

# پخش بار بهینه در شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر قطع بهینه بار و بهبود شاخص پایداری ولتاژ

سهیل درفشی بیگوند و حمدی عبدی

می‌سازد تا بارهای شبکه را به طور پیوسته و خودکار پایش نموده و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را اجرا نماید و نیز مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا جهت بهره‌برداری بهینه از شبکه هوشمند در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شرکت نمایند [۲].

## ۱-۱ پاسخ‌گویی بار

پاسخ‌گویی بار زیرمجموعه‌ای از برنامه‌های مدیریت سمت بار (DSM)<sup>۴</sup> و از عناصر اصلی شبکه هوشمند می‌باشد. این برنامه قادر است ضمن کاهش مصرف انرژی الکتریکی با مشارکت مصرف‌کنندگان در پاسخ به پرداخت‌های تشویقی<sup>۵</sup> (هنگام کاهش سطح ذخیره سیستم، کاهش قابلیت اطمینان شبکه و در ساعات پیک بار) یا تغییر در قیمت برق در بازار (زمانی که قیمت برق در بازار عمده‌فروشی<sup>۶</sup> بالا می‌باشد)، الگوی مصرف انرژی الکتریکی مشترکین را نیز اصلاح نماید [۳].

از مهم‌ترین مزایای اجرای پاسخ‌گویی بار در شبکه هوشمند می‌توان به اصلاح (کاهش) مصرف انرژی الکتریکی توسط مشترکین، کاهش قیمت برق در بازار، کاهش تعداد و ساعات خاموشی‌ها، افزایش سطح ذخیره سیستم، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، کاهش پیک بار، انتقال بار از ساعات پیک بار به ساعات کم‌باری، افزایش مصرف انرژی الکتریکی در ساعات کم‌باری، قطع بار در زمان مورد نیاز و ... اشاره کرد [۳] تا [۷].

زیرساخت‌های ارتباطی در شبکه هوشمند، بستری را فراهم می‌آورند تا مصرف‌کنندگان به صورت خودکار در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شرکت نمایند [۸] و [۹]. پاسخ‌گویی بار خودکار با سیستم مدیریت و کنترل انرژی و کنترل‌کننده‌های تجهیزات مصرف‌کنندگان به طور مستقیم در ارتباط بوده و مصرف‌کنندگان با سیستم کنترل بار خودکار (ALCS)<sup>۷</sup> نظیر سیستم مدیریت انرژی (EMS)<sup>۸</sup> را قادر می‌سازد تا در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شرکت نمایند. سیستم‌های کنترل بار خودکار چنان انعطاف‌پذیر هستند که به مشارکت‌کنندگان در پاسخ‌گویی بار اجازه می‌دهند که سطح مشارکتشان را در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انتخاب نموده و به طور خودکار با پاسخ‌گویی به سیگنال قیمت یا حوادث در رویدادهای پاسخ‌گویی بار شرکت نمایند.

کنترل مستقیم بار (DLC)<sup>۹</sup> زیرمجموعه‌ای از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق است [۵] و [۷]. این برنامه به شرکت‌های برق و بهره‌بردار شبکه امکان کنترل تجهیزات الکتریکی مصرف‌کنندگان را زمانی که بارهای قابل تنظیم<sup>۱۰</sup> و

چکیده: شبکه هوشمند حاصل فعال‌شدن مصرف‌کنندگان در سیستم قدرت و ایفای نقش آنها در زمینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت است. زیرساخت‌های ارتباطی، کنترلی و اندازه‌گیری به عنوان پل ارتباطی هوشمند، ارتباط دوسویه‌ای را بین مصرف‌کنندگان و شبکه قدرت برقرار نموده و زمینه را برای اجرای مؤثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار همانند کنترل مستقیم بار فراهم می‌کنند. در این مقاله پخش بار بهینه به عنوان یک مبحث مطالعاتی مهم در سیستم‌های قدرت مبتنی بر کنترل مستقیم بار و یک شاخص پایداری ولتاژ جدید ارائه شده است. سادگی انجام محاسبات، وابستگی به ولتاژ، عدم وابستگی مستقیم به بار و همبندی شبکه و نیز عدم نیاز به کاهش شبکه به فرم دو شین معادل، شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی را برای محاسبات بی‌درنگ با وجود تغییر الگوی بار مناسب ساخته است. در روش ارائه‌شده، قطع بهینه بار در تعدادی از بارهای انتخابی شبکه با هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی روی یک شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه به عنوان یک شبکه هوشمند جهت تشخیص مؤثر بودن آن اعمال شده است.

کلیدواژه: پخش بار بهینه، شاخص پایداری ولتاژ، شبکه هوشمند، قطع بار، کنترل مستقیم بار، ناپایداری ولتاژ.

## ۱- مقدمه

شبکه هوشمند یک شبکه الکتریکی است که عناصر مختلف مانند زیرساخت‌های کنترلی، ارتباطی و اندازه‌گیری، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار<sup>۱</sup> (DR)، منابع تولید پراکنده، تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی و ... قابلیت‌های فراوانی به آن اضافه نموده و آن را قادر ساخته تا موازی با سیستم گسترده قدرت یا به صورت یک سیستم مجزا بهره‌برداری شود [۱]. به کارگیری فناوری‌های دیجیتال (فناوری ارتباطات و فناوری اطلاعات) در شبکه هوشمند، امکان بهره‌برداری مؤثر از منابع سیستم قدرت، بهبود کارایی و امکان مشارکت مصرف‌کنندگان (فعال بودن مشترکین) را فراهم می‌آورد. این سیستم به عنوان یک پل ارتباطی برای زیرساخت‌های کنترلی و اندازه‌گیری در شبکه هوشمند، امکان ایجاد ارتباط هوشمند و دوطرفه را بین شرکت‌های برق و مشترکین فراهم می‌آورد. زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته<sup>۲</sup> (AMI)، بهره‌بردار شبکه توزیع<sup>۳</sup> (DNO) و شرکت برق را قادر

این مقاله در تاریخ ۳ خرداد ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۸ تیر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

سهیل درفشی بیگوند، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، (email: soheil3240@yahoo.com).

حمدی عبدی، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، (email: hamdiabdi@razi.ac.ir).

4. Demand-Side Management

5. Incentive Payments

6. Wholesale Market

7. Automated Load Control System

8. Energy Management System

9. Direct Load Control

10. Adjustable Loads

1. Demand Response

2. Advanced Metering Infrastructure

3. Distributed Network Operator

پایداری ولتاژ ندارند. مرجع [۲۰] نیز صرفاً قطع بار<sup>۱۳</sup> را با هدف کاهش نامتعادلی در شبکه توزیع انجام داده است.

### ۳-۱ پایداری ولتاژ

پایداری ولتاژ یکی از مهم‌ترین مسایل سیستم قدرت می‌باشد که لازم است در بهره‌برداری به آن دقت شود. ناپایداری ولتاژ می‌تواند ناشی از عدم تزریق توان راکتیو تحت بارگذاری شدید یا کاهش قابلیت انتقال شبکه به علت یک اغتشاش باشد [۲۱]. مرجع [۲۱] پایداری ولتاژ را به صورت توانایی یک سیستم قدرت به منظور حفظ ولتاژ مانای قابل قبول در همه شین‌های سیستم در شرایط بهره‌برداری عادی و پس از وقوع یک اغتشاش تعریف نموده است. هنگامی که یک اغتشاش سبب کاهش پیش‌رونده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد، سیستم قدرت وارد حالت ناپایداری ولتاژ شده و پدیده فروپاشی ولتاژ رخ می‌دهد [۲۲] و [۲۳]. راه حل سنتی بررسی پایداری ولتاژ، تعیین حساسیت ولتاژ-توان راکتیو بار است که اگر برای هر شین مثبت باشد، سیستم از نظر ولتاژ پایدار است و اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود، سیستم ناپایدار خواهد بود. بهره‌بردار سیستم چگونگی نزدیکی سیستم به فروپاشی ولتاژ را به کمک شاخص پایداری ولتاژ پایش نموده تا در زمان مورد نیاز برنامه اقدامات اصلاحی را به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ و افزایش حاشیه پایداری اتخاذ نماید [۲۴]. این شاخص یک حل عددی است که هدف از آن تعیین فاصله نقطه کاری سیستم از نقطه پایداری حاشیه‌ای و تعیین ضعیف‌ترین شین سیستم از نقطه نظر پایداری ولتاژ است؛ چرا که فروپاشی ولتاژ از ضعیف‌ترین شین سیستم به لحاظ پایداری ولتاژ شروع خواهد شد [۲۴].

مرجع [۲۵] شاخص پایداری شین را با محاسبه اندازه نسبت امپدانس معادل تونن به امپدانس بار در یک شین داده شده، تعیین کرده است. در این روش، زمانی که مقدار هر شاخص شین به عدد یک برسد حد پایداری بحرانی رخ خواهد داد. مرجع [۲۶] با محاسبه حداقل مقدار تکین، شاخص مشابهی پیشنهاد کرده است. مرجع [۲۷] نیز با بهره‌گیری از ماتریس ادمیتانس شین، خط انتقال توان و ولتاژ شین‌ها، شاخص پایداری ولتاژ را توسعه داده است. با این حال روش پیشنهادی در [۲۶] و [۲۷] عموماً برای سیستم‌های انتقال مناسب بوده و مستلزم محاسبه ماتریس ژاکوبین [۲۶] و ماتریس ادمیتانس شین [۲۷] می‌باشد که ممکن است تکین بوده یا برای سیستم‌های توزیع شعاعی در دسترس نباشد. علاوه بر این، شاخص معرفی شده در [۲۵] مستلزم تعیین ماتریس امپدانس شین بوده که ممکن است در شبکه‌های توزیع شعاعی به علت تکین بودن ماتریس ادمیتانس شین، قابل محاسبه نباشد.

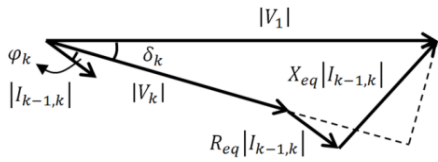
در شبکه‌های توزیع شعاعی، به علت نسبت بالای  $R/X$ ، تلفات توان بیشتر می‌باشد که ممکن است مسئله ناپایداری ولتاژ در این سیستم‌ها جدی‌تر باشد [۲۲] تا [۲۴] و [۲۸]. مرجع [۲۹] شاخص پایداری ولتاژ را با فرمول‌بندی توان اکتیو و راکتیو انتقالی خط توزیع کاهش یافته بدون ولتاژ ابتدا و انتهای خط، توسعه داده است. شاخص پایداری ولتاژ معرفی شده در [۳۰] با معادل‌سازی شبکه توزیع به صورت دوشینه و محاسبه ماتریس ژاکوبین سیستم کاهش یافته، به دست آمده است. شاخص پایداری شین/خط از حل معادلات توان راکتیو انتهای خط [۳۱] و معادلات توان اکتیو انتهای خط [۲۸] در شبکه کاهش یافته دوشینه، پیشنهاد شده است. اما [۳۲] با استفاده از معادلات توان اکتیو و راکتیو انتقالی در خطوط توزیع،

بارهای قابل قطع<sup>۱</sup> تحت کنترل توزیع‌کننده سیستم<sup>۲</sup> از طریق سیستم کنترل بار است، می‌دهد. بنابراین مشارکت مصرف‌کنندگان در این برنامه علاوه بر این که پرداخت‌های تشویقی را برای آنها در پی دارد، اجازه کنترل مصرف الکتریکی آنها را به بهره‌بردار شبکه و شرکت برق می‌دهد تا در زمان لزوم، تجهیزات مشترکین تنظیم یا قطع گردد [۱۰]. این قطع بار به عنوان ذخیره چرخان سیستم لحاظ شده که بهره‌بردار مستقل سیستم<sup>۳</sup> (ISO) آنها را شناسایی و نظیر ظرفیت نصب‌شده تولید در نظر می‌گیرد. بدیهی است که پاسخ‌گویی بار خودکار بستر مناسبی برای اجرای برنامه‌های کنترل مستقیم بار است [۸] و [۹].

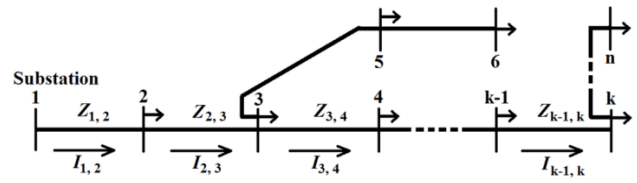
### ۲-۱ پخش بار بهینه

پخش بار بهینه<sup>۴</sup> (OPF) به عنوان یکی از اساسی‌ترین مطالعات بهره‌برداری و حتی برنامه‌ریزی در سیستم‌های قدرت، متشکل از مجموعه توابع هدف همراه مجموعه قیود برابری و نابرابری، نقطه کار بهینه سیستم را تعیین می‌کند. این مقوله با ظهور شبکه‌های هوشمند، تغییراتی را از نقطه نظر تابع هدف، قیود و روش‌های حل مسئله به سبب وجود زیرساخت‌ها، عناصر و شرایط بهره‌برداری مختلف تجربه کرده است [۱۱]. مرجع [۱۲] با به کارگیری واحدهای پردازشگر<sup>۵</sup> (PU) موجود در هر شین شبکه هوشمند، مسئله پخش بار بهینه را به تعداد شین‌های سیستم تجزیه کرده و پخش بار بهینه توزیع‌شده و موازی<sup>۶</sup> (DPOPF) را پیشنهاد پیشنهاد داده است. در این مرجع به منظور مقابله با چالش همگام‌سازی محاسباتی به ازای داده‌های ناهمزمان، مدل پتری نت<sup>۷</sup> (PN) ارائه شده است. در [۱۳] با پوشش حوزه زمان و حوزه شبکه به تجمیع تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی در ریزشبکه پرداخته شده است. تحلیل کامل شبکه هوشمند نامتعادل در [۱۴] گزارش شده است. مرجع [۱۵] با تقریب بارها به صورت امپدانس و خطی‌سازی ریزشبکه هوشمند و نیز استفاده از روش برنامه‌نویسی نیمه‌معین<sup>۸</sup> (SDP)، یک مسئله پخش بار بهینه محدب و نیمه‌معین را برای سیستم قدرت متعادل بررسی کرده است. پخش بار بهینه سه‌فاز نامتعادل با استفاده از روش شبه‌نیوتنی<sup>۹</sup> و تحلیل یک سیستم خطی در هر تکرار در [۱۶] پیشنهاد شده است. مرجع [۱۷] شبکه توزیع را به صورت نامتعادل مدل نموده و پخش بار بهینه توزیع را با تبدیل مسئله<sup>۱۰</sup> MINLP به<sup>۱۱</sup> NLP و پیشنهاد یک فضای جستجو معرفی کرده است. مرجع [۱۸] روش برنامه‌نویسی نیمه‌معین را به شبکه‌های قدرت نامتعادل توسعه داده است. مرجع [۱۹] بهینه‌سازی روز آتی را با هدف کمینه‌سازی هزینه ذخیره علاوه بر هزینه تولید توان مبتنی بر تابع لاگرانژ انجام داده است. مراجع [۱۲] تا [۱۹] روش‌های گوناگونی به منظور حل مسئله پخش بار بهینه پیشنهاد داده‌اند که عمدتاً سمت شبکه را تحلیل کرده‌اند و توجهی به بار و شین‌های سیستم به لحاظ

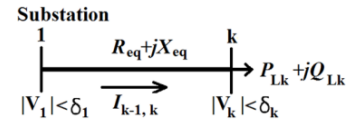
1. Shedable Loads
2. System Dispatcher
3. Independent System Operator
4. Optimal Power Flow
5. Processing Unit
6. Distributed and Parallel OPF
7. Petri Net
8. Semidefinite Programming
9. Quasi-Newton
10. Mixed Integer Nonlinear Programming
11. Nonlinear Programming



شکل ۳: روابط برداری سیستم دوشینه شکل ۲.



شکل ۱: شبکه n شینه شعاعی توزیع.



شکل ۲: سیستم دوشینه معادل.

ساختار مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی برای شبکه‌های توزیع شعاعی معرفی و مزایای آن تشریح خواهد شد. در بخش سوم تابع هدف و قیود حاکم بر پخش بار بهینه فرمول‌بندی می‌شود. بخش چهارم نیز به تحلیل اجرای روش پیشنهادی بر شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه اختصاص داده شده است. این بخش از دو زیربخش با اهداف انتخاب بارهای شرکت‌کننده در کنترل مستقیم بار و انجام پخش بار بهینه تشکیل شده و در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۲- شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی

در این مقاله شاخص پایداری ولتاژ معرفی شده مبتنی بر شاخص پیشنهادی [۳۳] می‌باشد. مرجع [۳۳] با معادل‌سازی شبکه توزیع n شینه شکل ۱ به فرم معادل دوشینه شکل ۲، شاخص پایداری ولتاژ k امین شین سیستم را به صورت (۱) استخراج کرده است

$$SI_k = |V_k|^2 - \varphi |V_1|^2 (R_{eq} P_{Lk} + X_{eq} Q_{Lk}) - \varphi (X_{eq} P_{Lk} - R_{eq} Q_{Lk})^2 \quad (1)$$

|V<sub>۱</sub>| اندازه ولتاژ شین پست است و R<sub>eq</sub> و X<sub>eq</sub> به ترتیب مقاومت و راکتانس خط معادل می‌باشند که از طریق (۲) محاسبه می‌گردند. P<sub>Lk</sub> و Q<sub>Lk</sub> نیز به ترتیب تقاضای توان اکتیو و راکتیو در شین k ام شبکه کاهش نیافته شکل ۱ هستند که به صورت (۳) محاسبه می‌گردند

$$R_{eq} + jX_{eq} = \frac{\sum_{i=2}^k (R_{i-1,i} + jX_{i-1,i}) I_{i-1,i}}{I_{k-1,k}} \quad (2)$$

$$P_{Lk} + jQ_{Lk} = |V_k| |I_{k-1,k}| (\cos \varphi_k + j \sin \varphi_k) \quad (3)$$

که عمل جمع روی مسیر شین پست تا شین k ام، I<sub>k-1,k</sub> بیانگر جریان از شین k-۱ به شین k، |V<sub>k</sub>| اندازه ولتاژ شین k ام و φ<sub>k</sub> اختلاف زاویه بین ولتاژ و جریان تقاضای بار در شین k ام است.

فرض شده که شین ۱، شین پست و به عنوان شین مرجع بوده و δ<sub>۱</sub> = ۰ باشد. روابط برداری ولتاژ شکل ۲ به صورت (۴) و (۵) مستخرج از شکل ۳ می‌باشند

$$|V_1| \cos \delta_k - |V_k| = R_{eq} |I_{k-1,k}| \cos \varphi_k + X_{eq} |I_{k-1,k}| \sin \varphi_k \quad (4)$$

$$|V_1| \sin \delta_k = X_{eq} |I_{k-1,k}| \cos \varphi_k - R_{eq} |I_{k-1,k}| \sin \varphi_k \quad (5)$$

که δ<sub>k</sub> زاویه ولتاژ شین k ام است. روابط (۴) و (۵) را می‌توان با ضرب طرفین آن در |V<sub>k</sub>| به ترتیب به صورت (۶) و (۷) بازنویسی نمود

$$R_{eq} P_{Lk} + X_{eq} Q_{Lk} = |V_k| \Delta V \quad (6)$$

$$X_{eq} P_{Lk} - R_{eq} Q_{Lk} = |V_1| |V_k| \sin \delta_k \quad (7)$$

که در آن ΔV = |V<sub>۱</sub>| cos δ<sub>k</sub> - |V<sub>k</sub>| می‌باشد. بنابراین (۱) را می‌توان به صورت (۸) بازنویسی کرد

$$SI_k = |V_k|^2 - \varphi |V_1|^2 (|V_k| \Delta V) - \varphi (|V_1| |V_k| \sin \delta_k)^2 \quad (8)$$

شاخص پایداری ولتاژ سیستم دوشینه معادل را توسعه داده است. مرجع [۲۴] نیز تحلیل شاخص پایداری دو شین معادل را با حضور منابع تولید پراکنده انجام داده است. بنابراین این شاخص‌ها تنها زمانی معتبر هستند که معادل تک خط شبکه توزیع در نقاط کاری قابل دستیابی باشد [۳۲]. روش‌های پیشنهادی در [۲۸] تا [۳۲] مستلزم عملیات محاسباتی اضافی مانند کاهش شبکه توزیع به دو شین معادل علاوه بر محاسبات پخش بار هستند. همچنین روش‌های پیشنهادی در [۲۹] و [۳۰] اجازه تغییر الگوی بار شین‌های مختلف سیستم که بیشترین تأثیر را بر نقطه فروپاشی ولتاژ دارد، نمی‌دهند. شاخص پایداری معرفی شده در [۳۳] مبتنی بر معادله شبه درجه دوم<sup>۱</sup> وابسته به اندازه ولتاژ ابتدا و انتهای خط معادل و توان انتهایی خط می‌باشد. در این روش نقطه بحرانی زمانی که شاخص پایداری صفر باشد، تعیین می‌گردد. به طور مشابه، شاخص پایداری شین در [۳۴] توسعه داده شده که از معادلات ولتاژ شین انتهایی خط مبتنی بر قانون ولتاژ کیرشهف در قسمتی از خط استفاده کرده است.

## ۱-۴ بیان نوآوری و ساختار مقاله

در این مقاله پخش بار بهینه در شبکه هوشمند مبتنی بر قطع بهینه بار در چند شین سیستم به منظور افزایش شاخص پایداری ولتاژ در زمان پیک بار پیشنهاد شده است. همچنین شاخص پایداری ولتاژ جدیدی که مبتنی بر توسعه شاخص پیشنهادی [۳۳] می‌باشد، معرفی شده است. از مهم‌ترین مزایای این شاخص می‌توان به مناسب بودن آن برای محاسبات به هنگام، وابستگی به ولتاژ شین بار و شین پست، عدم وابستگی مستقیم به بار و همبندی<sup>۲</sup> شبکه، عدم نیاز به محاسبه ماتریس امپدانس و نیز امپدانس معادل مسیر هر شین تا شین پست، عدم نیاز به کاهش شبکه به فرم دو شین معادل، سادگی عبارت ریاضی توصیف‌کننده شاخص برای استفاده در نرم‌افزار MATLAB (زمانی که به یک تابع حقیقی نیاز می‌باشد) اشاره کرد. قطع‌های بهینه بار مبتنی بر کنترل مستقیم بار به عنوان ذخیره چرخان سیستم به منظور افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین حین پیک بار انتخاب می‌گردند. بنابراین بهره‌بردار سیستم در زمان پیک بار قادر خواهد بود ضمن کاهش تقاضای بار، شاخص پایداری ولتاژ همه شین‌های سیستم را افزایش و یا ثابت نگه دارد. همچنین اندازه ولتاژ همه شین‌ها نیز یا افزایش می‌یابد یا ثابت باقی خواهد ماند. روش و شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی روی شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه [۳۳] و در محیط نرم‌افزار MATLAB اجرا شده تا مؤثر و به هنگام بودن آن نشان داده شود.

1. Bi-Quadratic
2. Topology

نماید. همچنین تابع قطع بار به صورت درجه دوم در نظر گرفته شده تا به ازای قطع بار بیشتر، هزینه آن نیز افزایش یابد. هدف قسمت دوم (۹)، منهای هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین گره سیستم است به طوری که این هزینه حداکثر شود. علامت منفی در (۹) به این علت است که چون  $f.SI_{weakest}$  باید در یک روند کمینه‌سازی، بیشینه شود لذا به صورت  $-f.SI_{weakest}$  لحاظ شده و این حالت به منظور همسورکردن اهداف بهینه‌سازی اتخاذ می‌گردد.

در (۹) هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین دلایل این انتخاب عبارت است از (۱) بهبود شاخص پایداری ولتاژ منوط به قطع بار می‌باشد (با توجه به تابع هدف)، لذا بهبود شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین، شاخص پایداری ولتاژ همه شین‌های شبکه را بهبود می‌بخشد (به معنی تغییر نکردن یا افزایش یافتن شاخص) که دلیل آن در بخش ۴-۲-۱ بیان شده است. (۲) در نظر گرفتن شاخص پایداری ولتاژ چند شین ضعیف با شاخص‌های نزدیک به هم، تنها طول عبارت تشکیل‌دهنده تابع هدف را افزایش می‌دهد که می‌توان به ازای انتخاب  $f$  مناسب، این تأثیر را در تابع هدف لحاظ نمود (بخش ۴-۲-۲) ذکر این نکته لازم است که تابع هدف می‌تواند متشکل از تعداد زیادی تابع علاوه بر موارد مذکور در این مقاله باشد مانند تلفات و ... اما در این مقاله دو هدف مذکور به عنوان مطلوب بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند (اجرای برنامه کنترل مستقیم بار به منظور افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم).

قیود برابری، معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو به صورت (۱۰) و (۱۱) می‌باشند

$$P_{gi} - P_{di} - \left| V_i \right| \sum_{j=1}^n \left| V_j \right| \times (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) = 0 \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - \left| V_i \right| \sum_{j=1}^n \left| V_j \right| \times (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) = 0 \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

که  $P$  و  $Q$  به ترتیب بیانگر توان اکتیو و راکتیو هستند، زیر نویس‌های  $g$  و  $d$  به ترتیب اشاره به تولید و تقاضا دارند و  $G_{ij}$  و  $B_{ij}$  نیز به ترتیب رسانایی و سوسپتانس خط بین شین‌های  $i$  و  $j$  هستند.

قیود نابرابری را قید اندازه ولتاژ در همه شین‌های سیستم مطابق (۱۲) و قید قطع بار در مجموعه شین‌های  $DLC$  مطابق (۱۳) در نظر می‌گیریم

$$\left| V_i \right|^{\min} \leq \left| V_i \right| \leq \left| V_i \right|^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$P_m^{\min} \leq P_m \leq P_m^{\max}, \quad m \in DLC \quad (13)$$

بالانویس  $\min$  بیانگر حداقل مقدار می‌باشد.

باید توجه داشت که به علت تأثیر مثبت قطع بار بر شاخص پایداری ولتاژ، برقراری قید بزرگ‌تر از صفر بودن روی این شاخص لازم نیست. اما بهره‌بردار سیستم می‌تواند قید حداقل شاخص پایداری ولتاژ قابل قبول را برقرار نماید. با توجه به این که افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین شبکه، شاخص پایداری ولتاژ کل شبکه را بهبود می‌بخشد (بخش ۴-۲-۱-۲) ببینید) لذا فقط لازم است که این شاخص مقید شود یعنی نامساوی زیر برقرار باشد

$$SI_{weakest} \geq SI_{desirable} \quad (14)$$

شاخص پایداری ولتاژ به صورت (۸)، تنها به اندازه ولتاژ شین پست و شین  $k$  ام و نیز زاویه ولتاژ شین  $k$  ام بستگی دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که شاخص معرفی شده در (۸)، شاخصی وابسته به ولتاژ است که در آن نیازی به کاهش شبکه توزیع به فرم دو شین معادل نیست. یکی از عیوب (۱) آن است که در تشکیل آن بخش‌های موهومی وجود دارند که باعث خواهند شد همه توابع بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB (مانند  $fmincon(\cdot)$ ) قادر به تحلیل آن نباشد (این عیب بر بخش ۳ مؤثر می‌باشد که سبب مناسب‌تر شدن شاخص پیشنهادی می‌شود چرا که این تحلیل‌گرها همگی با توابع حقیقی سر و کار دارند). با توجه به این که شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم قسمتی از تابع هدف می‌باشد (بخش ۳ را ببینید) پس باید در تشکیل آن فقط عبارات حقیقی حضور داشته باشند. از طرف دیگر جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی برای تشکیل (۱) آن را به رابطه‌ای بسیار طولانی تبدیل می‌کند که با رشد شبکه (افزایش تعداد شین‌ها) طولانی‌تر شده و تشکیل آن بسیار مشکل خواهد شد (به علت وجود (۲) در (۱) و (۳)) اما کلیه قسمت‌های تشکیل‌دهنده (۸) عبارات حقیقی هستند و یکی از مهم‌ترین مزایای آن ضمن کوتاهی و سادگی، حفظ طول (۸) برای محاسبه شاخص پایداری ولتاژ کلیه شین‌های سیستم می‌باشد و سبب حذف وابستگی به رشد شبکه می‌شود. در شاخص پیشنهادی، نیازی به محاسبه ماتریس ادمیتانس شین، ماتریس ادمیتانس شین و ادمیتانس معادل گره  $k$  ام تا شین پست (معادله (۲)) نمی‌باشد. مزایای فوق سبب خواهد شد که این شاخص برای محاسبات بی‌درنگ مناسب باشد و محاسبه این شاخص تنها به یک بار پخش بار نیاز دارد. همچنین حد پایداری ولتاژ شین  $k$  ام زمانی فرا خواهد رسید که  $SI_k = 0$  باشد.

### ۳- پخش بار بهینه

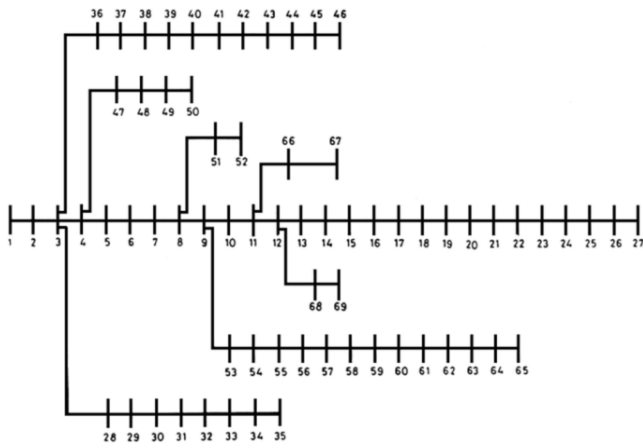
زیرساخت‌های شبکه هوشمند بستری را فراهم آورده که بتوان شبکه قدرت را در نقطه کار بهتری بهره‌برداری نمود. در این مقاله از برنامه کنترل مستقیم بار مبتنی بر پاسخ‌گویی بار خودکار بهره برده شده است (بخش ۱-۱) تا ضمن قطع بهینه بار، شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم افزایش یابد.

تابع هدف از دو قسمت به صورت (۹) تشکیل شده است

$$\min \left[ \left( \sum_{m \in DLC} f_m (P_m - P_m^{\max})^2 \right) - f.SI_{weakest} \right] \quad (9)$$

که  $f_m$  و  $f$  به ترتیب ضریب هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین و ضریب هزینه تابع قطع بار  $m$  ام هستند،  $P_m$  تقاضای توان اکتیو بار  $m$  ام بر حسب پروبیت می‌باشد،  $SI_{weakest}$  (۸) برای ضعیف‌ترین شین به لحاظ پایداری ولتاژ است؛  $DLC$  نیز مجموعه بارها با بیشترین تأثیرگذاری روی  $SI_{weakest}$  است که بهره‌بردار سیستم پیشنهاد شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار (کنترل مستقیم بار) را به آنها داده و آنان پذیرفته‌اند که در این برنامه شرکت نمایند و بالانویس  $\max$  نیز بیانگر حداکثر مقدار است.

هدف قسمت اول (۹) کمینه‌سازی قطع بار می‌باشد. در این مقاله فرض شده که بارهای شرکت‌کننده در برنامه کنترل مستقیم بار، بارهای انعطاف‌پذیری هستند (کاهش یا افزایش تقاضای توان در آنها به صورت پلکانی نیست) و به عبارت دیگر به علت وجود بارهای قابل تنظیم، کاهش تقاضای توان این تجهیزات متناظر با قطع بار به همان میزان است. به این ترتیب بهره‌بردار قادر است تا مصرف مشترکین شرکت‌کننده در این برنامه را کنترل نماید به طوری که قطع بار را به میزان دلخواه تنظیم



شکل ۵: شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه.

**گام ششم:** انتخاب تقاضاهای بار با بیشترین تأثیر بر شاخص ضعیف‌ترین شین (تعیین مجموعه  $DLC$ ).

**گام هفتم:** انتخاب تابع هدف مطابق (۹) و مجموعه قیود بهره‌برداری مطابق (۱۰) تا (۱۴)، سپس انجام پخش بار بهینه با مقاردهی اولیه در گام اول.

**گام هشتم:** تعیین قطع بهینه بار و نقطه کار جدید شبکه.

**گام نهم:** پایش شبکه به لحاظ شاخص پایداری ولتاژ شین‌های سیستم.  
**گام دهم:** بررسی تغییر ضعیف‌ترین شین شبکه؟ اگر ضعیف‌ترین شین تغییر کند باید به گام پنجم رفت و در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌یابد.

توجه داشته باشید که بهینه‌سازی لازم در صورت عدم تغییر ضعیف‌ترین شین شبکه در اولین تکرار الگوریتم پیشنهادی، انجام خواهد شد چرا که با تغییر ضعیف‌ترین شین سیستم، باید مجموعه  $DLC$  مجدداً تعیین شود.

#### ۴- نتیجه شبیه‌سازی

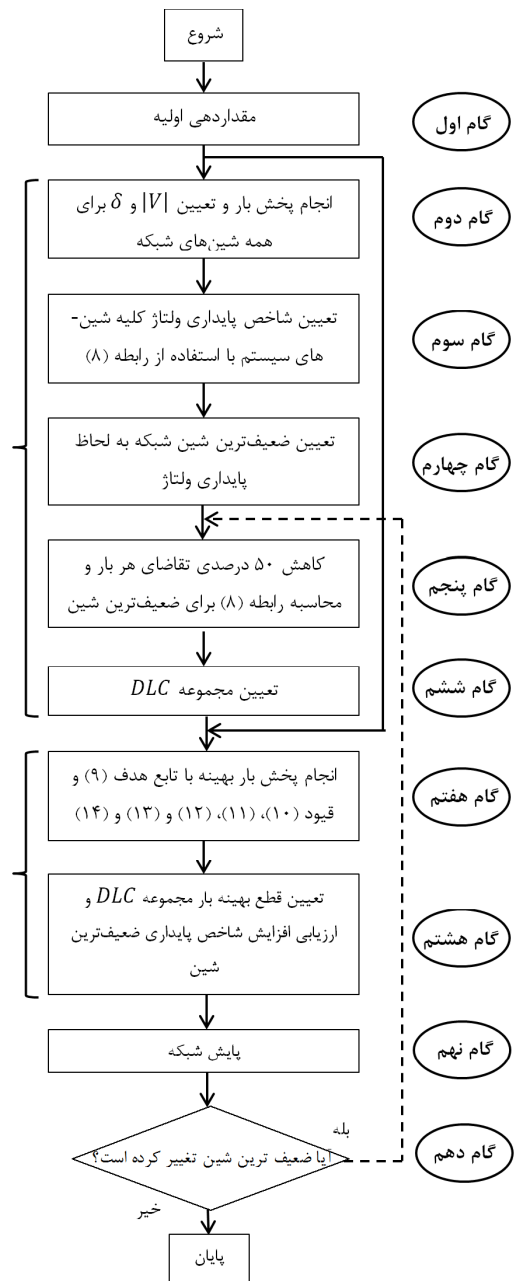
روش پیشنهادی در این مقاله روی شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه شکل ۵ اجرا شده است. این شبکه متشکل از ۴۸ بار و ۶۸ شاخه می‌باشد که اطلاعات آن از [۳۳] اخذ شده است. قیود حداکثر و حداقل اندازه ولتاژ شین‌ها به ترتیب ۱/۱ و ۰/۹ پریونیت در نظر گرفته شده و نیز اندازه ولتاژ شین پست، ۱ پریونیت است. همچنین از دو تابع  $fmincon(\cdot)$  و  $fsolve(\cdot)$  به ترتیب به منظور انجام پخش بار و پخش بار بهینه در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

#### ۴-۱ انتخاب مصرف‌کنندگان شرکت‌کننده در برنامه

##### کنترل مستقیم بار توسط بهره‌بردار سیستم

در نقطه کار نامی سیستم، مقدار بار کل  $z/۲۶۹۴ + ۳/۷۹۲$  پریونیت است (مگاوات امپر مبنا ۱ می‌باشد). کمترین شاخص پایداری ولتاژ سیستم شکل ۵ متعلق به شین ۶۵ می‌باشد که برابر ۰/۶۶۹۱۲ است و اندازه ولتاژ این شین نیز ۰/۹۰۹۱۸ می‌باشد (کیلوولت مبنا ۱۲/۶۶ می‌باشد). شین ۶۵ ضعیف‌ترین گره سیستم توزیع مذکور بوده و فروپاشی ولتاژ از این گره آغاز خواهد شد. به منظور مشاهده اثر محسوس تغییر هر بار سیستم بر شاخص پایداری ولتاژ شین ۶۵، تأثیر کاهش ۵۰ درصدی هر بار با حفظ ضریب توان بر افزایش شاخص پایداری شین ۶۵ مطابق شکل ۶ به دست می‌آید. این شکل نشان می‌دهد که کاهش ۵۰ درصدی بارهای موجود در شین‌های ۵۹، ۶۱، ۶۲، ۶۴ و ۶۵ شاخص پایداری ولتاژ شین ۶۵ را به

انتخاب مصرف‌کنندگان شرکت‌کننده در کنترل مستقیم بار توسط بهره‌بردار سیستم



شکل ۴: الگوریتم پیشنهادی.

که  $SI_{desirable}$  بیانگر حداقل شاخص پایداری مطلوب است. قطع بهینه بار به منظور افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم مطابق الگوریتم شکل ۴ می‌باشد که گام‌های آن به شرح زیر است:

**گام اول:** مقداردهی اولیه برای اندازه ولتاژ شین‌ها و زاویه آنها به ترتیب برابر ۱ پریونیت و ۰ درجه. همچنین انتخاب حداقل تقاضای بار برای مجموعه بارهای  $DLC$  که در گام هفتم مورد نیاز می‌باشد.

**گام دوم:** انجام پخش بار و تعیین  $|V_i|$  و  $\delta_i$  به ازای  $i = 1, \dots, n$ .

**گام سوم:** تعیین شاخص پایداری ولتاژ همه شین‌های سیستم با استفاده از (۸).

**گام چهارم:** تعیین شین با کمترین شاخص پایداری ولتاژ و انتخاب آن به عنوان ضعیف‌ترین شین سیستم.

**گام پنجم:** کاهش ۵۰ درصدی تقاضاهای بار شبکه با حفظ ضریب توان (دلیل این موضوع در بخش ۴-۱ ذکر شده است) و محاسبه تأثیر آن بر افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین.

شین ۶۵ هستند.

در این نقاط کاری، اندازه ولتاژ و شاخص پایداری شین ۶۵ به ترتیب برابر ۰/۹۲۴۷۵، پرینیت و ۰/۷۲۱۲۱ برای سناریوی ۱ و ۰/۹۲۷۶۱، پرینیت و ۰/۷۳۱۰۰ برای سناریوی ۲ می‌شود که به ترتیب افزایش ۱/۷۱۲ و ۷/۷۸۴ درصدی برای سناریوی ۱ و ۲/۰۲۷ و ۹/۲۴۸ درصدی برای سناریوی ۲ را نسبت به حالت مبنا (بار نامی) را نشان می‌دهد. نیز بار کل سیستم به ترتیب  $z/۲۴۹۰ + ۳/۵۰۸$  و  $z/۲۴۵۰ + ۳/۴۵۰$  پرینیت خواهد شد که به ترتیب کاهش ۷/۵۳ و ۹/۰۴ درصدی را در تقاضای بار (توان ظاهری) برای دو سناریوی مذکور نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱، شاخص پایداری ولتاژ بالاتر با انجام قطع بار بیشتر به دست آمده است.

اندازه ولتاژ و شاخص پایداری کلیه شین‌های سیستم توزیع مورد مطالعه، قبل و بعد از بهینه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل افزایش یا ثابت ماندن اندازه ولتاژ و شاخص پایداری همه شین‌های شبکه توزیع را نشان می‌دهد، چرا که با کاهش بار شین‌های مجموعه  $DLC$ ، توان عبوری از خطوط شبکه و در نتیجه تلفات سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین با کاهش افت ولتاژ در شین‌های ۱ تا ۹ سیستم، ولتاژ همه شین‌ها افزایش می‌یابد به طوری که این افزایش در نقاط دورتر از شبکه، محسوس‌تر می‌باشد و در نتیجه، شاخص پایداری ولتاژ نیز بهبود خواهد یافت.

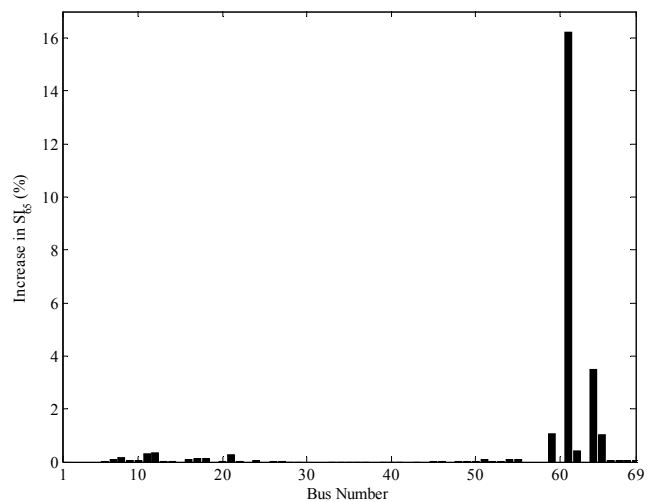
فرض می‌شود که در سناریوی ۲، بهره‌بردار سیستم می‌خواهد حداقل شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین شبکه برابر ۰/۸ باشد (یعنی  $SI_{weakest} \geq 0.8$ ). با اجرای برنامه کنترل مستقیم بار توسط بهره‌بردار (در نظر گرفتن نامساوی (۱۴))، حداقل اندازه ولتاژ برابر ۰/۹۴۷۲۷ پرینیت خواهد شد (در این حالت شین ۶۵ ضعیف‌ترین شین شبکه است) که بهبود ۴/۱۹۰ درصدی را نسبت به حالت مبنا نشان می‌دهد. در این نقطه کاری، بار کل سیستم  $z/۲۱۷۶ + ۳/۰۶۷$  خواهد بود که به ترتیب قطع بار ۱۹/۱۱۹ و ۱۹/۲۲۷ درصدی را نسبت به تقاضاهای بار اکتیو و راکتیو نشان می‌دهد.

#### ۴-۲-۲ بررسی تأثیر شاخص پایداری ولتاژ سایر شین‌های ضعیف بر مسئله بهینه‌سازی

در این بخش علاوه بر تأثیر شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین شبکه، شاخص پایداری ولتاژ سایر شین‌های ضعیف نیز به (۹) اضافه شده است (ضرایب هزینه قطع بار برابر یک در نظر گرفته شده و نیز از قید (۱۴) صرف نظر شده است). این شین‌ها به ترتیب شین‌های ۶۱ تا ۶۴ انتخاب شده‌اند (این شین‌ها به ترتیب از شاخص بزرگ‌تر به کوچک‌تر می‌باشند). توجه داشته باشید که سایر شین‌ها، شاخص پایداری بزرگ‌تری نسبت به شین‌های گفته‌شده دارند (شکل ۹ را ببینید).

جدول ۳ نتایج بعد از بهینه‌سازی را به ازای اضافه کردن تعداد متفاوتی از شاخص‌های پایداری ولتاژ سایر شین‌های ضعیف (شین‌های ۶۱ تا ۶۴) و نیز تغییر ضریب هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین بدون اضافه کردن سایر شین‌های ضعیف گفته‌شده نشان می‌دهد. جدول ۳ نتیجه زیر را به دست می‌دهد:

فرض کنید که شین‌های  $(nw, weak), \dots, (1, weakest)$  به ترتیب ضعیف‌ترین شاخص را دارند (شاخص‌های تقریباً نزدیک به هم) به طوری که رابطه  $SI_{1, weak} \geq SI_{nw, weak} \geq \dots \geq SI_{weakest}$  برقرار باشد. آن گاه می‌توان برای بخش مربوط به شاخص پایداری ولتاژ در (۹)، رابطه تقریبی زیر را بیان نمود



شکل ۶: تأثیر کاهش ۵۰ درصدی هر بار تحت ضریب ثابت بر افزایش شاخص پایداری شین ۶۵

ترتیب به میزان ۱/۰۷، ۱۶/۲۱، ۰/۴۳، ۳/۴۷ و ۱/۰۵ درصد افزایش می‌دهند (بارهای با تأثیر بیش از ۰/۴ درصد) که نسبت به سایر بارها بیشترین تأثیر را دارند.

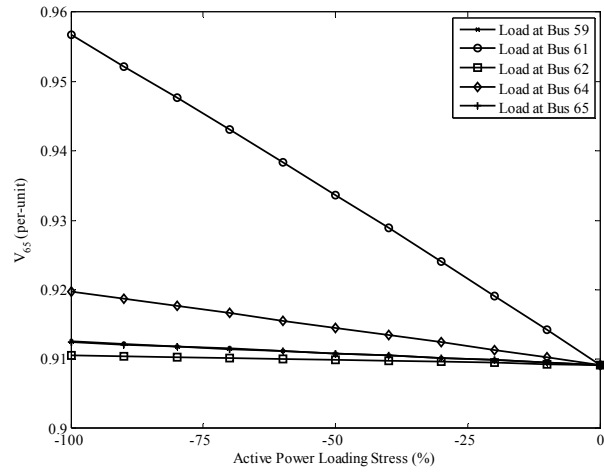
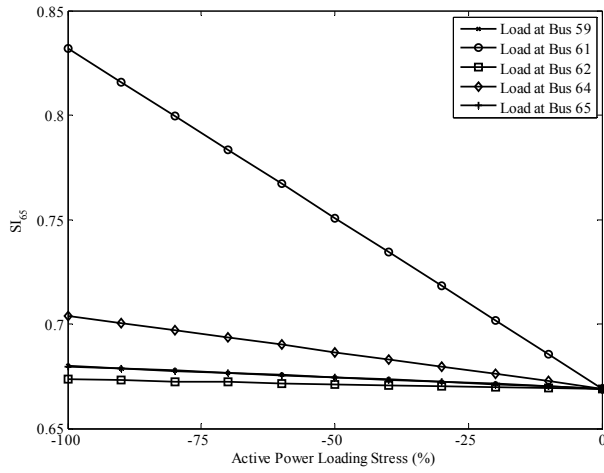
همچنین شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج به ترتیب تأثیر کاهش تقاضای بار اکتیو، کاهش تقاضای بار راکتیو و کاهش تقاضای بار اکتیو با حفظ ضریب توان بارهای پنج شین مذکور را بر شاخص پایداری ولتاژ و اندازه ولتاژ شین ۶۵ نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که کاهش تقاضای بار اکتیو با حفظ ضریب توان در مصرف‌کنندگان انتخابی، بیشترین تأثیر را بر افزایش شاخص پایداری شین ۶۵ و نیز اندازه ولتاژ شین مذکور دارد. لذا در بخش ۴-۲ قطع بهینه بار در شین‌های ۵۹، ۶۱، ۶۲، ۶۴ و ۶۵ با حفظ ضریب توان انجام خواهد شد و به عبارت دیگر  $DLC = \{59, 61, 62, 64, 65\}$  است. همچنین مشاهده می‌شود که بارهای شین‌های ۵۹ و ۶۵ تأثیر مشابهی دارند و کاهش تقاضای بار شین ۶۱ بیشترین تأثیر را بر شاخص و اندازه ولتاژ شین ۶۵ دارد و البته تغییرات بار شین ۶۲ تقریباً بی‌تأثیر است.

#### ۴-۲-۴ اجرای پخش بار بهینه

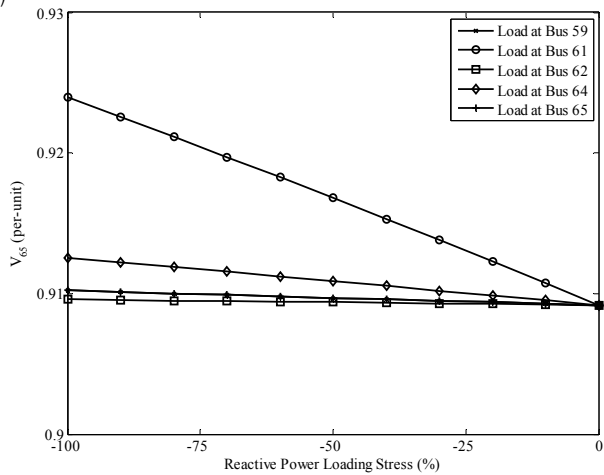
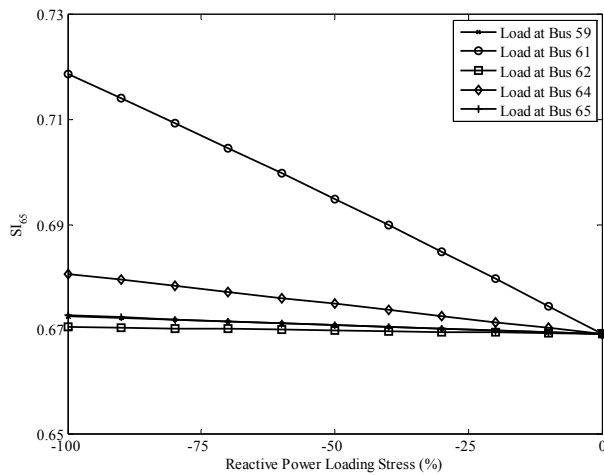
##### ۴-۲-۴-۱ بررسی تأثیر ضرایب هزینه متفاوت بر مسئله بهینه‌سازی

بارهای مجموعه  $DLC$  با بهره‌گیری از پاسخ‌گویی بار خودکار، پذیرفته‌اند که در زمان لازم (هنگام کاهش قابلیت اطمینان سیستم، بیک بار و ...) در برنامه کنترل مستقیم بار به طور خودکار شرکت نمایند و نیز به بهره‌بردار اجازه داده‌اند که قطع بار را مطابق جدول ۱ و با حفظ ضریب توان انجام دهد.

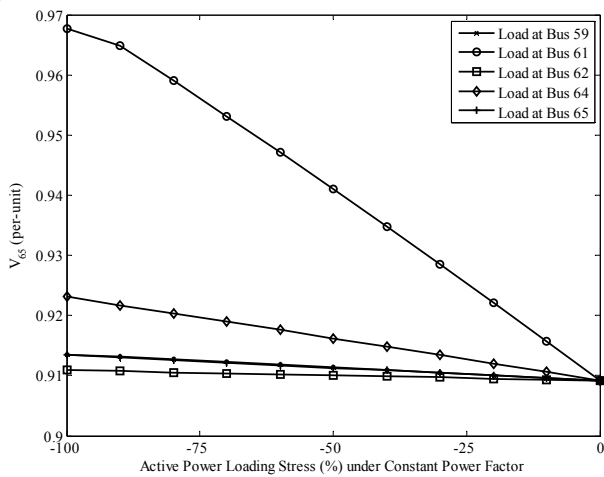
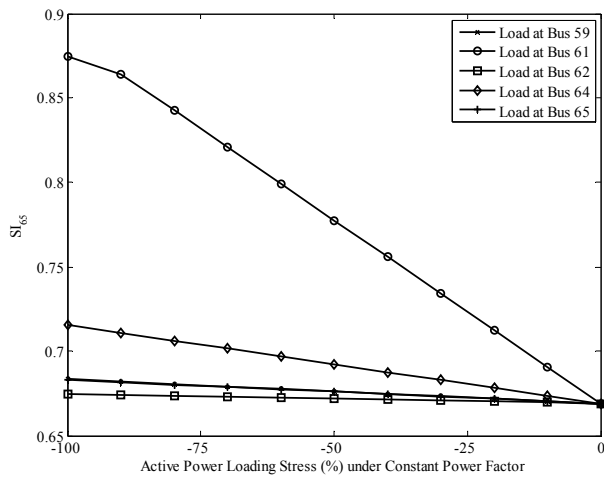
سه سناریو مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. در سناریوی ۱ ضرایب هزینه یکسان هستند. به عبارت دیگر قطع بهینه بار توسط الگوریتم به موقعیت بار در شبکه و نیز تأثیر آن که در بخش قبل بررسی شد، بستگی خواهد داشت. در سناریوی ۲ علاوه بر دو عامل مذکور، ضرایب هزینه متفاوت نیز تأثیرگذار خواهد بود. سناریوی ۳ نیز شرایط قبل از بهینه‌سازی را تشریح می‌کند. با فرض رخداد پیک بار سیستم (بار نامی سیستم) و اجرای برنامه کنترل مستقیم بار به منظور افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم (شین ۶۵) توسط بهره‌بردار (تابع هدف مطابق (۹))، نتیجه قطع بهینه بار مطابق شکل ۸ می‌باشد (بدون در نظر گرفتن قید (۱۴)). می‌توان مشاهده کرد که تقاضاهای بار ۱، ۳ و ۵ روی حداقل قرار داده شده‌اند و این بارها همان بارهای کم‌تأثیر بر شاخص



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: تأثیر کاهش، (الف) تقاضای بار اکتیو، (ب) تقاضای بار راکتیو و (ج) تقاضای بار اکتیو با حفظ ضریب توان بر شاخص پایداری ولتاژ و اندازه ولتاژ شین ۶۵ در محور افقی، صفر درصد به معنای بار نامی بوده و ۱۰۰- درصد به معنی قطع کامل بار (اکتیو، راکتیو یا هر دو) می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات بارهای شرکت کننده در کنترل مستقیم بار.

شماره بار	شماره شین	ضریب توان	حداکثر تقاضای توان اکتیو (پربونیت)	حداقل تقاضای توان اکتیو (پربونیت)
۱	۵۹	۰٫۷۲۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۰۴۰
۲	۶۱	۰٫۷۱۳۸	۱٫۲۴۴	۰٫۷۴۶
۳	۶۲	۰٫۷۱۸۸	۰٫۰۳۲	۰٫۰۱۶
۴	۶۴	۰٫۷۱۳۷	۰٫۲۲۷	۰٫۰۶۸
۵	۶۵	۰٫۷۱۱۹	۰٫۰۵۹	۰٫۰۴۱

جدول ۲: سناریوهای مختلف جهت بررسی تأثیر ضرایب هزینه متفاوت.

شماره سناریو	ضرایب هزینه					
	$f_1$	$f_{D1}$	$f_{D2}$	$f_{D3}$	$f_{D4}$	$f_{D5}$
۱	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰
۲	۱٫۵	۱٫۱	۰٫۸	۰٫۹	۱٫۸	۱٫۳
۳	قیل از بهینه‌سازی					

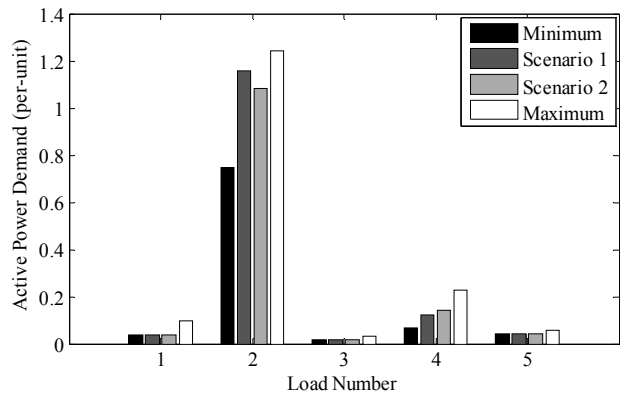
جدول ۳: بررسی تأثیر شاخص‌های پایداری ولتاژ شین‌های ۶۱ تا ۶۵ بر مسئله بهینه‌سازی.

کل بار توان	اندازه		شماره شین‌ها	شاخص ولتاژ	نتیجه
	توان اکتیو	شاخص			
۲,۴۹۰٫۹	۳,۵۰۸۸	۰,۷۲۱۲۱	۶۵	۰,۹۲۴۷۵	$f_1 = 1^{**}$
۲,۴۹۰٫۹	۳,۵۰۸۸	۰,۷۲۱۲۱	۶۴ و ۶۵	۰,۹۳۲۵۳	$f_2 = 2^{**}$
۲,۳۸۸۶	۳,۳۶۵۵	۰,۷۴۷۹۷	۶۳ و ۶۴ و ۶۵	۰,۹۳۲۵۳	$f_3 = 3^{**}$
۲,۳۸۸۶	۳,۳۶۵۵	۰,۷۴۷۹۷	۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵	۰,۹۳۲۵۳	$f_4 = 4^{**}$
۲,۳۲۶۲	۳,۲۷۸۰	۰,۷۶۳۲۶	۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵	۰,۹۳۶۹۱	$f_5 = 5^{**}$
۲,۳۲۶۳	۳,۲۷۸۲	۰,۷۶۳۲۳		۰,۹۳۶۹۰	
۲,۲۶۴۰	۳,۱۹۰۹	۰,۷۷۸۴۸		۰,۹۴۱۲۳	
۲,۲۶۴۰	۳,۱۹۰۹	۰,۷۷۸۴۸		۰,۹۴۱۲۳	
۲,۲۰۱۴	۳,۱۰۳۳	۰,۷۹۳۷۹		۰,۹۴۵۵۴	
۲,۲۰۱۷	۳,۱۰۳۷	۰,۷۹۳۷۲		۰,۹۴۵۵۲	

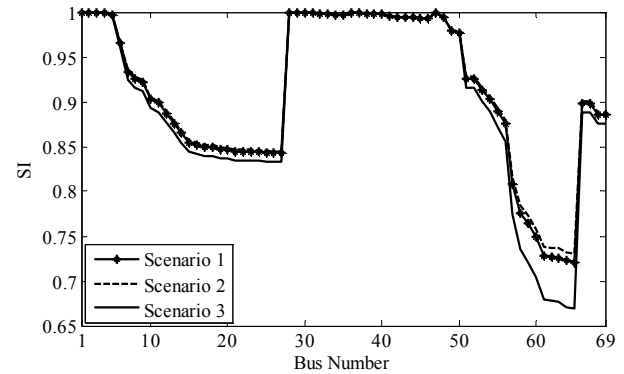
\* شماره شین‌هایی که شاخص پایداری ولتاژ آنها در (۹) موجود می‌باشد یا اضافه شده است. توجه کنید که در این حالت، همه ضرایب هزینه برابر یک هستند.  
 \*\* ضریب هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین. توجه داشته باشید که در این حالت فقط شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین در (۹) حضور دارد.

### ۵- نتیجه‌گیری

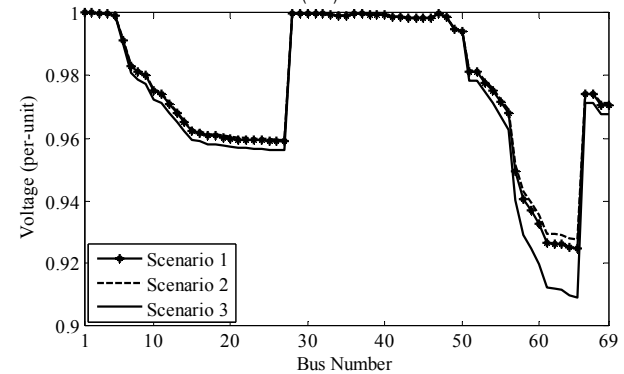
در این مقاله، شاخص پایداری ولتاژ جدیدی برای شبکه‌های توزیع شعاعی معرفی شد که تنها وابسته به ولتاژ بوده و آن را برای محاسبات بی‌درنگ با وجود تغییر الگوی بار مناسب می‌سازد. محاسبه این شاخص تنها به یک بار پخش بار نیاز دارد و سادگی و حفظ طول عبارت تشکیل‌دهنده این شاخص مجزا از تعداد شین‌های سیستم است که آن را برای تحلیل پایداری ولتاژ سیستم‌های توزیع شعاعی بزرگ مناسب ساخته است. این شاخص در یک شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه با هدف شناسایی ضعیف‌ترین شین سیستم به لحاظ پایداری ولتاژ و نیز شناسایی بارهای با بیشترین تأثیرگذاری بر شاخص این شین و انتخاب آنها برای مشارکت در برنامه کنترل مستقیم بار اجرا شد و نشان داد شین ۶۵ این سیستم ضعیف‌ترین شین بوده و بارهای شین‌های ۵۹، ۶۱، ۶۲، ۶۴ و ۶۵ بیشترین تأثیر را بر شاخص پایداری این شین دارند. همچنین پخش بار بهینه مبتنی بر کنترل مستقیم بار در شین‌های مذکور شبکه توزیع مورد مطالعه (به عنوان یک شبکه توزیع هوشمند) با هدف افزایش شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین سیستم انجام شد. به عبارت دیگر قطع بهینه بار با حفظ قیود بهره‌برداری سیستم و با هدف بهبود ضعیف‌ترین شین شبکه به لحاظ پایداری ولتاژ اجرا شد. همچنین تأثیر ضرایب هزینه متفاوت، اعمال قید حداقل شاخص پایداری ولتاژ قابل قبول و نیز در نظر گرفتن چند شاخص پایداری ولتاژ نزدیک به هم (از ضعیف‌ترین شین به بعد) نیز بررسی گردید. این بهینه‌سازی نشان داد که نه تنها اندازه ولتاژ و شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین شین شبکه افزایش می‌یابد، بلکه شاخص پایداری و اندازه ولتاژ همه شین‌های سیستم افزایش یا ثابت نگه داشته می‌شود. علاوه بر این، ضریب هزینه شاخص پایداری ولتاژ ضعیف‌ترین



شکل ۸: قطع بهینه بار.



(الف)



(ب)

شکل ۹: وضعیت شبکه توزیع مورد مطالعه بعد از بهینه‌سازی، (الف) شاخص پایداری ولتاژ و (ب) اندازه ولتاژ.

$$SI_{weakest} \equiv SI_{i,weak} \quad (15)$$

$$i = weakest, \dots, (nw, weak)$$

رابطه فوق که بر اساس جدول ۳ استنباط شده است، نشان می‌دهد که (۹) رابطه ساده‌تر و با دقت بالا را نتیجه می‌دهد که آن را برای بهینه‌سازی مناسب می‌سازد. به عبارت دیگر، تأثیر لحاظ شاخص پایداری ولتاژ چند شین ضعیف (به ترتیب از ضعیف‌ترین شین به بعد) مشابه انتخاب ضریب  $f_i$  به همان اندازه است؛ علامت  $\equiv$  به معنی تأثیر مشابه این شاخص‌ها بر بهینه‌سازی است. به عنوان مثال به ازای در نظر گرفتن ۳ شین ضعیف (از ضعیف‌ترین به بعد) در (۹) داریم

$$3SI_{weakest} \equiv SI_{weakest} + SI_{\backslash,weak} + SI_{\backslash,weak} \equiv 3SI_{\backslash,weak} \quad (16)$$

که نتایج شبیه‌سازی، بیان فوق را تأیید می‌کند. مهم‌ترین دلیل برقراری رابطه فوق، نزدیکی شاخص پایداری ولتاژ شین‌های مذکور به یکدیگر است که باعث می‌شود تأثیر مشابهی داشته باشند.



- [20] A. Mehrtash, P. Wang, and L. Goel, "Reliability evaluation of restructured power systems using a novel optimal power-flow-based approach," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 2, pp. 192-199, Feb. 2013.
- [21] P. Kundur, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [22] M. Z. El-Sadek, *Power System Voltage Stability and Power Quality*, in Mukhtar Press, Egypt, Assuit, 2002.
- [23] G. M. Huang and L. Zhao, Measurement Based Voltage Stability Monitoring of Power System, www.pserc.wisc.edu.
- [24] G. V. K. Murthy, S. Sivanagaraju, S. Satyanarayana, and B. Hanumantha Rao, "Voltage stability index of radial distribution networks with distributed generation," *Int. J. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 791-803, 2012.
- [25] A. M. Chebbo, M. R. Irwing, and M. J. H. Sterling, "Voltage collapse proximity indicator: behavior and implications," in *IEE Proc. C Gen. Transm. Distrib.*, vol. 139, no. 3, pp. 241-252, May 1992.
- [26] P. A. Lof, G. Andersson, and D. J. Hill, "Voltage stability indices for stressed power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 326-334, Feb. 1993.
- [27] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the voltage stability of a power system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 346-352, Jul. 1986.
- [28] M. Moghavvemi and M. O. Faruque, "Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 1, pp. 58-60, Jan. 2001.
- [29] G. B. Jasmon and L. H. C. C. Lee, "Distribution network reduction for voltage stability analysis and load flow calculations," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 9-13, Feb. 1991.
- [30] F. Gubina and B. Strmenik, "A simple approach to voltage stability assessment in radial networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1121-1128, Aug. 1997.
- [31] M. Moghavvemi and M. O. Faruque, "Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for prediction," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 21, no. 6, pp. 455-461, Aug. 1999.
- [32] U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, "A voltage stability index for radial distribution networks," in *Proc. 42nd Int. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 408-413, England, Brighton, Sep. 2007.
- [33] M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 129-135, Feb. 2001.
- [34] A. Chaturvedi, K. Prasad, and R. Ranjan, "A new voltage stability index for radial distribution network," *Int. J. Power Energy Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 83-88, Jan. 2006.

**سهیل درفشی بیگوند** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ از دانشگاه رازی به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی مقطع دکتری (Ph.D.) مهندسی برق- قدرت در همان دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت و بخش بار بهینه در شبکه‌های هوشمند و ترکیبی.

**حمدی عبدی** در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق- قدرت خود را از دانشگاه تبریز اخذ نمود؛ نیز مدارک کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی (Ph.D.) خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۵ در رشته مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تربیت مدرس تهران دریافت نمود. هم‌اکنون ایشان با مرتبه علمی استادیاری، عضو هیأت علمی دانشگاه رازی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، کاربرد روش‌های مختلف بهینه‌سازی، تجدید ساختار و بازارهای رقابتی، انرژی‌های تجدیدپذیر و شبکه هوشمند است.

شین می‌تواند تأثیر در نظر گرفتن شاخص پایداری چند شین ضعیف را مدل‌سازی نماید.

## مراجع

- [1] L. Gang, D. Debraj, and S. Wen-Zhan, "Smart grid lab: a laboratory-based smart grid test bed," in *Proc. 1st IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 143-148, Gaithersburg, USA, Oct. 2010.
- [2] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 82-88, Jun. 2010.
- [3] U. S. Department of Energy, *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*, Tech. Rep. to United States Congr., Feb. 2006. <http://eetd.lbl.gov>.
- [4] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243-250, Jan. 2010.
- [5] North American Electric Reliability Corporation Reliability Assessment Subcommittee, *Demand Response Discussion for the 2007 Long-Term Reliability Assessment*, Tech. Rep., Feb. 2007.
- [6] U. S. Department of Energy, *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*, Tech. Rep., Aug. 2006.
- [7] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 11, pp. 1989-1996, Nov. 2008.
- [8] G. Wikler, *Auto-DR: Smart Integration of Supply and Demand for Rapid Grid Response*, A White Paper for Global Energy Partners, LLC, Mar. 2010, <http://www.gepllc.com/AutoDRGridResponse.pdf>.
- [9] E. Koch and T. Samad, *Demand Response and Energy Efficiency for the Smart Grid*, Stanford University, May 2011, <http://www.stanford.edu/class/ee392n/Lectures/EE392nLecture8Hon.pdf>.
- [10] J. R. Stitt, "Implementation of a large-scale direct load control system-some critical factors," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 7, pp. 1663-1669, Jul. 1985.
- [11] S. Chanda and A. De, "A multi-objective solution algorithm for optimum utilization of smart grid infrastructure towards social welfare," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 58, pp. 307-318, Jun. 2014.
- [12] S. Lin and J. Chen, "Distributed optimal power flow for smart grid transmission system with renewable energy sources," *Energy*, vol. 56, pp. 184-192, Jul. 2013.
- [13] Y. Levron, J. M. Guerrero, and Y. Beck, "Optimal power flow in microgrids with energy storage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3226-3234, Aug. 2013.
- [14] L. R. Araujo, D. R. R. Penido, and F. A. Vieira, "A multiphase optimal power flow algorithm for unbalanced distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 632-642, Dec. 2013.
- [15] T. Erseghe and S. Tomasin, "Power flow optimization for smart microgrids by SDP relaxation on linear networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 751-762, Jun. 2013.
- [16] S. Bruno, S. Lamonaca, G. Rotondo, U. Stecchi, and M. L. Scala, "Unbalanced three-phase optimal power flow for smart grids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4504-4513, Oct. 2011.
- [17] S. Paudyal, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of distribution feeders in smart grids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4495-4513, Oct. 2011.
- [18] E. Dall'Anese, H. Zhu, and G. B. Giannakis, "Distributed optimal power flow for smart microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1464-1475, Sep. 2013.
- [19] C. E. Murillo-Sanchez, R. D. Zimmerman, C. L. Anderson, and R. J. Thomas, "A stochastic, contingency-based security-constrained optimal power flow for the procurement of energy and distributed reserve," *Decis. Support Syst.*, vol. 56, pp. 1-10, Dec. 2013.