

## کنترل کننده پیش‌فاز- پس‌فاز بهینه برای تولید پراکنده در شرایط جزیره‌ای به وسیله

## الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده

عادل اکبری مجد<sup>۱</sup> و بهروز صبحانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار- گروه مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل- ایران

adelakbary@yahoo.com

۲- دانشجوی دکتری- گروه مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل- ایران

b.sobhany@gmail.com

**چکیده:** توان اکتیو و راکتیو تولیدات پراکنده معمولاً در شرایط متصل به شبکه توسط استراتژی جریان dq کنترل می‌شود، اما پس از جزیره ای شدن استراتژی کنترل جریان dq نمی تواند وظایف کنترل را به درستی انجام دهد؛ در نتیجه این کنترل کننده غیر فعال شده و یک کنترل کننده پیش‌فاز- پس‌فاز تنظیم شده به وسیله الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده برای تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای پیشنهاد می‌گردد. معیار مجموع حاصلضرب زمان در سیگنال خطا به عنوان تابع هدف الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده فلزات برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده به کار گرفته می‌شود تا پاسخ سریع و مقاوم برای سیستم به دست آید. کنترل کننده پیشنهادی حاشیه‌های پایداری مقاوم سیستم را بهبود می‌دهد و نتایج شبیه سازی به ازای شرایط مختلف بار و ورودی، قوام و سرعت بیشتر کنترل کننده پیشنهادی را در مقایسه با یک کنترل کننده مشابه قبلی تایید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تولیدات پراکنده، شرایط جزیره‌ای، کنترل پیش‌فاز- پس‌فاز، عملکرد مقاوم، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده.

## ۱- مقدمه

الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌گردند [۲]. ریزشبکه‌ها باید قادر باشند که هم به صورت متصل به شبکه و هم به صورت مجزا از شبکه (جزیره‌ای) کار کنند [۳]. تجربه‌ها و استانداردهای موجود اجازه عملکرد جزیره‌ای تولیدات پراکنده را نمی‌دهد و اصلی‌ترین دلیل آن به خطر افتادن جان تکنسین‌ها بر اثر برقدار باقی ماندن قسمت جزیره‌ای است، اما مقرراتی وجود دارد که اجازه عملکرد جزیره‌ای را به یک تولید پراکنده (DG<sup>۱</sup>) و بار مختص آن (در صورتی که جزیره شامل بخشی از شبکه سراسری نباشد) می‌دهد و در این زمینه DG مانند یک UPS برای بار عمل می‌کند [۴]. چالش اصلی عملکرد یک DG با بار محلی در حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه این است که این DG باید به یک VSC<sup>۲</sup> با تجهیزات کنترلی تجهیز شود که شرایط زیر را

منابع تولید انرژی پراکنده شامل تکنولوژی‌های متفاوتی مانند فتوولتائیک، پیل سوختی، میکروتوربین، توربین بادی کوچک و ... است. عملکرد هماهنگ و کنترل منابع انرژی پراکنده همراه با بار قابل کنترل و یک منبع ذخیره کننده انرژی مانند باتری و یا خازن ساختار کلی یک ریزشبکه را تشکیل می‌دهد [۱]. اکثر این منابع تولید پراکنده توسط مبدل

۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۰۹/۲۰

نام نویسنده مسؤول : بهروز صبحانی

نشانی نویسنده مسؤول : ایران- اردبیل- دانشگاه محقق اردبیلی -

گروه مهندسی برق

برآورده سازد:

- مبدل باید قادر باشد که ولتاژ و فرکانس باس ریزشبهه را ثابت نگه دارد.
- VSC باید بتواند بدون در نظر گرفتن پارامترهای سیستم، بار از پیش تعیین شده را تغذیه کند.
- کنترل VSC باید از روی فیدبک از بار محلی باشد [۴].

در حالت متصل به شبکه از استراتژی کنترل ابتدایی جریانی برای VSC استفاده می‌گردد. در این حالت ولتاژ و فرکانس توسط شبکه به شین نقطه اتصال مشترک دیکته می‌شود و در این شرایط VSC توان اکتیو و راکتیو را بر اساس مؤلفه جریانی dq تغییر می‌دهد [۵].

افزودن یک استراتژی کنترل جریان dq برای واحدهای متعدد DG در حالت جزیره‌ای ریزشبهه، مبتنی بر نمودارهای افت توان راکتیو/ولتاژ و توان اکتیو/فرکانس، روشی است که کارهای قبلی بیشتر بر روی آن پایه‌گذاری شده است. کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو برای کمینه کردن حالت گذرا و نگهداری پایداری زاویه ولتاژ و کیفیت ولتاژ چیزی است که در مرجع [۶] به آن اشاره شده است. مدل دینامیکی سیگنال کوچک و حالت گذرای ریزشبهه شامل تولیدات پراکنده با واسطه الکترونیکی در مرجع [۷] و [۸] بحث شده است. در [۹] یک روش کنترل کاهش بار بر پایه تولید توان راکتیو از روی توالی منفی جریان و توالی مثبت ولتاژ خط پیشنهاد شده است. این روش کنترل Q-G نامیده می‌شود که می‌تواند با روش P-f و Q-V نیز استفاده گردد، اما در این روش‌ها دینامیک بار به طور مستقیم در داخل مسیر کنترل کننده وارد نمی‌گردد. بنابراین، این روش برای تغییرات سریع و یا زیاد بار، پاسخ دینامیکی ضعیفی خواهد داشت و یا حتی ممکن است به ناپایداری ولتاژ و یا فرکانس بینجامد. در مرجع [۵]، یک ساختار کنترل بر پایه روش کنترلی کلاسیک برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم بیان شده است که این ساختار در ادامه مقاله تشریح خواهد

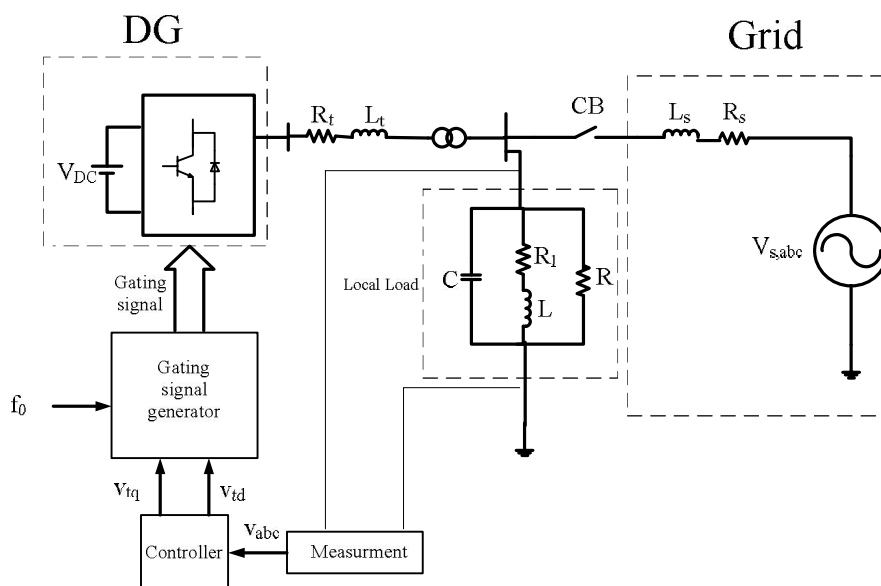
شد.

با توجه به اینکه ریزشبهه های شامل تولیدات پراکنده دارای رفتار غیرخطی هستند و دینامیک آنها همواره در حال تغییر است، به نظر می‌رسد برای ایجاد رفتار مناسب در برابر آثار غیرخطی سیستم و تغییرات آن در اطراف نقطه کار، انتخاب و طراحی یک کنترل کننده که باعث به وجود آمدن رفتار مقاوم سیستم شود، مفید خواهد بود. برای رسیدن به چنین کنترل کننده‌ای از ساختار کنترلی پیش‌فاز-پس‌فاز استفاده خواهیم کرد که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده فلزات (SA) و با توجه به معیار مجموع حاصلضرب زمان در سیگنال خطا (ITAE) تنظیم می‌شوند.

در این مقاله، طراحی کنترل کننده به صورت یک مساله بهینه‌سازی فرمول بندی شده و سپس حل می‌گردد. برای این کنترل کننده در حوزه زمان یک تابع هدف مبتنی بر ITAE تعریف شده و از طریق الگوریتم باز پخت شبیه سازی شده (SA) این تابع هدف بهینه می‌گردد. کنترل کننده به دست آمده برای سیستم بیان شده در مرجع [۵] پیاده شده و نتایج به دست آمده از این روش با روش همان مقاله مقایسه می‌گردد و برتری کنترل کننده پیشنهادی به کنترل کننده بیان شده در مرجع [۵] نمایش داده می‌گردد.

## ۲- سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه در این مقاله همان سیستم مورد استفاده در مرجع [۵] است که دی‌گرام تک خطی آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این شکل DG به صورت یک منبع DC و یک VSC نشان داده شده است که توسط یک فیلتر پایین‌گذر و یک ترانسفورماتور افزایش دهنده به شبکه سراسری و بار محلی متصل شده است. کل امپدانس مربوط به فیلتر پایین‌گذر و ترانسفورماتور با  $R_t$  و  $L_t$  نمایش داده شده است. پارامترهای این سیستم در جدول (۱) بیان شده اند.



شکل (۱): سیستم مورد مطالعه شامل: تولید پراکنده، شبکه سراسری، بار محلی

$$[a_3, a_2, a_1, a_0] =$$

$$[220.6, 177700, 3.094e7, 4.868e9]$$

قطب های این سیستم در نقاط  $2.33 \pm 377.54j$  - و  $107.97 \pm 149.98j$  - قرار دارند. یک جفت از قطب ها دارای مقدار حقیقی  $-2.33$  و نزدیک محور موهومی قرار دارند. در نتیجه، با کوچکترین عدم قطعیت یا تغییر در مشخصات، سیستم ممکن است به سمت ناپایداری برود. پس در لحظه جزیره ای باید حالت جزیره ای تشخیص داده شود و کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل شده، ولتاژ و فرکانس را برگرداند. استراتژی کنترل کننده پیشنهادی در بخش بعدی بیان می شود. برای تشخیص لحظه جزیره ای شدن هم روش های متعددی در مراجع بیان شده است. روش های تزریق جریان [۱۰]، استفاده از رله های هوشمند [۱۱] و استفاده از روش های مبتنی بر پردازش سیگنال مانند بازشناخت الگو [۱۲] از جمله این روش ها هستند. نحوه تشخیص لحظه جزیره ای شدن جزو اهداف این مقاله نیست و با فرض اینکه این رویداد توسط یکی از روش های موجود تشخیص داده شده است، تمرکز مطالب مقاله بر روی طراحی کنترل کننده برای سیستم خواهد بود.

این سیستم باید بتواند در حالت متصل به شبکه و حالت قطع از شبکه کار کند. در حالتی که سیستم به شبکه اتصال یافته است، VSC میانی به عنوان یک منبع جریان کنترل شده با ولتاژ عمل می کند. هنگامی که کلید CB نشان داده شده در شکل (۱) باز می شود، یک حالت جزیره به وجود می آید که واحد DG بار محلی را تغذیه می کند. در لحظه باز شدن کلید؛ بسته به این که مقدار بار چقدر باشد ولتاژ و فرکانس شبکه می تواند افزایش یا کاهش یابد و رو به سمت ناپایداری برود. تنها در صورت بار نامی ولتاژ و فرکانس شبکه تغییر نخواهد کرد که آن هم در صورت تغییر بار ممکن است باز هم به سوی ناپایداری برود.

برای توضیح بیشتر موضوع تابع انتقال خطی شده سیستم در اطراف نقطه کار نامی را که در مرجع [۵] به دست آمده است، در نظر می گیریم:

$$G_n(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

$$[b_2, b_1, b_0] =$$

$$[33150, 208300, 4.711e9]$$

و:

روش قابل قبول است که ذره از حالت  $x_0$  با انرژی  $E_0$  به حالت  $x$  با انرژی بالاتر  $E$  رفته باشد. اگر نقطه فعلی بهتر از حالت قبل باشد، نقطه فعلی همواره پذیرفته می‌شود، اما اگر نقطه فعلی بدتر از نقطه قبل باشد، نقطه فعلی با احتمال زیر پذیرفته می‌گردد:

$$P(x) = e^{-\frac{E-E_0}{k_B T}} \quad (2)$$

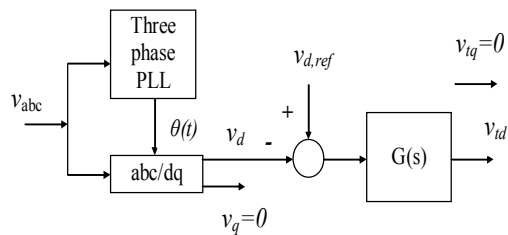
که در آن  $k_B$  ضریب بولتزمن و  $T$  دما است. احتمال قبول کردن نقطه بد، زمانی بالا می‌رود که انرژی در حالت فعلی پایین‌تر از حالت قبل بوده، دما نیز زیاد باشد. در  $T=0$  هرگز شرایط بد پذیرفته نمی‌شود. در طول این پروسه، مقدار دما از مقدار اولیه  $T_0$  تا دمای صفر بر طبق یک قانون سرد کردن کاهش می‌یابد که این به معنای یک الگوریتم جستجو است. این الگوریتم به دلیل آنکه یک الگوریتم بسیار قوی است، می‌تواند در یافتن نقطه بهینه بهتر از بقیه الگوریتم‌ها باشد. تابع کاهش دما می‌تواند متفاوت باشد؛ برای مثال یکی از قوانین سرد کنندگی در این الگوریتم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$T(i) = \frac{T_0}{\ln(i)} \quad (3)$$

که در آن  $i$  تعداد تکرار است.

### ۳-۲- طراحی کنترل کننده پیش فاز- پس فاز

با وجود توسعه خیلی زیاد سیستم‌های کنترل و نیز کاربردی شدن انواع کنترل کننده‌ها، در سیستم‌های قدرت



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترل کننده پیشنهادی به منظور

کنترل تولید پراکنده در شرایط جزیره‌ای

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مربوط به تولید پراکنده- بار

محلی و شبکه

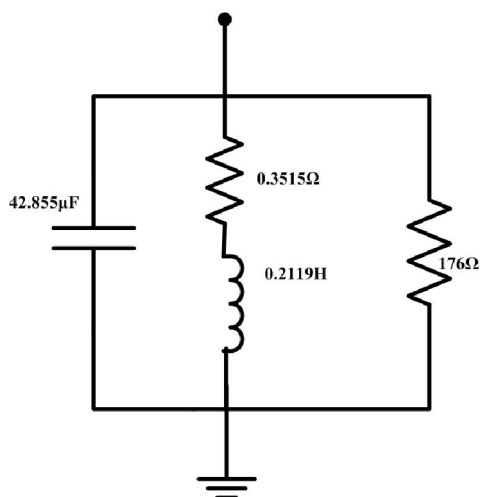
Parameter	Value
R	76.176 $\Omega$
L	111.9 mH
C	62.855 $\mu\text{F}$
$R_s$	1 $\Omega$
$L_s$	10 mH
$R_t$	1.5 m $\Omega$
$L_t$	300 $\mu\text{H}$
VSC rated power	2.5 MW
PWM carrier frequency	1,980 HZ
$f_0$	60 HZ
VSC terminal voltage	600 V
Nominal grid frequency	60 HZ
DC voltage	1500 V
Nominal grid Line-Line voltage	13.8 kV (rms)
Transformer voltage ratio	0.6/13.8 kV
Transformer rated power	2.5 MW

### ۳- طراحی کنترل کننده

#### ۳-۱- الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده

در این مقاله الگوریتم SA (که اولین بار توسط S. Kirkpartick و Cerny در [9][۱۳] و [۱۴] ارایه شد) برای طراحی یک کنترل کننده پیش فاز- پس فاز به منظور کنترل اینورتر تولید پراکنده که یک بار محلی را تغذیه می‌کند پیشنهاد می‌گردد. این الگوریتم برای کارهای مختلفی از جمله پردازش سیگنال و تصویر [۱۵]، مدارهای مجتمع [۱۶] [۱۷]، تخمین پارامتر [۱۸] و سیستم‌های حمل و نقل [۱۹] استفاده شده است. الگوریتم SA یک ابزار کارا برای حل مسائل بهینه‌سازی است [۲۰]. هدف اصلی در این بخش استفاده از روش الگوریتم SA برای رسیدن به یک کنترل کننده مناسب و بهینه به منظور کنترل تولید پراکنده برای حالت‌های مختلف بار است.

عملکرد این الگوریتم بهینه‌سازی نیز همانند الگوریتم‌های دیگر براساس روش جستجو در ناحیه مورد نظر است. در ابتدا چندین شرایط اولیه برای شروع الگوریتم در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. در این الگوریتم، تصمیم‌گیری بر اساس انرژی ذرات است. هنگامی یک حرکت در این



شکل (۳): شرایط بد بار در شرایط جزیره‌ای

زمانی  $T_1$ - $T_4$  است. باید توجه کرد که خطای حالت ماندگار سیستم و نیز شرایط گذرای سیستم به تعیین پارامترهای کنترل کننده وابسته است. برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی به مقادیر بهینه آنها در شرایط جزیره-ای و در بدترین شرایط ممکن بار، الگوریتم SA پیشنهاد می‌گردد. شرایط وخیم بار در اینجا به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شده است که در این شرایط شبکه مقدار  $1.43\text{MW}$  ( $0.572 \text{ p.u}$ ) و  $710\text{kvar}$  ( $0.284 \text{ p.u}$ ) از بار دریافت می‌کند.

حال باید مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی نوشته و حل شود. انتخاب یک تابع هدف مهمترین بخش این مسأله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهد؛ چرا که انتخاب توابع هدف مختلف ممکن است مراحل الگوریتم SA و رفتار آن را کاملاً تغییر دهد. در مسأله بهینه‌سازی مورد نظر در اینجا ما از مجموع حاصلضرب زمان در سیگنال خطا (ITAE) استفاده می‌کنیم.

$$J = \int_0^{t_f} |v_d - v_{d,ref}| dt \quad (5)$$

که در آن  $t_f$  انتهای بازه زمانی است که تابع هدف در آن بازه محاسبه می‌گردد. تابع هدف ITAE در مقالات متعدد برای رسیدن به یک رفتار مقاوم به کار گرفته شده است (برای مثال، نک. مراجع [۲۶] و [۲۴]). هر مسأله بهینه‌سازی تحت یک تعدادی از قیود بهینه‌سازی می‌گردد که در این مسأله قیود به صورت زیر بیان می‌گردد:

هنوز کنترل کننده‌های پیش‌فاز- پس‌فاز کنترل کننده‌های مطلوب به شمار می‌آیند؛ زیرا اجرای این کنترل کننده‌ها بسیار راحت است و نیز در نقاط وسیعی از حوزه عملکرد سیستم، باعث ایجاد رفتار مقاوم می‌شود [۲۳] [۲۲]. از طرف دیگر، این کنترل کننده‌ها به راحتی در سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال قابل پیاده‌سازی هستند. در این مطالعه، کنترل کننده پیش‌فاز- پس‌فاز برای کنترل یک DG که توسط اینورتر به شبکه متصل شده است، در شرایط جزیره-ای پیشنهاد می‌گردد. نمای کلی این کنترل کننده در شکل (۲) آمده است. در این استراتژی ابتدا ولتاژ بار اندازه‌گیری و به حوزه  $dq0$  برده می‌شود. PLL سه فاز برای به دست آوردن مرجع زاویه در تبدیل  $abc/dq$  استفاده می‌شود. زاویه بار در این مطالعه به عنوان ولتاژ مرجع به حساب می‌آید پس مؤلفه  $q$  به مقدار 0 تنظیم می‌گردد و مؤلفه  $d$  باید به مقدار اوج آن برسد. در نتیجه باید مطابق شکل (۲) با یک مقدار مرجع  $v_{d,ref}$  مقایسه گردد. سیگنال خطای به دست آمده وارد کنترل کننده شده و خروجی کنترل کننده  $v_{td}$  به همراه سیگنال  $v_{tq}$  وارد تولید کننده سیگنال گیت برای VSC می‌گردد.

در این مقاله تابع تبدیل کنترل کننده در شکل (۲) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G(s) = K \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (4)$$

این کنترل کننده جبرانگر دینامیکی است که شامل دو بلوک کنترل کننده پیش‌فاز- پس‌فاز به همراه یک بهره است. پارامترهای قابل تنظیم در آن شامل ضریب  $K$  و ضرایب

کنترل کننده پیش‌فاز-پس‌فاز بهینه برای تولید پراکنده در شرایط جزیره‌ای بوسیله الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده

می‌رود که رفتار سیستم با کنترل کننده (۳) پیشنهاد شده در این مقاله

جدول ۲- پارمترهای پایداری مقاوم با کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده مرجع [۵]

	Phase Margin	Gain Margin	Gain Crossover Freq.
کنترل کننده (۳) پیشنهاد شده در این مقاله	78°	∞	162 rad/s
کنترل کننده (۷) پیشنهاد شده در مرجع [۵]	56.2°	11.3db	36.8 rad/s

رفتار مقاومتری باشد. از طرفی، با بیش از چهار برابر شدن فرکانس گذر بهره انتظار پاسخ سریعتری برای سیستم با کنترل کننده پیشنهادی داریم. نتایج شبیه سازی بخش بعد این مطالب را تایید خواهد کرد.

#### ۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی در پنج وضعیت مختلف انجام می‌گیرد و نتایج خروجی سیستم با کنترل کننده پیشنهادی با نتایج به دست آمده با کنترل کننده مرجع [۵] نیز مقایسه می‌گردد.

#### ۴-۱- شرایط بار نامی

در این آزمایش مقادیر مقاومت و سلف و خازن (بار) به مقادیر نامی آنها که در جدول (۱) آمده، تنظیم شده است. در ابتدا سیستم در حالت اتصال به شبکه کار می‌کند و در ثانیه  $t=1s$  کلید CB عمل کرده، باز می‌گردد و سیستم از شبکه سراسری جدا شده و شرایط جزیره‌ای اتفاق می‌افتد. در ثانیه  $t=1.06s$  شرایط جزیره‌ای تشخیص داده می‌شود. کنترل کننده جریانی اولیه از مدار خارج می‌گردد و کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل می‌گردد. شکل (۴) نشان دهنده شکل موج‌های ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده

Minimize  $J$  subject to

$$K^{\min} \leq K \leq K^{\max}$$

$$T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max}$$

$$T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max}$$

$$T_3^{\min} \leq T_3 \leq T_3^{\max}$$

$$T_4^{\min} \leq T_4 \leq T_4^{\max}$$

(۶)

که در آن  $K$  در بازه [0.01 100] و هر یک از زمان‌ها در بازه [0.01 1] است. این محدوده های زمانی طوری انتخاب شده‌اند که ثابت زمانی کنترل کننده با ثابت زمانی سیستم قابل مقایسه باشد. محدود کردن بهره  $K$  هم به این علت است که از ناپایداری سیستم در بهره‌های بالا اجتناب شود.

با استفاده از الگوریتم SA مسأله بهینه‌سازی حل شده و پارامترهای کنترل کننده به صورت زیر به دست می‌آید.

$$K=40.5695; T_1=0.0127; T_2=0.0100; T_3=0.0153; T_4=4.959$$

در این مسأله بهینه‌سازی تعداد ذرات، بُعد ذرات و تعداد تکرار برترتیب ۴۰، ۵، ۸۰ انتخاب گردیده است.

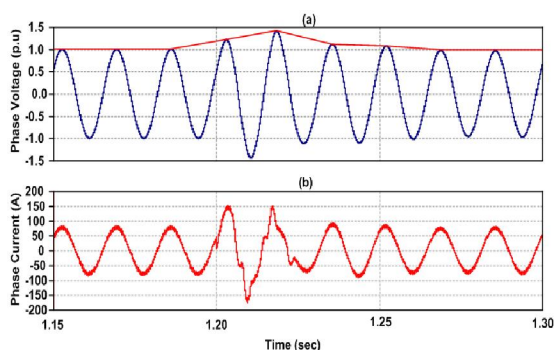
#### ۳-۳- تحلیل پایداری مقاوم

در این بخش با استفاده از معیارهای حاشیه فاز و حاشیه بهره پایداری مقاوم سیستم با کنترل کننده پیشنهادی را با کنترل کننده مرجع ۵ مقایسه خواهیم کرد. ساختار کنترلی مقاله مرجع [۵] مشابه ساختار شکل (۲) است که در آن تابع  $G(s)$  (به جای کنترل کننده پیش‌فاز-پس‌فاز پیشنهاد شده در این مقاله) به صورت زیر انتخاب شده است:

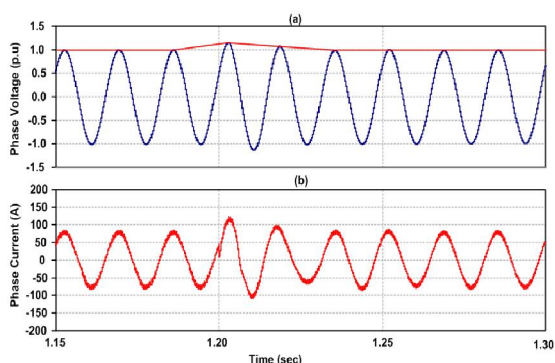
$$G(s) = \frac{4000}{s(s+100)} \quad (7)$$

مقادیر حاشیه فاز و حاشیه بهره و فرکانس گذر بهره برای سیستم (۱) با کنترل کننده های (۳) و (۷) در جدول (۲) نشان داده شده است. با مقایسه این مقادیر مشخص می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی حاشیه‌های پایداری مقاوم سیستم را تا حد زیادی بهبود بخشیده است. در نتیجه، انتظار

و کنترل‌کننده موجود در حالت اتصال به شبکه از مدار خارج می‌گردد. نتایج این حالت با کنترل‌کننده مرجع [۵] در شکل (۶) و با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی در شکل (۷) آمده است. در شکل (۶) واضح است که پس از جزیره‌ای شدن، ولتاژ بار به شدت (تا حدود  $1.4 \text{ p.u}$ ) افزایش پیدا می‌کند و پس از آن کنترل‌کننده مربوط به مرجع [۵] وارد عمل شده، ولتاژ را برمی‌گرداند. ولتاژ به صورت کامل پس از چهار سیکل به مقدار نامی خود ( $1 \text{ p.u}$ ) برگشته است.



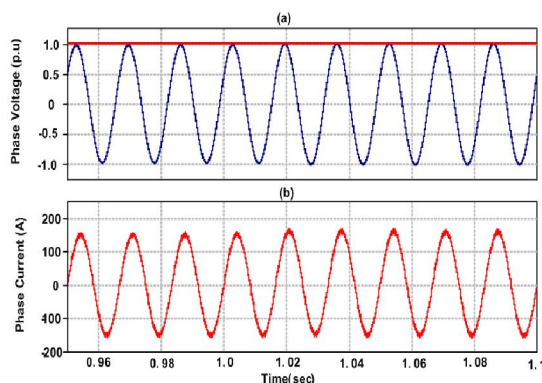
شکل (۶): ولتاژ و جریان فاز **a** با کنترل‌کننده مرجع [۵] در بار غیر نامی (a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار



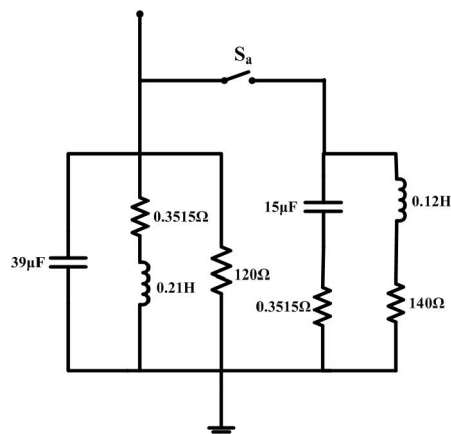
شکل (۷): ولتاژ و جریان فاز **a** با کنترل‌کننده پیشنهادی در بار غیر نامی (a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار

با دقت به شکل (۷) واضح است که عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله مطلوب‌تر است. ولتاژ در این حالت تا حدود  $1.15 \text{ p.u}$  افزایش پیدا کرده و پس از دو سیکل برگشته است و مقدار آن در  $1 \text{ p.u}$  تثبیت شده است. این شکل موج‌ها قوام عملکرد و کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی را در مقابل کنترل‌کننده مرجع [۵] نشان می‌دهد.

پیشنهادی است. کاملاً واضح است که در حالت بار نامی شکل موج‌های ولتاژ و جریان تقریباً هیچ حالت گذرایی نخواهند داشت. در این حالت از شبکه، این دو کنترل‌کننده (پیشنهادی و مرجع [۵]) تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.



شکل (۴): ولتاژ و جریان فاز **a** با کنترل‌کننده پیشنهادی در بار نامی (a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار



شکل (۵): دیاگرام تک خطی بار محلی در شرایط بار غیر نامی

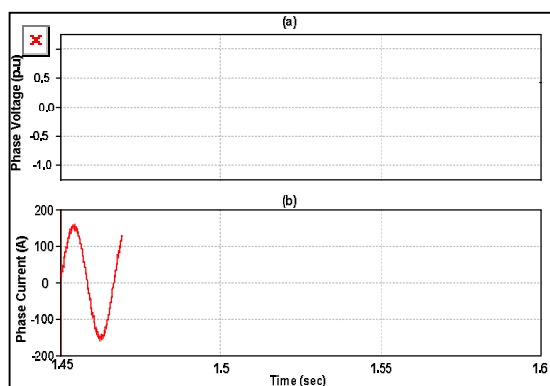
#### ۴-۲- بار غیر نامی

در این آزمایش بار محلی مقادیر غیر نامی دارد در حالت اتصال به شبکه، شبکه توان اکتیو  $910 \text{ kW}$  ( $0.5 \text{ p.u.}$ ) را از تولید پراکنده جذب می‌کند و نیز توان راکتیو  $400 \text{ kVAR}$  ( $0.16 \text{ p.u.}$ ) پارامترهای تکفاز بار در این حالت در شکل (۵) نشان داده شده است. (کلید  $S_a$  باز است) شرایط جزیره‌ای در ثانیه ۱.۲ اتفاق می‌افتد و پس از مدت زمان ۰.۰۰۸ ثانیه، در ثانیه ۱.۲۰۸ این شرایط تشخیص داده می‌شود و کنترل‌کننده پیشنهادی وارد می‌شود

ولتاژ تغییر اندکی داشته است که سریعاً به حالت ماندگار رسیده است. مقایسه در این حالت از شبکه نیز عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد.

#### ۴-۴- ردیابی ولتاژ

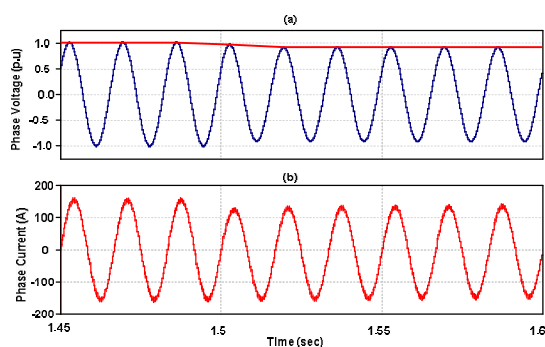
در این سناریو پاسخ سیستم در برابر تغییرات سیگنال مرجع بررسی می‌شود. فرض کنید که سیستم در شرایط جزیره‌ای قرار دارد و تحت شرایط بار نامی (جدول ۱) کار می‌کند. در زمان  $t=1.5s$  سیگنال مرجع ولتاژ به صورت پله ای از  $1.0 \text{ p.u}$  به  $0.85 \text{ p.u}$  کاهش می‌یابد. شکل های (۱۰) و (۱۱) پاسخ سیستم به این تغییر را به ترتیب با کنترل کننده مرجع [۵] و کنترل کننده پیش‌فاز-پس‌فاز پیشنهادی نشان می‌دهند.



شکل (۱۰): ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده مرجع [۵]

بازای تغییرات سیگنال مرجع ولتاژ

(a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار



شکل (۱۱): ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده پیشنهادی

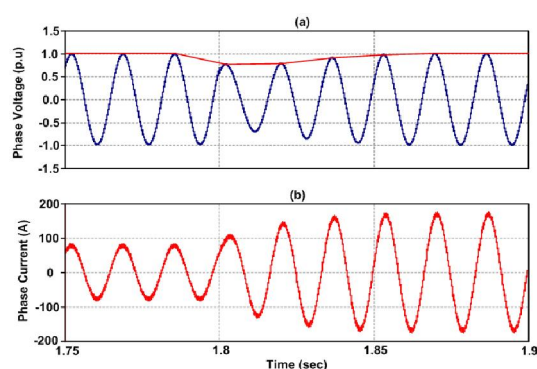
بازای تغییرات سیگنال مرجع ولتاژ

(a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار

در اینجا هم مشخص است که پاسخ سیستم با کنترل

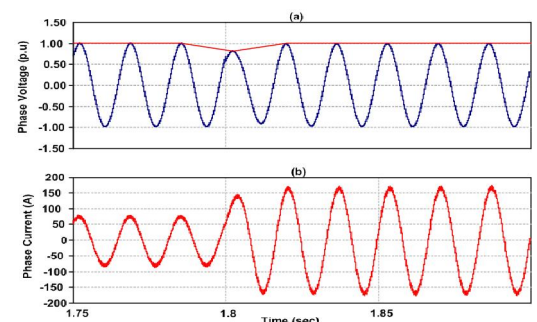
#### ۴-۳- تغییرات بار در حالت جزیره‌ای

در این آزمایش سیستم در ابتدا در حالت جزیره کار می‌کند و یک دفعه در ثانیه  $t=1.5s$ ، مقداری بار به شبکه اضافه می‌گردد. مشخصات این بار در شکل (۵) آمده است. تا ثانیه  $t=1.5s$  کلید Sa باز است و کلید یکدفعه بسته می‌شود. شکل (۸) پاسخ کنترل کننده مرجع [۵] به این تغییرات بار است. با توجه به شکل مشخص است که این سیستم پاسخ گذرای زیادی دارد و تقریباً پس از پنج سیکل به حالت ماندگار رسیده و به این تغییرات بار پاسخ داده است.



شکل (۸): ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده مرجع [۵] در

تغییرات بار (a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار

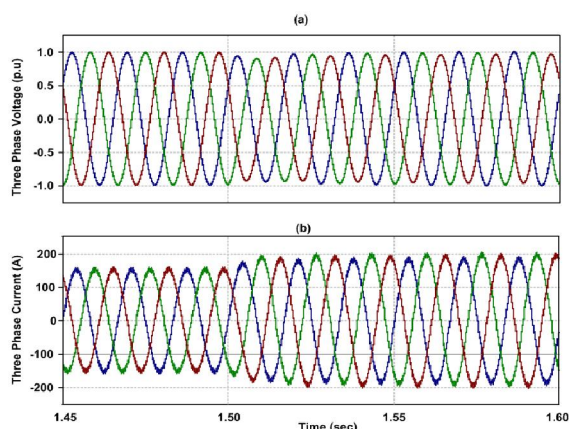


شکل (۹): ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده پیشنهادی در

تغییرات بار (a) ولتاژ فازی بار (b) جریان بار

اما شکل (۹) مربوط به کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله است که زمان پاسخ گذرا به کمتر از یک سیکل کاهش یافته است. مشخص است که این پاسخ نسبت به پاسخ مربوط در شکل (۸) بسیار بهتر است و پس از تغییر بار،





شکل (۱۴): ولتاژ و جریان سه فاز در شرایط نامتعادلی بار با

کنترل کننده پیشنهادی

(a) ولتاژ فاز بار (b) جریان بار

نیز پاسخ دینامیکی سیستم با کنترل کننده پیشنهادی آمده است که در اینجا نیز شکل (۱۴-ا) نشان دهنده ولتاژ خروجی سه فاز و شکل (۱۴-ب) نشان دهنده جریان‌های خروجی سه فاز است. در اینجا نیز با مقایسه این شکل موج‌ها مشاهده می‌گردد که بازم خروجی به ازای کنترل کننده پیشنهادی بهتر از پاسخ کنترل کننده مرجع [۵] است. در شکل (۱۳) زمان گذرا بیشتر از سه سیکل طول کشیده است، در حالی که این زمان در شکل (۱۴) کمتر از دو سیکل است؛ در عین حال که افت ولتاژ در حالت گذرای شکل (۱۳) بیشتر از شکل (۱۴) است.

### ۵- نتیجه گیری

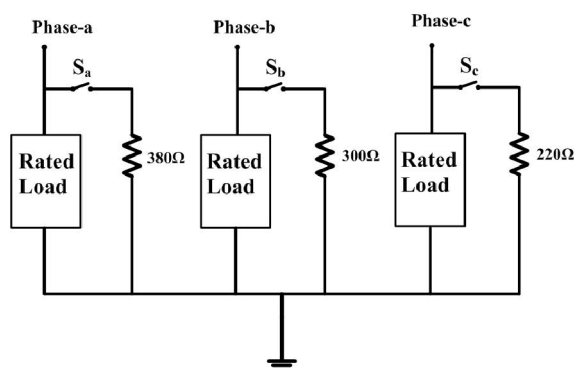
کنترل کننده‌های جریانی dq قادر به کنترل DG در حالت جزیره‌ای نیستند. در نتیجه، لازم است در حالت جزیره‌ای کنترل کننده دیگری سیستم تولید پراکنده را کنترل کند. این کنترل کننده باید رفتار مقاوم از خود بروز دهد؛ به گونه‌ای که در برابر تغییرات پارامترها و ناپیچینی‌ها، سیستم حلقه بسته از رفتار مناسب خود انحراف زیادی نداشته باشد. لذا در این مقاله یک کنترل کننده جدید پیشنهاد شد که به دو قرینه دارای رفتاری مقاوم است:

- ۱- استفاده از ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز که یک ساختار کنترلی کلاسیک مقاوم است.

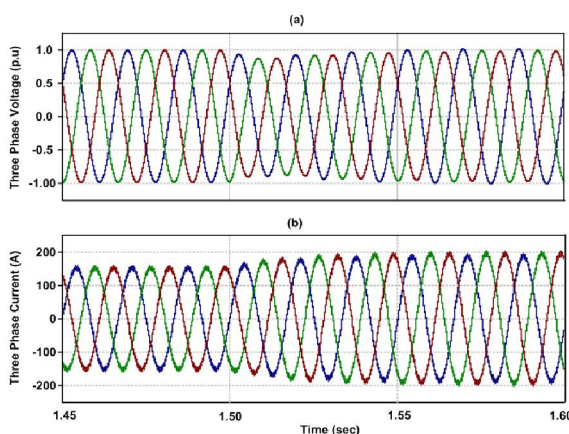
کننده پیشنهادی از نظر شکل و زمان پاسخ گذرا بهتر است.

### ۴-۵- بار نامتعادل

در این بخش از مطالعات، پاسخ سیستم به بار نامتعادل بررسی می‌شود. در ابتدا سیستم در حالت جزیره‌ای و با مقادیر بار بیان شده در جدول (۱) کار می‌کند. در زمان 1.5s باری نامتعادل مطابق شکل (۱۲) با بسته شدن کلیدهای Sa، Sb و Sc وارد شبکه می‌گردد. پاسخ دینامیکی به این بار در شکل های (۱۳) و شکل (۱۴) نشان داده شده است. شکل (۱۳) پاسخ دینامیکی سیستم با کنترل کننده مرجع [۵] را نشان می‌دهد که شکل (۱۳-ا) مربوط به ولتاژ خروجی فازهای a، b، c و شکل (۱۳-ب) مربوط به جریان‌های خروجی فازهای a، b و c است. در شکل (۱۴)



شکل (۱۲): بار سه فاز در شرایط نامتعادل



شکل (۱۳): ولتاژ و جریان سه فاز در شرایط نامتعادلی بار با

کنترل کننده [۵]

(a) ولتاژ فاز بار (b) جریان بار

- Subsequent to Islanding Process". IEEE Trans. Power Del; Vol 20 No 1, pp. 248-257., 2005
- [7] Katiraei F., Iravani M. R. "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units". IEEE Trans. Power Systems; Vol. 21 No 4, pp. 1821-1831, 2006
- [8] Katiraei F., Iravani M. R. and Lehn P.W., "Small-signal Dynamic Model of a Microgrid Including Conventional and Electronically Interfaced Distributed Resources", IET Gener. Transm. Distrib; Vol. 1, No 3, pp. 369-378, 2007
- [9] Cheng P. T., Chen C. A., Lee T. L. and Kuo S.Y., "A Cooperative Imbalance Compensation Method for Distributed-Generation Interface Converters", IEEE Trans. Ind. Appl; Vol 45, No 2, pp. 805-815, 2009
- [10] Karimi H., Yazdani A. and Iravani R., "Negative-sequence Current Injection for Fast Islanding Detection of a Distributed Resource Unit", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 23, No. 1, pp. 1698-1705, 2008
- [11] Heidari Orejloo M., Seifossadat G., Gharibreza E., "Design and Simulation of Intelligent based Relay for Power Islanding Detection", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 2, No 3, pp. 67-78 2011
- [12] Lidula A., N. W., and Rajapakse, A. D., "Pattern-recognition Approach for Detecting Power Islands using Transient Signals" Parts, I & II, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No 3, 2012
- [13] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol 220, No 4598, pp. 621-630. 1983
- [14] Cerny V., "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Approach", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, No. 1, pp 41-51, 1985
- [15] Carnevali P., Coletti L., Patarnello S., "Image Processing by Simulated Annealing", IBM Journal of Research and Development, Vol. 29, No 6, pp. 569-579, 1985
- [16] Darema F., Kirkpatrick S., Norton V. A., "Parallel Algorithms for Chip Placement by Simulated Annealing", IBM Journal of Research and Development, Vol. 31, No 3, pp. 391 - 402, 1987
- [17] Chandy J. A., Banerjee P., "Parallel Simulated Annealing Strategies for VLSI Cell Placement", In Proc. 9th Int. Conf. on VLSI
- ۲- استفاده از معیار ITAE به عنوان تابع هدف شناخته شده برای ایجاد رفتار مقاوم برای تنظیم ضرایب کنترل کننده.
- ضرایب کنترل کننده پیشنهادی به وسیله الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده فلزات (SA) به صورت بهینه تنظیم شدند. در حل این مسأله، ابتدا مسأله به یک مسأله بهینه‌سازی که تابع هدف آن در حوزه زمان و به صورت معیار ITAE تعریف گردید، نوشته شد و سپس مسأله با استفاده از الگوریتم SA حل گردید.
- کنترل کننده پیشنهادی توانست حاشیه های پایداری مقاوم سیستم را تا حد زیادی ارتقا دهد. همچنین، کنترل کننده پیشنهادی حالت گذرای ولتاژ و جریان را در شرایط جزیره‌ای بهبود بخشید و در مقابل تغییرات مختلف در نقطه کار، شرایط بار و مقدار ورودی رفتار مناسبی از خود بروز داد. این ادعا با شبیه‌سازی سیستم در حوزه زمان و در نرم افزار PSCAD/EMTDC با انجام آزمایش های مختلف تایید گردید.

## مراجع:

- [1] Jiayi H, Chuanwen J, Rong X, "A Review on Distributed Energy Resources and MicroGrid". Renewable and Sustainable Energy Reviews; Vol 12, No 9, pp 2472-2483, 2008
- [2] Nikkhajoei H., Iravani R., "Steady-State Model and Power Flow Analysis of Electronically-Coupled Distributed Resource Units". IEEE Trans. Power Del; Vol. 22 No 1, pp. 721-728, 2007
- [3] Sao C.K., Lehn P.W., "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids", IEEE Trans. Power Systems, Vol 23, No 3, pp. 1088-1098, 2008
- [4] Chen C. L., Wang. Y., Lai, J. S., Lee Y. S. "Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Microgrid Applications", IEEE Trans. Power Electron, Vol. 25, No 1, pp 6-15, 2010
- [5] Karimi H., Nikkhajoei H., Iravani R., "Control of an Electronically-Coupled Distributed Resource Unit Subsequent to an Islanding Event", IEEE Trans. Power Del; Vol. 23, No. 1, pp. 493-501, 2008.
- [6] Katiraei F., Iravani M. R., Lehn P.W., "Micro-Grid Autonomous Operation During and

---

<sup>1</sup> Distributed Generation

<sup>2</sup> Voltage Sourced Converter

<sup>3</sup> Simulated Annealing

<sup>4</sup> Integral of Time multiply by Absolute Error

- Design, Bangalore – India, 1996
- [18] Gonzalez O. R., Küper C., Jung K., Naval Jr P. C. and Mendoza E., "Parameter Estimation using Simulated Annealing for S-system Models of Biochemical Networks", *Bioinformatics*, Vol. 23, No 4, pp. 480-486, 2007
- [19] Dowsland K. A., Soubeiga E. and Burke E., "A Simulated Annealing Based Hyperheuristic for Determining Shipper Sizes for Storage and Transportation", *European Journal of Operational Research* Vol. 179, No 3, pp 759-774, 2007
- [20] Fleischer M., "Simulated Annealing: Past, Present, and Future", *Proc. of the 1995 Winter Simulation Conference*, Department of Engineering Management, Old Dominion University, Norfolk, VA, 1995
- [21] Goffe W. L., Ferrier G. D., Rogers J., "Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing", *Journal of Econometrics* Vol. 60, No 1, pp. 65-99, 1994
- [22] Shayeghi H., Shayanfar H. A., Safari A., Aghmasheh R., "A robust PSSs Design using PSO in a Multi-machine Environment" *Energy Conversion and Management* Vol. 51, No 4 pp. 696–702, 2010
- [23] Shahriari Kahkeshi M., Bijami E., Sheikholeslam F., Zekri M., Maghfoori Farsangi M., "Power System Stabilizer Design for Damping Power System Low Frequency Oscillations based on Fuzzy Wavelet Neural Network", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 1, Number 1, pp. 1-22, 2011
- [24] Huang Y., Yu Y. F. and Sun L., "ITAE Controller Design and Simulation for Electric Load Simulator Based on Genetic Algorithm". *Journal of Astronautics*, Vol. 5, 2008
- [25] Zhang J., Wang X. and Guo F., "Radial Suspension Control of Magnetic Bearing Switched Reluctance Motor Based on the ITAE Optimization". In *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-6, 2012
- [26] Taher S. A., Nosratabadi S. M., Shibani M. R., " Optimal Load Frequency Control Method Using Artificial Bee Colony Algorithm in Deregulated Power Systems Including SMES", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 1, Number 1, pp. 23-42, 2011

