرخطی که مولفه‌های فرکانس بالا جریان هارمونیک از منبع کشیده می‌شوند.



شکل ۲- نمایش بلوکی تحقق ولتاژ مرجع

برای یک منبع ولتاژ اینورتری.

افت ولتاژ هارمونیک قابل توجهی بر روی اندوکتانس ایجاد می‌شود و در نتیجه ولتاژهای منبع و بار دارای اعوجاجهای فرکانس بالا می‌شوند. این موضوع باعث کاهش کیفیت ولتاژهای سیستم می‌گردد. برای رفع این اشکال از امپدانس مجازی مقاومتی که تابعی از فرکانس نیست در برابر

شکل ۱ مدار معادل تک فاز سیستم AC مستقل مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این سیستم شامل دو منبع ولتاژ اینورتری است که از طریق امپدانس‌های تزویج  $Z1$  و  $Z2$  یک بار مشترک را تغذیه می‌کنند. مشخصه‌های کنترل افتی فرکانس/ولتاژ برای تقسیم مولفه‌های اصلی توان بین منابع در شرایط ماندگار بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\omega_i = \omega_0 - m_{p,i} \cdot P_{m,i} \quad (1)$$

$$E_i = E_0 - n_{q,i} \cdot Q_{m,i} \quad , i = 1, 2 \quad (2)$$

که در آن  $\omega_0$  و  $E_0$  به ترتیب فرکانس و ولتاژ بی باری،  $m_{p,i}$  و  $n_{q,i}$  به ترتیب ضرایب افتی مشخصه‌ها فرکانس و ولتاژ منبع  $i$  ام و  $P_{m,i}$  و  $Q_{m,i}$  توانهای اکتیو و راکتیو متوسط این منبع می‌باشند که توسط دو فیلتر پایین گذر که دارای ثابت زمانی بزرگتر از دیگر ثابت زمانی‌های سیستم اند، محاسبه می‌شوند. در اینجا از فیلترهای مرتبه اول مطابق روابط زیر استفاده شده است.

$$P_{m,i} = \frac{w_c}{s + w_c} P_i \quad (3)$$

$$Q_{m,i} = \frac{w_c}{s + w_c} Q_i \quad (4)$$

که در آن  $P_i$  و  $Q_i$  توانهای حقیقی و راکتیو منبع  $i$  ام و  $w_c$  فرکانس قطع فیلترها می‌باشد. در صورتیکه امپدانس تزویج منابع سلفی غالب نباشند، بین توانهای حقیقی و راکتیو تولیدی آنها تزویج وجود داشته و تقسیم توانهای حقیقی و راکتیو منابع بصورت مستقل از یکدیگر امکان پذیر نمی باشد. در شرایطی که اندازه امپدانس موثر بین منابع ولتاژ اینورتری موازی کوچک است، کندی دینامیکهای مربوط به حلقه‌های کنترل فرکانس/ولتاژ در روش افتی باعث جاری شدن جریانهای گردشی گذرای قابل توجه بین منابع ولتاژ موازی می‌گردد.

بکارگیری روش اندوکتانس مجازی در کنار روش کنترل افتی فرکانس/ولتاژ برای منابع ولتاژ اینورتری موازی می‌تواند باعث بهبود عملکرد تقسیم توان در سیستم گردد. در اینجا از روش امپدانس مجازی به منظور افزایش اندازه امپدانس موثر بین منابع موازی و نیز ایجاد خاصیت سلفی غالب برای

### بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

با ضرب مقدار اندوکتانس مجازی  $L$  در مشتق مولفه‌های توالی مثبت و عاری از هارمونیک جریانهای خروجی منبع، ولتاژهای مناسب برای ایجاد اندوکتانس مجازی در مقابل مولفه‌های اصلی تشکیل می‌گردند. در این روش تاثیر نامطلوب جریانهای نامتعادل و هارمونیکی منبع بر روی مرجع ولتاژ آن بنحو چشمگیری تقلیل می‌یابد. مقدار اندوکتانس مجازی  $L$  براساس یک مصالحه بین دقت تقسیم توان بین منابع و تنظیم ولتاژ در باس بار مشترک انتخاب می‌گردد. برای بهبود عملکرد تقسیم توان هارمونیکی، در مقابل مولفه‌های هارمونیکی جریان منابع مقاومت مجازی ایجاد می‌گردد. برای این منظور از فیلترهای میان نگذر با فرکانس مرکزی برابر با فرکانس اصلی سیستم جهت استخراج مولفه‌های هارمونیکی جریان منابع استفاده می‌شود [12]. با ضرب مقدار مقاومت مجازی  $R$  در این مولفه‌ها، ولتاژهای مناسب برای ایجاد مقاومت مجازی در مقابل مولفه‌های هارمونیکی جریان منبع تشکیل می‌گردند.

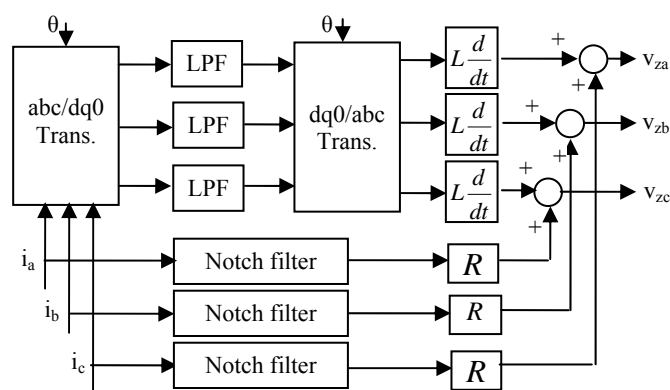
در شرایطی که جریانهای هارمونیکی از منبع کشیده می‌شوند، ولتاژهای هارمونیکی متناسب با آنها (با ضریب تناسب  $R$ ) از طریق مسیر امپدانس مجازی به ولتاژهای مرجع منبع اضافه می‌شوند. این ولتاژها باعث بهبود تقسیم توان مولفه هارمونیکی بین منابع می‌شوند. اما از طرفی موجب افزایش اعوجاج هارمونیکی در ولتاژهای خروجی منبع می‌گردند. بنابراین انتخاب مقدار مقاومت مجازی  $R$ ، بصورت مصالحه ای براساس افزایش دقت تقسیم توان هارمونیکی بین منابع و افزایش اعوجاج هارمونیکی در ولتاژهای سیستم انجام می‌گیرد. باید توجه داشت که طراحی حلقه کنترل ولتاژ برای منبع بنحوی انجام گیرد تا پهنای باند لازم برای تقسیم توان هارمونیکی بین منابع فراهم گردد [11].

#### ۴- بهبود عملکرد دینامیکی تقسیم توان

گرچه استفاده از اندوکتانس مجازی بزرگتر باعث بهبود عملکرد تقسیم توان در حالت ماندگار می‌شود اما عملکرد تنظیم ولتاژ بار را کاهش می‌دهد و باعث افزایش زاویه توان

مولفه‌های هارمونیکی جریان منبع استفاده می‌شود. در اینصورت با حفظ کیفیت ولتاژهای سیستم عمل تقسیم توان هارمونیکی نیز بین منابع صورت می‌گیرد. بنابراین امپدانس مجازی بنحوی شکل داده شود که در مقابل مولفه اصلی جریان منبع خاصیت سلفی داشته باشد و در برابر مولفه‌های هارمونیکی جریان رفتار مقاومتی از خود نشان دهد.

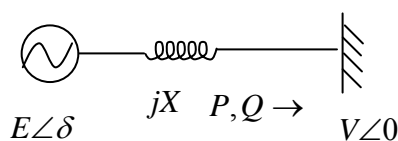
در شرایط بار نامتعادل از منبع جریانهای نامتعادل کشیده می‌شود. برای آنکه ولتاژهای خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی متعادل باشند و در نتیجه ولتاژهای مرجع منبع متعادل باقی بمانند لازم است از مولفه توالی مثبت جریان خروجی منبع برای تحقق امپدانس مجازی استفاده گردد. شکل ۳ نمودار بلوکی تحقق امپدانس مجازی موردنظر را برای منبع ولتاژ اینورتری در حالت سه فاز نشان می‌دهد. به منظور استخراج مولفه‌های توالی مثبت جریانهای منبع، از روش فیلترکردن در چارچوب سنکرون  $dq0$  استفاده شده است. در این روش ابتدا جریانهای خروجی منبع توسط ماتریس تبدیل پارک به چارچوب سنکرون  $dq0$  منتقل می‌شوند. سپس با استفاده از فیلترهای پایین گذر مقادیر DC مولفه‌های  $d$  و  $q$  و  $0$  جریانهای منبع، متناظر با مولفه‌های توالی مثبت، استخراج و مولفه‌های هارمونیکی جریان حذف می‌گردند. آنگاه با بکارگیری ماتریس تبدیل معکوس، مولفه‌های موردنظر به چارچوب ساکن  $abc$  منتقل می‌شوند. در اینجا از فیلترهای مرتبه اول با بهره واحد و فرکانس قطع یک دهه کمتر از فرکانس اصلی سیستم استفاده شده است.



شکل ۳- نمودار بلوکی نحوه تشکیل امپدانس مجازی

برای یک منبع ولتاژ اینورتری.

### بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۴- نمودار تک فاز یک منبع ولتاژ متصل به باس بی نهایت از طریق یک اندوکتانس رابط..

با خطی سازی معادلات بالا حول یک نقطه کار نتیجه می‌شود.

$$\Delta P = H_e \cdot \Delta E + H_\delta \cdot \Delta \delta \quad (9)$$

$$\Delta Q = G_e \cdot \Delta E + G_\delta \cdot \Delta \delta \quad (10)$$

که در آن

$$H_e = \frac{V}{X} \cdot \sin(\delta^0), \quad H_\delta = \frac{E^0 \cdot V}{X} \cdot \cos(\delta^0),$$

$$G_e = \frac{2E^0 - V \cdot \cos(\delta^0)}{X}, \quad G_\delta = \frac{E^0 \cdot V}{X} \cdot \sin(\delta^0) \quad (11)$$

بالانویس 0 برای نمایش مقدار حالت ماندگار کمیت متناظر استفاده شده است. رابطه بین زاویه انتقال توان منبع و فرکانسهای زاویه ای ولتاژ منبع و باس بی نهایت بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\delta = \int (\omega - \omega_{ib}) dt \quad (12)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه ای منبع و  $\omega_{ib}$  فرکانس زاویه ای باس بی نهایت می‌باشد. با خطی سازی روابط (3) و (4) و (5) و (6) و (12) و ترکیب آنها با روابط (9) و (10) معادله مشخصه حلقه کنترل توان منبع بصورت زیر بدست می‌آید

$$a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0 = 0 \quad (13)$$

که در آن

$$a_5 = \tau^2, \quad a_4 = \tau[2 + w_c(2\tau + G_e \cdot A_n)]$$

$$a_3 = 1 + w_c \cdot [G_e \cdot A_n + \tau \cdot (4 + w_c \cdot \tau + G_e \cdot n_q + G_e \cdot A_n \cdot w_c + H_\delta \cdot A_m)]$$

منبع می‌گردد. برای غلبه بر این مشکلات، یک اندوکتانس مجازی کوچکتر برای هر منبع ولتاژ اینورتری انتخاب می‌گردد تا عملکرد تنظیم ولتاژ سیستم چندان تقلیل پیدا نکند آنگاه با اضافه کردن یک ساختار دینامیکی به مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ، نوسانات توان بین منابع کاهش داده می‌شود. ساختارهای دینامیکی بر روی عملکرد حالت ماندگار تقسیم توان منابع تاثیر ندارند اما باعث بهبود پاسخ دینامیکی و گذرای تقسیم توان در سیستم می‌شوند. مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ اصلاح شده برای منابع در حوزه لاپلاس بصورت زیر بیان می‌گردند.

$$\omega_i = \omega_0 - m_{p,i} \cdot P_{m,i} - \frac{k_{pd,i} \cdot s}{\tau \cdot s + 1} \cdot P_{m,i} \quad (5)$$

$$E_i = E_0 - n_{q,i} \cdot Q_{m,i} - \frac{k_{qd,i} \cdot s}{\tau \cdot s + 1} \cdot Q_{m,i}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

که در آن s فرکانس مختلط می‌باشد. در مشخصه‌های افتی اصلاح شده، جملات دینامیکی مرتبه اول بصورت تابعی از توانهای حقیقی و راکتیو متوسط در نظر گرفته شده است. این جملات بیانگر مشتق تقریبی توانهای حقیقی و راکتیو متوسط منبع می‌باشند. برخلاف مشتق گیر، این جملات در محدوده فرکانس بالا، که توسط پارامتر  $\tau$  مشخص می‌شود، بصورت بهره ثابت عمل می‌کنند و به مولفه‌های فرکانس بالای موجود در توانهای منبع حساس نمی‌باشند. برای انتخاب ضرایب  $k_{pd,i}$  و  $k_{qd,i}$  در جملات دینامیکی، می‌توان از مدل خطی یک منبع ولتاژ متصل به باس بی نهایت از طریق یک اندوکتانس رابط استفاده نمود (شکل 4). نقش حلقه کنترل امپدانس مجازی در این تحلیل همان ایجاد اندوکتانس سلفی غالب برای منبع است.

روابط مربوط به توانهای حقیقی و راکتیو خروجی منبع بصورت زیر نوشته می‌شوند

$$P = \frac{E_0 \cdot V}{X} \cdot \sin(\delta) \quad (7)$$

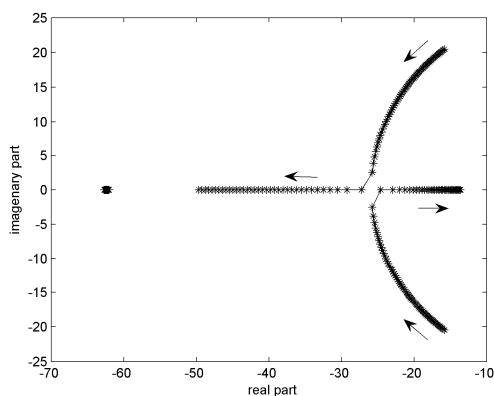
$$Q = \frac{E \cdot [E - V \cdot \cos(\delta)]}{X} \quad (8)$$

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

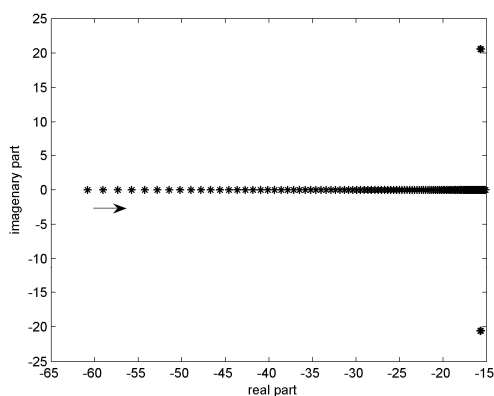
ریشه‌های معادله مشخصه ندارد. بنابراین در اینجا نمودارهای مکان هندسی ریشه‌ها فقط برای نقطه کار نامی ترسیم شده است.

## ۵- شبیه سازی سیستم

برای بررسی عملکرد تقسیم توان در سیستم AC شکل ۱



(الف)



(ب)

شکل ۵- مکان هندسی ریشه‌های غالب معادله مشخصه سیستم

الف. به ازای تغییرات  $k_{pd}$  ب. به ازای تغییرات  $k_{qd}$ .

براساس روش مورد نظر، شبیه سازی هایی در محیط Matlab/Simulink در شرایط مختلف بارگذاری انجام شده است. مدل گرافیکی بکار رفته جهت شبیه سازی در شکل ۱۰ در انتهای مقاله آورده شده است. پارامترهای سیستم نمونه شامل پارامترهای مشخصه‌های افتی فرکانس/ ولتاژ منابع، امپدانس‌های مجازی و شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$a_2 = w_c \cdot [2 + w_c \cdot (2\tau + G_e \cdot n_q \cdot \tau + G_e \cdot A_n + H_\delta \cdot A_m \cdot \tau + A_n \cdot A_m \cdot A_\delta) + G_e \cdot n_q + H_\delta \cdot (\tau \cdot m_p + A_m)]$$

$$a_1 = w_c^2 \cdot [1 + G_e \cdot n_q + H_\delta \cdot (m_p \cdot \tau + A_m) + A_\delta \cdot (A_n \cdot m_p + A_m \cdot n_q)] + w_c \cdot H_\delta \cdot m_p$$

$$a_0 = w_c^2 \cdot m_p (H_\delta + A_\delta \cdot n_q) \quad , \quad A_n = n_q \cdot \tau + k_{qd} \quad , \\ A_m = m_p \cdot \tau + k_{pd} \quad , \quad A_\delta = H_\delta \cdot G_e - H_e \cdot G_\delta \quad (14)$$

با استفاده از نمودارهای مکان هندسی ریشه‌های غالب معادله مشخصه سیستم برحسب ضرایب  $k_{pd}$  و  $k_{qd}$  مقادیر مناسب برای این پارامترها بنحوی تعیین می‌شوند که مدهای غالب سیستم در نقطه کار نامی دارای میرایی قابل قبول باشند. شکل ۵ نمودارهای مکان هندسی ریشه‌های غالب معادله مشخصه سیستم به ازای تغییرات پارامترهای  $k_{pd}$  و  $k_{qd}$  را در شرایط کار نامی نشان می‌دهد. این نمودارها برای منبع اول و بر اساس پارامترهای داده شده در جدول ۱ ترسیم شده است. شکل ۵ الف. مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه به ازای  $k_{qd} = 0$  و تغییرات  $k_{pd}$  از ۰ تا ۰/۱ را نشان می‌دهد. جهت پیکان جهت افزایش  $k_{pd}$  را نشان می‌دهد. شکل ۵ ب. مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه را به ازای  $k_{pd} = 0$  و تغییرات  $k_{qd}$  از ۰ تا ۰/۱ نشان می‌دهد. چنانچه مقادیر  $k_{pd}$  و  $k_{qd}$  هر دو صفر انتخاب شوند (مشخصه‌های افتی بدون ساختار دینامیکی)، ریشه‌های غالب معادله مشخصه سیستم بصورت  $-62.72$  و  $-15 \pm 20.56j$  خواهند بود.

با انتخاب  $k_{pd} = 0.05$  و  $k_{qd} = 0.005(1/s)$ ، ریشه‌های غالب معادله مشخصه بصورت  $-24.38$  و  $-23.59 \pm 10.68j$  بدست می‌آیند. همانگونه که ملاحظه می‌شود در این حالت میرایی مدهای نوسانی سیستم افزایش می‌یابد و رفتار دینامیکی تقسیم توان در سیستم بهبود می‌یابد. در اینجا  $\tau$  برابر  $0.0005s$  انتخاب شده است. می‌توان نشان داد که زاویه توان در سیستم مورد مطالعه کوچک است و تغییرات نقطه کار منبع تاثیر قابل توجهی بر روی مکان

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

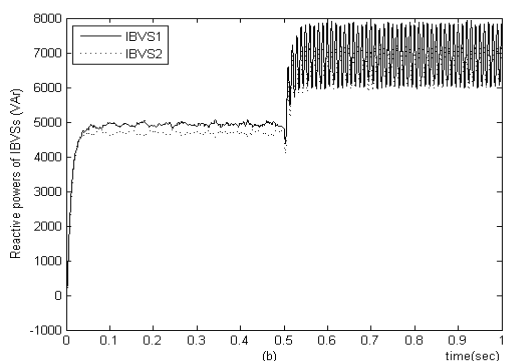
جدول ۱- پارامترهای سیستم نمونه.

IBVSs Ratings	25kVA, 380V(L-L)
$Z1$	$0.15+0.2\Omega$
$Z2$	$0.15+0.1\Omega$
$L$	$1.5(\text{mH})$
$R$	$0.5\Omega$
$m_p$	$2 (1/s)$
$n_q$	$0.1$
$k_{pd}$	$0.05$
$k_{qd}$	$0.005(1/s)$
$w_c$	$31.4(\text{rad/s})$

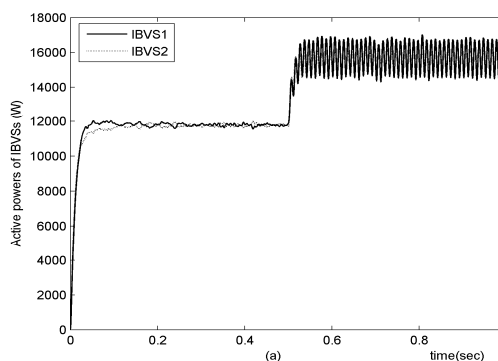
حقیقی منابع، توانهای راکتیو آنها، اندازه ولتاژ خروجی منابع و بار، و ولتاژهای سه فاز بار را نشان می‌دهد. در شکل ۷. سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی و جریانهای کشیده شده از منابع نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، عملکرد تقسیم توانهای حقیقی و راکتیو بین منابع، تنظیم ولتاژ در باس بار و پاسخ گذرای سیستم به تغییرات بار کاملاً مطلوب است.

## ۲-۵- بارگذاری غیرخطی

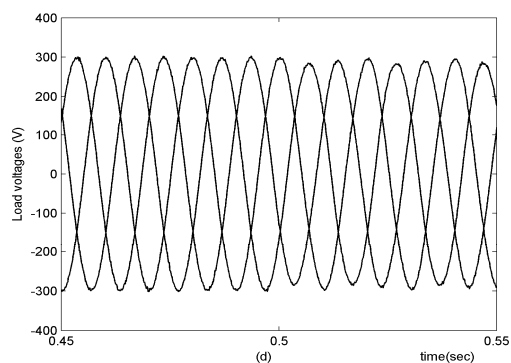
این شبیه سازی به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی در تقسیم توانهای مولفه اصلی و هارمونیک بین منابع در شرایط بارگذاری غیرخطی انجام شده است. در این حالت ابتدا سیستم با یک بار سه فاز متعادل خطی با توانهای (20kW, 10kVA) راه اندازی می‌شود. در لحظه  $t=0.5 \text{ sec}$  یک بار غیرخطی متعادل، شامل سه عدد یکسوساز تک فاز کنترل شده با بار مقاومتی  $2.5 \Omega$ ، به باس بار سیستم اضافه می‌شود.



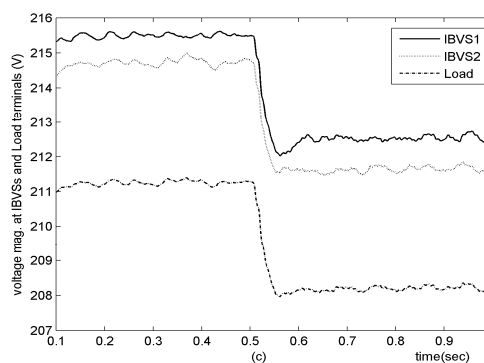
(ب)



(الف)



(د)

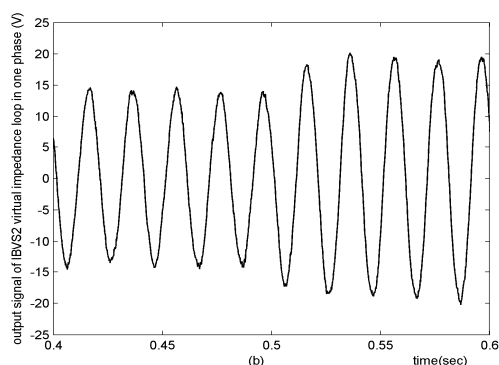


(ج)

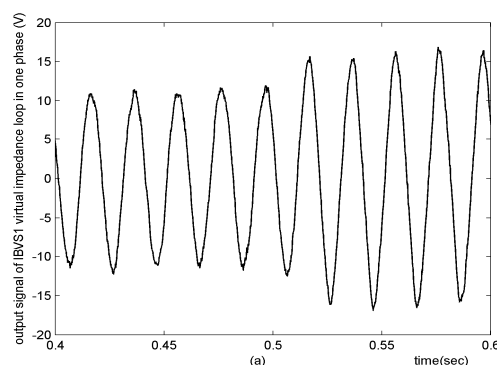
## شکل ۶- عملکرد سیستم کنترل توان پیشنهادی در شرایط بار خطی

الف. توانهای حقیقی منابع ب. توانهای راکتیو منابع ج. اندازه ولتاژ خروجی منابع و بار د. ولتاژهای سه فاز بار.

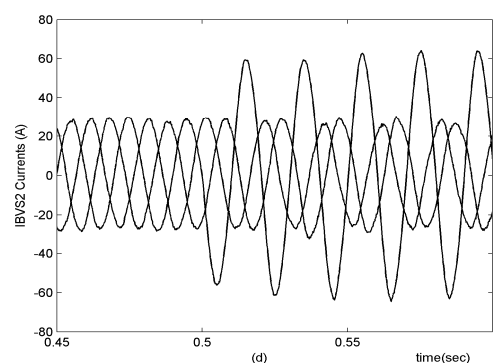
### بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق



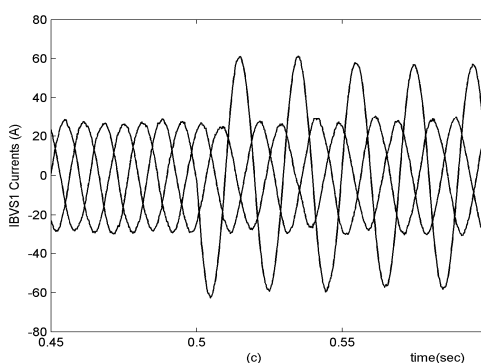
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷- سیگنال‌های خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی و جریانهای خروجی منابع

الف. سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی منبع اول ب. سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی منبع دوم.  
ج. جریانهای خروجی منبع اول د. جریانهای خروجی منبع دوم.

امپدانس خروجی منابع مورد استفاده قرار گرفت بنحوی که عملکرد تقسیم توان در سیستم از طریق روشهای افتی فرکانس/ ولتاژ بهبود یابد. همچنین از این روش برای تقسیم توان هارمونیکی بین منابع استفاده شد. در روش تقسیم توان پیشنهادی تمهیداتی برای کاهش اثرات نامطلوب امپدانس مجازی بر روی عملکرد تنظیم ولتاژ بار و کیفیت ولتاژهای سیستم در شرایط بار نامتعادل و غیرخطی در نظر گرفته شد. همچنین از طریق اضافه نمودن یک ساختار دینامیکی به مشخصه‌های افتی عملکرد دینامیکی و گذرای تقسیم توان در سیستم ارتقا داده شد. با استفاده از نتایج شبیه سازی عملکرد روش پیشنهادی بررسی و کارایی آن برای منابع ولتاژ اینورتری موازی در یک سیستم AC مستقل نشان داده شد.

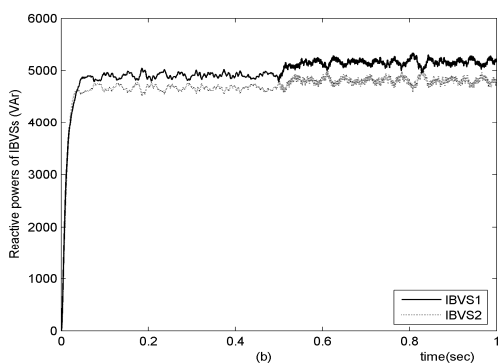
در شکل ۸ توانهای حقیقی منابع، توانهای راکتیو آنها، اندازه ولتاژ منابع و بار و ولتاژ سه فاز بار نشان داده شده است. در شکل ۹ سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی منابع و جریانهای آنها برای یک فاز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دارای عملکرد بسیار مطلوب تقسیم توان بین منابع و تنظیم ولتاژ در باس بار از نظر مولفه‌های اصلی و هارمونیکی می‌باشد.

### ۶- نتیجه گیری

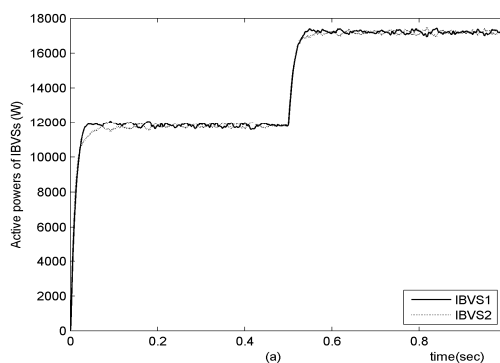
در این مقاله یک استراتژی تقسیم توان ترکیبی بر اساس روشهای افتی فرکانس/ولتاژ و امپدانس مجازی تعمیم یافته برای منابع ولتاژ اینورتری موازی در یک سیستم AC مستقل ارائه گردید. روش امپدانس مجازی به منظور تنظیم مناسب



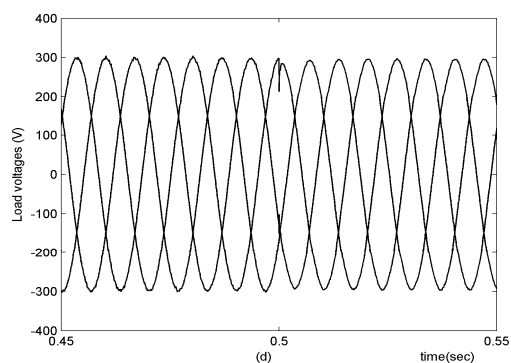
### بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق



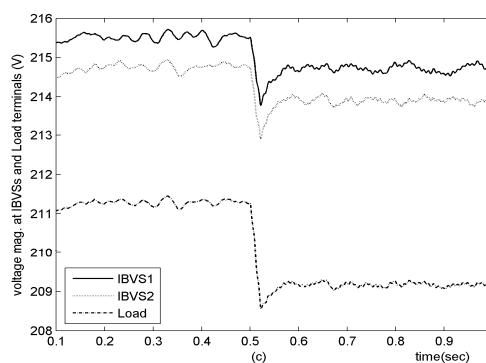
(ب)



(الف)

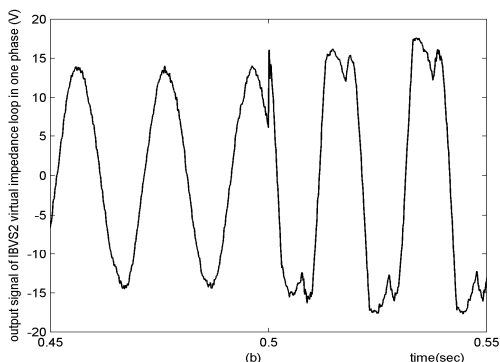


(د)

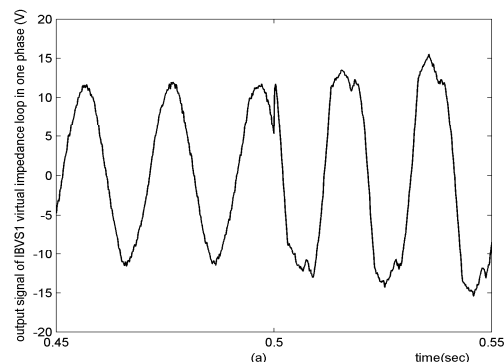


(ج)

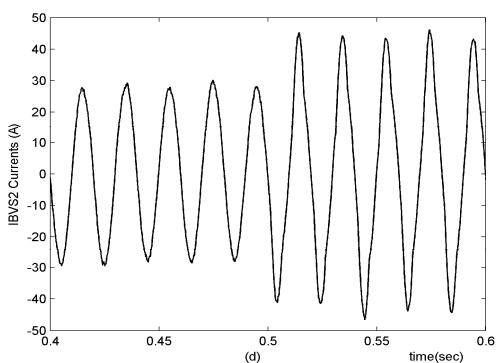
شکل ۸- عملکرد سیستم کنترل توان پیشنهادی در شرایط بار غیرخطی  
الف. توانهای حقیقی منابع ب. توانهای راکتیو منابع ج. اندازه ولتاژ منابع و بار د. ولتاژهای سه فاز بار.



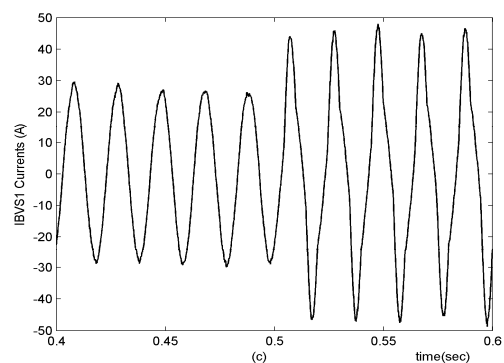
(ب)



(الف)



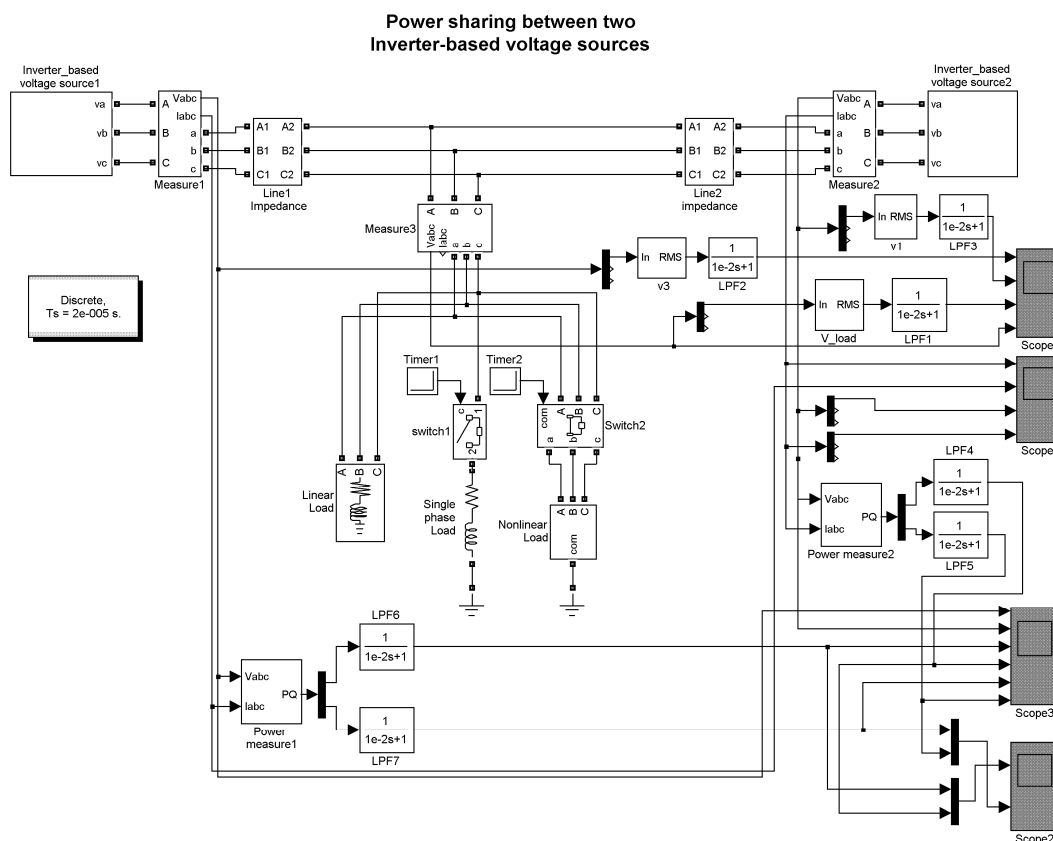
(د)



(ج)

شکل ۹- الف. سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی منبع اول ب. سیگنال خروجی مسیر کنترل امپدانس مجازی منبع دوم.  
ج. جریان خروجی یکی از فازهای منبع اول د. جریان خروجی یکی از فازهای منبع دوم.

### سیستم و پنجمین کنفرانس بین المللی برق



شکل ۱۰- مدل گرافیکی بکار رفته جهت شبیه سازی سیستم در محیط Matlab/Simulink.

### مراجع

- Trans. Ind. Electron., vol. 52, No. 4, August 2005
- [8] Guerrero .J.M, De Vicuna.L.G , Matas.J, Castilla.M, and Miret.J, "A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems", IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, No. 5, pp.1205-1213, Sep. 2004
- [9] Borup.U, Blaabjerg.F and Enjeti.P.N, "Sharing of Nonlinear Load in Parallel-Connected Three-Phase Converters", IEEE Trans.Ind. Appl. , vol. 39, No. 6, pp. 1817-1823, Nov./Dec. 2001
- [10] Rokrok. E., Hamedani Golshan., M. E., "Control of Three-Phase Four-Wier Inverter-Based Distributed Generation under Undalanced and Nonlinear Loading Conditions", 22<sup>nd</sup> International Power System Conference, 19-21 Nov. 2007, Tehran-Iran.
- [11] Rokrok. E., Hamedani Golshan., M. E., "Control of power electronic interface in an inverter-based distributed generation source under unbalanced and nonlinear loading conditions", 16<sup>nd</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering, May 13-15, 2008, Tehran-Iran.
- [12] Teodorescu.R, Blaabjerg.F, Liserre.M and Loh.P.C 'Proportional-resonant Controllers and filters for grid-connected voltage-source converters', IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153 , No. 5 , September 2000
- [1] Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T., and Mauch, K.: 'Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power System with Consideration of Line Impedance Effect', IEEE Trans. Ind. Appl., 2000, 36, (1), pp. 131-137
- [2] Gao, F., and Irvani, M.R.: ' A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation', IEEE Trans. Power Del., 2008, 23, (2), pp. 850-859
- [3] Sao, C.K., and Lehn, P.W.: 'Autonomous Load Sharing of Voltage Source Converters', IEEE Trans. Power Del., 2005, 20, (2), pp.1009-1016
- [4] Katiraei, F., and Irvani, M.R.: 'Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units', IEEE Trans. Power Sys., 2006, 21, (5), pp. 1821-1830
- [5] Pogaku.N, Prodanovic.M and Green.C.T, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, No. 2, March 2007
- [6] Marwali.M.N, Jung.J.W and Keyhani.A,'Control of Distributed Generation Systems-Part II :Load Sharing Control', IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, No. 6, November 2004
- [7] Guerrero .J.M, De Vicuna.L.G , Matas.J, Castilla.M, and Miret.J, "Output Impedance Design of Parallal-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control", IEEE