

مدل چندهدفه قیمت گذاری تزریق توان راکتیو منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع

مجید حروفیانی^۱، دانشجوی دکترا، علی زنگنه^۲، استادیار، رضا قندهاری^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی-تهران- ایران m.horoufiany@srttu.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی-تهران- ایران a.zanganeh@srttu.edu

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی-تهران- ایران r.gandhari@srttu.edu

چکیده: مدیریت توان راکتیو نقش مهمی در بهره‌برداری سیستم قدرت با هدف کاهش تلفات توان و آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال ایفا می‌نماید. این مسئله انگیزه‌ای را جهت توسعه بازار توان راکتیو منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع به وجود آورده است. در این مقاله ساختاری جهت قیمت گذاری توان راکتیو منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن تابع هزینه تزریق توان راکتیو آن‌ها ارائه می‌شود. برای این منظور منحنی قیمت توان راکتیو منابع تولید پراکنده با استفاده از یک تقریب تکه‌ای، خطی‌سازی شده و به ده ناحیه از پیش تعیین‌شده تفکیک می‌گردد. در روش پیشنهادی، ابتدا منابع تولید پراکنده قیمت خود را برای هر یک از ده ناحیه ارائه نموده و سپس مدیریت شبکه با در نظر گرفتن قیمت خرید توان راکتیو از شبکه انتقال، قیمت یکپارچه‌ای را برای هر کدام از ده ناحیه جذب و تزریق توان راکتیو تعیین می‌نماید. در این مقاله تسویه قیمت بازار توان راکتیو با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGAI) انجام و قیمت تزریق توان راکتیو تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری تزریق توان راکتیو؛ مدل تکه‌ای خطی؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ تسویه بازار توان راکتیو.

A Multi-Objective Reactive Power Pricing Approach of Distributed Generation Units within Distribution Networks

M. Horoufiany, Ph.D. student¹, A. Zangeneh, Assistant Professor², R. Ghandhari, Assistant Professor³

1- Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran m.horoufiany@srttu.edu

2- Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran a.zanganeh@srttu.edu

3- Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran r.gandhari@srttu.edu

Abstract: Reactive power management is a vital part of the power system operation to reduce power losses and to release available capacity of transmission lines. This further motivated the reactive power market development for distributed generation (DG) units at distribution networks. In this study, a mechanism is proposed for reactive power pricing of various DG technologies considering different cost functions of DG units. For this purpose, the reactive power production cost curve of the DG units is linearized using a piecewise linear approximation into 10 predetermined regions. In this approach, at first, DGs offer their prices for each of 10 regions and then an integrated price is determined for each region based on the price of reactive power purchase from transmission network. The market clearing price of reactive power is calculated by a multi-objective optimization algorithm (NSGAI).

Keywords: Reactive power pricing, piecewise linear model, multi objective optimization, market clearing

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۵/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۶/۱۴ و ۹۴/۷/۱۸ و ۹۴/۹/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۶

نام نویسنده مسئول: علی زنگنه

نشانی نویسنده مسئول: ایران-تهران- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

به طور کلی تأمین توان راکتیو در سطح شبکه توزیع به طرق مختلف امکان پذیر است. مقدار مورد نیاز این توان یا از شبکه انتقال و یا از طریق بانک های خازنی موجود در شبکه توزیع دریافت می شود. از سوی دیگر، در شبکه های دارای منابع تولید پراکنده نیز می توان از ظرفیت موجود این منابع جهت تزریق توان راکتیو بهره جست. به طور کلی منبع تولید پراکنده به منبع کوچکی اطلاق می گردد که در نزدیک محل بار نصب می گردد [۱]. توان راکتیو تولیدی توسط منابع تولید پراکنده با توجه به تزریق در نزدیک محل مصرف علاوه بر بهبود ولتاژ، کاهش تلفات توان را نیز به همراه خواهد داشت. بنابراین خرده فروشان شبکه توزیع در جستجوی راهکارهایی برای بهره گیری بیش تر از این ظرفیت ها در شبکه های خود هستند [۲]. با به کارگیری منابع تولید پراکنده جهت تزریق توان راکتیو، بازار خدمات جانبی مرتبط با این منابع اهمیت بیش تری یافته است. مطالعات زیادی در زمینه ظرفیت به کارگیری این منابع در بخش خدمات جانبی انجام پذیرفته که بعضی از آن ها بر روی استفاده از این منابع جهت تأمین توان راکتیو شبکه متمرکز شده اند. در مرجع [۳]، چارچوبی برای به کارگیری خازن ها، تپ چنجرها و منابع تولید پراکنده جهت کنترل ولتاژ به صورت محلی و از راه دور ارائه شده است. مرجع [۴] هماهنگ سازی مناسب این تجهیزات را بررسی نموده است. در [۵]، بررسی استفاده از ظرفیت تزریق توان راکتیو منابع موجود در نیروگاه های بادی که دارای تجهیزات الکترونیک قدرت برای اتصال به شبکه می باشند انجام پذیرفته است.

تاکنون روش های متعددی جهت قیمت گذاری توان راکتیو ارائه شده است. روش ردیابی شارش راکتیو [۶]، روش میانگین نموی [۷] و روش های مبتنی بر تئوری قیمت گذاری حدی [۸-۹] از جمله این روش ها هستند. در [۱۰]، برای قیمت گذاری توان راکتیو از تأثیر آن بر ولتاژ بهره گرفته شده است. بر این اساس بازارهای توان های اکتیو و راکتیو جدا در نظر گرفته شده و تابع هدف ارائه شده جهت حداقل کردن هزینه تأمین توان راکتیو و با حفظ قیود ولتاژ شبکه هست. در [۱۱] نیز قیمت گذاری گره ای توان راکتیو در شبکه ارائه و مزایا و معایب این روش بیان شده است. عیب قیمت گذاری گره ای عدم جبران سازی تمام هزینه های تولید توان راکتیو هست، از سوی دیگر، در مواردی، نوسانات بالای قیمت گذاری در این روش سبب ناپایداری بازار می گردد. در [۱۲] نیز قیمت گذاری توان راکتیو به صورت لحظه ای و با توجه به تعداد منابع توان راکتیو موجود و هزینه تزریق توان راکتیو توسط آن ها در کل شبکه تعیین شده است.

بر اساس دستورالعمل گروه تنظیم انرژی فدرال تنظیم یک قیمت ثابت بابت هزینه تزریق توان راکتیو کافی نبوده و بایستی قیمت توان راکتیو با توجه به ضریب توان ژنراتور تعیین گردد. تاکنون مقالات متعددی راجع به هزینه تولید توان راکتیو [۱۳] به بحث و ارائه نظر پرداخته اند. برخی از مشکلات تعیین هزینه تزریق توان راکتیو عبارت اند از تأثیرپذیری هزینه تولید توان راکتیو از نوع تجهیزات جبران کننده،

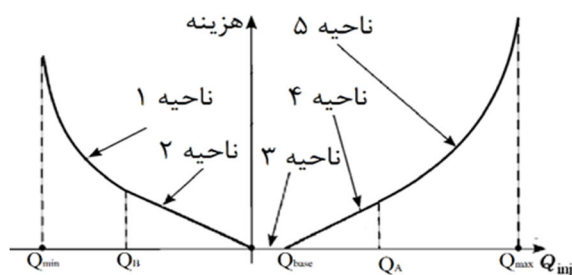
محل قرارگیری تجهیزات و وابستگی ولتاژ به توان راکتیو [۱۴]. از سوی دیگر با توجه به اینکه فاصله محل تولید و مصرف توان راکتیو تأثیر بسیار زیادی بر میزان کیفیت ولتاژ در شبکه می گذارد لذا قیمت های خرید توان راکتیو از تولیدکنندگان آن بهتر است توسط شرکت های توزیع و به صورت محلی تعیین گردد.

یک روش دیگر قیمت گذاری گره ای در [۱۵] بر اساس هزینه از دست دادن فرصت و در دسترس بودن برای منابع ارائه شده که با استفاده از پخش بار بهینه در شرایط عادی و اضطراری قیمت گذاری انجام می پذیرد. پرداخت به منابع در این مقاله نیز با توجه به ضریب در دسترس بودن با استفاده از منحنی غیرخطی تزریق توان راکتیو - هزینه انجام شده است. در [۱۶] برای قیمت گذاری تزریق توان راکتیو در بازارهای رقابتی از منحنی غیرخطی تزریق توان راکتیو - هزینه استفاده شده است. قسمت اول این منحنی به صورت خطی و قسمت دوم به صورت غیرخطی است. علت غیرخطی شدن منحنی کاهش سود منبع به علت کم کردن تولید توان اکتیو به علت تزریق توان راکتیو هست. در این مقاله جهت تعیین قیمت در هر باس از پخش بار بهینه بهبود یافته استفاده شده است.

در [۱۷]، تسویه بازار توان راکتیو به صورت روزانه و به کمک بهینه سازی چندهدفه فازی انجام گرفته است. توابع هدف مورد استفاده در این مقاله مجموع پرداخت به تزریق کنندگان توان راکتیو و میزان تلفات توان هست. بر این اساس قیمت های تزریق توان راکتیو پیشنهادی توسط منابع دو ناحیه خطی و غیرخطی را تشکیل می دهد و در تسویه بازار جهت تعیین قیمت از این منحنی ها استفاده شده است.

یکی دیگر از روش های تعیین قیمت توان راکتیو بر اساس هزینه تولید توان راکتیو در [۱۸] ارائه شده است. در این مقاله جهت تعیین قیمت یکپارچه در کل شبکه از منحنی غیرخطی هزینه - تزریق توان راکتیو بهره گرفته شده و بازار با کمینه کردن چند تابع هدف تسویه شده است. در این مقاله با تکیه بر بیان عدم قطعیت منابع از مدل مارکو و روش مونت کارلو جهت تعیین قیمت یکپارچه تزریق توان راکتیو در شبکه استفاده نموده است.

در روش پیشنهادی این مقاله، امکان قیمت گذاری توان راکتیو تکنولوژی های مختلف تولید پراکنده بر مبنای منحنی های مختلف قیمت - توان راکتیو (به دلیل رفتار متفاوت هزینه جذب یا تزریق توان راکتیو در فن آوری های مختلف تولید پراکنده) میسر هست. از سوی دیگر با توجه به تعدد منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع آینده، وجود مدل های غیرخطی جهت تعیین قیمت تزریق توان راکتیو می تواند سبب پیچیدگی و ازدیاد محاسبات گردد. در این مقاله مدل غیرخطی قیمت گذاری توان راکتیو با استفاده از یک تبدیل سه تکه خطی به مدل خطی تبدیل شده و صاحبان منابع بر اساس این مدل قیمت های خود را پیشنهاد می دهند. برای این منظور منحنی تزریق توان راکتیو به ده ناحیه تقسیم شده و منابع تولید پراکنده موجود در شبکه قیمت های پیشنهادی خود را برای هر کدام از این ده ناحیه به مرکز مدیریت شبکه ارسال می نمایند. تعیین قیمت برای هر کدام از این نواحی با توجه به

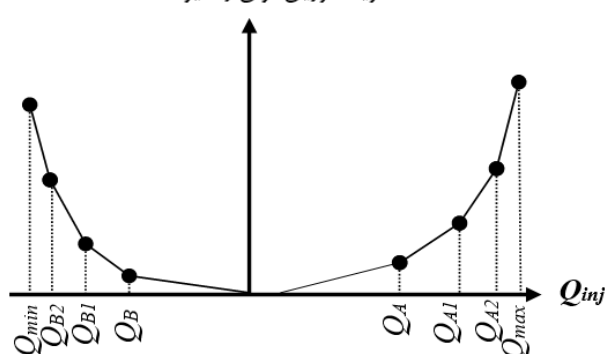


شکل ۱: منحنی افزایش هزینه به ازای تزریق و جذب توان راکتیو توسط منابع [۱۶]

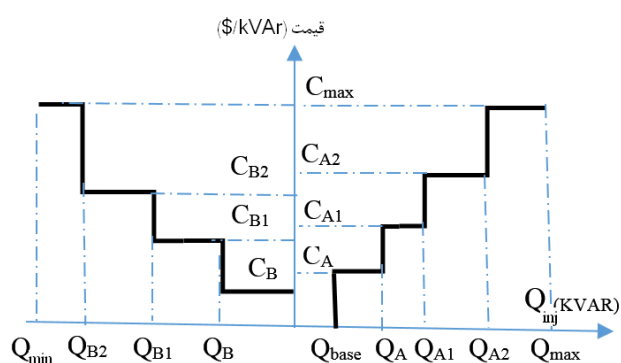
۱-۲- خطی سازی مدل تزریق توان راکتیو

نواحی اول و پنجم تزریق توان راکتیو به صورت یک منحنی درجه دوم بیان شده اند. می توان با یک تقریب خطی سه تکه این ناحیه را مدل سازی نمود. شکل ۲ مدل تکه ای خطی هزینه - تزریق توان راکتیو و شکل ۳ منحنی قیمت فروش توان راکتیو را به ازای تقریب خطی سه تکه ارائه شده نشان می دهد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، قسمت غیرخطی منحنی با سه تکه خطی قابل تقریب هست. با این تقریب قیمت تزریق توان راکتیو در این قسمت ها به صورت خطی در می آید. حال منابع می توانند بر اساس این تقریب قیمت های پیشنهادی خود را برای کار در هر یک از نواحی ارائه نمایند.

هزینه تزریق توان راکتیو



شکل ۲: منحنی تکه ای خطی هزینه - تزریق توان راکتیو



شکل ۳: منحنی قیمت توان راکتیو را به ازای تقریب خطی سه تکه

پیشنهادهای منابع و با در نظر گرفتن هزینه تأمین توان راکتیو مورد نیاز بارها از شبکه انتقال با کمینه سازی توابع هدف انجام می گردد. این خطی سازی ساختار حل مسئله ساده را نموده و سرعت رسیدن به جواب را افزایش می دهد. در این مقاله فرض شده که منابع بزرگ توان راکتیو مانند ژنراتورهای نیروگاهی نیز در بازار توان راکتیو نقش داشته و قیمت توان راکتیو تولید شده توسط آن ها به صورت ثابت از قبل تعیین شده است. پس از آن تسویه بازار بر اساس قیمت های ارائه شده و با در نظر گرفتن قیمت خرید توان راکتیو از شبکه های انتقال انجام پذیرفته و قیمت یکپارچه ای برای تزریق توان راکتیو در سطح شبکه توزیع برای هر کدام از ده ناحیه ارائه می گردد.

بر مبنای تحقیقات انجام شده و نتایج به دست آمده در خاتمه می توان موارد زیر را به عنوان نوآوری های کار ارائه شده ذکر نمود:

- ۱- ارائه مدلی جهت تعیین و تسویه قیمت توان راکتیو منابع تولید پراکنده در بازار خدمات جانبی در سطح خرده فروشی.
- ۲- قابلیت مناسب مدل پیشنهادی تسویه قیمت توان راکتیو در حضور فن آوری های مختلف تولید پراکنده با منحنی های مختلف هزینه - توان راکتیو.
- ۳- ارائه قیمت گذاری یکپارچه تزریق و یا جذب توان راکتیو برای هر یک از نواحی با در نظر گرفتن قیمت خرید توان راکتیو از شبکه انتقال.

۲- هزینه تزریق توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده

بر اساس شکل ۱ هزینه تزریق توان راکتیو توسط یک منبع بر حسب میزان تزریق راکتیو به پنج ناحیه قابل تقسیم است: [۱۶]

نواحی اول و پنجم: در ناحیه اول ($Q_{min} \leq Q_{inj} \leq Q_B$) منبع در حال جذب و در ناحیه پنجم ($Q_A \leq Q_{inj} \leq Q_{max}$) در حال تزریق توان راکتیو است. در این نواحی علاوه بر هزینه ثابت، هزینه بهره برداری شامل هزینه ناشی از افزایش تلفات و هزینه های از دست دادن فرصت تزریق توان اکتیو هست. در این نواحی افزایش تزریق توان راکتیو همراه با کاهش تزریق توان اکتیو منبع هست.

نواحی دوم و چهارم: در ناحیه دوم ($Q_B \leq Q_{inj} \leq 0$) منبع در حال جذب و در ناحیه چهارم ($Q_{base} \leq Q_{inj} \leq Q_A$) در حال تزریق توان راکتیو است. در این نواحی هزینه تزریق توان راکتیو توسط منبع شامل هزینه های ثابت (هزینه سرمایه گذاری) و هزینه بهره برداری است. در این نواحی هزینه بهره برداری فقط شامل هزینه تلفات (ناشی از افزایش جریان منبع) است و تزریق توان راکتیو تأثیری بر تزریق توان اکتیو منبع ندارد.

ناحیه سوم: در این ناحیه منبع در حال تزریق توان با ضریب توانی در حدود ۱ الی ۰/۹۵ است. میزان تزریق توان راکتیو در این حالت بین صفر تا Q_{base} است. در این ضریب توان هیچ هزینه ای به منبع برای تزریق توان راکتیو پرداخت نمی گردد.

$$\text{Min } f_1 = C_{net} Q_{net} + \sum_{i \in DG, j=1}^{10} \eta_{j,i} CQ_{j,i} \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i \in DG} (TP_{DG,i}^{cont} - TP_{DG,i}) \quad (2)$$

$$\text{Min } f_3 = \sum_{k \in L} PL_k \quad (3)$$

$$\text{Min } f_4 = \sum_{n \in N} VHI_n \quad (4)$$

که در این توابع:

$\eta_{j,i}$: بیانگر فعال بودن یا نبودن منبع i ام در قسمت j ام منحنی هزینه است و به صورت صفر و یا یک بیان می گردد.

C_{net} : قیمت فروش توان راکتیو به شرکت توزیع از طریق شبکه انتقال بر حسب دلار بر کیلووات ساعت

Q_{net} : توان راکتیو خریداری شده از شبکه انتقال توسط شرکت توزیع

$TP_{DG,i}^{count}$: توان اکتیو تزریقی قرارداد بسته شده با منبع i ام

$TP_{DG,i}^{(t)}$: توان اکتیو تزریقی توسط منبع i ام

$P_{L,k}$: تلفات خط k ام

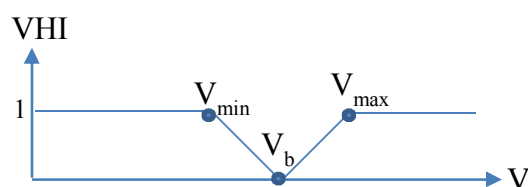
N : تعداد باس های شبکه

L : تعداد خطوط شبکه

VHI_n : انحراف ولتاژ در باس n ام است و بر اساس شکل ۵ با استفاده از رابطه (۵) و (۶) محاسبه می گردد.

$$VHI_n = 1 + \frac{V_n - V_{\min}}{V_{\min} - V_b} \quad V_{\min} \leq V_n \leq V_b \quad (5)$$

$$VHI_n = 1 + \frac{V_n - V_{\max}}{V_{\max} - V_b} \quad V_b \leq V_n \leq V_{\max} \quad (6)$$



شکل ۵: محاسبه VHI و ولتاژ

در رابطه ۱، $CQ_{j,i}$ به ازای نواحی مختلف عبارت است از

$$CQ_{1,i} = C_{max} (|Q_{\min,i} - Q_{B2,i}|) + C_{B2} (|Q_{B2,i} - Q_{B1,i}|) + C_{B1} (|Q_{B1,i} - Q_{B,i}|) + C_B (|Q_{B,i}|) \quad (7)$$

$$CQ_{2,i} = C_{B2} (|Q_{B2,i} - Q_{B1,i}|) + C_{B1} (|Q_{B1,i} - Q_{B,i}|) + C_B (|Q_{B,i}|) \quad (8)$$

$$CQ_{3,i} = C_{B1} (|Q_{B1,i} - Q_{B,i}|) + C_B (|Q_{B,i}|) \quad (9)$$

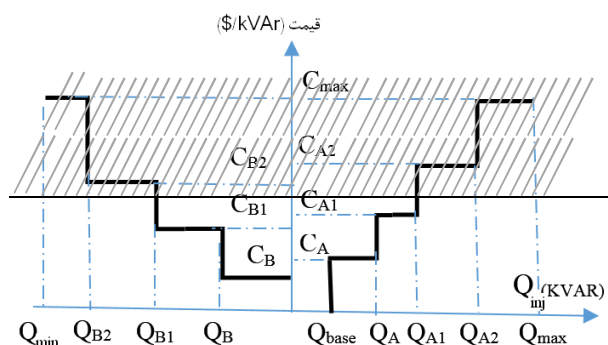
$$CQ_{4,i} = C_B (|Q_{B,i}|) \quad (10)$$

$$CQ_{7,i} = C_A (|Q_{A,i}|) \quad (11)$$

بر اساس شکل ۳، قیمت خرید توان راکتیو از منابع تولید پراکنده مابین هر دو بازه ثابت و برابر C_i هست. به عنوان نمونه در صورتی که منبعی با مشخصه هزینه به ازای تزریق توان راکتیوی مانند شکل ۳ در بازه بین Q_{A1} تا Q_{A2} تزریق توان راکتیو نماید به ازای هر کیلووات توان راکتیو تزریقی C_{A2} دلار به منبع پرداخت می گردد.

۳- تعیین قیمت تزریق توان راکتیو

جهت قیمت گذاری توان راکتیو، ابتدا منابع تولید پراکنده میزان تزریق توان راکتیو خود را به ازای ۸ نقطه کاری $(Q_{\min}, Q_{B2}, Q_{B1}, Q_B, Q_A, Q_{A1}, Q_{A2}, Q_{\max})$ به همراه قیمت های پیشنهادی برای این نقاط $(C_{max}, C_{B2}, C_{B1}, C_B, C_A, C_{A1}, C_{A2})$ را به مرکز مدیریت توزیع ارسال می نمایند. این قیمت ها در هر بازه زمانی (T) که در آن توان راکتیو منابع تغییر نکرده باشد، ثابت می باشند. از سوی دیگر از محل اتصال به شبکه فوق توزیع و یا انتقال نیز شبکه توزیع قادر به دریافت توان راکتیو با قیمت مشخص شده از قبل (C_{net}) هست. قیمت خرید توان راکتیو از شبکه انتقال یا فوق توزیع به عنوان عاملی تأثیرگذار در محاسبات به شمار می رود. بدین معنی که منابعی که قیمتی بیش از قیمت خرید از شبکه انتقال ارائه نمایند در صورتی که محدودیت های شبکه نقض نشوند فرصت تزریق توان راکتیو را از دست خواهند داد. در شکل ۴ با فرض نقض نشدن محدودیت های شبکه قسمت تیره شده قسمتی را نشان می دهد که خرید توان راکتیو در این نواحی از منبع توجیه اقتصادی برای شرکت توزیع ندارد. در ادامه توابع هدف و قیودی که شرکت توزیع با توجه به آن ها اقدام به تسویه بازار می نماید ارائه شده است.



شکل ۴: نمایش ناحیه توجیه پذیر خرید توان راکتیو از منابع (زیر قیمت خرید توان راکتیو)

۳-۱- توابع هدف

برای تعیین قیمت تزریق توان راکتیو توسط منابع، قیمتی که توابع هدف زیر را کمینه نماید به عنوان قیمت تسویه بازار توسط مرکز مدیریت توزیع تعیین می گردد. متغیرهای مسئله در اینجا توان راکتیو دریافتی از منابع تولید پراکنده و شبکه انتقال می باشند. خروجی این بهینه سازی نیز تعیین قیمت تزریق توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده در قسمت های مختلف منحنی هزینه - توان راکتیو هست.

$$Q_{SG} \leq \sqrt{\frac{(V E q)^2 - (X_s P)^2}{X_s}} - \frac{V^2}{X_s} \quad (25)$$

$$Q_{DFIG} \leq \sqrt{\frac{(X_m V \bar{I})^2 - ((X_a + X_m) P)^2}{X_a + X_m}} - \frac{V^2}{X_a + X_m} \quad (26)$$

$$Q_{SG} \geq \frac{P}{\tan(\delta)} - \frac{V^2}{X_s} \quad (27)$$

رابطه (۱۵) برای بیان تعادل بین مجموع توان راکتیو خریداری شده از منابع (Q_{DG}) و شبکه (Q_{net}) با توان راکتیو مصرفی توسط بارها (Q_{load}) بیان شده است. روابط (۱۶) الی (۲۰) برای ایجاد محدودیت و عملکرد صحیح در نواحی کار توان راکتیو به کار می‌روند. روابط (۲۱) و (۲۲) نیز جهت اعمال محدودیت به منظور حفظ ولتاژ و جریان خطوط در محدوده مجاز خود استفاده شده‌اند. شکل ۶ منحنی قابلیت تزریق توان راکتیو را برای ژنراتور سنکرون و DFIG نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۶، رابطه (۲۳) برای تعیین محدودیت‌های جریان آرمیچر در هر دو ژنراتور به کار می‌رود. البته در قسمت ابتدایی ناحیه جذب توان راکتیو در ژنراتور سنکرون از رابطه (۲۴) برای بیان محدودیت جریان آرمیچر استفاده می‌گردد. روابط (۲۵) و (۲۶) به ترتیب برای بیان محدودیت‌های جریان رتور در ژنراتور سنکرون و DFIG و رابطه (۲۷) برای بیان محدودیت زیر تحریک استفاده شده است [۱۹] که در آن‌ها:

$E q$: ماکزیمم ولتاژ داخلی منبع

X_s : راکتانس سنکرون

X_m : راکتانس مغناطیسی DFIG

P : توان اکتیو تولیدی منبع

می‌باشند.

۴- شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی‌ها از شبکه ۳۷ شین شعاعی IEEE استفاده شده است [۲۰]. پیوست ۱ توپولوژی شبکه و مقادیر بارها در شین‌های شبکه را نشان می‌دهد. فرض بر این است که ۵ منبع در باس‌های ۸ (منبع شماره یک)، ۱۷ (منبع شماره دو)، ۲۴ (منبع شماره سه)، ۳۲ (منبع شماره چهار) و ۳۳ (منبع شماره پنج) از شبکه فوق نصب شده‌اند. منبعی که در باس شماره ۱۷ نصب شده است از نوع DFIG و بقیه منابع سنکرون هستند. دو سناریوی مختلف جهت انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

در سناریوی اول توان تولیدی منابع کم‌تر از توان بار و در سناریوی دوم بیش‌تر از بار است. بدین‌منظور در سناریوی اول ظرفیت منابع ۱۰۰ کیلوولت آمپر و در سناریوی دوم ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر هست. این منابع میزان توان اکتیو تزریقی خود را (TP_{DG}^{count}) برای یک بازه ۱۲ ساعته بر اساس جدول شماره ۱ تعیین نموده و به همراه قیمت‌های توان راکتیو تزریقی منابع (جدول ۲) برای مرکز مدیریت توزیع ارسال کرده‌اند.

$$C Q_{8,i} = C_{A1} (|Q_{A1,i} - Q_{A,i}|) + (C_A (|Q_{A,i}|)) \quad (12)$$

$$C Q_{9,i} = C_{A2} (|Q_{A2,i} - Q_{A1,i}|) + C_{A1} (|Q_{A1,i} - Q_{A,i}|) + (C_A (|Q_{A,i}|)) \quad (13)$$

$$C Q_{10,i} = C_{max} (|Q_{max,i} - Q_{A2,i}|) + C_{A2} (|Q_{A2,i} - Q_{A1,i}|) + C_{A1} (|Q_{A1,i} - Q_{A,i}|) + (C_A (|Q_{A,i}|)) \quad (14)$$

توابع هدفی که در روابط (۱) الی (۴) ذکر گردید جهت بهینه‌سازی شرایط شبکه در موارد زیر به کار گرفته شده‌اند.

تابع f_1 : این تابع به منظور حفظ منافع مرکز مدیریت توزیع در نظر گرفته شده است و مجموع هزینه انجام شده توسط شرکت توزیع برای خرید توان راکتیو از منابع تولید پراکنده و شبکه انتقال یا فوق توزیع را نشان می‌دهد.

تابع f_2 : این تابع به منظور حفظ پایداری و فرکانس شبکه اعمال شده و هدف از کاربرد آن حفظ توان اکتیو خروجی منابع تولید پراکنده در مقداری است که با آن‌ها قرارداد بسته شده است. به عبارت دیگر این تابع هدف با حداقل‌سازی تغییر و تخطی از قراردادهای تنظیم‌شده توان اکتیو منابع تولید پراکنده مانع تغییرات وسیع و غیرقابل قبول ضریب قدرت منابع تولید و عملکرد آن‌ها در نواحی مختلف منحنی می‌گردد.

تابع f_3 : میزان تلفات در شبکه را نشان داده و درواقع منافع مرکز مدیریت توزیع را افزایش می‌دهد.

تابع f_4 : انحراف ولتاژ در شبکه را بیان می‌نماید. هدف از کاربرد این تابع بهبود کیفیت ولتاژ شبکه و افزایش کیفیت توان هست.

۳-۲- قیود حل مسئله

قیود مربوط به توابع هدف برای بهینه‌سازی مسئله عبارت‌اند از:

$$Q_{load} = \sum_{i \in DG} (\eta_{1,i} Q_{min,i} + \eta_{2,i} Q_{B2,i} + \eta_{3,i} Q_{B1,i} + \eta_{4,i} C_B + \eta_{6,i} Q_{A,i} + \eta_{7,i} Q_{A1,i} + \eta_{8,i} Q_{A2,i} + \eta_{9,i} Q_{max,i}) + Q_{net} \quad (15)$$

$$Q_{min,i} < Q_i < Q_{max,i} \quad \forall i \in DG \quad (16)$$

$$Q_{B2,i} \leq Q_{max1,i} \ \& \ Q_{A2,i} \leq Q_{max2,i} \quad \forall i \in DG \quad (17)$$

$$Q_{B1,i} \leq Q_{B2,i} \ \& \ Q_{A1,i} \leq Q_{A2,i} \quad \forall i \in DG \quad (18)$$

$$Q_{B,i} \leq Q_{B1,i} \ \& \ Q_{A,i} \leq Q_{A1,i} \quad \forall i \in DG \quad (19)$$

$$\eta_{1,i} + \eta_{2,i} + \eta_{3,i} + \eta_{4,i} + \eta_{6,i} + \eta_{7,i} + \eta_{8,i} + \eta_{9,i} \leq 1 \quad \forall i \in DG \quad (20)$$

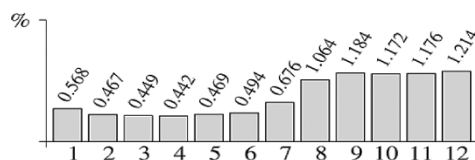
$$V_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$0 \leq I_{L,i} \leq \bar{I}_{L,i} \quad \forall i \in L \quad (22)$$

$$Q_{DG} \leq \sqrt{(V \bar{I})^2 - (P)^2} \quad (23)$$

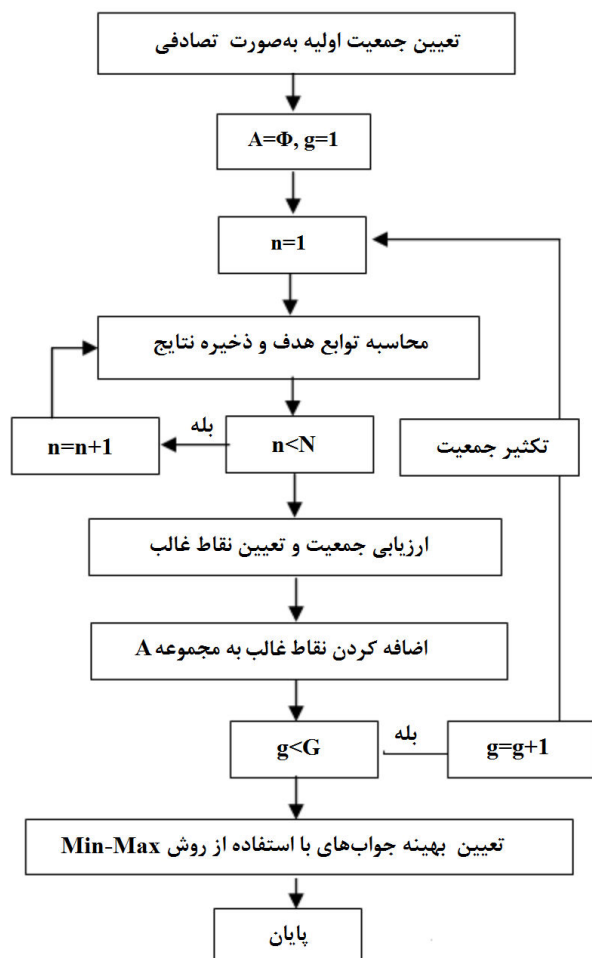
$$Q_{SG} \geq \sqrt{(V \bar{I})^2 - (P)^2} \quad (24)$$

جهت تأمین توان راکتیو موردنیاز بارها، شبکه توزیع قادر است از محل اتصال به شبکه انتقال در باس شماره یک توان راکتیو خریداری نماید. فرض بر این است در طول بازه زمانی آزمایش قیمت خرید توان راکتیو از شبکه انتقال به طور ثابت و با قیمت ۰/۶ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تغییرات میانگین بار را در بازه زمانی آزمایش نشان می دهد.

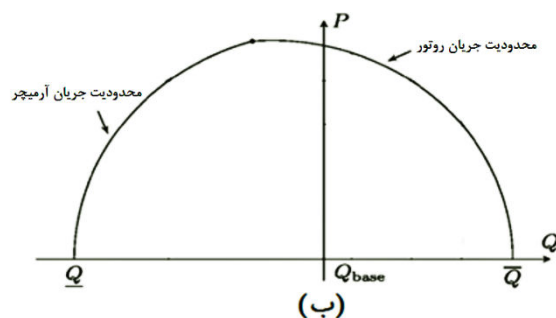
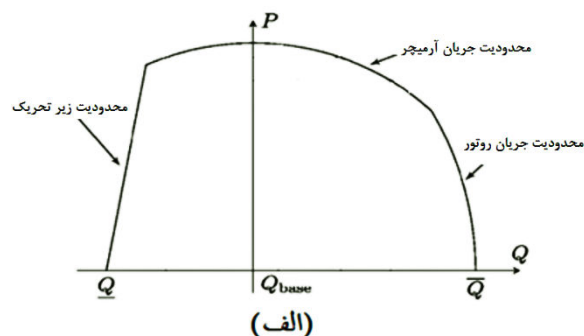


شکل ۷: میانگین تغییرات بار در بازه زمانی آزمایش

برای بهینه سازی چندهدفه از الگوریتم NSGA2 در نرم افزار متلب استفاده شده است. شکل ۸ مراحل بهینه سازی انجام شده با این الگوریتم را نشان می دهد. در این بهینه سازی تعداد جمعیت اولیه (یا N) و تعداد تکرارها (یا G) ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸: الگوریتم NSGA2 استفاده شده جهت بهینه سازی



شکل ۶: منحنی قابلیت تزریق توان راکتیو؛ الف) ژنراتور سنکرون، ب) DFIG

جدول ۱: توان اکتیو قابل تزریق پیش بینی شده توسط منابع

توان اکتیو قابل تزریق پیش بینی شده (KW)					
ساعت	منبع ۱	منبع ۲	منبع ۳	منبع ۴	منبع ۵
۱	۸۰۰	۹۰۰	۵۰۰	۹۰۰	۷۰۰
۲	۹۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۳	۹۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۴	۹۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۵	۹۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۶	۹۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۷	۷۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۸	۷۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۹	۷۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۱۰	۷۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۱۱	۷۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۱۲	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۶۰۰

جدول ۲: قیمت های توان راکتیو پیشنهادی منابع برای نقاط کاری منابع بر

اساس شکل ۴

شماره منبع					قیمت \$/kVarh	
۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۷۵	C_{min}	
۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۷	C_{B2}	
۰/۵	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۸	C_{B1}	
۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۵	C_B	
۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۵	C_A	
۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۸	C_{A1}	
۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۷	C_{A2}	
۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۸۵	C_{max}	

می‌نماید و در ناحیه ششم نیز ضریب توان ۰/۹۵ پیش‌فاز است که در آن پولی به منبع بابت تزریق توان راکتیو پرداخت نمی‌گردد. از سوی دیگر دستور تزریق یا جذب توان راکتیو نیز برای منابع ارسال می‌گردد. در صورتی که برای منبعی دستور عملکرد در ناحیه جذب و یا تزریق صادر شده باشد و از سوی دیگر قیمتی که منبع برای هر یک از نواحی پیشنهاد داده است کمتر از قیمت منبع تعیین‌کننده قیمت (با توجه به جدول ۲) در آن ناحیه باشد منبع اقدام به تزریق و یا جذب توان راکتیو خواهد نمود. جدول ۴ نواحی عملکرد هر یک از منابع را در نواحی مختلف بازه زمانی آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نواحی عملکرد هر یک از منابع در بازه زمانی آزمایش

منبع پنجم	منبع چهارم	منبع سوم	منبع دوم	منبع اول	ساعت
۳	۸	۶	۳	۶	۱
۳	۶	۷	۳	۶	۲
۳	۶	۷	۳	۵	۳
۳	۵	۷	۳	۶	۴
۳	۶	۷	۳	۶	۵
۳	۶	۷	۳	۶	۶
۳	۹	۶	۴	۶	۷
۳	۸	۵	۳	۶	۸
۳	۵	۸	۵	۶	۹
۳	۵	۸	۵	۶	۱۰
۳	۶	۸	۵	۵	۱۱
۴	۴	۹	۶	۵	۱۲

در جدول ۴ (به عنوان نمونه) برای ساعت ۱ منبع اول و سوم بایستی در ناحیه ششم کار کنند، این امر توسط مرکز مدیریت انرژی شبکه به منابع ابلاغ می‌گردد و این منابع فرصت اجازه عملکرد در نواحی دیگر تزریق توان راکتیو را حتی با وجود قیمت های پایین‌تر نخواهند داشت. از سوی دیگر منبع چهارم به عنوان تعیین‌کننده قیمت در ناحیه هشتم انتخاب می‌گردد. منبع دوم و پنجم مجوز عملکرد در ناحیه پس فاز را دارند لذا نیازی به بررسی قیمت‌ها در این ناحیه نبوده و هیچ منبعی غیر از منبع چهارم نمی‌تواند در این ناحیه کار نماید. در ناحیه سوم منبع دوم به عنوان تعیین‌کننده قیمت (۰/۵۴) به شمار می‌رود. از آنجایی که منبع پنجم در این ناحیه قیمتی کمتر (۰/۵) از این مقدار دارد لذا این منبع نیز در این ناحیه عمل می‌نماید. در ساعت ۷ نیز منبع دوم و پنجم مجوز کار در ناحیه پس فاز را دارند. قیمت عملکرد منبع دوم در ناحیه سوم (۰/۵۴) بیش‌تر از قیمت تعیین‌شده شبکه (قیمت پیشنهاد شده توسط منبع سوم ۰/۵۰) هست لذا این منبع در قیمت پیشنهاد داده توسط خودش در ناحیه چهارم که توسط شبکه تأیید شده است عمل می‌نماید.

شکل ۹ توابع هدف به دست آمده توسط مسئله بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد. در این شکل توابع هدف برای ۶ ساعت از بازه زمانی آزمایش که منابع تعیین‌کننده قیمت و توان اکتیو تولیدی توسط منابع تفاوت کرده‌اند نشان داده شده است. در این شکل تلفات و لتاژ و انحراف

متغیرهای مسئله در اینجا توان راکتیو خروجی هر یک از منابع تولید پراکنده است که می‌تواند یکی از مقادیر ۹ گانه نقاط کاری تزریق توان راکتیو در شکل ۳ و یا صفر باشد. از سوی دیگر خروجی مسئله قیمت کاری به ازای ۸ قسمت کاری ارائه شده و تعیین ناحیه عملکرد پیش فاز و یا پس فاز منابع است که با استفاده از الگوریتم NSGA2 برای هر یک از بازه‌های زمانی آزمایش انجام شده و با استفاده از روش Min-Max جواب نهایی از میان مجموعه پارتو برای هر ساعت از بازه زمانی تعیین می‌گردد [۲۱]. به منظور استفاده از روش Min-Max بعد از اجرای شبیه‌سازی و به دست آوردن توابع هدف، اعضای مجموعه پارتو (یا A) انتخاب می‌گردند. سپس هر یک از اعضای مجموعه A نسبت به بیش‌ترین مقدار تابع هدف مربوط به خود نرمالیزه شده و در هر ساعت کم‌ترین تابع هدف از بین چهار تابع هدف مورد محاسبه در هر تکرار انتخاب می‌گردد. در ادامه از بین مقادیر حداقل انتخاب‌شده در هر ساعت مقدار ماکزیمم به عنوان جواب نهایی انتخاب می‌گردد.

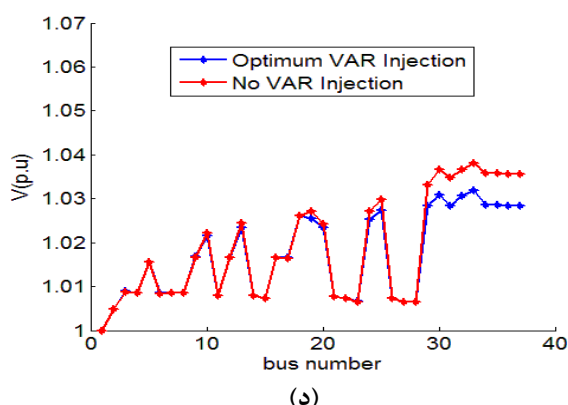
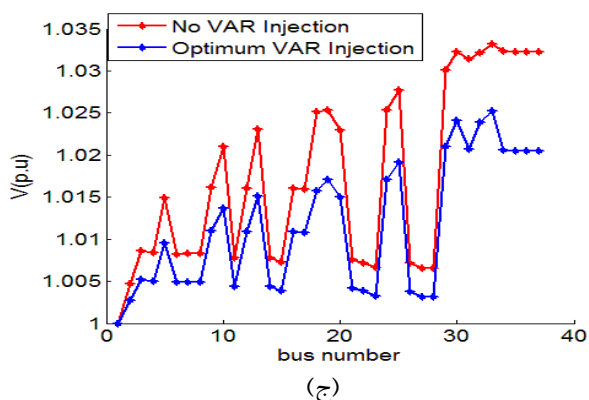
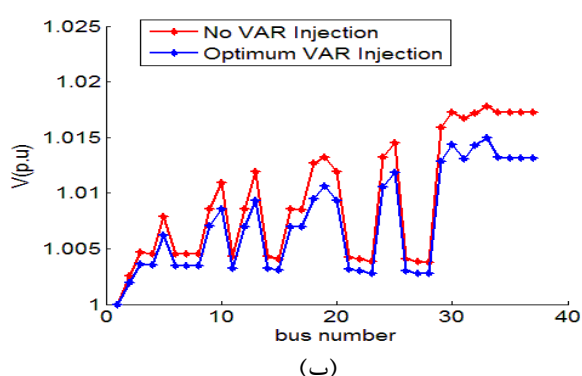
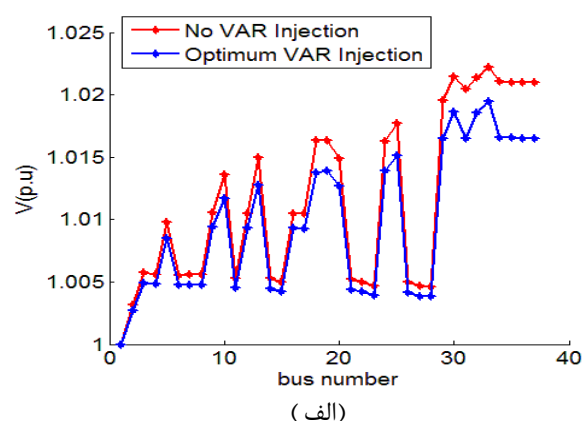
۴-۱- سناریوی اول

در سناریوی اول میزان ظرفیت منابع ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر در نظر گرفته شده است جدول ۳ منبع تعیین‌کننده قیمت در هر ناحیه از منحنی تزریق توان راکتیو را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه در ساعت ۱ پیشنهاد قیمت ارائه شده توسط منبع دوم به عنوان قیمت تعیین‌کننده قیمت در ناحیه سه و پیشنهاد قیمت ارائه شده در ناحیه ۸ توسط منبع چهارم به عنوان قیمت تعیین‌شده شبکه در این ناحیه به شمار می‌رود. با توجه به جدول ۳ نواحی عملکرد هر یک از منابع در بازه‌های زمانی آزمایش تعیین می‌گردد.

جدول ۳: منابع تعیین‌کننده قیمت در نواحی مختلف تزریق توان راکتیو در بازه زمانی آزمایش

منبع تعیین‌کننده قیمت										
	$C_{MAX1}(1)$	$C_{H2}(2)$	$C_{H1}(3)$	$C_{B1}(4)$	$C_{A1}(7)$	$C_{A1}(8)$	$C_{A2}(9)$	$C_{MAX2}(10)$		
۱	۰	۰	DG2	۰	۰	DG4	۰	۰		
۲	۰	۰	DG2	۰	DG3	۰	۰	۰		
۳	۰	۰	DG2	۰	DG3	۰	۰	۰		
۴	۰	۰	DG2	۰	DG3	۰	۰	۰		
۵	۰	۰	DG2	۰	DG3	۰	۰	۰		
۶	۰	۰	DG2	۰	DG3	۰	۰	۰		
۷	۰	۰	DG5	DG2	۰	۰	DG4	۰		
۸	۰	۰	DG2	۰	۰	DG4	۰	۰		
۹	۰	۰	DG5	۰	۰	DG3	۰	۰		
۱۰	۰	۰	DG5	۰	۰	DG3	۰	۰		
۱۱	۰	۰	DG5	۰	۰	DG3	۰	۰		
۱۲	۰	۰	DG4	۰	۰	۰	DG3	۰		

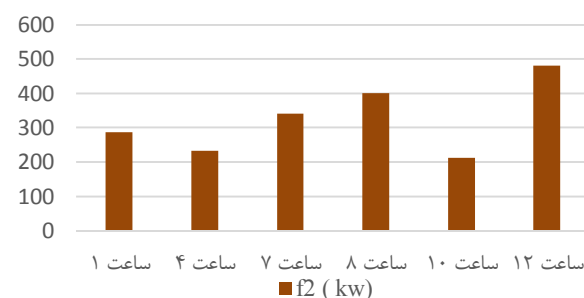
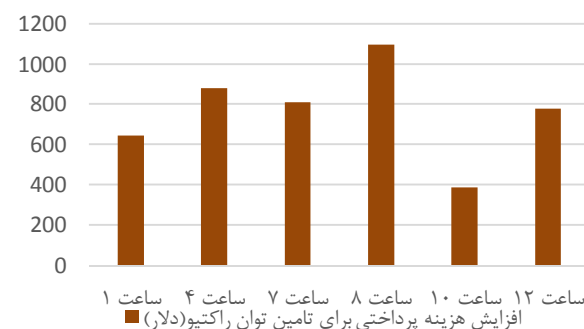
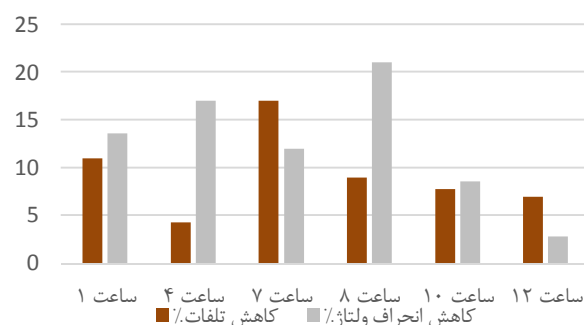
لازم به ذکر است که دستور کارکرد در ناحیه پیش‌فاز و یا پس‌فاز و همچنین عملکرد در نواحی ۵ و ۶ توسط مرکز مدیریت انرژی باید به منابع اعلام گردد. در ناحیه ۵ منبع در حالت ضریب توان واحد عمل



شکل ۱۰: مقایسه ولتاژ شبکه به ازای عملکرد منابع در حالت کار با قیمت یکپارچه نسبت به عدم تزریق توان راکتیو؛ (الف) ساعت ۱، (ب) ساعت ۴، (ج) ساعت ۸، (د) ساعت ۱۲

برای نمایش ارتباط بهبود پروفیل ولتاژ (f_4) و میزان پرداخت به منابع (f_1) مجموعه نقاط این توابع هدف برای یک ساعت (ساعت ۱۲)

ولتاژ برحسب درصد نسبت به حالتی که تمام منابع در ناحیه پنجم کار می‌نمایند نشان داده شده است. میزان هزینه پرداخت شده به منابع جهت تأمین توان راکتیو بر اساس قیمت‌های تصویب شده را نمایش می‌دهد. میزان انحراف توان اکتیو قرارداد بسته شده توسط منبع و شبکه با میزان توان اکتیو تزریقی توسط منابع (f_2) نیز در همین شکل نشان داده شده است.



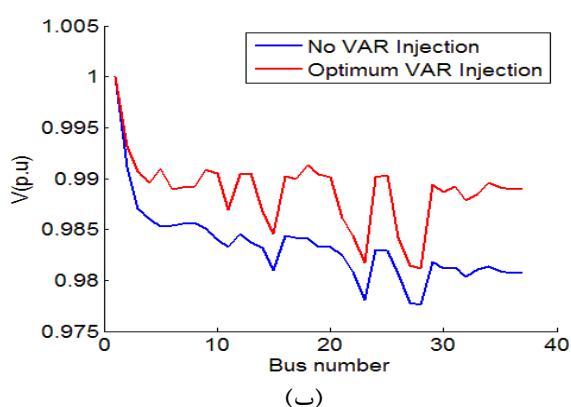
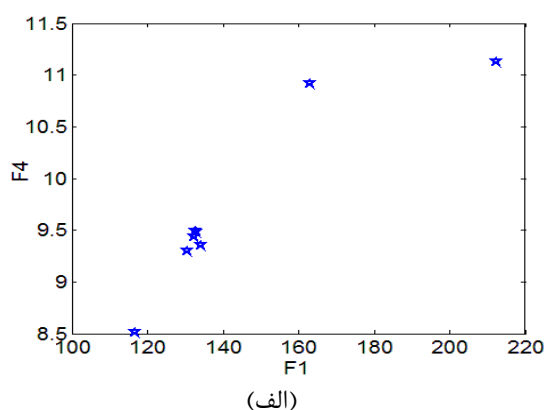
شکل ۹ - مقایسه توابع هدف به ازای عملکرد منابع در حالت کار با قیمت یکپارچه شبکه نسبت به عدم تزریق توان راکتیو

یکی از مهم‌ترین اهداف این بهینه‌سازی بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه است. شکل ۱۰ پروفیل ولتاژ شبکه را برای برخی از بازه‌های زمانی آزمایش نشان می‌دهد. منحنی ارائه شده در این شکل، ولتاژ را در حالتی که منابع در ناحیه ۵ کار می‌نمایند (No VAR Injection) با ناحیه کار بهینه تعیین شده توسط شبکه (Optimum VAR Injection) نشان می‌دهد.

جدول ۶: نواحی عملکرد هر یک از منابع در بازه زمانی آزمایش سناریوی دوم

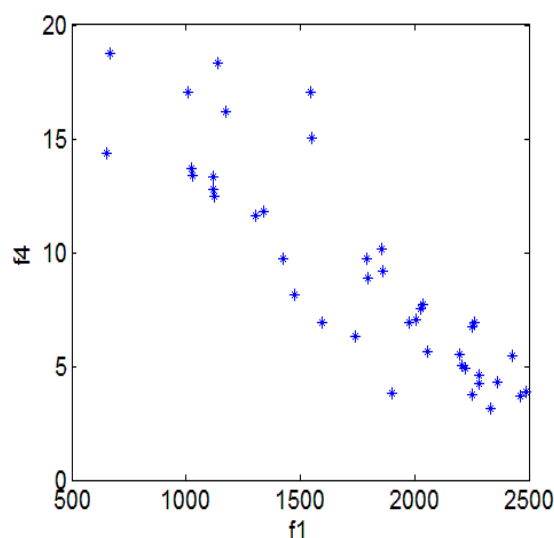
منبع پنجم	منبع چهارم	منبع سوم	منبع دوم	منبع اول	
۶	۷	۷	۷	۷	۱
۶	۷	۷	۶	۷	۲
۶	۷	۷	۷	۷	۳
۶	۷	۶	۷	۷	۴
۶	۷	۷	۷	۷	۵
۶	۶	۷	۷	۷	۶
۶	۷	۶	۷	۷	۷
۶	۷	۶	۷	۶	۸
۶	۷	۷	۷	۶	۹
۶	۵	۷	۸	۷	۱۰
۶	۶	۷	۸	۷	۱۱
۶	۷	۷	۸	۷	۱۲

بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی ها، شکل ۱۲-الف منحنی جواب های دو تابع هدف پرداخت بابت تأمین توان راکتیو و انحراف ولتاژ را (برای ساعت ۱۲) نشان می دهد. شکل ۱۲-ب نیز منحنی ولتاژ شبکه را به ازای حالت عدم تزریق توان راکتیو توسط منابع و حالت تزریق بهینه توان راکتیو در سناریوی دوم برای این ساعت نمایش می دهد.



شکل ۱۲: الف) ارتباط میزان پرداخت بابت تزریق توان راکتیو و انحراف ولتاژ، ب) منحنی ولتاژ شبکه به ازای عملکرد در حالت بهینه و عدم تزریق توان راکتیو توسط منابع برای سناریوی دوم در ساعت ۱۲

در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده افزایش پرداخت به منابع بابت جذب و تزریق توان راکتیو سبب بهبود مشخصه ولتاژ گردیده است. این بهبود به دلیل کاهش تزریق توان اکتیو منابع و همچنین جذب توان راکتیو توسط آن ها هست.



شکل ۱۱: ارتباط کاهش انحراف ولتاژ (V) و میزان پرداختی به منابع بابت جذب و تزریق توان راکتیو (f_1) در سناریوی اول

۴-۲- سناریوی دوم

در این سناریو که برای نمایش جبران افت ولتاژ در شبکه توسط منابع انجام گرفته است ظرفیت منابع ۱۰۰ کیلوولت آمپر در نظر گرفته شده است. در این حالت مجموع توان منابع کم تر از توان مصرفی شبکه توزیع است. جدول ۵ در این حالت منبع تعیین کننده قیمت و جدول ۶ ناحیه عملکرد هر یک از منابع را نمایش می دهد.

جدول ۵: منابع تعیین کننده قیمت در نواحی مختلف تزریق توان راکتیو در بازه زمانی آزمایش در سناریوی دوم

منبع تعیین کننده قیمت	منبع تعیین کننده قیمت							
	$C_{MAX}(1)$	$C_{B2}(2)$	$C_{B1}(3)$	$C_{B4}(4)$	$C_A(7)$	$C_{A1}(8)$	$C_{A2}(9)$	$C_{MAX}(10)$
۱	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰	۰	DG1	۰	۰	۰
۸	۰	۰	۰	۰	DG4	۰	۰	۰
۹	۰	۰	۰	۰	DG4	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰	۰	DG1	DG2	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	DG1	DG2	۰	۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	DG1	DG2	۰	۰

پیوست ۱

دیاگرام تک خط سیستم توزیع نمونه مورد مطالعه به همراه اطلاعات آن به ترتیب در جدول (پ ۱) و شکل (پ ۱) ارائه شده است.

جدول پ ۱: مشخصات شبکه ۳۷ شین [۲۰]

باس فرستنده	باس گیرنده (۱)	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$Pj(Kw)$	$Qj(Kvar)$
۰	۱	۰/۰۷۹۶۲	۰/۰۸۱۷۶	۲۱۰	۱۰۵
۱	۲	۰/۰۵۷۵۵	۰/۰۵۹۸۵	۰	۰
۲	۳	۰/۱۲۰۲۷	۰/۰۳۸۶۷	۰	۰
۲	۵	۰/۰۵۵۸۱	۰/۰۳۱۸۵	۲۸/۳	۱۳/۳
۲	۴	۰/۰۷۹۱۳	۰/۰۸۲۳۱	۰	۰
۴	۸	۰/۰۷۲۲۲	۰/۰۲۳۲۹	۱۴	۷
۴	۹	۰/۰۹۳۰۶	۰/۰۵۳۰۸	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۱۰	۱۳	۰/۰۲۴۰۷	۰/۰۰۷۷۴	۱۲/۶۷	۶
۱۰	۱۴	۰/۱۲۴۰۴	۰/۰۷۰۷۱	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۳	۶	۰/۰۹۶۲۰	۰/۰۳۰۹۷	۳۱	۱۴/۶
۳	۷	۰/۰۷۲۲۲	۰/۰۲۳۲۹	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۲۱	۲۵	۰/۰۸۴۲۴	۰/۰۲۷۰۷	۱۴	۷
۲۲	۲۷	۰/۲۲۸۶۱	۰/۰۷۳۴۵	۱۴	۷
۲۲	۲۶	۰/۰۳۶۱۱	۰/۰۱۱۶۱	۵۳/۶۷	۲۶/۶
۱۸	۲۴	۰/۰۴۹۶۰	۰/۰۲۸۲۵	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۱۸	۲۳	۰/۰۹۶۲۰	۰/۰۳۰۹۷	۱۴	۷
۱۲	۱۷	۰/۰۹۳۰۶	۰/۰۵۳۰۸	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۱۲	۱۸	۰/۰۴۹۶۰	۰/۰۲۸۲۵	۰	۰
۲۹	۳۲	۰/۰۶۰۱۸	۰/۰۱۹۳۹	۷۰/۳۳	۳۴
۲۹	۳۱	۰/۳۸۴۹۱	۰/۱۲۳۷۴	۱۴	۷
۳۴	۳۶	۰/۰۶۲۰۲	۰/۰۳۵۳۵	۱۴	۷
۳۴	۳۵	۰/۰۶۰۱۸	۰/۰۱۹۳۹	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۵	۱۰	۰/۰۸۰۶۴	۰/۰۴۵۹۷	۰	۰
۱۳	۲۰	۰/۱۵۶۳۹	۰/۰۵۰۲۶	۲۸/۳۳	۱۳/۳
۱۴	۲۲	۰/۲۷۶۶۷	۰/۰۸۸۹۳	۰	۰
۱۴	۲۱	۰/۰۹۳۰۶	۰/۰۵۳۰۸	۰	۰
۸	۱۱	۰/۰۴۳۴۰	۰/۰۲۴۷۵	۱۴	۷
۹	۱۲	۰/۰۳۱۰۳	۰/۰۱۷۷۰	۰	۰
۲۴	۲۸	۰/۰۸۶۸۵	۰/۰۴۹۵۳	۱۴	۷
۲۸	۳۰	۰/۰۹۹۲۶	۰/۰۵۶۶۱	۴۶/۶۷	۲۳/۳
۲۸	۲۹	۰/۱۵۶۳۹	۰/۰۵۰۲۷	۰	۰
۳۰	۳۳	۰/۰۶۲۰۲	۰/۰۳۵۳۷	۰	۰
۳۳	۳۴	۰/۰۶۲۰۲	۰/۰۳۵۳۷	۰	۰
۱۱	۱۶	۰/۰۶۰۱۸	۰/۰۱۹۳۴	۴۲	۲۱
۱۱	۱۵	۰/۰۸۴۱۶	۰/۰۲۷۰۵	۱۴	۷
۱۲	۱۹	۰/۰۹۳۰۶	۰/۰۵۳۰۷	۲۸/۳۳	۱۳/۳

همان طور که در شکل ۱۲-الف مشاهده می گردد به دلیل این که قیمت تأمین توان راکتیو از شبکه بالادست به مراتب بیش تر از تأمین توان راکتیو توسط منابع در نظر گرفته شده است لذا کاهش تزریق توان راکتیو توسط منابع سبب افزایش هزینه و در کنار آن افزایش بیش تر انحراف ولتاژ گردیده است.

جدول ۷ نتایج توابع هدف را به ازای استفاده از الگوریتم ارائه شده در این مقاله و مقاله [۱۸] در ساعت ۱۲ از سناریوی دوم نشان می دهد. مقایسه نتایج میان دو حالت تزریق و عدم تزریق توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده صورت پذیرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵ تفکیک منحنی به نواحی مختلف به علت افزایش قدرت نقطه کار منابع توسط مرکز مدیریت انرژی سبب بهتر شدن وضعیت کاهش تلفات و انحراف ولتاژ گردیده است. به عبارت دیگر در مرجع [۱۸] به علت تعیین یک قیمت برای تزریق توان راکتیو توسط منابع ممکن است منبعی که در قیمت پایین تری داده است اما در محل مناسبی قرار ندارد اقدام به تزریق توان راکتیو نماید. اما در این مقاله با تفکیک منحنی تزریق توان راکتیو به ۱۰ ناحیه قیمت ها تنها در هر ناحیه با یکدیگر قیاس می گردند و قدرت مانور مرکز مدیریت انرژی برای تعیین نقطه کار بهینه افزایش یافته است. از سوی دیگر کار در ناحیه ۵ و ۶ به دستور مرکز مدیریت انرژی انجام می گردد و بدین وسیله امکان عدم به کارگیری منابعی که در محل مناسبی قرار ندارند امکان پذیر می گردد.

جدول ۷: مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم ارائه شده در این مقاله با الگوریتم ارائه شده در [۱۸] در حالت تزریق و عدم تزریق توان راکتیو توسط منابع

نتایج حاصله	کاهش تلفات %	هزینه تأمین توان راکتیو (\$)	کاهش انحراف ولتاژ (%)	انحراف تزریق توان راکتیو با مقدار قرارداد بسته شده (kW)
الگوریتم ارائه شده	۴/۹۳	۱۳۳	۹/۴	۲۰
مرجع [۱۸]	۴/۹۸	۱۳۱	۱۰/۱	۱۵

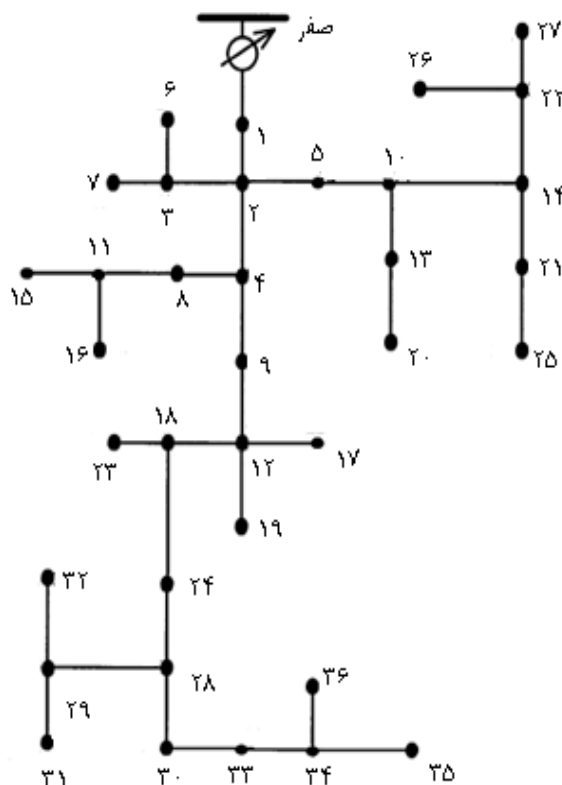
نتیجه گیری

مدیریت ظرفیت آزاد منابع تولید پراکنده جهت تزریق توان راکتیو و قیمت گذاری مناسب این توان در سطح شبکه می تواند بدون ایجاد هزینه های اضافی برای مصرف کنندگان، سبب کاهش هزینه ها برای خرده فروشان انرژی و از سوی دیگر افزایش سود صاحبان منابع شود. این منابع از آنجایی که در محلی نزدیک به بار نصب می گردند فوایدی مانند کاهش تلفات انتقال انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ خطوط را به همراه دارند. بر اساس ساختار بازار توان راکتیو ارائه شده در این مقاله، می توان بدون ایجاد تغییرات زیادی در خروجی توان اکتیو منابع، بازار توان راکتیو را مدیریت نمود. تسویه بازار ارائه شده نیز می تواند بهترین قیمت را برای شبکه به طوری تعیین نماید که سبب کاهش هزینه ها گردد. در نهایت با توجه به مزایای زیاد این منابع در سطح شبکه و نیاز به افزایش تعداد آنها، می توان گفت که گسترش بازارهای توان راکتیو می تواند به عنوان عاملی محرک در جهت افزایش به کارگیری این منابع به کار رود.

- [7] G. M. Huang and H. Zhang, "Pricing of generators reactive power delivery and voltage control in the unbundled environment," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 2121-2126, 2000.
- [8] M. C. Caramanis, R. E. Bohn and F. C. Schweppe, "Optimal Spot Pricing: Practice and Theory," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PAS-101, no. 9, pp. 3234 - 3245, 1982.
- [9] M. L. Baughman, S. N. Siddiqi and J. W. Zarnikau, "Advanced pricing in electrical systems. II. Implications," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 496 - 502, 1977.
- [10] S. W. Jung, S. H. Song, Y. Tae Yoon and S. Moon, "Assessment of reactive power pricing by controlling generators voltage under deregulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, pp. 128-135, 2006.
- [11] J. Zhong and K. Bhattacharya, "Toward a competitive market for reactive power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 1206-1215, 2002.
- [12] Z. Junfang, M. Qinguo and D. Xinzhou, "Real-time pricing of reactive power considering value of reactive power resources," *China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2008)*, pp. 1-6, 2008.
- [13] J. B. Gil, T. G. S. Roman, J. J. A. Rios and P. S. Martin, "Reactive power pricing : A conceptual framework for remuneration and charging procedures," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 483-489, 2000.
- [14] T. J. Miller, *Toward Reactive power in electric systems*, Wiley, NJ, USA, 1982.
- [15] T. Moger and S. Dodjoo, "A Comprehensive Analysis of Reactive Power Pricing in a Competitive Electricity Markets," *IEEE- International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM -2012)*, pp. 472-478, 2012.
- [16] H. Ahmadi and A. Akbari-Foroud, "A stochastic framework for reactive power procurement market, based on nodal price model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 104-113, 2013.
- [17] A. Saini and A. Sara-swat, "Multi-objective day-ahead localized reactive power market clearing model using HFMOEA," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, pp. 376-391, 2013.
- [18] A. C. Rueda-Medina and A. Padilha-Feltrin, "Distributed Generators as Providers of Reactive Power Support—A Market Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp.490-502, 2013.
- [19] N. E. Nilsson and J. Mercurio, "Synchronous generator capability curve testing and evaluation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 414-424, 2002.
- [20] Z. Akhtar, B. Chaudhuri and S. Ron-Hui, "Primary Frequency Control Contribution From Smart Loads Using Reactive Compensation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2356-2365, 2015.
- [21] S. M. R. Rafiei, M. H. Kordi, H. A. Toliyat and M. Barakati, "IEEE-519 based optimal UPQC design under distorted voltages using Pareto based Min-Max constrained multi-objective optimization," *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-7, 2011.

زیرنویس‌ها

¹non-dominated sorting genetic algorithm



شکل پ ۱: شبکه ۳۷ شین استاندارد IEEE [۲۰]

مراجع

- [۱] سعید عباپور، کاظم زارع و بهنام محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲.
- [۲] حسین شکری و سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴.
- [3] F. A. Viawan and D. Karlsson, "Combined local and remote voltage and reactive power control in the presence of induction machine distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp.2003-2012, 2007.
- [4] F. A. Viawan and D. Karlsson, "Voltage and reactive power controlling systems with synchronous machine based distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 1079-1087, 2008.
- [5] N. R. Ullah, K. Bhattacharya, and T. Thiringer, "Wind farms as reactive power ancillary service providers—Technical and economic issues," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 661-672, 2009.
- [6] D. Kirschen, R. Allan, G. Strbac, "Contributions of individual generators to loads and flows," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 52-60, 1997.