

بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال با قابلیت جزیره‌ای شدن در حضور

منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و خودروهای برقی

علی احمدیان^۱، دانشجوی دکتری، مهدی صدقی^۱، دانشجوی دکتری، مسعود علی‌اکبر گلکار^۱، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

Ali.Ahmadian.1988@ieee.org, Meh.sedghi@gmail.com, Golkar@eetd.kntu.ac.ir

چکیده: اخیراً به دلیل نگرانی‌ها در خصوص اتمام سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست محیطی، مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های توزیع فعال به یک چالش مهم در حوزه سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. از طرف دیگر، این مسئله با حضور ضریب نفوذ بالای منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و خودروهای برقی، به یک مسئله پیچیده تبدیل می‌شود. در این مقاله، یک رویه مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال در حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، باتری‌ها و خودروهای برقی ارائه شده است. پروسه بهره‌برداری به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع (TS) حل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده با بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع از طریق برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ باتری‌ها و خودروهای برقی، هزینه بهره‌برداری کاهش و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری بهینه، شبکه‌های توزیع، ذخیره‌سازها، توان بادی، خودروهای برقی، الگوریتم جستجوی ممنوع.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۳/۳/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: مسعود علی‌اکبر گلکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- خیابان دکتر شریعتی- سید خندان- دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی-

آزمایشگاه مدیریت انرژی و سیستم‌های توزیع- تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۲۱۶۳

۱- مقدمه

است. همچنین جهت بهره‌برداری بهینه، در این مقاله توان راکتیو توربین‌های بادی بصورت یک ضریب توان متغیر مدلسازی و در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال در حضور توان تولید پراکنده بادی، خودروهای برقی و باتری‌ها با قابلیت جزیره‌ای شدن شبکه ارائه شده است. به منظور ارزیابی اثر خودروهای برقی بر روی هزینه‌های بهره‌برداری، سه سناریو متفاوت برای پروفیل شارژ خودروی برقی ارائه شده است. مدیریت بهینه در افق ۲۴ ساعت با هدف کمینه کردن هزینه بهره‌برداری و بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم تحت محدودیت‌های فنی انجام شده است. قابل ذکر است که در این مقاله (به عنوان یک مطالعه استاتیکی)، فرض می‌شود که توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی در طول ۲۴ ساعت آینده، از عملیات پیش‌بینی تولید و بار به دست می‌آیند و مشابه مراجع [۱۵] و [۱۶] از خطای عملیات پیش‌بینی صرف‌نظر می‌گردد. در صورتیکه پیش‌بینی مقادیر دارای خطا باشد، لازم است که برنامه‌ریزی انجام شده، حین بهره‌برداری به طور دینامیکی اصلاح شود. با توجه به اینکه حل مسئله بهره‌برداری در زمان کم مطلوب بهره‌بردار شبکه توزیع می‌باشد، لذا برای حل آن باید الگوریتمی استفاده کرد که علی‌رغم زمان محاسبات کم، دقت بالایی داشته باشد. از این رو، الگوریتم ابتکاری جستجوی ممنوع^{۱۰} (TS)، به دلیل سرعت بالای آن در رسیدن به جواب بهینه جهت بهینه‌سازی این مسئله استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت روش پیشنهادی در کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری شبکه‌های توزیع را نشان می‌دهد.

۲- فرموله‌بندی مسأله

در این مقاله، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و خودروهای برقی به عنوان عناصر غیر قابل دیسپچ^{۱۱} در نظر گرفته شده است. توان تولیدی بادی و خورشیدی به صورت جداگانه به عنوان منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. از این رو باید انرژی از طریق برنامه‌ریزی توان باتری‌های موجود و همچنین خرید از شبکه بالادست بصورت بهینه مدیریت شود. برنامه‌ریزی بهینه شامل کمینه کردن هزینه تابع هدف تحت محدودیت‌های فنی می‌باشد. یک برنامه‌ریزی بهینه باید میزان توان باتری‌ها و جهت آن (شارژ یا دشارژ) را در هر ساعت از بازه ۲۴ ساعته تعیین نماید. تابع هدف مسئله شامل جمع هزینه‌های بهره‌برداری، قابلیت اطمینان و هزینه‌های تشویقی شارژ خودروهای برقی می‌باشد. هزینه بهره‌برداری شبکه برابر هزینه‌های خرید انرژی از شبکه بالادست می‌باشد. همچنین، هزینه قابلیت اطمینان برابر هزینه انرژی تامین نشده‌ای^{۱۲} است که با توجه به رخدادهای خطا در ترانسفورماتور HV/MV و یا در فیدرهای ولتاژ متوسط رخ می‌دهد. بعد از رخداد خطا، تجهیز خطا دار با استفاده از باز کردن کلیدهایی (که در حالت نرمال بسته هستند) از شبکه جدا می-

نگرانی‌های زیست محیطی، محدودیت سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌گی آنها از مهمترین چالش‌های جامعه امروزی است. بنابراین بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع همانند سایر بخش‌های سیستم قدرت یک مسئله جدی می‌باشد [۱]. از طرف دیگر، به دلیل توانایی غلبه بر چالش‌های ذکر شده، ضریب نفوذ خودروهای برقی^۱ (PEVs) و منابع تجدیدپذیر^۲ مانند توان بادی افزایش یافته است [۲ و ۳]. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بصورت تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع نسبت به تولید متمرکز در سیستم قدرت بیشتر است [۴]. مهمترین مسئله در منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع، عدم قطعیت آنها می‌باشد که این مسئله بطور مناسب توسط ذخیره‌سازها پوشش داده می‌شود [۵]. در مرجع [۶] ذخیره‌سازها برای کاهش نوسانات توان بادی استفاده شده است. نتایج نشان داده که نوسانات توان بادی بطور مناسبی توسط ذخیره‌ساز کوچک رفع شده با این حال، ظرفیت بزرگتری از ذخیره‌ساز برای برنامه‌ریزی بلند مدت مورد نیاز است. در مرجع [۷] یک مدیریت انرژی هوشمند بر اساس الگوریتم ژنتیک^۳ (GA) برای بهره‌برداری یک ریزشبکه استفاده شده است. برنامه‌ریزی خطی^۴ (LP) در مرجع [۸] برای کمینه کردن هزینه یک ریز شبکه با استفاده از شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازها ارائه شده است. در مرجع [۹] الگوریتم بهبود یافته تجمع ذرات^۵ (AMPSO) برای حل مسئله مدیریت انرژی در یک ریز شبکه نمونه اعمال شده است. ریز شبکه نمونه شامل منابع تولیدی تجدیدپذیر، میکروتوربین^۶، پیل سوختی^۷ و باتری‌ها بوده که برای افق زمانی ۲۴ ساعت به صورت بهینه برنامه‌ریزی شده است. در یک مطالعه مشابه در مرجع [۱۰] مسئله مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع در حضور توان بادی، پنل‌های خورشیدی و پیل سوختی ارائه شده است. در این مرجع الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل^۸ (HBMO) برای بهینه‌سازی استفاده شده است. دیسپچ کردن توان اکتیو واحدهای تولید پراکنده در یک ریز شبکه در مرجع [۱۱] ارائه شده که در آن از یک الگوریتم پاسخ سریع برای کمینه کردن هزینه بهره‌برداری استفاده شده است. مرجع [۱۲] استراتژی مدیریت بهینه باتری‌های توزیع شده در شبکه‌های توزیع را در حضور ضریب نفوذ بالای توان خورشیدی ارائه کرده است. مسئله با کاهش تلفات شبکه و باتری‌ها و با کنترل ولتاژ شین‌های شبکه حل شده است. مرجع [۱۳] یک الگوریتم خود تطبیقی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات^۹ (PSO) جهت مدیریت بهینه انرژی ارائه کرده است. همچنین مدیریت بهینه چند منظوره با هدف کاهش تلفات، انرژی مصرفی و آلاینده‌گی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و توسط الگوریتم پیشنهادی زنبوران عسل حل شده است [۱۴]. با این حال، اثر حضور خودروهای برقی و الگوهای شارژ متفاوت آنها در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع در هیچ کدام از این مراجع ارائه نشده

در محدوده مجاز بوده و انرژی مورد نیاز بارها باید در شرایط نرمال تأمین شود. این محدودیت‌ها بصورت زیر بیان می‌شود:

$$S_t^u \leq S_{\max}^u, \quad \forall u \in A_{EQ}, t=1,2,\dots,24 \quad (2)$$

$$V_{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{\max}, \quad \forall i \in A_N, t=1,2,\dots,24 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in A_{SS}} S_{i,t}^{SS} + \sum_{j \in A_{DG}} S_{j,t}^{DG} = \sum_{k \in A_{ST}} S_{k,t}^{ST} + \sum_{l \in A_{LD}} S_{l,t}^{LD} + S_t^{LOSS}, \quad t=1,2,\dots,24 \quad (4)$$

که در آنها،

S_t^u : توان تجهیز u در ساعت t

S_{\max}^u : توان بیشینه مجاز تجهیز u

$V_{i,t}$: دامنه ولتاژ آمین شین شبکه در ساعت t

V_{\max} V_{\min} : دامنه ولتاژ کمینه و بیشینه مجاز

$S_{i,t}^{SS}$: توان آمین پست HV/MV در ساعت t

$S_{j,t}^{DG}$: توان تولید شده توسط آمین واحد تولید پراکنده در ساعت t

$S_{k,t}^{ST}$: توان شارژ k آمین ذخیره‌ساز در ساعت t

$S_{l,t}^{LD}$: توان بار در l آمین شین در ساعت t

S_t^{LOSS} : کل توان تلفاتی در شبکه توزیع در ساعت t

A_{EQ} : مجموعه تمام تجهیزات

A_N : مجموعه تمام شین‌ها

A_{DG} : مجموعه تمام منابع تولید پراکنده

A_{ST} : مجموعه تمام واحدهای ذخیره ساز

A_{LD} : مجموعه تمام نقاط بار

لازم به ذکر است در رابطه (۴)، $S_{k,t}^{ST}$ در زمان دشارژ یک مقدار

منفی می‌باشد. علاوه بر این، برای بهره‌برداری بهینه از باتری‌ها و افزایش طول عمر آن برخی محدودیت‌های ویژه باید در نظر گرفته شود که به صورت زیر است:

- توان دشارژ باتری‌ها تابعی از انرژی ذخیره شده در ساعات قبل،

بازده باتری و مبدل و توانایی توان پالس باتری^{۱۷} می‌باشد.

- باتری‌ها به دلیل محدودیت‌های طول عمرشان، در طول یک روز باید فقط یکبار شارژ و دشارژ شوند.

- بنا به دلایل فنی، باتری‌ها نباید بطور کامل دشارژ شوند.

برای برقراری قید تعادل توان، پس از تعیین توان شارژ و دشارژ

باتری‌ها، انرژی خریداری شده از شبکه بالادست از رابطه (۴) به دست می‌آید.

شود. سپس اگر از نقطه نظر فنی ممکن باشد، بارهای قطع شده با استفاده از منابع تولید پراکنده و باتری‌های موجود در مد جزیره‌ای^{۱۳} تأمین می‌شوند. لذا وضعیت شارژ^{۱۴} (SOC) باتری‌ها در هر ساعت باید تخمین زده شود و با یک برنامه‌ریزی اقتصادی و فنی، بهینه گردد. تابع هدف مسأله بصورت زیر بیان شده است:

$$\text{Min. } F = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \sum_{i \in A_{SS}} P(t) \times E_i^{SS}(t) + \sum_{j \in A_{EV}} OC \times \lambda_j \right. \\ \left. \times [S_j^{OUT}(t) - S_j^{RDG}(t) - S_j^{RST}(t)] \times \Delta T + IC(t) \right\} \quad (1)$$

که در آن،

F : تابع هدف

$P(t)$: قیمت برق در ساعت t

$E_i^{SS}(t)$: انرژی خریداری شده از شبکه بالادست در ساعت t

OC : هزینه خاموشی^{۱۵}

λ_j : نرخ خرابی j آمین رخداد در هر ساعت

$S_j^{OUT}(t)$: توان بار قطع شده به دلیل زامین رخداد در ساعت t

$S_j^{RDG}(t)$: توان بازیافت شده توسط واحدهای تولید پراکنده بعد از

j آمین رخداد در ساعت t

$S_j^{RST}(t)$: توان بازیافت شده توسط باتری‌ها بعد از j آمین رخداد

در ساعت t

ΔT : زمان لازم برای تعمیر یا تعویض تجهیز

$IC(t)$: هزینه تشویقی خودروها جهت شارژ هوشمند و یا شارژ با محدودیت

A_{SS} : مجموعه تمامی پست‌های HV/MV

A_{EV} : مجموعه تمامی رخداد‌های ممکن خطا در شبکه توزیع

در رابطه (۱)، OC تابعی از نوع بار قطع شده و مدت زمان

خاموشی است. $E_i^{SS}(t)$ شامل توان تلفاتی شبکه است که با استفاده

از روش پخش بار پسر-پیشرو^{۱۶} در حضور باتری‌ها محاسبه می‌شود.

در این مقاله، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از باتری‌ها از دید صاحب شبکه

توزیع در نظر گرفته می‌شود. هزینه بهره‌برداری و نگهداری باتری‌ها با

توجه به پارامترهای ارائه شده در مرجع [۱۷] ثابت در نظر گرفته شده

است. برای استفاده حداکثر از انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده،

توان بادی تولید شده بدون محدودیت وارد شبکه توزیع می‌شود.

بنابراین، اگرچه هزینه بهره‌برداری و نگهداری از منابع تولید پراکنده

متغیر است ولی تأثیری در متغیرهای تصمیم‌گیری در این مقاله

نخواهد داشت.

در حل بهینه مسأله بهره‌برداری، توان هر تجهیز نباید از مقدار

ظرفیت بیشینه آن تجاوز کند، همچنین دامنه ولتاژ همه شین‌ها باید

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- برنامه‌ریزی چند منظوره

به منظور بیشینه سازی سود بهره‌برداری، باتری‌ها بطور همزمان برای سه هدف به صورت زیر برنامه‌ریزی می‌شوند:

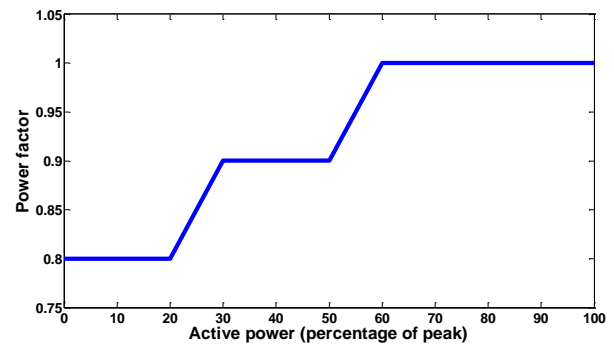
- پیک سایبی^{۱۸}

- تنظیم ولتاژ^{۱۹}

- بهبود قابلیت اطمینان^{۲۰}

به عنوان هدف اول، باتری‌ها برای پیک‌سایبی و به دنبال آن کاهش هزینه انرژی خریداری شده از شبکه بالادست و همچنین کاهش توان تلفاتی شبکه استفاده می‌شوند.

هدف دوم استفاده از باتری‌ها، بهبود سطح ولتاژ بویژه در شین‌هایی که تولید توان بادی بالا است، می‌باشد. در طول دوره‌هایی که سرعت باد بالا می‌باشد، توربین‌های مقدار بیشتری توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کند [۱۸]. لذا دامنه ولتاژ در این شین‌ها از حداکثر محدوده مجاز آن تجاوز خواهد کرد. از طرف دیگر، وقتی که سرعت باد کاهش می‌یابد، توربین بادی توان اکتیو بالایی از شبکه جذب می‌کند [۱۸] بطوریکه ممکن است دامنه ولتاژ در بعضی شین‌ها از محدوده حداقل ولتاژ مجاز آن خارج شود. در این مقاله، میزان توان اکتیو توربین‌های بادی با توجه به ضریب توان متغیر توربین‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از [۱۸]، در صورت استفاده حداکثری از توان بادی، ضریب توان توربین بادی، در هر لحظه، تابعی از توان اکتیو تولید شده خواهد بود. در این مقاله، با استفاده از نتایج مرجع [۱۸]، یک منحنی سه سطحی برای محاسبه ضریب توان توربین بادی پیشنهاد می‌شود. این منحنی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): تغییرات ضریب توان بر حسب توان اکتیو توربین بادی

بر خلاف بانک‌های خازنی، برای تنظیم ولتاژ، باتری‌ها می‌توانند هم توان اکتیو و هم راکتیو جذب و یا تزریق کنند. قابلیت تزریق و جذب توان راکتیو توسط باتری‌ها از طریق کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت واسط بین باتری‌ها و شبکه ممکن می‌باشد. بهره‌بردار باتری‌ها می‌تواند مطابق با محدودیت‌های باتری و بر اساس نیازمندی‌های خود از طریق کنترل مبدل‌ها میزان توانایی جذب و یا تزریق توان راکتیو

باتری‌ها را تنظیم نماید. بنابراین برای اهداف تنظیم ولتاژ بویژه در صورت ضریب نفوذ بالای توان بادی، باتری‌ها عملکرد بهتری نسبت به خازن‌ها دارند. لذا برنامه بهینه‌سازی شارژ/دشارژ باتری‌ها علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو آنها را نیز برنامه‌ریزی می‌کند. حداکثر توان راکتیو مجاز باتری‌ها در هر ساعت، با توجه به توان اکتیو و توان نامی باتری به دست می‌آید، به طوریکه توان راکتیو در هر ساعت باید در رابطه زیر صدق کند:

$$Q_{j,t}^{ST} \leq \sqrt{(S_j^{ST})^2 - (P_{j,t}^{ST})^2}, \quad j=1,2,\dots,n_{ST}, \quad t=1,\dots,24 \quad (5)$$

که در آن،

$Q_{j,t}^{ST}$: توان راکتیو باتری j ام در ساعت t

$P_{j,t}^{ST}$: توان اکتیو باتری j ام در ساعت t

S_j^{ST} : توان نامی باتری j ام

می‌باشند. علاوه بر آن، وضعیت شارژ باتری‌ها (SOC) در هر ساعت با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۵]:

$$SOC_{j,t+1} = \begin{cases} SOC_{j,t} + \frac{P_{j,t}^{ST}}{\eta_{dis}}, & \text{if } P_{j,t}^{ST} \leq 0 \\ SOC_{j,t} + \eta_{ch} \times P_{j,t}^{ST}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن،

$SOC_{j,t}$: وضعیت شارژ باتری j ام در ساعت t

$P_{j,t}^{ST}$: توان اکتیو باتری j ام در ساعت t

η_{ch} : بازدهی باتری و مبدل در هنگام شارژ

η_{dis} : بازدهی باتری و مبدل در هنگام دشارژ

می‌باشند. در رابطه (۶)، $P_{j,t}^{ST}$ می‌تواند مقدار منفی و یا مثبت داشته باشد.

علاوه بر این، باتری‌ها برای بهبود قابلیت اطمینان نیز استفاده می‌شوند. آنها می‌توانند بارهای قطع شده به دلیل رخداد خطا در ترانسفورماتور و فیدرهای فشار متوسط را بصورت مد جزیره‌ای تأمین کنند که در بخش ۲ توضیح داده شد.

۳-۲- بار مصرفی خودروهای برقی

برای بررسی اثر الگوهای مختلف شارژ خودروهای برقی بر روی شبکه‌های توزیع، سه سناریو متفاوت بصورت زیر شبیه‌سازی شده است [۱۹]:

- سناریو ۱: شارژ بدون محدودیت خودروها^{۲۱}. فرض شده خودروها بعد از آخرین سفر و به محض رسیدن به منزل شارژ می‌شوند.
- سناریو ۲: شارژ با محدودیت خودروها^{۲۲}. فرض شده خودروها با یک شیفت زمانی حداکثر سه ساعت بعد از آخرین سفر و رسیدن به منزل شارژ می‌شوند.

- سناریو ۳: شارژ هوشمند خودروها^{۲۳}. فرض شده خودروها دارای انعطاف و قابلیت پر کردن دره‌های پروفیل بار در ساعات غیر پیک را دارا می‌باشد. این سناریو به دلیل فراهم آوردن کنترل کامل زمان و مقدار انرژی شارژ خودروها، مطلوبترین سناریو از دیدگاه مدیران شرکت توزیع می‌باشد. با توسعه زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته، شرکت‌های توزیع می‌توانند از طریق شیف‌ت بار شارژ خودروها به ساعات غیر پیک (قبل از سفر روز بعد)، اثر سوء خودروها روی شبکه را کمینه کنند.

۳-۳- الگوریتم جستجوی ممنوع

برای کمینه کردن تابع هدف رابطه (۱)، باید از یک روش بهینه‌سازی استفاده نمود. از آنجا که تابع هدف مذکور یک تابع ترکیبی، ناپیوسته و پیچیده با تعداد زیادی کمینه محلی به حساب می‌آید، استفاده از روش‌های متداول بهینه‌سازی نمی‌تواند کارساز باشد و باید از روش‌های ابتکاری استفاده کرد [۲۰]. در این مقاله، الگوریتم جستجوی ممنوع (TS) به دلیل سرعت بالا در رسیدن به جواب بهینه، جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم جستجوی ممنوع بر اساس جستجوی محلی تکراری حول یک مسیر حرکت می‌باشد. با شروع از یک نقطه به عنوان راه‌حل عملی با اقلان کردن محدودیت‌ها، برخی راه‌حل‌های همسایه انتخاب می‌شود. تابع هدف همسایگان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. سپس بهترین راه‌حل همسایه به عنوان راه‌حل جاری برای ادامه جستجوهای محلی انتخاب می‌شود. این پروسه تا جایی که معیار توقف اقلان شود، ادامه می‌یابد. برای جلوگیری از سیکل‌های تکراری، یک لیست ممنوع در این الگوریتم استفاده می‌شود [۲۱]. روندنمای الگوریتم جستجوی ممنوع در شکل (۲) نشان داده شده است، که در آن I_{iter} شمارنده تکرارها، S_i راه حل اولیه، S_c راه حل جاری، S_{bn} بهترین راه حل همسایه و S_b بهترین راه حل کلی می‌باشند [۲۲].

۴- مطالعات شبیه‌سازی

سیستم مورد مطالعه برای شبیه‌سازی یک شبکه توزیع ۲۱ شینه، مستخرج از مرجع [۲۳]، با سطح ولتاژ ۱۳/۸ کیلو ولت می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شبکه فرض شده ۶ واحد توربین بادی (مطابق اطلاعات ضمیمه ۱)، نصب شده و همه بارهای مصرفی مسکونی می‌باشد. مکان توربین‌های بادی با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و محیطی شبکه تحت مطالعه و مسائل بهینه‌سازی طراحی (از جمله کنترل ولتاژ و ...) توسط بهره‌بردار تعیین شده و در این مقاله به صورت ثابت فرض می‌شود. همچنین فرض شده منابع تولید پراکنده خورشیدی به صورت توزیع شده در گستره شبکه می‌باشد. هزینه قطع مشترکین برای محاسبه انرژی تأمین نشده، از مرجع

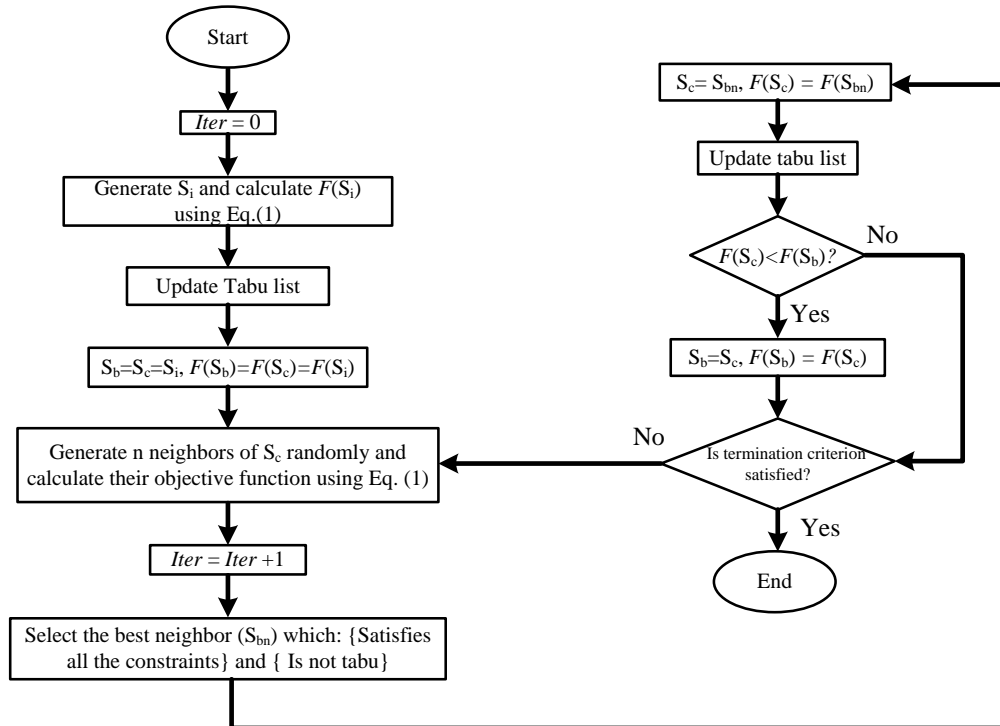
[۲۴] استخراج شده است. منحنی بار، قیمت انرژی، توان خورشیدی و توان بادی برای یک روز نمونه در تابستان در شکل (۴) نشان داده شده است. پروفیل بار و قیمت انرژی بر اساس اطلاعات واقعی شبکه توزیع شهرستان اهر در ایران می‌باشد. توان بادی و خورشیدی از اطلاعات واقعی سرعت باد در آذربایجان و یک منحنی توان برای یک توربین بادی نمونه بدست آمده است. توان مصرفی خودروها برای سه سناریو از اطلاعات مرجع [۲۵] استخراج شده است. همچنین به عنوان نمونه، توان مصرفی خودروها در استراتژی «شارژ بدون محدودیت» نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. در این حالت، سناریوهای بسیار زیادی را می‌توان در نظر گرفت که نشان‌دهنده رفتارهای متفاوتی از خودروهای برقی است. با این حال، تکنیک‌های کاهش سناریو، مناسب‌ترین راهکار جهت کاهش پیچیدگی‌های موجود است. در این مقاله، از امید ریاضی^{۲۴} سناریوهای مختلف استفاده شده است که روش استخراج آن به طور مبسوط در مراجعی مانند [۲۵] و [۲۶] آمده است.

در این مقاله فرض شده سه واحد باتری در شین‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۱ نصب شده است. این شین‌ها به دلیل نزدیکی به توربین‌های بادی و از طرفی قرار گرفتن در انتهای شبکه، از نقطه نظر فنی و اقتصادی بهترین مکان برای نصب باتری‌ها می‌باشند. در ابتدا این فرضیه با استفاده از برخی محاسبات اولیه و روش سعی و خطا، صحت‌گذاری شد. به همین ترتیب، ظرفیت باتری‌ها نیز در شین‌های ۱۵ (S_{i1})، ۲۰ (S_{i2}) و ۲۱ (S_{i3})، با ظرفیت معادل به ترتیب ۱۶۵۰، ۱۷۶۰ و ۱۹۸۰ کیلووات ساعت انتخاب شدند. حداکثر تغییرات ولتاژ مجاز برابر ۵٪ در نظر گرفته شده و مشخصات دیگر شبکه تحت مطالعه در مراجع [۲۳] و [۲۷] یافت می‌شود. توانایی توان پالس باتری در شکل (۵) نشان داده شده [۲۸] و پارامترهای باتری مورد استفاده از مرجع [۱۷] استخراج شده است. مطابق شکل (۵) مشخص است مدت زمان مجاز کار باتری-ها در وضعیت دشارژ به‌طور معکوس با نرخ دشارژ متناسب است به-عنوان مثال اگر باتری‌ها با نرخ ۱۰٪ دشارژ شوند می‌توانند ۷ ساعت یا بیشتر را تحمل کنند. الگوریتم بهینه‌سازی می‌تواند با در نظر گرفتن دو پارامتر زمان تحمل و نرخ دشارژ، گزینه‌های مختلف را بررسی و گزینه بهینه را انتخاب کند.

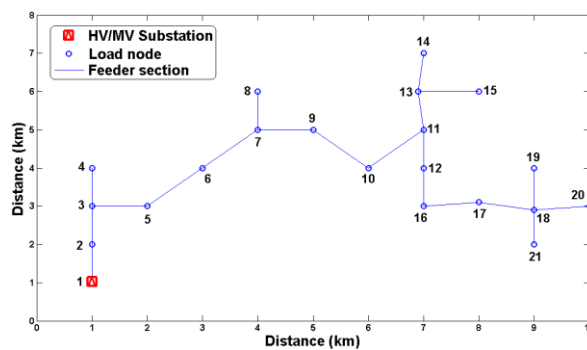
به منظور بررسی اثر تولید توان بادی، خورشیدی و مصرف خودروهای برقی بر روی تابع هدف، با برنامه‌ریزی بهینه باتری‌ها، ۲۱ سناریو به فرم نشان داده شده در جدول (۱) مطالعه شده است. مطابق جدول (۱)، هزینه بهره‌برداری شبکه با افزایش توان تجدید پذیر کاهش می‌یابد، با این حال حد این افزایش، به دلیل الزامات قابلیت اطمینان سیستم محدوده می‌باشد. با توجه به اینکه توان بادی نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر اقتصادی‌تر بوده و حجم توان بالایی را تولید می‌کند، مطابق جدول (۱)، هزینه بهره‌برداری از شبکه با حضور توان بادی در مقایسه با توان خورشیدی در سناریوهای متناظر کاهش پیدا کرده

کاهش دهد. پروفیل توان اکتیو خریداری شده از شبکه بالادست برای ۱۴ سناریو در شکل (۶) نشان داده شده است.

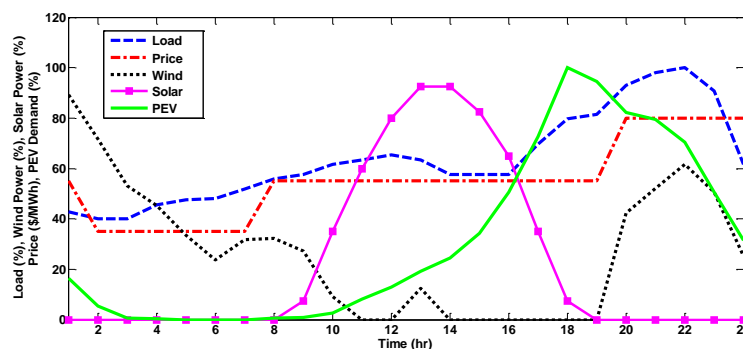
است. همچنین نشان داده شده اگرچه استراتژی شارژ با محدودیت خودروها از نظر اقتصادی مناسب تر از شارژ بدون محدودیت است، اما شارژ هوشمند می تواند هزینه بهره برداری را بیش از شارژ با محدودیت



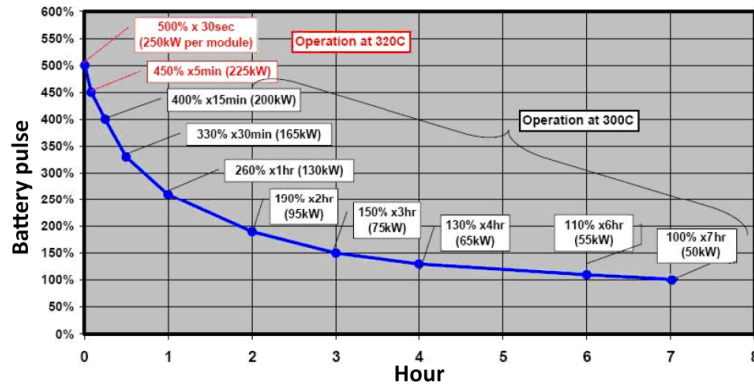
شکل (۲): روندنمای الگوریتم جستجوی ممنوع



شکل (۳): شبکه توزیع تحت مطالعه



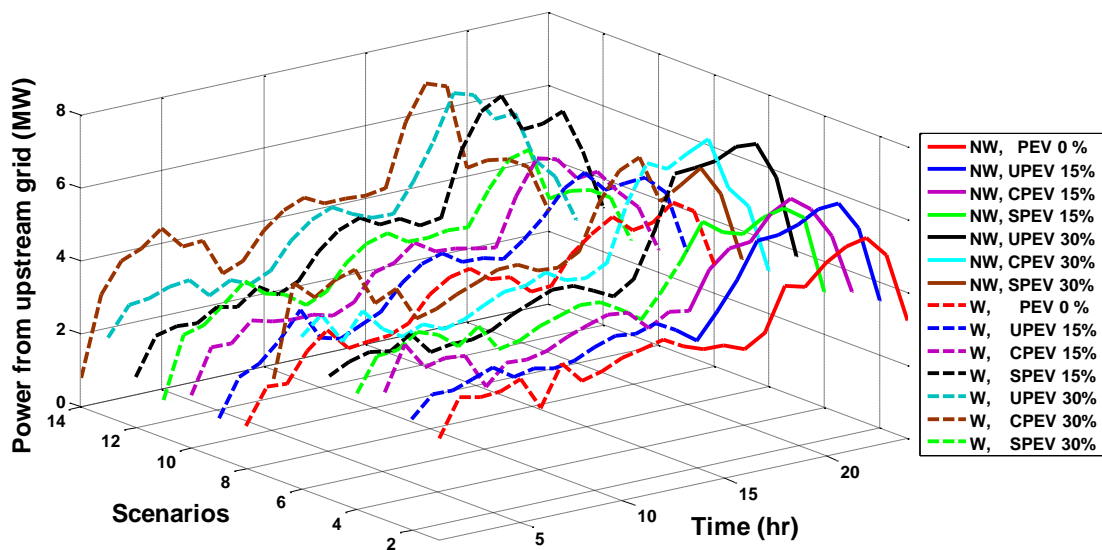
شکل (۴): پروفیل بار (بصورت درصد از پیک)، توان بادی و خورشیدی (بصورت درصد از پیک)، قیمت انرژی (\$/MWh) و توان مصرفی شارژ بدون محدودیت خودروها با ضریب نفوذ ۰.۴۰ (درصد از پیک مصرفی)



شکل (۵): توانایی توان پالسی دشارژ باتری‌ها [۲۸]

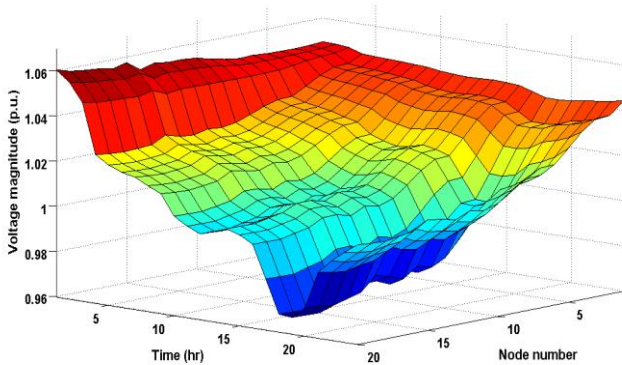
جدول (۱): هزینه تابع هدف برای ۱۴ سناریو متفاوت

هزینه تابع هدف (۱۰۰۰ دلار)									ضریب نفوذ خودروهای برقی (%)
بدون حضور منابع تجدیدپذیر			با حضور توان خورشیدی			با حضور توان بادی			
شارژ هوشمند	شارژ با محدودیت	شارژ بدون محدودیت	شارژ هوشمند	شارژ با محدودیت	شارژ بدون محدودیت	شارژ هوشمند	شارژ با محدودیت	شارژ بدون محدودیت	
۵/۶۳۰۴ (Sc.15)			۴/۹۲۲۰ (Sc.8)			۴/۷۷۴۱ (Sc.1)			۰
۵/۹۸۴۵ (Sc.18)	۶/۰۶۸۱ (Sc.17)	۶/۱۲۲۲ (Sc.16)	۵/۲۶۳۵ (Sc.11)	۵/۳۴۶۷ (Sc.10)	۵/۴۰۸۳ (Sc.9)	۵/۱۰۵۷ (Sc.4)	۵/۱۹۲۷ (Sc.3)	۵/۲۴۸۹ (Sc.2)	۱۵
۶/۳۲۹۵ (Sc.21)	۶/۴۹۵۱ (Sc.20)	۶/۶۲۰۶ (Sc.19)	۵/۶۲۲۳ (Sc.14)	۵/۷۷۴۱ (Sc.13)	۵/۸۹۵۷ (Sc.12)	۵/۴۳۹۹ (Sc.7)	۵/۶۲۸۰ (Sc.6)	۵/۷۳۷۴ (Sc.5)	۳۰

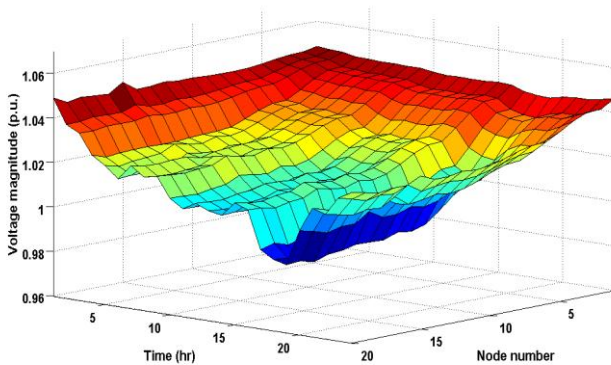


شکل (۶): پروفیل توان اکتیو خریداری شده از شبکه بالادست در ۱۴ سناریو متفاوت، با باد (W)، بدون باد (NW)، شارژ بدون محدودیت خودروها (UPEV)، با محدودیت خودروها (CPEV) و شارژ هوشمند (SPEV)

بانک‌های خازنی که فقط توان راکتیو تولید می‌کنند، نمی‌توانند بطور مناسبی برای این هدف استفاده شوند.



شکل (۷): سطح ولتاژ در شبکه توزیع بدون حضور واحد ذخیره‌ساز (با حضور توان بادی و ضریب نفوذ ۳۰٪ خودرووری برقی)



شکل (۸): سطح ولتاژ در شبکه توزیع در حضور واحد ذخیره‌ساز (با حضور توان بادی و ضریب نفوذ ۳۰٪ خودرووری برقی)

اطلاعات توان شارژ و دشارژ باتری‌ها، تلفات توان شبکه توزیع و توان خریداری شده از شبکه بالادست، با تولید توان بادی و بدون آن، به ترتیب در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است. این جداول نشان می‌دهد که جمع توان اکتیو شارژ/دشارژ باتری‌ها (در بازه ۲۴ ساعت) مقدار غیر صفر مثبت می‌باشد که این به دلیل تلفات در شارژ/دشارژ باتری‌ها است. نتایج همچنین نشان می‌دهد کل توان تلفاتی استراتژی شارژ با محدودیت ممکن است بیشتر از کل توان تلفاتی استراتژی بدون محدودیت باشد، با این حال هزینه تابع هدف متناظر کمتر است. این مسئله به این دلیل است که در زمانهایی که تلفات در استراتژی شارژ با محدودیت بیشتر است، قیمت انرژی پایین است. با این حال به طور عمومی، استفاده از باتری‌ها برای استراتژی شارژ بدون محدودیت موثرتر است. همچنین مطابق این جداول مشخص است که نرخ دشارژ همه باتری‌ها همواره بصورت توان ثابت می‌باشد که این مسئله به دلیل لحاظ کردن اثر توانایی توان پالس باتری‌ها در برنامه‌ریزی آنها می‌باشد. مطابق شکل (۵) باتری‌ها می‌توانند در نرخ دشارژ بالاتری نیز قرار بگیرند ولی به دلیل کم بودن زمان تحمل دشارژ، در اولویت الگوریتم بهینه‌سازی قرار نگرفته‌اند. همچنین، ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده به اندازه‌ای نبوده که کل شبکه در وضعیت جزیره‌ای قرار بگیرد، ولی چون شبکه قابلیت کار به صورت جزیره‌ای را دارد، در صورت رخداد خطا در پایین دست شبکه، قسمت خطادار از بقیه شبکه جدا شده و به صورت جزیره‌ای کار می‌کند. این مسئله باعث می‌شود که انرژی تامین نشده کم شده و در نتیجه هزینه بهره‌برداری کاهش یابد.

علاوه بر آن، تحلیل پخش بار نشان می‌دهد با حضور توان بادی و ضریب نفوذ ۳۰٪ خودرووها با استراتژی شارژ بدون محدودیت، در صورت عدم حضور باتری‌ها، محدودیت حداکثر ولتاژ مجاز بعضی شین‌ها نمی‌تواند اقلان شود. این موضوع در شکل (۷) نشان داده شده است. با این حال، برنامه‌ریزی بهینه باتری‌ها این مشکل را به فرم شکل (۸) رفع می‌کند. از طرف دیگر، بدون توان بادی و باتری‌ها، در صورت افزایش ضریب نفوذ خودرووها به بالاتر از ۳۰٪، محدودیت توان عبوری از برخی فیدرها اقلان نمی‌شود. با این حال، با اضافه کردن باتری‌ها به روش پیشنهادی، همه محدودیت‌های بهره‌برداری اقلان می‌شوند. بنابراین به عنوان یک نتیجه، ریسک شبکه‌های توزیع در صورت عدم حضور باتری‌ها قابل قبول نخواهد بود.

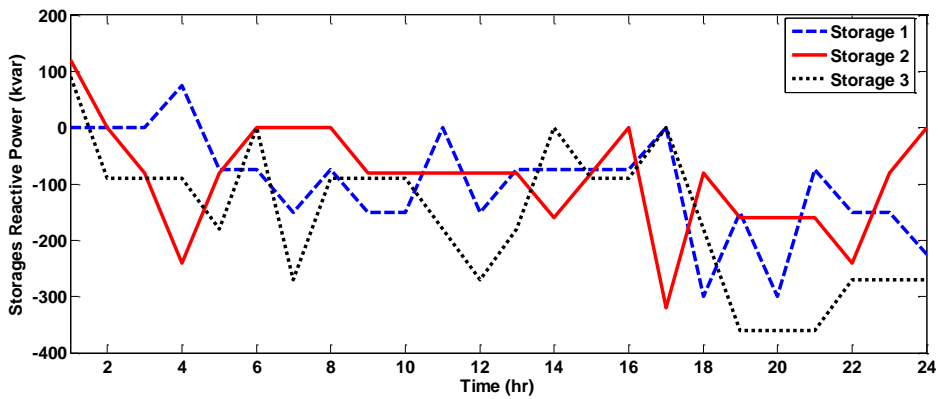
به منظور بهینه‌سازی سود، باتری‌ها همچنین برای تنظیم ولتاژ شین‌ها، از طریق جذب و تزریق هم توان اکتیو و هم توان راکتیو استفاده می‌شوند. توان راکتیو باتری‌ها نقش مهمی در تنظیم ولتاژ بازی می‌کند؛ زیرا می‌تواند توسط باتری‌ها هم تولید و هم مصرف شود. پروفیل توان راکتیو باتری‌ها برای ۴ سناریو در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها برای کمینه کردن تلفات و تنظیم بهینه ولتاژ، باتری‌ها در زمان‌های مختلف، توان راکتیو تولید و یا مصرف می‌کنند. لذا می‌توان نتیجه گرفت در شبکه‌های توزیع جدید،

جدول (۲): توان شارژ/دشارژ باتری‌ها، تلفات شبکه توزیع و توان خریداری شده از شبکه بالادست (کیلو وات)، در حضور تولید توان بادی

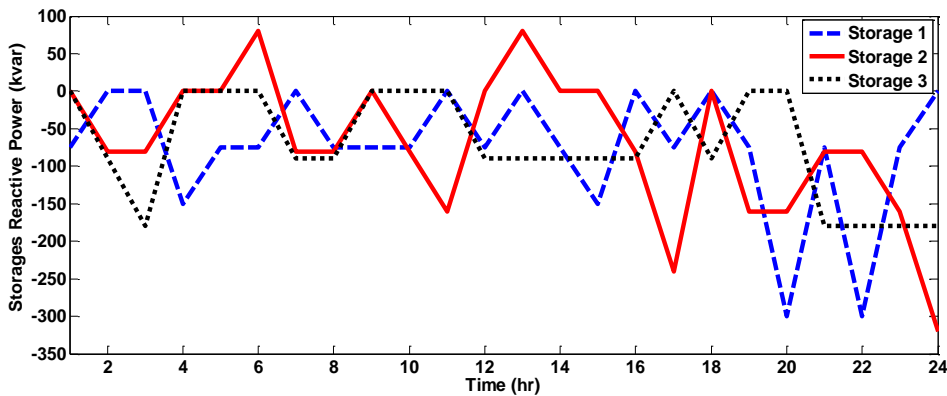
شارژ هوشمند					شارژ با محدودیت					شارژ بدون محدودیت					ساعت
شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			
		S_{I3}	S_{I2}	S_{I1}			S_{I3}	S_{I2}	S_{I1}			S_{I3}	S_{I2}	S_{I1}	
۸۰۰	۴/۰۴	۳۴/۲۱	۴/۳۴	۸۷/۸	۲۱۷۱	۱۸/۵۵	۱۲۱/۹	۴۸/۶۸	۱/۰۴	۱۲۸۶	۷/۷۱	۸۰/۷	۳۲۰	۱/۶۶	۱
۲۹۶۰	۴۵/۴۸	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۲۹۵۷	۴۶/۵۱	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۲۳۸۹	۳۴/۱۴	۷۴۶/۰۸	۳۲۰	۳۰۰	۲
۳۷۵۲	۸۷/۶۵	۵۹۶/۸	۳۷۸/۲	۳۴۲/۲	۳۰۲۶	۵۴/۸۲	۳۶۰	۳۵۷/۲۸	۳۵۵/۵۳	۲۵۲۹	۳۹/۴۴	۵۵۷/۰۳	۳۲۰	۳۰۰	۳
۳۹۷۸	۹۵/۱۶	۴۳۱/۱	۳۲۰	۲۵۷/۸	۳۲۰۵	۶۷/۶۱	۳۶۰	۳۲۰	۳۱۴/۳۸	۲۵۰۴	۴۶/۲	۱۲/۲	۳۲۰	۳۰۰	۴
۴۴۲۰	۱۲۳/۲	۳۶۰	۳۸۰/۳	۳۰۰	۳۲۶۴	۷۲/۴۷	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۲۸۲۹	۴۷/۶۲	۲۰۲/۵۲	۳۲۰	۴۶/۹۷	۵
۳۷۸۹	۷۹/۳۸	.	.	۲۱۲/۲	۲۷۳۵	۴۴/۳۷	۳۳۸/۰۵	.	.	۲۶۹۶	۴۲/۵۶	۲۰۱/۴۶	.	.	۶
۳۸۳۹	۸۰/۵۱	.	۱۹۷/۱	.	۳۰۳۵	۵۵/۵۰	.	۲۳۴/۰۳	۲۲۹/۰۴	۳۱۲۳	۵۶/۳	.	.	۵۵۱/۱	۷
۲۸۱۳	۳۹/۷۱	۱۷/۵۸	.	.	۲۷۹۸	۴۲/۷۹	.	.	.	۲۷۹۷	۴۱/۷	.	.	.	۸
۳۰۴۱	۴۷/۹۶	.	.	.	۳۰۴۶	۵۲/۷۴	.	.	.	۳۰۴۲	۴۸/۹	.	.	.	۹
۳۷۳۹	۷۹/۴	.	.	.	۳۷۴۲	۸۲/۸۸	.	.	.	۳۷۴۰	۸۰/۲۶	.	.	.	۱۰
۴۱۹۱	۱۰۴/۳	.	.	.	۴۱۹۲	۱۰۵/۴	.	.	.	۴۱۹۲	۱۰۴/۶	.	.	.	۱۱
۴۴۱۰	۱۱۴/۸	.	.	.	۴۴۱۲	۱۱۶/۸	.	.	.	۴۴۱۰	۱۱۴/۸	.	.	۰/۲۶	۱۲
۴۱۱۰	۹۵/۲	.	.	.	۴۱۱۲	۹۷/۳	.	.	.	۴۱۱۱	۹۶/۴۴	.	.	.	۱۳
۴۱۳۵	۱۰۰/۸	.	.	.	۳۹۲۹	۸۷/۳	-۱۹۲/۸	.	.	۴۱۳۶	۱۰۱/۶	.	.	.	۱۴
۴۱۳۵	۹۳/۸۲	.	-۱۷۱/۴	.	۳۹۷۵	۸۴/۷	.	-۱۷۱/۴	۱۵/۲	۳۹۴۰	۸۰/۱۱	-۱۹۲/۸	.	-۱۶۰/۷	۱۵
۴۲۸۲	۹۶/۲۱	.	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۴۶۴۹	۱۳۱/۴	.	.	-۱۵۱/۵	۴۰۹۶	۸۱/۹	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	-۱۶۰/۷	۱۶
۵۸۷۱	۲۰۴/۶	.	.	.	۵۶۸۱	۱۸۵/۲	.	-۱۷۱/۴	.	۵۷۰۳	۱۸۵/۹	.	-۱۵۰	.	۱۷
۶۸۷۳	۲۶۷/۶	-۱۹۲/۸	.	.	۶۸۷۹	۲۷۴/۶	-۱۹۲/۸	.	.	۶۶۹۹	۲۴۴/۴	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	.	۱۸
۶۷۰۷	۲۴۷/۲	-۱۹۲/۸	.	-۱۶۰/۷	۶۷۴۵	۲۵۵/۱	.	-۱۷۱/۴	.	۶۹۳۹	۲۷۶	.	-۱۵۰	.	۱۹
۴۳۸۸	۸۲/۶۱	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۶۰۲۲	۱۷۸/۶	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۵۱/۵	۶۰۲۶	۱۷۰/۳	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	-۱۶۰/۷	۲۰
۴۴۸۳	۸۴/۲۵	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۶۰۵۷	۱۷۰/۸	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۵۱/۵	۶۰۶۸	۱۶۹	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	-۱۶۰/۷	۲۱
۴۳۸۴	۷۸	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۴۵۸۲	۹۵	-۱۹۲/۸	.	-۱۵۱/۵	۶۱۷۰	۱۸۸/۵	.	.	-۱۶۰/۷	۲۲
۴۰۴۹	۶۷/۰۵	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۴۰۶۳	۷۱/۶۷	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۵۱/۵	۵۰۵۷	۱۱۱/۸	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	-۱۶۰/۷	۲۳
۲۷۶۰	۳۰	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۲۷۷۲	۳۲/۶۲	-۱۹۲/۸	-۱۷۱/۴	-۱۵۱/۵	۳۳۸۶	۴۸/۳	-۱۹۲/۸	-۱۵۰	-۱۶۰/۷	۲۴
۹۷۹۰۹	۲۳۴۸	۴۵۰	۴۰۰	۳۷۵	۹۸۰۴۹	۲۴۲۴	۴۵۰	۴۰۰	۶۰۶	۹۷۹۶۹	۲۴۰۹	۴۵۰	۴۰۰	۳۷۵	جمع

جدول (۳): توان شارژ/دشارژ باتری‌ها، تلفات شبکه توزیع و توان خریداری شده از شبکه بالادست (کیلو وات)، بدون حضور تولید توان بادی

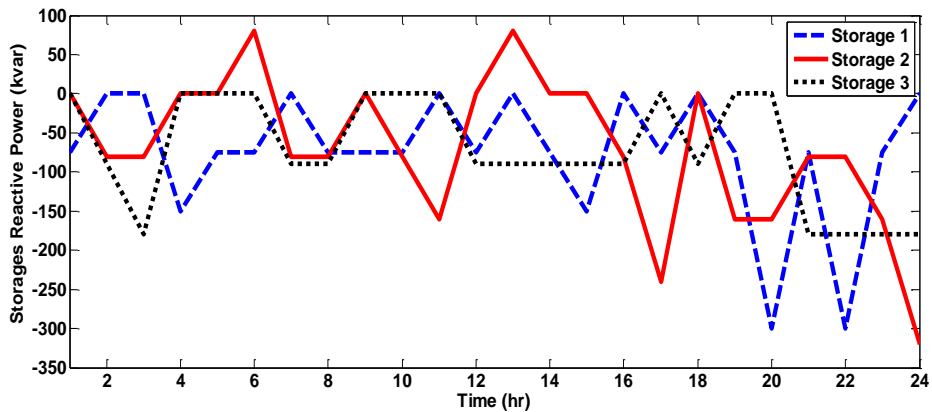
شارژ هوشمند					شارژ با محدودیت					شارژ بدون محدودیت					ساعت
شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			شبکه بالادست	تلفات	ذخیره‌سازها			
		St3	St2	St1			St3	St2	St1			St3	St2	St1	
۲۷۳۹	۴۵/۴۹	۱/۰۹	۴۰/۴۱	۰/۲۷	۴۱۷۲	۱۰۵/۰	۰/۴۵	۰/۶۴	۱۰۲/۵	۳۳۸۳	۷۲/۶۳	۶۱/۲۷	۴۸/۶۸	۲۴۱/۶	۱
۵۲۵۶	۲۰۵/۱	۵۱۲/۷	۴۱۳/۸	۵۹۹/۷۲	۴۶۵۶	۱۵۳/۹	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۳۶۵۸	۹۷/۸۳	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۲
۴۷۲۸	۱۵۸/۲	۴۲۴/۸	۳۲۰	۳۰۰	۳۸۱۴	۹۹/۵۸	۳۶۰	۱۰۵/۲	۱۷۲/۱	۳۷۹۱	۱۱۰/۲۶	۵۳۹/۱	۳۵۷/۳	۲۹۳/۷	۳
۵۰۸۸	۱۸۰/۵	۳۶۰	۳۷۰	۳۰۰	۴۵۳۸	۱۵۹/۱	۳۶۰	۷۸۷/۴	۸۴	۳۷۱۷	۹۶/۲۷	۱۶۰/۵	۳۲۰	۳۰۰	۴
۵۲۶۶	۱۹۳/۵	۴۵۱	۳۲۰	۳۰۰	۳۸۹۴	۱۰۷/۶	۳۶۰	۱۹۶/۶	۳۰۰	۴۰۵۵	۱۱۸/۷۱	۳۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۵
۴۲۱۶	۱۰۷/۳	.	۸۲/۶	.	۳۵۷۵	۸۵/۸۵	۲۵/۵۶	.	۴۸۲/۲	۳۴۴۲	۷۶/۹۲	۳۱۹/۱	.	۶۴/۶۵	۶
۴۴۸۸	۱۲۱/۶	۵۰/۴۴	۵۲/۵	.	۳۸۰۵	۹۸/۳۷	۲۷۲/۷	۲۱۴/۸	.	۳۵۳۱	۷۸/۳۱	.	۲۳۴	.	۷
۳۵۴۳	۷۴/۴۷	.	.	.	۳۵۰۵	۷۵/۸۵	.	.	.	۳۵۴۳	۷۴/۱۶	.	.	.	۸
۳۶۷۶	۸۰/۰۷	.	۰/۸	.	۳۶۷۷	۸۱/۴۶	.	.	.	۳۶۷۵	۸۰	.	.	.	۹
۳۹۵۸	۹۲/۳۸	.	.	.	۳۹۶۳	۹۴/۸۲	.	۲/۳۷	.	۳۹۵۸	۹۲/۶۲	.	.	.	۱۰
۴۱۹۰	۱۰۳/۶	.	.	.	۴۱۹۲	۱۰۵/۴	.	.	.	۴۱۹۱	۱۰۳/۷۳	.	.	.	۱۱
۴۴۱۰	۱۱۵/۱	.	.	.	۴۲۸۸	۱۰۵/۲	.	-۱۷۱/۴	۵۹/۲۴	۴۴۱۰	۱۱۵	.	.	.	۱۲
۴۴۰۵	۱۱۵/۶	.	.	.	۴۴۷۱	۱۲۰/۴	۶۱/۳	.	.	۴۴۰۴	۱۱۴/۴۶	.	.	.	۱۳
۴۱۳۶	۱۰۲/۵	.	.	.	۴۱۳۵	۱۰۱/۱	.	.	.	۴۱۳۵	۱۰۰/۸۸	.	.	.	۱۴
۴۱۴۹	۹۶/۸۶	.	.	-۱۶۰/۷	۴۱۳۹	۹۷/۳۷	.	-۱۷۱/۴	.	۳۹۵۳	۸۰/۴۳	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	.	۱۵
۴۴۵۹	۱۱۰/۳	-۱۶۸/۸	.	.	۴۴۳۵	۱۰۹	-۱۹۲/۹	.	.	۴۳۰۷	۹۸/۳۰	-۱۶۸/۸	.	-۱۴۰/۶	۱۶
۵۶۷۷	۱۸۲/۵	.	-۱۷۱/۴	.	۵۸۷۷	۲۰۹/۸	.	.	.	۵۵۲۳	۱۶۵/۹۷	-۱۶۸/۸	.	-۱۴۰/۶	۱۷
۶۵۲۲	۲۲۵/۷	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۶۹۱۷	۲۸۰/۳	.	.	-۱۶۰/۷	۶۸۹۹	۲۷۲/۳۵	.	-۱۷۱/۴	.	۱۸
۶۷۳۴	۲۵۱	-۱۶۸/۸	.	-۱۶۰/۷	۶۷۱۵	۲۵۵/۴	-۱۹۲/۹	.	-۱۶۰/۷	۶۹۵۲	۲۷۹/۶۷	.	.	-۱۴۰/۶	۱۹
۵۴۲۱	۱۵۱/۸	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۷۰۴۶	۲۷۰/۷	-۱۹۲/۹	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۷۰۸۸	۲۶۸/۸۳	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۴۰/۶	۲۰
۵۷۵۲	۱۷۲/۴	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۷۳۳۰	۲۹۵/۲	-۱۹۲/۹	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۷۳۷۱	۲۹۲/۱۷	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۴۰/۶	۲۱
۶۰۵۹	۱۹۹/۹	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	.	۵۸۵۷	۱۸۱/۷	-۱۹۲/۹	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۷۳۱۸	۲۸۷/۹۵	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۴۰/۶	۲۲
۵۲۶۹	۱۴۳	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۵۲۴۸	۱۴۵	-۱۹۲/۹	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۶۲۹۸	۲۰۹/۸۶	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۴۰/۶	۲۳
۳۳۶۸	۵۴/۱۷	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۳۳۴۲	۵۱/۸۹	-۱۹۲/۹	-۱۷۱/۴	-۱۶۰/۷	۴۰۰۰	۷۹/۸۴	-۱۶۸/۸	-۱۷۱/۴	-۱۴۰/۶	۲۴
۱۱۳۵۲۱	۳۲۸۳	۴۴۹	۴۰۰	۳۷۵	۱۱۳۶۳۰	۳۳۹۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۷۵	۱۱۳۶۰۶	۳۳۶۷	۴۴۹	۴۰۰	۳۷۵	جمع



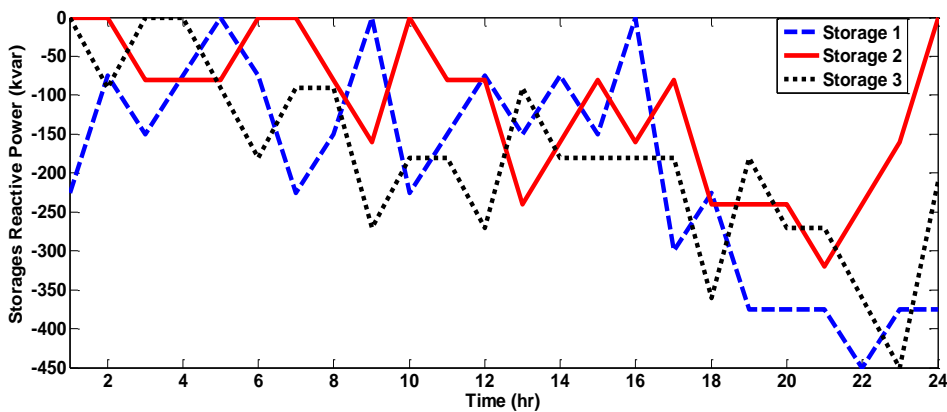
شکل (۹): پروفیل توان راکتیو باتری‌ها در شبکه توزیع در حضور توان بادی و ۳۰٪ ضریب نفوذ خودروی برقی



شکل (۱۰): پروفیل توان راکتیو باتری‌ها در شبکه توزیع در حضور توان بادی و بدون حضور خودروی برقی



شکل (۱۱): پروفیل توان راکتیو باتری‌ها در شبکه توزیع بدون توان بادی و بدون حضور خودروی برقی



شکل ۱۲: پروفیل توان راکتیو باتری‌ها در شبکه توزیع بدون توان بادی ولی با ۳۰٪ حضور خودروی برقی

مراجع

۵- نتیجه گیری

بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع یک مسئله مدیریتی است که از نقطه نظر فنی و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. در این مقاله، تولید توان بادی، خورشیدی و توان مصرفی خودروهای برقی به منظور کمینه کردن هزینه بهره‌برداری با استفاده از ذخیره‌سازها مدیریت شد. همچنین، بر خلاف مطالعات قبلی، توان راکتیو توربین‌های بادی نیز به صورت یک ضریب توان متغیر مدلسازی و در نظر گرفته شد. برای کمینه کردن تابع هدف تحت محدودیت‌های فنی، هم توان اکتیو و هم توان راکتیو برنامه‌ریزی شده و سناریوهای مختلف شارژ خودرو جهت بررسی اثر آنها روی پروفیل شارژ/دشارژ باتری‌ها در نظر گرفته شد. نتایج عددی نشان داد به واسطه مدیریت شبکه به روش پیشنهادی، هزینه بهره‌برداری شبکه کاهش یافت. با توجه به اقتصادی بودن توان بادی و حجم بالای تولید توان در قیاس با سایر منابع تجدیدپذیر، هزینه بهره‌برداری با حضور توان بادی در مقایسه با حضور توان خورشیدی در سناریوهای متناظر کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد اگرچه در استراتژی شارژ با محدودیت نسبت به استراتژی بدون محدودیت، کل توان خریداری شده از شبکه بالادست و توان تلفاتی شبکه بیشتر است، ولی تابع هدف آن به دلیل پایین بودن قیمت انرژی در ساعات غیرپیک کمتر می‌باشد. ولی با این حال شارژ هوشمند بهترین نتیجه را از نقطه نظر بهینه‌سازی تابع هدف دارا می‌باشد هرچند به هزینه سرمایه‌گذاری و زیرساخت پیشرفته‌تری جهت پیاده‌سازی در شبکه نیازمند است. همچنین، برنامه‌ریزی بهینه چند هدفه باتری‌ها علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری و ریسک، شاخص انرژی تأمین نشده در مد جزیره‌ای را با رعایت قیود شبکه بهبود داده، درحالیکه بدون حضور باتری‌ها، محدودیت‌های فنی شبکه در برخی نقاط اقلان نمی‌شدند.

ضمیمه (۱)

اطلاعات توان تولیدی بادی نصب شده در شبکه تحت مطالعه بصورت جدول (۴) می‌باشد.

جدول (۴): اطلاعات توان تولیدی بادی

توربین ۱		توربین ۲		توربین ۳	
مکان	ظرفیت	مکان	ظرفیت	مکان	ظرفیت
شین ۱۳	۵۰۰ کیلووات	شین ۱۵	۹۰۰ کیلووات	شین ۱۸	۵۰۰ کیلووات
توربین ۴		توربین ۵		توربین ۶	
مکان	ظرفیت	مکان	ظرفیت	مکان	ظرفیت
شین ۱۹	۳۰۰ کیلووات	شین ۲۰	۵۰۰ کیلووات	شین ۲۱	۱۰۰۰ کیلووات

- [1] J. Zhao, S. Kucuksari, E. Mazhari, Y. Son, "Integrated analysis of high-penetration PV and PHEV with energy storage and demand response", Applied Energy, Vol. 112, pp. 35–51, 2013.
- [2] A.R. Abul'Wafa, "Optimization of economic/emission load dispatch for hybrid generating systems using controlled elitist NSGA-II", Electric Power Systems Research, Vol. 105, pp. 142–151, 2013.
- [3] E. Pashajavid, M.A. Golkar, "Non-Gaussian multivariate modeling of plug-in electric vehicles load demand" Electrical Power and Energy Systems, Vol. 61, pp. 197–207, 2014.
- [4] L. Zhang, n. Gari, L.V. Hmurcik, "Energy management in a microgrid with distributed energy resources", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 297–305, 2014.
- [5] B. Bahmani-Firouzi, R. Azizipanah-Abarghooee, "Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 56, pp. 42–45, 2014.
- [6] L. Zhang, A. Wirth, "Wind energy management with battery storage", Journal of the Operational Research Society, Vol. 61, pp. 1510–1522, 2010.
- [7] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation", IET Renewable Power Generation, Vol. 5, pp. 258–267, 2011.
- [8] S. Chakraborty, M.D. Weiss, M.G. Simoes, "Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, 97–109, 2007.
- [9] A.A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, M.R.A. Pahlavani, "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source", Energy, Vol. 36, pp. 6490–6507, 2011.
- [10] T. Niknam, A. Kavousifard, S. Tabatabaei, J. Aghaei, "Optimal operation management of fuel cell/wind/photovoltaic power sources connected to distribution networks", Journal of Power Sources, Vol. 196, pp. 8881–8896, 2011.
- [11] E. Alvarez, A.M. Campos, P. Arboleya, A.J. Gutierrez, "Microgrid management with a quick response optimization algorithm for active power dispatch", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 43, pp. 465–473, 2012.
- [12] N. Jayasekara, P. Wolfs and M. A. S. Masoum, "An optimal management strategy for distributed storages in distribution networks with high penetrations of PV", Electric Power Systems Research, Vol. 116, pp. 147–157, 2014.
- [13] T. Niknam, H. Z. Meymand and H. D. Mojarrad, "A practical multi-objective PSO algorithm for optimal operation management of distribution network with regard to fuel cell power plants", Renewable Energy, Vol. 36, pp. 1529-1544, 2011.
- [14] T. Niknam, H. Z. Meymand and H. D. Mojarrad, "An efficient algorithm for multi-objective optimal operation management of distribution network considering fuel cell power plants", Energy, Vol. 36, pp. 119-132, 2011.
- [15] A. Gabash, P. Li, "Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage", IEEE Transactions on Power System, Vol. 27, pp. 2026–2035, 2012.

زیرنویس‌ها

¹ Plug-in Electric Vehicles

² Renewable Energy

³ Genetic Algorithm

⁴ Linear Programing

⁵ Adaptive Modified Particle Swarm Optimization

⁶ Micro-turbine

⁷ Fuel cell

⁸ Honey Bee Mating Optimization

⁹ Particle Swarm Optimization

¹⁰ Tabu Search

¹¹ Non-dispatchable Components

¹² Energy Not Supplied

¹³ Islanding Mode

¹⁴ State of Charge

¹⁵ Outage Cost

¹⁶ Backward-Forward

¹⁷ Pulse Power Capability

¹⁸ Peak Shaving

¹⁹ Voltage Regulations

²⁰ Reliability Enhancement

²¹ Unconstrained Charging

²² Constrained Charging

²³ Smart Charging

²⁴ Expected Value

- [16] A. Gabash, P. Li, "Flexible optimal operation of battery storage systems for energy supply networks", IEEE Transactions on Power System, Vol. 28, pp. 2788–2797, 2013.
- [17] P. Poonpun, W.T. Jewell, "Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, pp. 529–534, 2008.
- [18] A. Kusiak, H. Zheng, "Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm", Energy, Vol. 5, pp. 1324–32, 2010.
- [19] J. Wang, C. Liu, D. Ton, Y. Zhou, J. Kim, A. Vyas, "Impact of plug-in hybrid electric vehicles on power systems with demand response and wind power", Energy Policy, Vol. 39, pp. 4016–4021, 2011.
- [20] R. Banos, F. M. Agugliaro, F. G. Montoya and et al., "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 1753–1766, 2011.
- [21] E.K. Burke, G. Kendall, "Search methodologies: introductory tutorials in optimization and decision support techniques", New York: Springer, 2005.
- [22] M. Sedghi, "Distribution network expansion using modern optimization algorithms", MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2009.
- [23] E.G. Carrano, F.G. Guimaraes, R.H.C. Takahashi, O.M. Neto, F. Campelo, "Electric distribution network expansion under load-evolution uncertainty using an immune system inspired algorithm", IEEE Transactions on Power System, Vol. 22, pp. 851–861, 2007.
- [24] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar, M.R. Haghifam, "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 52, pp. 221–230, 2013.
- [25] NYSERDA and EPRI, "Transportation electrification in New York state", Technical Update, New York State Energy Research and Development Authority, 2011.
- [26] E. Pashajavid, M.A. Golkar, "Charging of plug-in electric vehicles: stochastic modelling of load demand within domestic grids", 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012), Tehran, Iran, pp. 535–539, 2012.
- [27] E.G. Carrano, F.G. Guimaraes, R.H.C. Takahashi, O.M. Neto, F. Campelo, "Electric distribution network expansion under load evolution uncertainty using an immune system inspired algorithm: simulation data", Technical Report, Universidad Federal de Minas Gerais, (2007). [Online] Available: <http://www.mat.ufmg.br/~taka/techrep/aisnet01.pdf>
- [28] E. Naderi, I. Kiaei, M.R. Haghifam, "NaS technology allocation for improving reliability of DG-enhanced distribution networks", IEEE Conference on PMAPS, Singapore, pp. 148–153, 2010.