

## کاهش مصرف سوخت در یک سیستم تغذیه جریان متناوب مستقل با به کارگیری مشخصه‌های کنترل فرکانس غیرخطی مقاوم

اسماعیل رک رک، استادیار

دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران

esmaeel.rokrok@gmail.com

ارسال مقاله: ۹۰/۱۰/۷ اصلاحیه: ۹۱/۱/۲۷

پذیرش مقاله: ۹۱/۲/۱۷

**چکیده:** در این مقاله، با به کارگیری مشخصه‌های غیرخطی کنترل فرکانس بهینه برای منابع فرمان‌پذیر یک سیستم تغذیه جریان متناوب مستقل، مصرف سوخت اولیه آن کاهش داده می‌شود. مدیریت توان در شبکه مورد مطالعه، به صورت محلی است و مشخصه‌های افتی فرکانس به کار گرفته شده برای منابع، بر اساس مدل شبکه طراحی می‌شوند. در تعیین پارامترهای این مشخصه‌ها، عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط شبکه نیز در نظر گرفته می‌شود تا مشخصه‌های مورد نظر نسبت به عدم قطعیت‌های مدل، مقاوم باشند. مشخصه‌های افتی فرکانس منابع به صورت تکه ای خطی بین هر دو سطح بارگذاری متوالی طراحی می‌شوند و پارامترهای آن‌ها بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی خارج خط تعیین می‌گردد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، کارایی مشخصه‌های پیشنهادی هم از نظر کاهش مصرف سوخت اولیه شبکه و هم از نظر مقاوم بودن مشخصه‌ها نسبت به عدم قطعیت‌های مدل، نشان داده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم تغذیه جریان متناوب مستقل، مشخصه‌های افتی فرکانس / ولتاژ، مدل‌سازی فازی، بهینه‌سازی مصرف سوخت منابع.

## ۱. مقدمه

در این مقاله، بر اساس روش کنترل غیرمتمرکز (محلی)، با به کارگیری مشخصه‌های افتی فرکانس غیرخطی بهینه برای منابع فرمان پذیر، مصرف سوخت در یک سیستم تغذیه مستقل کاهش داده می‌شود. استفاده از مشخصه‌های کنترل فرکانس غیرخطی برای منابع فرمان‌پذیر باعث می‌شود که بر خلاف روش افتی معمول، تقسیم توان بین منابع سیستم به صورت غیرخطی انجام پذیرد [۵]. در روش مورد نظر بر خلاف روش افتی معمول که در آن، ضرایب مشخصه‌های کنترل فرکانس/ ولتاژ منابع بدون در نظر گرفتن مدل شبکه (بارها و امپدانس خطوط)، فقط بر اساس حداکثر انحراف فرکانس و ولتاژ قابل قبول در شبکه تعیین می‌شوند [۹-۱۰]، طراحی مشخصه‌های کنترل فرکانس بر اساس مدل شبکه و بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی انجام می‌گیرد.

وجود عدم قطعیت در مدل شبکه، و به طور خاص عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط، می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر کاهش مصرف سوخت سیستم داشته باشد؛ بنابراین در روند طراحی مشخصه‌های کنترل فرکانس برای منابع، عدم قطعیت‌های مدل شبکه در نظر گرفته می‌شود تا مشخصه‌های پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت‌های مدل شبکه مقاوم باشند.

مشخصه‌های کنترل فرکانس برای هر منبع به صورت تکه‌ای خطی بین هر دو سطح بارگذاری متوالی شبکه در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای این مشخصه‌ها بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی خارج خط<sup>۱</sup> که در آن، تقاضای توان بین منابع فرمان‌پذیر سیستم به نحوی تقسیم می‌گردد که میزان مصرف سوخت حداقل باشد، تعیین می‌گردد. بهینه‌سازی به ازای سطوح مختلف بارگذاری انجام می‌گیرد و در تعیین پارامترهای مشخصه‌های کنترل فرکانس منابع، عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط شبکه در نظر گرفته می‌شود.

با شبیه‌سازی یک سیستم تغذیه مستقل نمونه، عملکرد مشخصه‌های پیشنهادی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد و از طریق نتایج شبیه‌سازی، کارایی مشخصه‌های پیشنهادی هم از نظر کاهش مصرف سوخت اولیه سیستم و هم از نظر مقاوم بودن عملکرد مشخصه‌های پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت‌های مدل نشان داده می‌شود.

## ۲. ساختار مشخصه‌های پیشنهادی فرکانس

برای تقسیم توان بین منابع فرمان‌پذیر سیستم، مشخصه‌های کنترل فرکانس غیرخطی با ساختار تکه‌ای خطی بین هر دو سطح بارگذاری متوالی پیشنهاد می‌شود. پارامترهای این مشخصه‌ها بر اساس معیار

روش کنترل متمرکز، مبتنی بر کنترل‌کننده مرکزی و لینک مخابراتی، به منظور کاهش مصرف سوخت و نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستم‌های تغذیه «جریان متناوب مستقل»<sup>۱</sup> به طور معمول استفاده می‌شود [۱-۴]. در این روش بر اساس اطلاعات دریافتی از شبکه، هر بار یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زمان حقیقی حل می‌شود و توان تولیدی مرجع برای منابع فرمان‌پذیر شبکه، تعیین و از طریق خطوط مخابراتی به آن‌ها ارسال می‌گردد. در فواصل زمانی بین اجرای هر بار الگوریتم بهینه‌سازی، توان تولیدی منابع بر اساس کنترل‌کننده‌های توان محلی منابع تعیین خواهند شد. این کنترل‌کننده‌ها غالباً مبتنی بر روش افتی فرکانس/ ولتاژ معمول<sup>۲</sup> هستند.

چنانچه شرایط بارگذاری شبکه در فاصله زمانی بین ارسال توان‌های تولیدی مرجع تغییر یابد، عملکرد کنترل‌کننده‌های محلی منابع منجر به تولید توان بهینه نخواهد شد [۵]. اشکال اصلی موجود در روش‌های کنترل متمرکز، محاسبات زمان حقیقی طولانی و فاصله زمانی قابل توجه بین ارسال مراجع تولید توان برای منابع فرمان‌پذیر از سوی کنترل‌کننده مرکزی است. برای رفع این اشکال می‌توان از کنترل‌کننده‌های توان محلی با مشخصه‌های کنترل فرکانس غیرخطی بهینه استفاده کرد [۶].

اگر سیستم تغذیه مستقل به صورت غیر متمرکز کنترل گردد و مدیریت توان در شبکه به صورت محلی انجام پذیرد، در این حالت نیز می‌توان با به کارگیری مشخصه افتی فرکانس غیرخطی بهینه برای منابع فرمان‌پذیر، مصرف سوخت را در شبکه کاهش داد [۵].

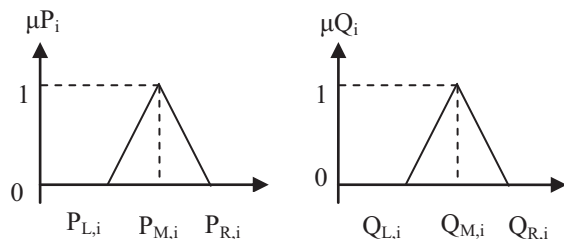
در [۲] مدیریت بهینه تولید انرژی در یک ریزشبکه<sup>۳</sup> به منظور کاهش هزینه تولید و انتشار گازهای آلاینده بررسی شده و بر اساس پیش‌بینی بار و محدودیت‌های منابع، یک جدول تولید شبانه‌روزی برای منابع ریزشبکه ارائه گردیده است. در [۷] مدیریت متمرکز و تولید بهینه هم‌زمان الکتریسیته و حرارت در یک شبکه هوشمند، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۳] یک سیستم مدیریت انرژی متمرکز مبتنی بر روش افتی فرکانس به منظور کاهش مصرف سوخت یک ریزشبکه و تضمین عملکرد پایدار آن ارائه شده است. در [۸] یک ساختار کنترل فرکانس/ ولتاژ مبتنی بر روش افتی معمول برای منابع اینورتری موازی جهت به کارگیری، هم در حالت اتصال به شبکه و هم در حالت خودگردان ریزشبکه معرفی شده است.

1. Standalone Ac Supply Systems
2. Conventional droop method
3. Micro grid

متغیرهای حالت و خروجی شبکه نیز به صورت اعداد فازی با مشخصه‌های توزیع امکان مثلثی به دست می‌آیند.

### ۳. مدل‌سازی عدم قطعیت‌های شبکه

برای مدل‌سازی عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط شبکه می‌توان از اعداد فازی با توزیع امکان مثلثی استفاده کرد [۱۱]. شکل (۱) توان حقیقی و راکتیو بار  $\bar{A}_m$  را که به صورت اعداد فازی مثلثی مدل شده‌اند، نشان می‌دهد. عدد فازی مثلثی (TFN) برای توان حقیقی بار  $\bar{A}_m$  به صورت  $\bar{P}_i = (P_{L,i}, P_{M,i}, P_{R,i})$  نمایش داده می‌شود. این عدد بیانگر آن است که توان حقیقی بار دارای یک توزیع امکان مثلثی، حول مقدار متوسط  $P_{M,i}$  می‌باشد و مقدار آن نه کمتر از  $P_{L,i}$  و نه بیشتر از  $P_{R,i}$  است.  $P_{L,i}$ ،  $P_{M,i}$  و  $P_{R,i}$  نقاط شکست مشخصه توزیع امکان توان حقیقی بار  $\bar{A}_m$  هستند.



شکل (۱): توان‌های حقیقی و راکتیو بار  $\bar{A}_m$  که به صورت اعداد فازی با توزیع امکان مثلثی مدل شده‌اند.

### ۴. تعیین پارامترهای مشخصه‌های کنترل فرکانس پیشنهادی

پارامترهای مشخصه‌های کنترل فرکانس پیشنهادی برای منابع فرمان‌پذیر، بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی خارج خط تعیین می‌گردند. بارهای شبکه و پارامترهای امپدانس خطوط، به صورت اعداد فازی با توزیع امکان مثلثی مدل می‌شوند. با استفاده از روش پخش توان فازی، اندازه ولتاژ باس‌های شبکه، توان حقیقی و توان راکتیو منابع که همگی اعداد فازی با مشخصه توزیع امکان مثلثی هستند، به دست می‌آیند. ضرایب افتی در مشخصه‌های تکه‌ای خطی کنترل فرکانس منابع فرمان‌پذیر،  $m_{p,i,l-1}$  و  $n_{q,i}$  به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و مقادیر آن‌ها به نحوی تعیین می‌گردد که تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، که خود مجموع سوخت مصرفی همه منابع فرمان‌پذیر سیستم است، در هر سطح بارگذاری حداقل گردد.

کاهش مصرف سوخت اولیه سیستم، با استفاده از یک مسئله بهینه‌سازی در سطوح مختلف بارگذاری تعیین می‌گردند. برای کنترل اندازه ولتاژ منابع فرمان‌پذیر، از مشخصه‌های افتی ولتاژ معمول استفاده شده است. مشخصه‌های فرکانس / ولتاژ برای منابع فرمان‌پذیر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\omega_i = \omega_{0,i,l} - m_{p,i,l} \cdot P_{m,i}, \quad l = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

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

که در آن، اندیس  $i$  شماره منابع فرمان‌پذیر و اندیس  $l$  سطوح بارگذاری سیستم را نشان می‌دهد.  $\omega_i$ ،  $Q_{m,i}$ ،  $P_{m,i}$  و  $E_i$  به ترتیب توان حقیقی، توان راکتیو، فرکانس زاویه‌ای و اندازه ولتاژ منبع  $\bar{A}_m$ ، و  $E_0$  اندازه ولتاژی باری منابع‌اند. در مشخصه‌های فوق، ضریب افتی فرکانس ( $m_{p,i,l}$ ) و فرکانس اولیه ( $\omega_{0,i,l}$ ) تعیین‌کننده مقدار توان حقیقی منبع  $\bar{A}_m$  در سطح بارگذاری  $l$  می‌باشند. ضریب افتی ولتاژ ( $n_{q,i}$ ) تعیین‌کننده اندازه ولتاژ منبع  $\bar{A}_m$  و توان راکتیو تولیدی آن است. ضرایب ( $n_{q,i}$ ) با توجه به ظرفیت تولید توان راکتیو منابع و تغییرات مجاز اندازه ولتاژ خروجی آن‌ها تعیین می‌گردند [۹].

به منظور حفظ پیوستگی در مشخصه کنترل فرکانس تکه‌ای خطی منبع، فرکانس اولیه در هر سطح بارگذاری،  $\omega_{0,l}$ ، بر اساس پارامترهای سطح بارگذاری پایین‌تر به صورت زیر انتخاب می‌گردد:

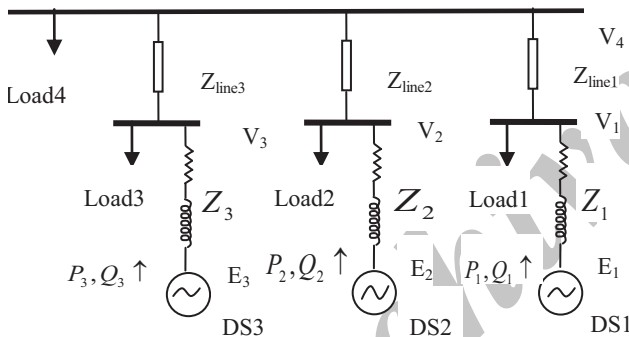
$$\omega_{0,l} = \omega_{0,l-1} + m_{p,i,l-1}^* \cdot P_{m,i,l-1}^* \quad (3)$$

که در آن،  $\omega_{0,l}$  فرکانس اولیه در سطح بارگذاری  $l$  ام،  $\omega_{0,l-1}$  فرکانس اولیه در سطح بارگذاری  $l-1$  و  $m_{p,i,l-1}^*$  شیب بهینه مشخصه کنترل فرکانس در سطح بارگذاری  $l-1$  می‌باشد که از حل مسئله بهینه‌سازی در سطح بارگذاری  $l-1$  به دست می‌آید. همچنین  $P_{m,i,l-1}^*$  توان حقیقی بهینه منبع  $\bar{A}_m$  به ازای سطح بارگذاری  $l-1$  می‌باشد که از حل مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌گردد؛ بنابراین فرکانس اولیه،  $\omega_{0,l}$ ، در مشخصه‌های تکه‌ای خطی کنترل فرکانس منابع به ازای سطوح مختلف بارگذاری تغییر می‌کند. از یک مسئله بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای مشخصه کنترل فرکانس منابع فرمان‌پذیر، با هدف کاهش هزینه سوخت مصرفی سیستم استفاده می‌شود. در مسئله بهینه‌سازی از یک روش پخش توان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط شبکه استفاده می‌شود تا مشخصه‌های پیشنهادی دارای عملکرد مقاوم باشند. در این مقاله، از روش پخش توان فازی استفاده شده است [۱۱]. پخش توان فازی مبتنی بر روش پخش توان مرزی است [۱۲-۱۳] که در آن، متغیرهای عدم قطعیت‌دار شبکه (متغیرهای ورودی) به صورت اعداد فازی با توزیع امکان مثلثی مدل می‌شوند.

(کاندیدهای جواب) ارزیابی می شود. با استفاده از یک مکانیزم انتخاب که در آن کروموزوم های دارای برازندگی بیشتر، از شانس بیشتری برای انتخاب شدن برخوردارند، و با اعمال عملگرهای ژنتیکی جابجایی و جهش بر روی کروموزوم های انتخاب شده، نسل بعدی الگوریتم تشکیل می گردد. پس از پایان اجرای مراحل الگوریتم ژنتیک، توان های حقیقی بهینه منابع و ضرایب مشخصه های کنترل فرکانس آنها به ازای یک سطح بارگذاری تعیین می گردند. برای سطح بارگذاری بعدی (بالا تر)، پس از تعیین فرکانس اولیه در مشخصه های تکه ای خطی کنترل فرکانس منابع، به روش مشابه، الگوریتم ژنتیک اجرا و توان های بهینه منابع و ضرایب مشخصه های کنترل فرکانس آنها تعیین می شوند.

### ۵. تعیین مشخصه های کنترل فرکانس پیشنهادی برای یک شبکه مستقل نمونه

در شکل (۲)، سیستم تغذیه مستقل مورد مطالعه که شامل سه منبع تولید پراکنده فرمان پذیر است نشان داده شده است.



شکل (۲): سیستم تغذیه مستقل مورد مطالعه

حداکثر تقاضای بار در هر یک از باس های شبکه، معلوم فرض می شود. پارامترهای شبکه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای سیستم تغذیه مورد مطالعه

<p>ظرفیت منابع، ولتاژ توان و مبنای شبکه</p> <p>DS1: ۵۰kVA, DS2: ۲۰kVA, DS3: ۳۰kVA, S<sub>base</sub> = ۵۰kVA, V<sub>base</sub> = ۳۸۰V (L-L)</p>	
<p>پارامترهای شبکه و خطوط بارها</p> <p>Z<sub>1</sub> = .۱ + j.۲ (Ω), Z<sub>line1</sub> = .۱ + j.۰۲ (Ω) Z<sub>2</sub> = .۱۵ + j.۲ (Ω), Z<sub>line2</sub> = .۲ + j.۰۵ (Ω) Z<sub>3</sub> = .۱ + j.۱۵ (Ω), Z<sub>line3</sub> = .۲ + j.۰۵ (Ω) Load1: ۲۷kW, ۱۳kVAr Load2, Load3: ۹kW, ۴/۳kVAr Load4: ۳۶kW, ۱۷kVAr</p>	

منبع اولیه انرژی برای DS2 یک پیل سوختی PEM با

$$J = \sum_{i=1}^{ns} C_i(P_{i,C}) \quad (۴)$$

در این تابع هدف، ns تعداد منابع فرمان پذیر سیستم را نشان می دهد. C<sub>i</sub>(.) تابع هزینه سوخت مصرفی منبع iام است که وابسته به توان حقیقی نرمالیزه شده آن منبع می باشد.  $\tilde{P}_i$ ، توان حقیقی منبع iام با در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در مدل شبکه است که از حل مسئله پخش بار فازی، به صورت یک عدد فازی با توزیع امکان مثلثی به دست می آید. برای محاسبه مقدار غیرفازی (crisp) توان حقیقی منبع iام (P<sub>i,C</sub>) از تابع نفازی سازی جابجایی استفاده شده است [۱۴].

تابع سوخت مصرفی منبع iام، C<sub>i</sub>(P<sub>i</sub>)، بر اساس مشخصات فنی واحد و یا با روش های اندازه گیری تعیین می گردد. قیود مسئله بهینه سازی شامل تعادل تولید و تقاضا در سیستم، محدوده تغییرات مجاز اندازه ولتاژ باس های شبکه، و محدوده تغییرات مجاز توان های تولیدی منابع به صورت زیر در نظر گرفته می شوند.

$$\sum_{i=1}^{ns} \tilde{P}_i = \tilde{P}_D + \tilde{P}_{loss}$$

$$\sum_{i=1}^{ns} \tilde{Q}_i = \tilde{Q}_D + \tilde{Q}_{loss}$$

$$V_{min} \leq \tilde{V}_i \leq V_{max}, i = 1, \dots, nb$$

$$Q_{min} \leq \tilde{Q}_j \leq Q_{max}$$

$$P_{min} \leq \tilde{P}_j \leq P_{max}, j = 1, \dots, ns \quad (۵)$$

در روابط فوق،  $\tilde{P}_D$  و  $\tilde{Q}_D$  به ترتیب، تقاضای توان های حقیقی و راکتیو سیستم و  $\tilde{P}_{loss}$  و  $\tilde{Q}_{loss}$  به ترتیب، تلفات توان حقیقی و راکتیو شبکه به صورت اعداد فازی مثلثی هستند.  $\tilde{V}_i$  و  $\tilde{Q}_j$  نیز به ترتیب، اندازه ولتاژ در باس iام و توان راکتیو منبع jام به صورت اعداد فازی می باشند. زیر نویس های max و min به ترتیب، برای نشان دادن حداکثر و حداقل کمیت های متناظر در قیود نامعادله ای استفاده شده است.

برای حل مسئله بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود [۱۵]. در این الگوریتم، ضرایب مشخصه های تکه ای خطی برای کنترل فرکانس هر منبع به عنوان متغیرهای بهینه سازی (کروموزوم ها) در نظر گرفته می شوند. ابتدا یک جمعیت اولیه از کروموزوم ها انتخاب می گردند. هر کروموزوم در بردارنده کدهای دودویی مربوط به ضرایب مشخصه های کنترل فرکانس منابع فرمان پذیر می باشد. با حل مسئله پخش توان فازی در سیستم، توان های حقیقی و راکتیو و اندازه ولتاژ ترمینال منابع تعیین می گردند. با استفاده از تابع هدف سیستم (مجموع سوخت مصرفی منابع) مقدار برازندگی هر یک از کروموزوم ها

پس از حل مسئله بهینه‌سازی، ضرایب مشخصه‌های کنترل فرکانس و توان‌های حقیقی بهینه منابع در هر سطح بارگذاری تعیین می‌گردند. این مقادیر در جدول (۲) آورده شده است. فرکانس هر منبع غیرخطی است که متشکل از ساختار تکه‌ای خطی به ازای سطوح بارگذاری متوالی می‌باشد. مشخصه کنترل ولتاژ منابع بر اساس روش افتی معمول انتخاب شده است. شیب مشخصه‌های افتی ولتاژ برای منابع یک مصالحه بین تنظیم ولتاژ و تقسیم توان راکتیو بین منابع به نحوی انتخاب می‌شود که توان راکتیو تولیدی آن‌ها از مقدار اسمی تجاوز نکند و ولتاژ باس‌های شبکه در محدوده مجاز باقی بماند.

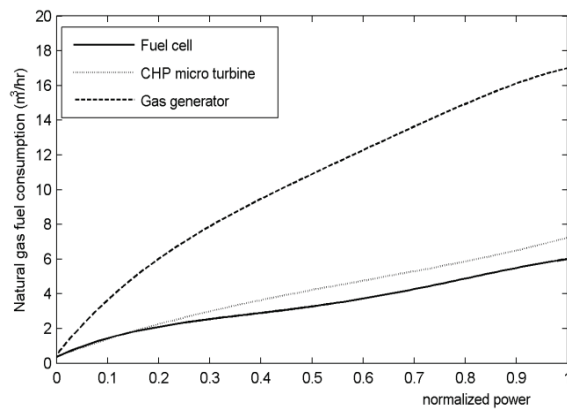
در شکل (۴) مشخصه‌های کنترل فرکانس و ولتاژ برای منابع سیستم مورد مطالعه ترسیم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مشخصه کنترل فرکانس هر منبع، غیرخطی با ساختار تکه‌ای خطی به ازای سطوح متوالی بارگذاری است. این مشخصه‌ها بیانگر روش غیرخطی تقسیم توان بین منابع فرمان‌پذیر شبکه می‌باشد. مشخصه کنترل ولتاژ منابع بر اساس روش افتی معمول انتخاب شده است. شیب مشخصه‌های افتی ولتاژ برای منابع یک مصالحه بین تنظیم ولتاژ و تقسیم توان راکتیو بین منابع، به نحوی انتخاب می‌گردد که توان راکتیو تولیدی آنها از مقدار اسمی تجاوز نکند و ولتاژ باسهای شبکه در محدوده مجاز باقی بماند.

## ۶. بررسی عملکرد سیستم تغذیه مستقل مورد مطالعه بر اساس مشخصه‌های پیشنهادی

برای نشان دادن کارایی مشخصه‌های پیشنهادی و مقایسه عملکرد آن‌ها با مشخصه‌های افتی معمول که در آن، ضرایب افتی بر اساس ظرفیت منابع تعیین می‌گردند، سیستم تغذیه مستقل شکل (۲) مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی، بارهای سیستم هم‌زمان از ۰ تا مقادیر نامی به صورت یکنواخت و در ۳۰ پله یکسان تغییر داده می‌شوند. در هر سطح بارگذاری، بارها می‌توانند به صورت تصادفی ۱۵ درصد از مقدار پایه، انحراف داشته باشند. همچنین پارامترهای امپدانس خطوط نیز می‌توانند به طور تصادفی ۱۰ درصد حول مقادیر اسمی متغیر باشند.

در شکل (۵) تابع هزینه (سوخت مصرفی) سیستم به ازای مشخصه

ریفرمر است. مشخصه مصرف سوخت بر حسب توان خروجی آن به صورت یک چند جمله‌ای درجه ۴ تقریب زده می‌شود [۱۶]. *DS3* یک میکروتوربین با مدل *Capstone 30* است. مشخصه مصرف سوخت میکروتوربین بر حسب توان الکتریکی خروجی آن به صورت یک چند جمله‌ای درجه ۴ تخمین زده می‌شود [۱۷]. *DS1* یک ژنراتور گازی مدل *50RES* است. مشخصه مصرف سوخت این منبع توسط یک چند جمله‌ای درجه ۴ تخمین زده شده است [۱۸]. مشخصه‌های مصرف سوخت (گاز طبیعی) این منابع بر حسب توان حقیقی نرمالیزه شده آن‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مشخصه‌های مصرف گاز طبیعی منابع شبکه بر حسب توان حقیقی نرمالیزه شده آن‌ها

بهینه‌سازی سیستم به ازای چهار سطح مختلف بارگذاری شامل ۲۰ درصد مقادیر نامی، ۴۵ درصد مقادیر نامی، ۶۵ درصد مقادیر نامی و ۹۰ درصد مقادیر نامی بارهای شبکه انجام شده است. در هر سطح بارگذاری، بارهای شبکه دارای توزیع امکان‌مثلی با نقطه مرکزی برابر با مقدار پایه آن‌ها و کران‌های پایین/بالا ۱۵ درصد کمتر/بیشتر از مقادیر پایه بارها در نظر گرفته می‌شود.

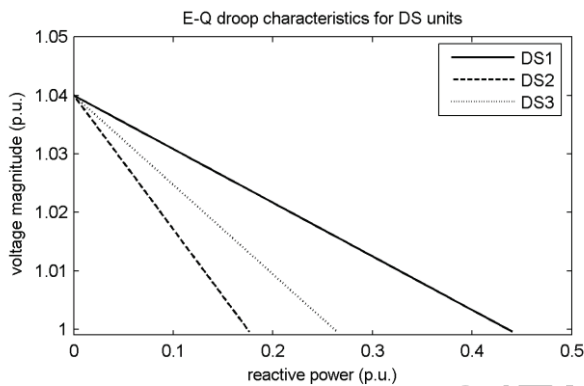
پارامترهای امپدانس خطوط شبکه نیز به صورت اعداد فازی با توزیع امکان‌مثلی در نظر گرفته شده است. نقطه مرکزی برای توابع توزیع امکان این پارامترها خود مقادیر اسمی آن‌ها، و کران پایین و کران بالا برای آن‌ها به ترتیب، ۱۰ درصد کمتر و ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر اسمی‌شان در نظر گرفته می‌شود.

های پیشنهادی و مشخصه‌های اف‌تی معمول بر حسب سطوح مختلف بارگذاری ترسیم شده است. علی‌رغم وجود عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط همچنان مصرف سوخت سیستم را به‌خصوص برای سطوح بارگذاری کم و

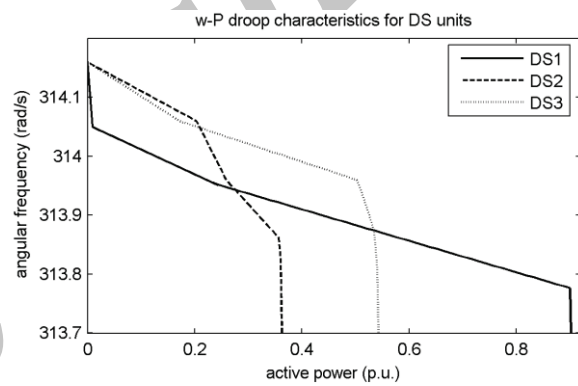
همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، مشخصه‌های پیشنهادی

جدول (۲): ضرایب مشخصه‌های کنترل فرکانس منابع و توان‌های حقیقی بهینه آن‌ها در سطوح مختلف بارگذاری

$P_{opt,3}$ (p.u.)	$\omega_{0,3}$ (rad/s)	$m_{p,3}$ (rad/s)	$P_{opt,2}$ (p.u.)	$\omega_{0,2}$ (rad/s)	$m_{p,2}$ (rad/s)	$P_{opt,1}$ (p.u.)	$\omega_{0,1}$ (rad/s)	$m_{p,1}$ (rad/s)	پارامترهای منابع سطوح بارگذاری
۰/۱۶۹۶	۳۱۴/۱۵۹	۰/۵۱۹	۰/۲۰۳۸	۳۱۴/۱۵۹	۰/۴۹۰	۰/۰۰۱۹	۳۱۴/۱۵۹	۵۰/۰۰	بارگذاری ۱
۰/۴۵۶۰	۳۱۴/۱۱۸	۰/۳۴۹	۰/۳۰۴۶	۳۱۴/۲۶۱	۰/۹۹۱	۰/۰۰۲۳	۳۱۴/۱۵۹	۵۰/۰۰	بارگذاری ۲
۰/۵۳۹۴	۳۱۴/۵۰۵	۱/۱۹۸	۰/۳۵۹۲	۳۱۴/۵۱۷	۱/۸۳۱	۰/۲۳۹۳	۳۱۴/۰۴۱	۰/۴۲۲	بارگذاری ۳
۰/۵۳۹۹	۳۴۰/۸۳۱	۵۰/۰۰	۰/۳۶۰۰	۳۳۱/۸۲۲	۵۰/۰۰	۰/۶۱۴۳	۳۱۴/۰۰۴	۰/۲۶۶	بارگذاری ۴

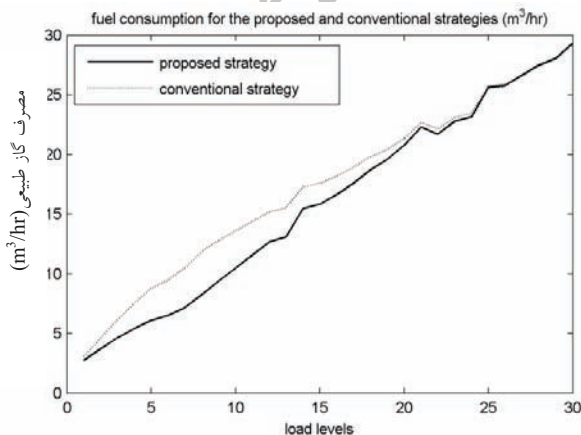


(ب)



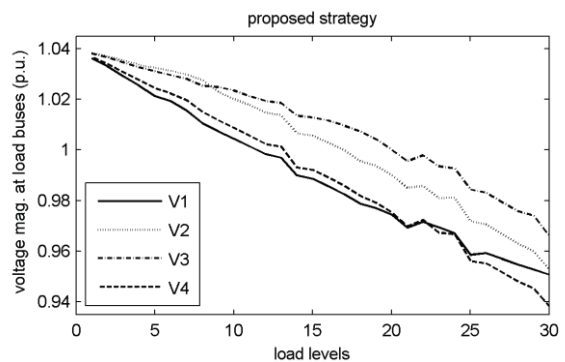
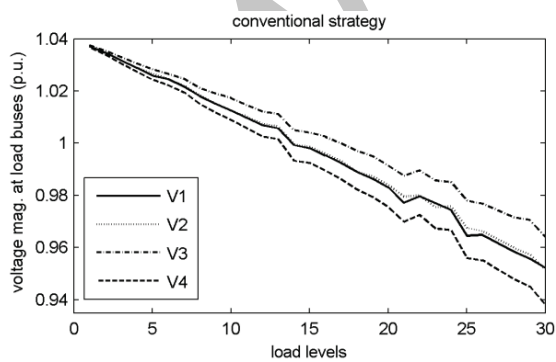
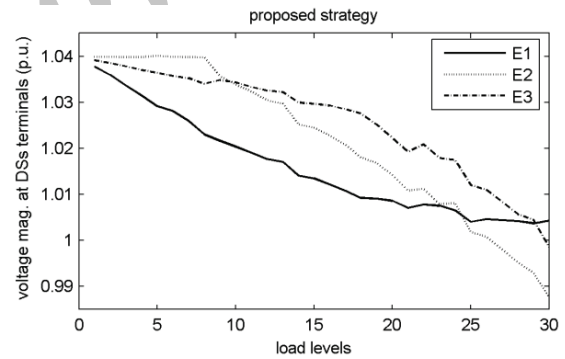
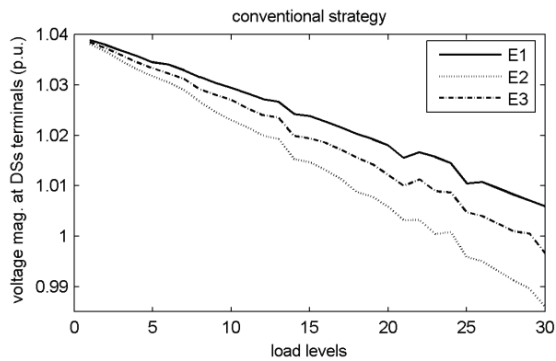
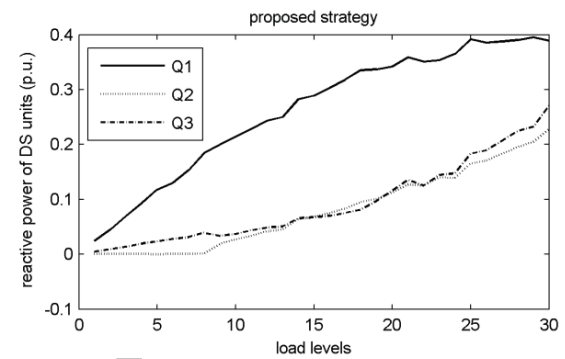
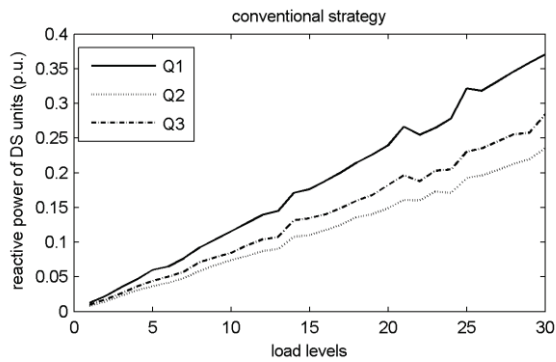
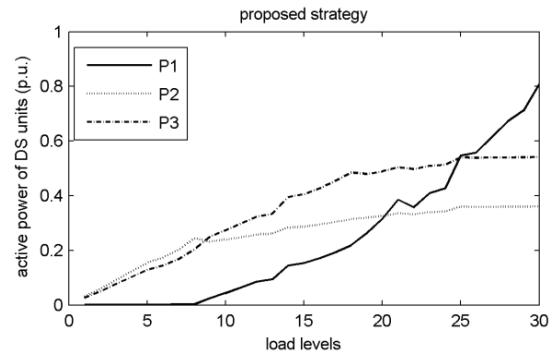
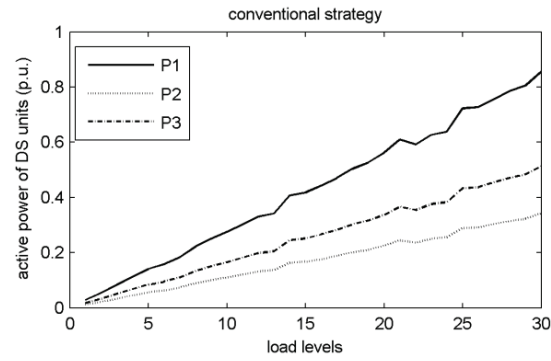
(الف)

شکل (۴): مشخصه‌های فرکانس / ولتاژ برای منابع سیستم الف. مشخصه‌های کنترل فرکانس ب. مشخصه‌های اف‌تی ولتاژ



شکل (۵): تابع هزینه سیستم، در حالت استفاده از مشخصه‌های پیشنهادی و مشخصه‌های اف‌تی معمول با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مدل شبکه

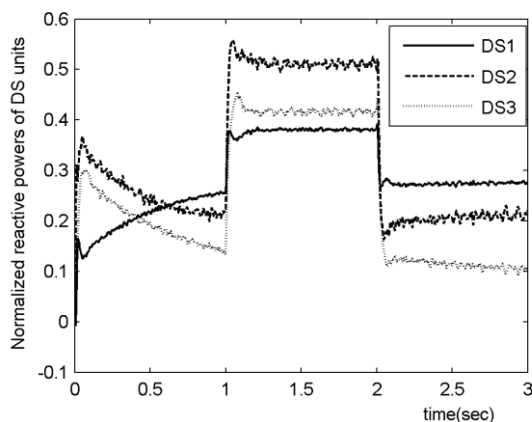
متوسط نسبت به روش اف‌تی معمول کاهش می‌دهند. در بارگذاری بزرگ سیستم همه منابع تقریباً با ظرفیت اسمی خود کار می‌کنند، لذا در هر دو روش اف‌تی معمول و پیشنهادی، مقدار توان تولیدی منابع تقریباً برابر ظرفیت اسمی آن‌هاست؛ بنابراین میزان مصرف سوخت سیستم در بارهای سنگین به ازای هر دو روش یکسان است. اما در بارگذاری‌های متوسط و یا کم سیستم، تولید بیشتر منابع ارزان‌تر و تولید کمتر منابع گران‌تر با استفاده از مشخصه‌های کنترل فرکانس غیرخطی فراهم می‌گردد و مصرف سوخت سیستم کاهش می‌یابد؛ برای نمونه، در این روش به ازای نصف بار نامی، مصرف سوخت سیستم حدود ۱۱ درصد نسبت به روش اف‌تی معمول کاهش می‌یابد.



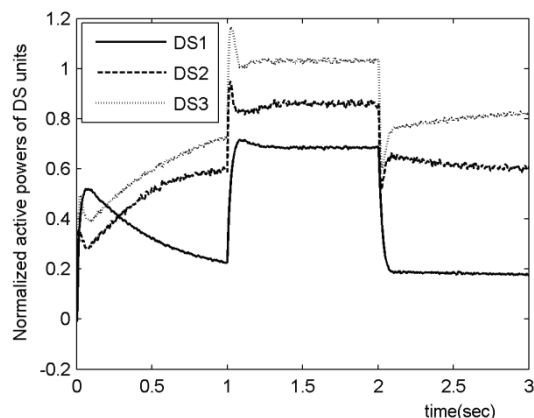
(ب)

(الف)

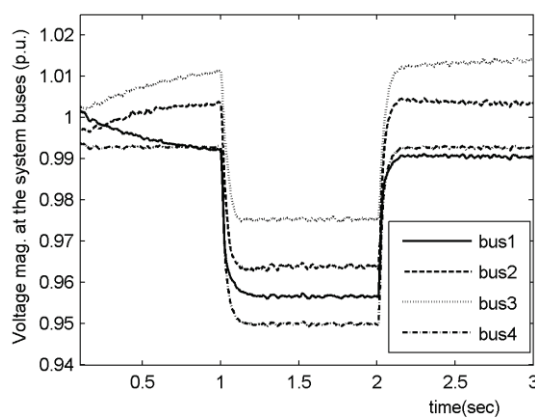
شکل (۶): توان حقیقی و راکتیو منابع، اندازه ولتاژهای در ترمینال منابع، و اندازه ولتاژ در باس بارهای شبکه به ازای سطوح مختلف بارگذاری با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط؛ در حالت استفاده از الف. مشخصه‌های پیشنهادی ب. مشخصه‌های افی معمول



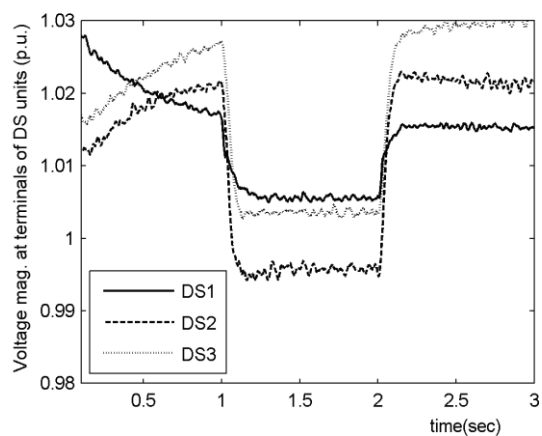
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۷): رفتار گذرای سیستم مورد مطالعه در صورت استفاده از مشخصه های پیشنهادی الف. توان های حقیقی منابع ب. توان های راکتیو منابع ج. اندازه ولتاژ در ترمینال های منابع د. اندازه ولتاژ در باس های بار

## ۷. بررسی رفتار گذرای سیستم مورد مطالعه بر اساس مشخصه های پیشنهادی

برای نشان دادن رفتار گذرای سیستم تغذیه مورد مطالعه بر اساس مشخصه های پیشنهادی، شبیه سازی حوزه زمان برای سیستم شکل (۲) انجام شده است. شکل (۷) توان های حقیقی، توان های راکتیو منابع، اندازه ولتاژ در ترمینال منابع و اندازه ولتاژ در باس بارهای شبکه را نشان می دهد. سیستم با نصف مقادیر بارهای نامی راه اندازی می شود. در زمان یک ثانیه بارهای سیستم به مقادیر نامی تغییر می یابد. در زمان دو ثانیه مجدداً بارهای سیستم به نصف مقادیر نامی تغییر داده می شوند. از این شکل مشاهده می شود که تقاضای توان های حقیقی و راکتیو به نسبت

در شکل (۶) به ازای مشخصه های پیشنهادی و افی معمول، رفتار سیستم از نظر تولید توان های حقیقی و راکتیو منابع، اندازه ولتاژ در ترمینال منابع و اندازه ولتاژ در باس بارهای شبکه نشان داده شده است. همان گونه که از این شکل ها مشاهده می شود، مشخصه های پیشنهادی دارای رفتار مقاوم اند و عدم قطعیت در بارها و امپدانس خطوط، تأثیر نامطلوبی بر عملکرد سیستم از نظر کاهش هزینه سوخت مصرفی ندارد. همچنین منحنی های توان حقیقی و راکتیو منابع و اندازه ولتاژ در ترمینال منابع و باس های شبکه در محدوده مجاز باقی می ماند.



پیشنهادی، دارای ساختار تکه‌ای خطی بین هر دو سطح متوالی بارگذاری می‌باشند. پارامترهای مشخصه‌های پیشنهادی بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی تعیین گردید. در تعیین پارامترهای مشخصه‌های کنترل فرکانس پیشنهادی، عدم قطعیت در بارها و امیدانس خطوط شبکه در نظر گرفته شد تا مشخصه‌های پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت‌های مدل شبکه مقاوم باشند. از طریق نتایج شبیه‌سازی، کارایی مشخصه‌های پیشنهادی هم از نظر کاهش مصرف سوخت اولیه سیستم و هم از نظر مقاوم بودن عملکرد آن نسبت به عدم قطعیت‌های مدل شبکه مشخص گردید و در مقایسه با مشخصه‌های اف‌تی فرکانس/ولتاژ معمول کارایی برتر آن نشان داده شد.

غیرخطی بین منابع تقسیم می‌گردند. اندازه ولتاژ در ترمینال منابع و باس های بار در محدوده مجاز باقی می‌ماند. با توجه به مقادیر کوچک به دست آمده برای ضرایب اف‌تی در بخش‌هایی از مشخصه کنترل فرکانس پیشنهادی برای منابع، و نیز ارتباط مستقیم سرعت پاسخ تقسیم توان بین منابع به شیب مشخصه های اف‌تی فرکانس؛ لذا مشاهده می‌شود که سرعت پاسخ‌گذاری سیستم در حالتی که از مشخصه های فرکانس پیشنهادی استفاده می‌شود کمتر از حالتی است که از مشخصه‌های اف‌تی فرکانس معمول استفاده شده است. برای رفع این اشکال و بهبود رفتار گذرای سیستم می‌توان به مشخصه‌های کنترل فرکانس پیشنهادی، یک ساختار دینامیکی اضافه کرد [۱۹].

## ۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور کاهش مصرف سوخت در یک سیستم تغذیه جریان متناوب مستقل با مدیریت توان محلی، مشخصه‌های غیرخطی فرکانس برای منابع فرمان‌پذیر پیشنهاد گردید. مشخصه‌های

## مراجع

- [1] Faisal A.M., *Micro grid Modelling and Online Management*, Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology, Helsinki University of Technology, 2008.
- [2] Sanseverino E.R., Di Silvestre M.L., Ippolito M.G., De Paola A., Lo Re G., "An execution, monitoring and replanning approach for optimal energy management in microgrids", *Solar Energy*, vol. 36, 2011, pp. 3429-3436.
- [3] Barklund E., Pogaku N., Prodanovic M., Hernandez-Aramburo C., Green Tim C., "Energy Management in Autonomous Micro grid Using Stability-Constrained Droop control of Inverters", *IEEE Trans., On Power Elec.*, Vol. 23, NO. 5, SEP. 2008.
- [4] Pecos Lopes, J. A., Moreira C. L. Madureira A.G., "Defining Control Strategies for Micro Grids Islanded Operation", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 21, No. 2, MAY 2006, pp. 916-924.
- [5] Hernandez-Aramburo C.A., Green T.C., Mugniot N., "Fuel

- Consumption Minimization of a Micro grid"*, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, Vol. 41, No. 3, May/June 2005, pp. 673-681.
- [6] رک رک، اسماعیل، مدیریت توان برای یک ریزشبکه مبتنی بر اینورتر در حالت خودگردان، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [7] Wille-Hausmann B., Erge T., Wittwer C., "Decentralised optimization of cogeneration in virtual power plants", *Solar Energy*, vol. 84, 2010, pp. 604-611.
- [8] Arbolea P., Diaz D., Guerrero J.M., Garcia P., Briz F., Gonzalez-Moran C., Gomez Alexandre J., "An improved control scheme based in droop characteristic for microgrid converters, *Electric power system research*", vol. 80, 2010, pp. 1215-1221.
- [9] Nagaraju Pogaku, Milan Prodanovic, and Timothy C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Micro grid", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, NO. 2, March 2007, pp. 613-624.

- [10] Khadem S.K., Basu M., Conlon M.F., "Parallel operation of inverters and active power filters in distributed generation system-A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, 2011, pp. 5155-5168.
- [11] Ramirez-Rosado J., Domiguez-Navaro J.A., "Possibilistic model based on fuzzy sets for the multi objective optimal planning of electric power distribution networks", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 1801-1810.
- [12] Dimitrovski A. Tomsovic K., "Boundary power flow solutions", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 1, Feb. 2004, pp. 348-355.
- [13] Bijwe P.R., Viswanadha G.K., "Fuzzy Distribution Power Flow for Weakly Meshed Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, November 2006, pp.1645-1652.
- [14] Haghifam M.-R., Falaghi H. Malik O.P., "Risk-based distributed generation placement", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2, No. 2, pp. 252-260, 2008.
- [15] Haupt R.L. Haupt, S.E., *Practical Genetic Algorithms*, New York, Wiley, 2004.
- [16] Obara S., "Power characteristics of a fuel cell micro-grid with wind power generation", Int. J. Energy Res. Vol. 31, 2007, pp. 1064-1075.
- [17] Campanari S., Macchi E., "Technical and Tariff Scenarios Effect on Micro turbine Trigenerative Applications", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 126, JULY 2004, pp. 581-589
- [18] Technical Datasheets for 50REZ, Gas-Based Generator. Kohler Power Systems. [Online] Available:<http://www.kohlersystems.com>
- [19] Mohamed Y., El-Saadany E.F., "Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Micro grids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 6, Nov. 2008, pp. 2806 - 2816

Archive of SID

