

# افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده توسط جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه‌های توزیع

ناصر بیابانی، مریم رضانی و حمید فلقی

DG<sup>۱</sup>ها نمایان‌تر خواهد شد. از آنجا که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت است، ایده ذخیره‌سازی برق در ساعات غیر پیک (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک (برق گران) مطرح شد. در دهه‌های اخیر انواع تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز انرژی به طور روزافزونی توسعه یافته‌اند. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در کنار منابع تولید پراکنده باعث می‌شود در مواقعی که بار سیستم از حد معینی کمتر است، سیستم ذخیره‌ساز شارژ شده و در زمانی که بار از حد معینی زیادتر می‌شود، سیستم ذخیره‌ساز دشارژ شده و از این رو تعادلی بین بار و تولید ایجاد می‌شود. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مکان‌یابی واحدهای DG در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در آنها کاهش هزینه‌های مرتبط با تلفات، قابلیت اطمینان و هزینه احداث واحدهای تولیدی به عنوان هدف طراحی مورد نظر بوده است [۲] تا [۴]. در [۵] مسأله جایابی واحدهای تولید پراکنده در فیدرهای شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توسط الگوریتم ژنتیک حل شده است. در [۶] مکان‌یابی منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم چندهدفه PSO با دو تابع هدف کاهش هزینه بهره‌برداری واحدها و آلودگی برای تعداد مشخصی از واحدهای DG بررسی شده است. در [۷] با استفاده از الگوریتم NSGAI<sup>۲</sup> سعی در افزایش میزان نفوذ منابع تولید پراکنده شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله شامل افزایش فروش انرژی، کاهش میزان تلفات و کاهش میزان سطوح اتصال کوتاه می‌باشد. در [۸] از یک روش ترکیبی شامل GA و OPF<sup>۳</sup> با تابع هدف حداکثرسازی توان تزریقی توسط منابع تولید پراکنده استفاده شده است. در [۹] تا [۱۱] نیز از طریق شبیه‌سازی تشویق توسعه‌دهندگان و بهره‌برداران، از یک OPF استفاده شده که نتیجه آن انتخاب ظرفیت مناسب DG با توجه به محدودیت‌های شبکه است. در [۱۲] ضمن بررسی تأثیر واحدهای DG روی تلفات اهمی و ظرفیت سیستم توزیع، الگوریتمی برای یافتن پاسخ تقریبی مکان واحدهای DG روی خطوط به منظور کاهش تلفات سیستم پیشنهاد شده است.

در [۱۳] به منظور تعیین مکان و ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک آموزش داده شده و به ظرفیت‌یابی و کنترل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی پرداخته شده است. در [۱۴] روش تحلیلی و آنالیز هزینه-فایده، برای تعیین میزان استفاده از سیستم ذخیره‌ساز به کار برده شده و تابع هدف برای ظرفیت‌یابی این سیستم‌ها بیان شده است. در [۱۵] به جایابی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه‌های توزیع شعاعی با استفاده از پخش بار بهینه در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته شده است.

در این مقاله ابتدا مسأله مکان‌یابی DG با توجه به هدف کمینه‌سازی

چکیده: منابع تولید پراکنده افزون بر مزایای بسیار زیادی که برای سیستم قدرت به همراه دارند، دارای معایبی نیز هستند. افزایش نفوذ این تجهیزات در سیستم قدرت، در کنار اثرات مطلوبی چون کاهش توان دریافتی از شبکه بالادست، می‌تواند به اضافه بار در زمان‌های کم‌باری سیستم منجر شود. از این رو در مطالعات اخیر، تلاش‌های فراوانی برای رفع موانع افزایش نفوذ این منابع صورت گرفته است. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی یکی از روش‌هایی است که با جلوگیری از عیوب ممکن منابع تولید پراکنده، می‌تواند باعث افزایش نفوذ این منابع در سیستم‌های قدرت شود. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با ذخیره‌سازی انرژی در ساعات کم‌باری و تحویل آن به شبکه در ساعات پیک، می‌تواند افزون بر کاهش تلفات شبکه توزیع، نفوذ منابع تولید پراکنده را نیز افزایش دهند. در این مقاله پس از تشریح مسایل مکان‌یابی منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با هدف کاهش تلفات شبکه توزیع ارائه شده است. نتایج به دست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد مکان‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نسبت به جایابی جداگانه آنها، می‌تواند نفوذ منابع تولید پراکنده را افزایش داده و تلفات شبکه توزیع را به مقدار بیشتری کاهش دهد.

کلید واژه: افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده، الگوریتم ژنتیک، جایابی همزمان، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی.

## ۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی و در عین حال پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی واحدهای تولید پراکنده، جذابیت ویژه‌ای در استفاده از این واحدها ایجاد کرده است. در واقع تولیدات پراکنده یکی از تجهیزات مهم در آینده سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند که به خاطر کاهش حجم سرمایه‌گذاری، نزدیکی در محل مصرف، افزایش قابلیت اطمینان در تأمین انرژی مصرفی مشترکین و بسیاری مزیت‌های دیگر نقش مهمی را در صنعت برق کشورهای پیشرفته و توسعه‌یافته ایفا خواهند نمود [۱]. با افزایش استفاده از تولیدات پراکنده و همچنین مسایل فنی و مالی این تکنولوژی‌ها، مسایلی چون تعیین ظرفیت و مکان اتصال این تجهیزات به شبکه مطرح شده است. با جلوگیری از عیوبی که در اثر استفاده از منابع تولید پراکنده در لحظات کم‌باری به وجود می‌آید، مزایای استفاده از

این مقاله در تاریخ ۱۵ مهر ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۳ فروردین ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

ناصر بیابانی، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، بیرجند، (email: Biabani\_naser@yahoo.com).

مریم رضانی، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، (email: mramezani@birjand.ac.ir).

حمید فلقی، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، (email: falaghi@birjand.ac.ir).

1. Distributed Generation
2. Nondominated Sorting Genetic Algorithm
3. Optimal Power Flow

قابل ذخیره یا تحویل ESS است. در به کارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی دو خاصیت توان بالا و انرژی بالا اهمیت ویژه‌ای دارد. باتری‌های جریانی چون وانادیوم (VRB) و روی-برم (ZBB) تکنولوژی‌های مناسب برای کاربرد انرژی بالا با هدف مدیریت انرژی می‌باشند [۲۱]. با توجه به معیارها و نکات ارائه شده در [۲۱] و [۲۲]، در این مقاله باتری VRB مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعضی از ویژگی‌های خاص این نوع باتری مانند سازگاری با محیط زیست [۲۳]، توان و زمان بالای دشارژ، مجزای بودن توان و انرژی نامی از هم، سادگی جایگزین نمودن الکترولیت، پاسخ سریع باتری در تغییر وضعیت آن از حالت شارژ به دشارژ و نداشتن تخلیه خودبخودی موجب شده تا این نوع باتری مطلوبیت بیشتری در سیستم قدرت داشته باشد.

### ۳- ارزیابی هزینه

در این قسمت هزینه‌های مرتبط با منابع تولید پراکنده، تلفات شبکه و ذخیره‌سازهای انرژی مطرح می‌شود.

#### ۳-۱ هزینه‌های منابع تولید پراکنده

به طور کلی می‌توان بخش‌های زیر را به عنوان هزینه‌های وابسته به منابع تولید پراکنده در نظر گرفت:

#### ۳-۱-۱ هزینه نصب منابع تولید پراکنده

واحدهای تولید پراکنده بسته به نوع و ظرفیتشان دارای هزینه‌های سرمایه‌گذاری متفاوتی هستند که طبیعتاً کمیته‌سازی این هزینه‌ها یکی از مهم‌ترین اهداف مسأله است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه منابع تولید پراکنده را می‌توان به صورت (۱) بیان کرد

$$C_{IC\_DG} = \sum_{i=1}^N IC_i \times C_{DG} \times CRF \quad (1)$$

که در آن

$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^z}{(1+i_r)^z - 1} \quad (2)$$

در این روابط  $N$  تعداد DG نصب شده،  $IC_i$  هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نصب  $i$  امین DG بر حسب  $\$/kVA$ ،  $C_{DG}$  ظرفیت DG بر حسب  $kVA$ ،  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه،  $i_r$  نرخ سود بهره و  $Z$  تعداد سال عمر پروژه می‌باشد.

ضریب  $CRF$  در (۱) برای بر سال کردن هزینه نصب DG صورت می‌گیرد تا امکان جمع کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فراهم شود.

#### ۳-۱-۲ هزینه بهره‌برداری سالانه منابع تولید پراکنده

هزینه‌های بهره‌برداری سالانه منابع تولید پراکنده نیز باید در برآورد هزینه‌های DG در نظر گرفته شود. این هزینه با ظرفیت منابع تولید پراکنده رابطه مستقیم دارد و از (۳) محاسبه می‌شود

$$C_{OP} = \sum_{i=1}^N OC_i \times C_{DG} \quad (3)$$

که  $C_{OP}$  هزینه بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در هر ساعت ( $\$/h$ ) و  $OC_i$  هزینه بهره‌برداری از  $i$  امین DG بر حسب  $\$/kVAh$  می‌باشد.

تلفات و هزینه‌های DG بیان می‌شود، سپس مسأله مکان‌یابی ESS<sup>۱</sup> با در نظر گرفتن هزینه تلفات و هزینه‌های ESS مطرح می‌گردد. در ادامه جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به صورت هم‌زمان با هدف کاهش تلفات در شبکه توزیع ارائه می‌شود. در تمامی این مسایل، الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تشریح مسایل فوق ابتدا مدل ریاضی هزینه DG، هزینه ESS و تلفات شبکه توزیع ارائه می‌شود، سپس با ترکیب بخش‌های فوق، توابع هدف مسایل جایابی هم‌زمان و جداگانه این تجهیزات فرمول‌بندی می‌گردد.

روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۳ باسه IEEE اعمال شده و نتایج جهت جایابی منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به صورت جداگانه و همچنین هم‌زمان ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده کارایی منابع ذخیره‌ساز انرژی در کاهش تلفات شبکه توزیع و افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد.

### ۲- منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی

تعاریفی که برای DG ها ارائه شده تا حدودی متفاوت است. IEEE، تولید برق توسط وسایلی که به اندازه کافی از نیروگاه‌های مرکزی کوچک‌تر باشند و قادر به نصب در محل مصرف هستند را به عنوان تولید پراکنده تعریف کرده است [۱۶]. IEA، واحدهای تولیدکننده توان در محل مصرف یا در داخل شبکه توزیع که توان را به طور مستقیم به شبکه توزیع محلی تزریق می‌کنند را DG معرفی می‌کند [۱۷]. این منابع، مزایایی چون آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع، بهبود قابلیت اطمینان سیستم، بهبود کیفیت توان، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات را می‌توانند برای شبکه توزیع به همراه داشته باشند. منابع تولید پراکنده با نوع و ظرفیتشان مشخص می‌شوند. توربین‌های گازی کوچک، میکروتوربین‌ها، توربین‌های بادی و خورشیدی از جمله منابع تولید پراکنده هستند.

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی امکان ذخیره انرژی در یک بازه زمانی و تحویل آن به شبکه را در بازه‌های دیگر دارند. اصولاً ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی می‌توانند با اهداف گوناگونی مانند کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان، مسطح‌سازی منحنی بار، پیک‌زدایی و ... در سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گیرند [۱۸].

هم‌اکنون تکنولوژی‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی وجود دارد که عبارتند از ذخیره انرژی مغناطیسی در ابرسازها (SMES)، ذخیره انرژی در ابرخازن، ذخیره انرژی در چرخ طیار (FWES)، ذخیره آب پمپاژ شده (HPES)، ذخیره انرژی در هوای فشرده (CAES)، سیستم‌های ذخیره انرژی بر پایه هیدروژن و ذخیره انرژی در باتری‌های جریانی [۱۹]. هر کدام از این تکنولوژی‌ها با توجه به مشخصه‌هایی که دارند برای کاربردهای خاصی مفیدند. به عنوان مثال برخی از آنها دارای زمان دشارژ بسیار کوتاه هستند و جهت بهبود کیفیت توان و حفظ پایداری ولتاژ در حالت گذرا استفاده می‌شوند. برخی دیگر دارای زمان دشارژ نسبتاً بلندمدت (چند دقیقه یا ساعت) هستند که دارای کاربردهایی چون مدیریت انرژی و تنظیم فرکانس هستند [۲۰]. در [۱۹] ذخیره انرژی در باتری و معیارهای تصمیم‌گیری برای انتخاب نوع مناسب آنها بسته به کاربرد در سیستم‌های قدرت، مورد بررسی قرار گرفته است.

ESS ها دارای دو مشخصه توان و انرژی نامی هستند. توان نامی، نرخ شارژ و دشارژ شدن ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد و انرژی نامی حداکثر انرژی

2. Vanadium Redox Flow Battery

3. Zinc-Bromine Flow Battery

1. Energy Storage Systems

در رابطه بالا  $A$  هزینه تعویض و نگهداری بر حسب  $\$/kwh$ ،  $F$  ارزش آینده هزینه تعویض سیستم ذخیره‌ساز بر حسب  $\$/kwh$  و  $r$  نیز دوره تعویض ذخیره‌ساز بر حسب سال می‌باشد. نکته مهم در استفاده از رابطه بالا این است که تعداد پارامترهای این رابطه برابر با تعداد تعویض‌های سیستم ذخیره‌ساز در طول پروژه می‌باشد. در محاسبات هزینه‌های تعویض سیستم ذخیره، عمر باتری به صورت تعداد شارژ/دشارژ آن بیان می‌شود. دوره تعویض در هر سال برای سیستم ذخیره‌ساز از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$r = \frac{C}{n \times D} \quad (11)$$

در این رابطه  $C$  طول عمر سیستم ذخیره بر حسب تعداد شارژ و دشارژ،  $n$  تعداد شارژ و دشارژ در روز و  $D$  تعداد روزهای کاری سیستم ذخیره در سال می‌باشد. در نهایت هزینه سالیانه تعویض سیستم ذخیره‌ساز با استفاده از (۱۲) محاسبه می‌شود

$$ARC = A \times \frac{E_{ESS}}{\eta} \quad (12)$$

### ۳-۲-۵ هزینه تعمیر و نگهداری

هزینه تعمیر و نگهداری از (۱۳) به دست می‌آید

$$OMC = OM \times P_{ESS} \quad (13)$$

که  $OMC$  هزینه تعمیر و نگهداری بر حسب  $\$/kwh$  و  $OM$  نیز هزینه تعمیر و نگهداری بر حسب  $\$/kwh$  می‌باشد.

بنابراین با توجه به پارامترهای مهم در هزینه سیستم ذخیره‌ساز تابع هزینه سیستم ذخیره‌ساز ( $C_{ESS}$ ) مطابق (۱۴) می‌باشد

$$C_{ESS} = ACC + OMC + ARC \quad (14)$$

### ۳-۳ هزینه تلفات سالانه انرژی در سیستم توزیع

تلفات انرژی در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$E_{loss} = \sum_{h=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_l} r_k I_{k,h}^2 \quad (15)$$

در این رابطه،  $E_{loss}$  میزان تلفات انرژی شبکه بر حسب کیلووات ساعت،  $I_{k,h}$  جریان عبوری از خط  $k$  ام در ساعت  $h$  ام بر حسب کیلوآمپر،  $N_l$  تعداد کل خطوط سیستم و  $r_k$  نیز مقاومت خط  $k$  ام بر حسب اهم است. در نتیجه هزینه تلفات انرژی شبکه توزیع مطابق رابطه زیر خواهد بود

$$C_{Loss} = E_{loss} \times C_L \quad (16)$$

در این رابطه  $C_L$  هزینه تلفات انرژی بر حسب  $\$/kwh$  می‌باشد. چنانچه  $C_{Loss}$  برای ارزیابی تلفات شبکه در حضور DG استفاده شود، جریان  $I_{k,h}$  در تمام ساعات سال یکسان است، چرا که شارش توان توسط DG در تمام ساعات ثابت است. اما در جایابی ESS و جایابی هم‌زمان DG و ESS به دلیل حضور ESS و وجود سه عملکرد دریافت توان، تحویل توان و بی‌اثر برای ESS، جریان  $I_{k,h}$  بسته به وضعیت ESS در ساعات مختلف، متفاوت خواهد بود.

در این مقاله برای ارزیابی تلفات شبکه توزیع از روش پخش بار جاروب رفت و برگشت استفاده شده است [۲۵].

### ۴-۲-۴ تابع هدف و قیود مسایل بهینه‌سازی

در این مقاله منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی با هدف کاهش

بنابراین با توجه به پارامترهای اثرگذار، تابع هزینه منابع تولید پراکنده ( $C_{DG}$ ) مطابق (۴) در نظر گرفته می‌شود

$$C_{DG} = C_{IC\_DG} + 1760 \times C_{OP} \quad (4)$$

### ۳-۲ هزینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی

هزینه کل سیستم ذخیره‌ساز شامل دو هزینه انرژی و هزینه توان می‌باشد [۱۵] و [۲۴]. هزینه انرژی متناسب با ظرفیت انرژی ( $E_{ESS}$ ) سیستم ذخیره‌ساز و مربوط به هزینه قسمت ذخیره‌کننده انرژی در سیستم ذخیره‌ساز بوده و واحد آن  $\$/kwh$  است. هزینه توان متناسب با ظرفیت توان ( $P_{ESS}$ ) سیستم ذخیره‌ساز و مربوط به یکسوکننده‌ها، اینورترها و سایر ادوات الکترونیک قدرت موجود در سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد که به صورت  $\$/kw$  بیان می‌شود. در واقع ظرفیت توان، همان ظرفیت آنی سیستم ذخیره‌ساز است که سرعت شارژ و دشارژ را مشخص می‌کند. ادامه این زیربخش به توضیح هزینه سیستم ذخیره‌ساز می‌پردازد [۲۴].

### ۳-۲-۱ هزینه ادوات الکترونیک قدرت

هزینه ادوات الکترونیک قدرت از (۵) به دست می‌آید

$$PCS = PCSU \times P_{ESS} \quad (5)$$

که  $PCSU$  هزینه ادوات الکترونیک قدرت برای واحد توان بر حسب  $\$/kw$  و  $P_{ESS}$  توان نامی سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر حسب  $kw$  می‌باشد.

### ۳-۲-۲ هزینه اتصال به شبکه

از (۶) هزینه اتصال به شبکه محاسبه می‌شود

$$BOP = BOPU \times \frac{E_{ESS}}{\eta} \quad (6)$$

که  $BOP$  هزینه اتصال به شبکه بر حسب  $\$/kwh$ ،  $BOPU$  هزینه واحد برای اتصال به شبکه بر حسب  $\$/kwh$ ، میزان انرژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر حسب  $kw$  و  $\eta$  نیز بازده سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد.

### ۳-۲-۳ هزینه واحد ذخیره‌کننده

از (۷) برای به دست آوردن هزینه واحد ذخیره‌کننده استفاده می‌شود

$$SUC = SUCU \times \frac{E_{ESS}}{\eta} \quad (7)$$

که  $SUC$  هزینه واحد ذخیره‌کننده بر حسب  $\$/kwh$  و  $SUCU$  هزینه واحد قسمت ذخیره‌ساز انرژی سیستم ذخیره بر حسب  $\$/kwh$  می‌باشد. هزینه اولیه کل به صورت (۸) بیان می‌شود

$$TCC = PCS + BOP + SUC \quad (8)$$

که  $TCC$  هزینه اولیه کل بر حسب  $\$/kwh$  می‌باشد.

محاسبه هزینه اولیه سالیانه سیستم ذخیره‌ساز با استفاده از ضریب بازگشت سرمایه طبق (۹) می‌باشد

$$ACC = TCC \times CRF \quad (9)$$

که  $ACC$  هزینه اولیه سالیانه و بر حسب  $\$/kwh$  می‌باشد.

### ۳-۲-۴ هزینه تعویض و نگهداری

ممکن است عمر سیستم ذخیره‌ساز نسبت به عمر کل پروژه کوتاه‌تر باشد و نیاز به تعویض مجدد داشته باشد. هزینه تعویض را به صورت سالیانه می‌توان طبق (۱۰) محاسبه کرد

$$A = F[(1+i_r)^{-r} + (1+i_r)^{-2r} + \dots] \times CRF \quad (10)$$

(۲) قید بارگذاری فیدرها؛ در بهره‌برداری از سیستم توزیع همواره به دلیل رعایت حد حرارتی عایق‌ها باید توان عبوری از خطوط کمتر از مقدار ماکزیمم مشخص شده باشد

$$S_{LK} \leq S_{LK}^{\max} \quad (22)$$

در (۲۲)،  $S_{LK}$  میزان توان عبوری از خط  $k$  ام و  $S_{LK}^{\max}$  مقدار حد بالای مجاز توان عبوری برای آن خط می‌باشد.

(۳) قید توان دریافتی از شبکه بالادست [۱۵]

$$-0.6 \times R \leq PG_{i,1} \leq R \quad (23)$$

این قید تضمین می‌کند که سیلان توان در جهت معکوس از ۰.۶ میزان نامی ترانس فوق توزیع بیشتر نباشد. در رابطه بالا  $PG_{i,1}$  میزان توان اکتیو ترانس فوق توزیع در زمان  $t$  و  $R$  توان نامی ترانسفورماتور فوق توزیع بر حسب kW می‌باشد.

### ۵- بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک

در جایابی DG و ESS تعداد واحدها در هر یک از باس‌های کاندیدای سیستم توزیع، متغیرهای تصمیم مسأله را تشکیل می‌دهند. با توجه به این که در این مقاله تولید منابع DG به صورت توان ثابت در یک ضریب قدرت معلوم فرض شده است، با داشتن توان اکتیو تولیدی می‌توان به راحتی توان راکتیو تولیدی واحد را نیز به دست آورد. همچنین با توجه به معلوم در نظر گرفتن ساعات شارژ و دشارژ ESS‌ها انرژی آنها نیز به راحتی با دانستن توان نامی آنها، قابل محاسبه خواهد بود. تعداد ژن‌های هر کروموزوم برابر با تعداد باس‌های کاندیدا برای نصب منبع تولید پراکنده به اضافه تعداد باس‌های کاندیدا برای نصب سیستم ذخیره‌ساز در نظر گرفته می‌شوند. در این مسئله هر ژن می‌تواند یک عدد صحیح از ۰ تا بیشترین تعداد ممکن تجهیز را به خود اختصاص دهد.

در شکل ۱  $x_i$  و  $y_j$  به ترتیب نشان‌دهنده تعداد منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای نصب در  $i$  امین و  $j$  امین باس کاندیدا است.  $n$  و  $m$  نیز تعداد باس‌های کاندیدای هر یک از تجهیزات را نشان می‌دهد.

پس از مشخص شدن کروموزوم، مکان و ظرفیت DG‌ها و ESS‌ها در شبکه معلوم می‌شود، متناسب با آن شبکه اصلاح شده و سپس پخش بار جاروب رفت و برگشت بر روی شبکه اجرا می‌شود تا میزان تلفات و هزینه آن به دست آید. در ادامه هزینه ناشی از احداث و بهره‌برداری منابع تولید پراکنده و باتری محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار هزینه اختصاص یافته به هر کروموزوم محاسبه می‌گردد.

### ۶- مطالعات عددی

#### ۶-۱ اطلاعات ورودی

##### الف) سیستم مورد مطالعه

در این بخش به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، برای افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع از شبکه ۳۳ باسه IEEE استفاده شده است. دیگرام تک‌خطی این شبکه در شکل ۲ ارائه شده است [۲۶] و بار کل این سیستم ۳۰۷۴۰ مگاوات می‌باشد. مقدار تلفات توان این شبکه در بار پیک ۲۱۰۹۹۸ کیلووات، کمترین میزان ولتاژ ۰.۹۰۳ پریونیت و در باس ۱۸ روی داده است [۲۶]. از آنجا که این سیستم دارای پروفیل ولتاژ مناسب است، برای ارزیابی بهتر عملکرد منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در اصلاح شبکه، مقدار بار هر باس دو برابر شده تا شبکه

$x_1$	$x_2$	.....	$x_n$	$y_1$	$y_2$	.....	$y_m$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

شکل ۱: نحوه کدبندی مسئله در جایابی هم‌زمان DG و ESS.

تلفات شبکه توزیع مکان‌یابی می‌شوند. از این رو برای مکان‌یابی بهینه DG‌ها یا ESS‌ها به تنهایی یا هم‌زمان هزینه‌های بر سال شده این تجهیزات و هزینه سالیانه تلفات شبکه توزیع در نظر گرفته می‌شود. در ادامه تابع هدف مسایل و قیود آنها مطرح می‌شود.

#### ۴-۱ مکان‌یابی DG با هدف کاهش تلفات

در مسأله مکان‌یابی بهینه DG هدف، تعیین تعداد، مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده است. با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به منابع تولید پراکنده و هزینه تلفات سیستم توزیع تابع هدف جایابی این منابع با هدف کاهش تلفات طبق رابطه زیر در نظر گرفته شده است

$$OF_{Loss}^{DG} = C_{DG} + C_{Loss} \quad (17)$$

#### ۴-۲ مکان‌یابی ESS با هدف کاهش تلفات

در مسأله جایابی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، علاوه بر تعیین نوع تکنولوژی این تجهیزات، لازم است تعداد، مکان، توان نامی و انرژی نامی آنها نیز تعیین شود. در این مقاله از سیستم‌های ذخیره‌ساز با ظرفیت توان مشخص استفاده گردیده و با فرض این که زمان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در ابتدا مشخص است، به راحتی می‌توان انرژی سیستم ذخیره‌ساز را نیز طبق (۱۸) محاسبه نمود

$$E_{ESS} = P_{ESS} \times D_{Dch} \quad (18)$$

بدیهی است که زمان نامی شارژ یا دشارژ باتری تأثیر مستقیمی بر انرژی نامی باتری دارد. در این معادله  $E_{ESS}$  و  $P_{ESS}$  به ترتیب میزان توان و میزان انرژی سیستم ذخیره‌ساز و  $D_{Dch}$  نیز زمان نامی دشارژ در حداکثر توان است.

با توجه به توضیحات فوق و در صورت در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و هزینه تلفات شبکه توزیع، تابع هدف جایابی ESS با هدف کاهش تلفات مطابق (۱۹) در نظر گرفته شده است

$$OF_{Loss}^{ESS} = C_{ESS} + C_{Loss} \quad (19)$$

#### ۴-۳ مکان‌یابی هم‌زمان DG و ESS

با توجه به مطالب بیان شده در توابع هدف جایابی منابع تولید پراکنده و همچنین جایابی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، تابع هدف مربوط به جایابی هم‌زمان آنها با هدف کاهش تلفات سیستم توزیع می‌تواند به صورت (۲۰) در نظر گرفته شود

$$OF_{Loss}^{DG-ESS} = C_{DG} + C_{ESS} + C_{Loss} \quad (20)$$

#### ۴-۴ قیود مکان‌یابی منابع DG و ESS

قیودی که برای مکان‌یابی این تجهیزات در شبکه توزیع در نظر گرفته شده‌اند، شامل موارد زیر است:

(۱) قید ولتاژ؛ ولتاژ باس‌های شبکه باید در محدوده مجاز باشند

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (21)$$

در این رابطه  $V_i$  مقدار ولتاژ هر باس و  $V_i^{\min}$  و  $V_i^{\max}$  به ترتیب مقدار حد پایین و بالای مجاز برای ولتاژ باس‌ها می‌باشند.

جدول ۲: مشخصات باتری VRB.

مقادیر	پارامتر
۱۰۰	توان خروجی نامی (kW)
۰٫۷	ضریب بازده باتری
**	هزینه ادوات الکترونیک قدرت برای واحد توان
۷۴۰	هزینه واحد قسمت ذخیره‌ساز انرژی سیستم ذخیره
۳۰	هزینه واحد جهت اتصال به شبکه
۲۰	هزینه تعمیر و نگهداری
۲۲۲	ارزش آینده هزینه تعویض
۱۰۰۰۰	طول عمر سیستم ذخیره بر حسب تعداد شارژ و دشارژ
**	هزینه ادوات الکترونیک قدرت به هزینه واحد قسمت ذخیره‌ساز انرژی افزوده شده است.

جدول ۳: مکان و ظرفیت بهینه در جایابی DG.

ظرفیت DG (kVA)	باس
۱۰۰	۱۶
۱۰۰	۱۷
۱۵۰	۱۸
۱۰۰	۳۳

همان طور که در بخش‌های ۳-۳ و ۴-۲ اشاره شد، زمان شارژ و دشارژ ESSها دارای اهمیت ویژه بوده و بر تلفات سیستم نیز تأثیرگذار است. در این مطالعه ESS زمانی که بار شبکه از حد معینی کمتر است شارژ می‌شود، در واقع در این ساعات بار شبکه به اندازه توان سیستم ذخیره‌ساز افزایش می‌یابد. همچنین زمانی که بار شبکه از حد معینی زیادتر می‌شود، ESS دشارژ می‌شود و بار شبکه در این لحظات کاهش می‌یابد. این رفتار به مسطح‌نمودن منحنی بار سیستم کمک می‌نماید.

لازم به ذکر است که ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در این مقاله ۵۰ kVA و ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌ساز مورد استفاده با ۹ ساعت دشارژ،  $20/180$  (kW/kWh) در نظر گرفته شده است. در هر باس کاندید، تنها ۵ واحد از هر یک از منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب می‌شود.

### ۶-۲ نتایج عددی

مقدار تلفات سالانه شبکه مورد مطالعه بدون حضور هر گونه منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی  $5241/37$  مگاوات ساعت است. در ادامه جایابی DG و ESS به طور جداگانه و هم‌زمان با هدف کاهش تلفات انجام شده و نتایج به شرح زیر است:

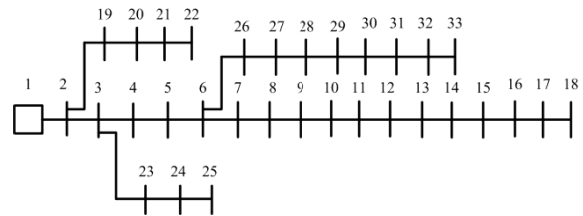
#### الف) مکان‌یابی DG

در جدول ۳ مکان و ظرفیت بهینه DG در سیستم مورد مطالعه نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ظرفیت DG قابل نصب در شبکه ۴۵۰ کیلوولت آمپر است.

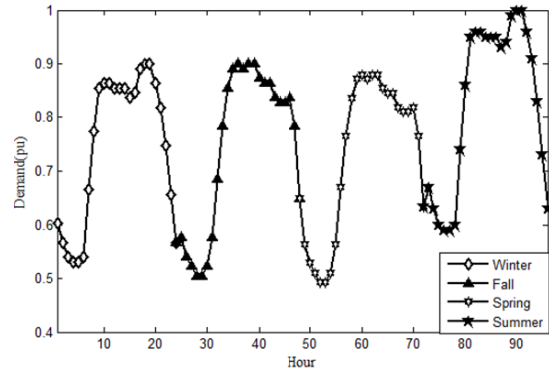
با نصب این تجهیزات در شبکه، تلفات سالانه، کمترین و بیشترین ولتاژ در میان باس‌ها و هزینه طرح در جدول ۴ آمده است.

برای این حالت نمودار همگرایی هزینه و تغییرات توان دریافتی از شبکه بالادست به ترتیب مطابق شکل‌های ۴ و ۵ است.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، توان دریافتی از شبکه بالادست پس از حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع کاهش می‌یابد که در واقع این کاهش به اندازه توان نصب‌شده منابع تولید پراکنده در



شکل ۲: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ باسه IEEE.



شکل ۳: مدل بار شبکه IEEE-RTS.

جدول ۱: باس‌های کاندیدای نصب منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز.

۶-۸-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶	کاندید نصب منابع تولید پراکنده
۱۸-۳۱-۳۲-۳۳	
۵-۶-۷-۸-۱۲-۱۳-۱۴	
۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۲۰-۲۲	کاندید نصب سیستم ذخیره‌ساز
۲۴-۲۵-۲۶-۳۰-۳۱-۳۲	
۳۳	

دارای مشکلات اولیه بوده و با کمک DG و ESS اصلاح شود. با این تغییرات، میزان تلفات توان شبکه در بار پیک  $1030/8$  کیلووات، کمترین میزان ولتاژ  $0.7843$  پریونیت و مجدداً در باس ۱۸ روی داده است.

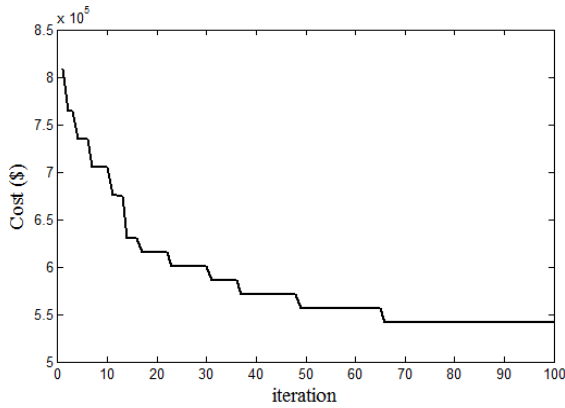
از آنجا که در عمل امکان احداث و اتصال منابع DG و ESS به تمامی باس‌های شبکه وجود ندارد، تعدادی از باس‌های این شبکه برای اتصال DG و ESS انتخاب شده‌اند. جدول ۱ باس‌های کاندیدای نصب منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد.

#### ب) مدل بار

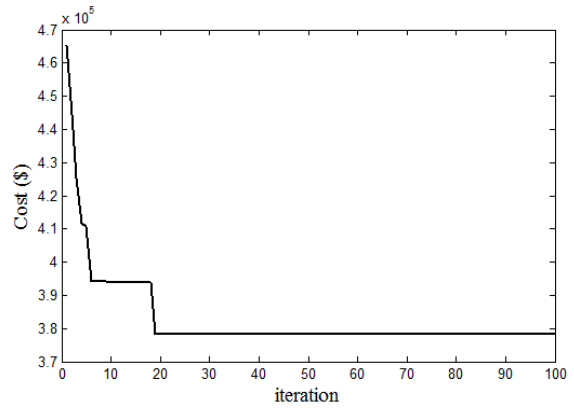
در بسیاری از مطالعات مکان‌یابی DG، بار پیک به عنوان بار شبکه در نظر گرفته شده و تلفات فیدر در سال بر مبنای آن محاسبه شده است [۲۷]. حال آن که در عمل میزان بار با تغییرات در طول روز مواجه است و مقدار تلفات در ساعات مختلف متفاوت است و طبعاً نتایج مطالعه با بار ساعتی با آنچه از مطالعه با بار پیک حاصل شده است، متفاوت خواهد بود. در این مقاله از مدل بار شبکه IEEE-RTS استفاده شده است. البته جهت کاهش حجم مطالعات، به جای در نظر گرفتن تمام ساعات سال و اجرای  $8760$  پخش بار برای محاسبه تلفات سالانه، تنها از ۴ روز (۹۶ ساعت) آن استفاده شده است. بدین ترتیب که از هر فصل، شبانه‌روزی انتخاب شده که در آن شبانه‌روز حداکثر بار ساعتی در آن فصل رخ داده است. از این طریق از ۹۶ ساعت که نماینده کل ساعات یک سال می‌باشد، استفاده شده است. شکل ۳ الگوی بار بیان شده را نشان می‌دهد.

#### ج) سیستم ذخیره‌ساز

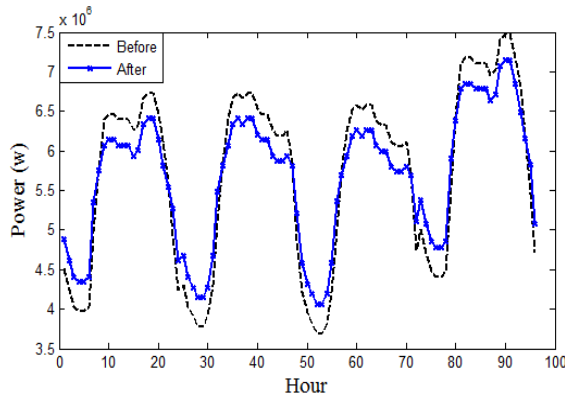
در این مقاله از باتری‌های وانادیومی VRB جهت ذخیره انرژی استفاده شده است. اطلاعات مربوط به این باتری در جدول ۲ آمده است [۲۴].



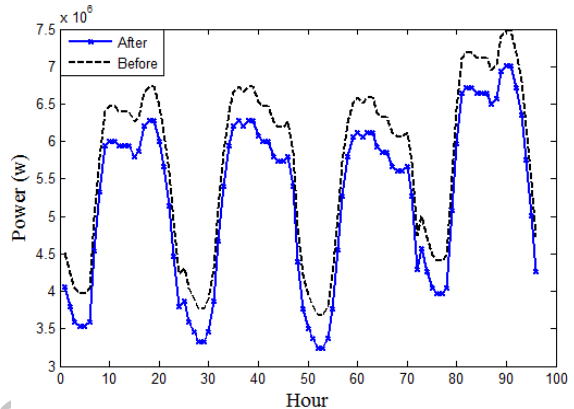
شکل ۶: نمودار همگرایی هزینه برای حالت جایابی ESS.



شکل ۴: نمودار همگرایی هزینه برای حالت جایابی DG.



شکل ۷: تغییرات توان دریافتی در قبل و بعد از جایابی ESS.



شکل ۵: تغییرات توان دریافتی از شبکه بالادست قبل و بعد از حضور DG.

جدول ۶: نتایج عددی حاصل از جایابی ESS.

پارامتر	مقدار
تلفات (MWh)	۴۷۷۸٫۵۸
کمترین ولتاژ (باس)	(۱۸)۰٫۸۵۰۱
بیشترین ولتاژ (باس)	(۱)
هزینه (\$)	۵۴۱۸۸۰

جدول ۴: نتایج عددی حاصل از جایابی DG.

پارامتر	مقدار
تلفات (MW)	۳۰۷۸٫۷۰
کمترین ولتاژ (باس)	(۳۳)۰٫۹۱۱۲
بیشترین ولتاژ (باس)	(۱)
هزینه (\$)	۳۷۸۲۹۰

جدول ۵: مکان و ظرفیت بهینه در جایابی ESS.

باس	ظرفیت ESS (kw/kwh)
۱۲	۲۰/۱۸۰
۱۳	۶۰/۵۴۰
۱۴	۴۰/۳۶۰
۱۵	۸۰/۷۲۰
۱۷	۱۰۰/۹۰۰
۱۸	۱۰۰/۹۰۰

سودآوری کمتری است، چرا که هزینه کاهش هر مگاوات ساعت تلفات سالانه برای DG، ۱۷۴/۹۱ دلار و برای ESS، ۱۱۷۰/۸۹ دلار است.

نمودار همگرایی هزینه برای جایابی ESS در شبکه توزیع و همچنین تغییرات توان دریافتی از شبکه، قبل و بعد از حضور سیستم ذخیره‌ساز به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است.

### ج) مکان‌یابی هم‌زمان DG و ESS

در صورت نصب هم‌زمان DG و ESS در شبکه مورد مطالعه، مکان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مطابق جدول ۷ خواهد بود.

همان‌طور که نتایج ارائه‌شده در جدول ۷ نشان می‌دهد، مکان نصب DG و ESS در بسیاری موارد متفاوت است. این نتیجه با توجه به رفتار این منابع قابل توجه است. در مکان‌یابی هم‌زمان DG و ESS باید توجه داشت که رفتار شارژ و دشارژ ESS و تأثیر آن بر تلفات سیستم در مکان این تجهیزات تأثیرگذار است. اگر صرفاً به عملکرد دشارژ ESS توجه شود، رفتاری مشابه DG خواهد داشت و بدیهی است که هر چه نصب این تجهیزات در فیدر گستردگی بیشتری داشته باشد، تأثیر بیشتری بر کاهش تلفات خواهد داشت. اما در واقع علاوه بر دشارژ ESS، باید رفتار شارژ آن نیز در مدل‌سازی لحاظ شود. با توجه به این که شارژ در ساعات کم‌باری رخ می‌دهد، توان دریافتی از شبکه بالادست و در نتیجه تلفات شبکه در

شبکه است. همچنین با مقایسه تلفات شبکه، قبل و بعد از نصب DG می‌توان به کاهش تلفات به اندازه ۲۱۶۲/۶۷ مگاوات ساعت پی برد که با صرف هزینه ۳۷۸۲۹۰ دلار ممکن شده است.

### ب) مکان‌یابی ESS

در جدول ۵ نتایج مسأله مکان‌یابی ESS در شبکه شامل مکان، ظرفیت نامی و انرژی نامی ESS در سیستم مورد مطالعه نمایش داده شده است. پس از نصب ESS با مشخصات ذکرشده در جدول ۵، شرایط شبکه مطابق جدول ۶ تغییر می‌کند که حاکی از کاهش تلفات سالانه به اندازه ۴۶۲/۷۹ مگاوات در صورت صرف هزینه سالانه ۵۴۱۸۸۰ دلار است. در مقایسه با نتایج جایابی DG، کاهش تلفات توسط نصب ESS دارای

جدول ۷: مکان و ظرفیت بهینه جایابی همزمان DG و ESS.

باس	ظرفیت ESS (kw/kwh)	ظرفیت DG (kVA)
۱۲	۶۰/۵۴۰	۱۰۰
۱۳	۴۰/۳۶۰	۵۰
۱۴	.	۵۰
۱۵	۶۰/۵۴۰	.
۱۶	.	۵۰
۱۷	۲۰/۱۸۰	.
۱۸	.	۲۵۰
۳۱	.	۵۰
۳۲	۶۰/۵۴۰	۱۵۰
۳۳	۶۰/۵۴۰	۱۵۰

جدول ۸: نتایج عددی جایابی همزمان DG و ESS.

پارامتر	مقدار
تلفات (MWh)	۲۳۸۳,۳۳
کمترین ولتاژ (باس)	(۳۳)۰,۹۲۰۹
بیشترین ولتاژ (باس)	(۱)۱
هزینه (\$)	۷۲۷۴۱۰

جدول ۹: مقایسه میزان DG در دو حالت جایابی DG و جایابی همزمان DG و ESS.

مسأله	ظرفیت DG (kVA)	تلفات سالانه (MWh)	هزینه کاهش تلفات (\$)
جایابی DG	۴۵۰	۳۰۷۸,۷۰	۱۷۴,۹۱
جایابی همزمان ESS و DG	۸۵۰	۲۳۸۳,۳۳	۲۵۴,۵۱

جدول ۱۰: نتایج عددی حاصل از تغییر در تعداد واحد ذخیره‌ساز مجاز به نصب.

ظرفیت ESS (kw/kwh)	ظرفیت DG (kVA)	تلفات سالانه (MWh)	هزینه (\$)	بیشترین ولتاژ (باس)	کمترین ولتاژ (باس)
۲۰/۱۸۰	۳۰۰	۴۱۶۰,۶۴	۳۷۲۵۰۰	(۱)۱	(۳۳)۰,۸۹۷۰
۳۰۰/۲۷۰۰	۸۵۰	۲۳۸۳,۳۳	۷۲۷۴۱۰	(۱)۱	(۳۳)۰,۹۲۰۹

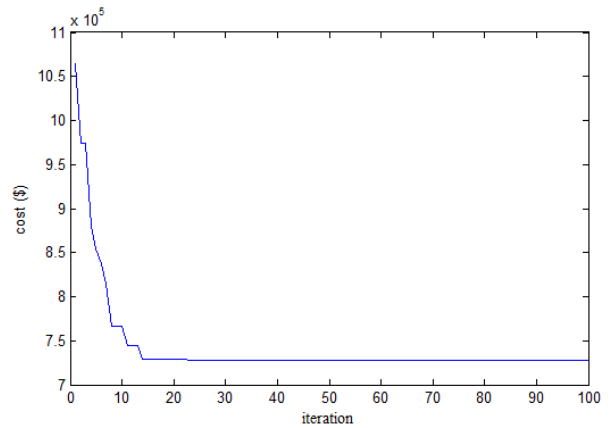
نتایج این مقایسه در جدول ۹ آمده است.

نمودار همگرایی هزینه برای این حالت مطابق شکل ۸ و نمودار توان دریافتی از شبکه در قبل و بعد از حضور منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی در شکل ۹ آمده است.

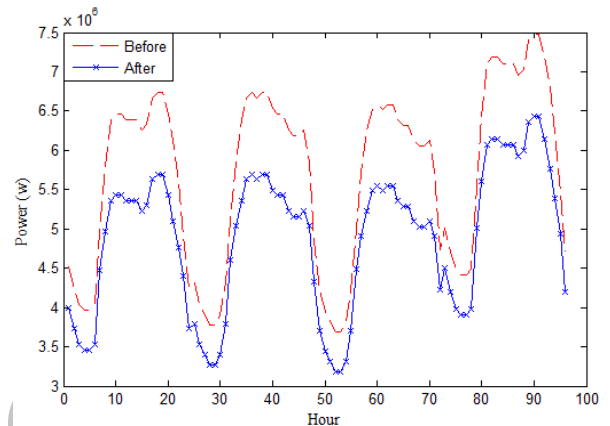
### ۷- آنالیز حساسیت

در این قسمت آنالیز حساسیت در جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با تغییر در تعداد واحد ذخیره‌ساز مجاز به نصب، در هر باس کاندید ارائه شده است. همان طور که بیان شد در هر باس کاندید، مجاز به نصب تعداد محدودی از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هستیم و در این صورت نتایج عددی حاصل با تعداد ۲ تا ۵ واحد مجاز به نصب از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در هر باس کاندید، مطابق جدول ۱۰ خواهد بود.

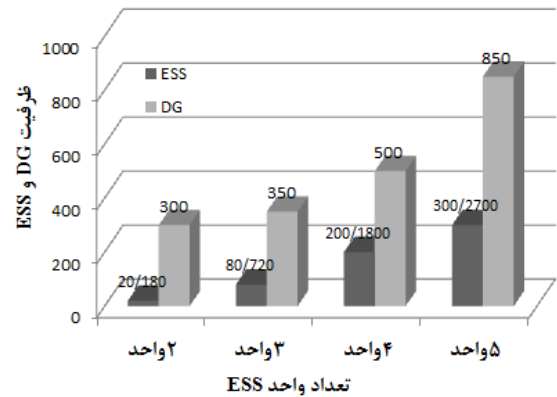
در شکل ۱۰ حالات مختلف تعداد DG و ESS انتخاب شده با تغییر در



شکل ۸: نمودار همگرایی هزینه برای جایابی همزمان DG و ESS.



شکل ۹: توان دریافتی در قبل و بعد از حضور DG و ESS.



شکل ۱۰: تغییر در تعداد DG و ESS با تغییر در تعداد واحد مجاز به نصب ذخیره‌ساز.

این ساعات افزایش می‌یابد، اما این افزایش بسیار کمتر است از کاهش که در اثر دشارژ ESS در زمان‌های پیک بار برای تلفات رخ می‌دهد. لذا برآیند عملکرد ESS کاهش تلفات و کمک به تأمین بار در ساعات پیک است، از این رو باز هم قرارگرفتن ESS در مکان‌هایی متمایز از DG دور از انتظار نیست.

پس از نصب منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه مورد مطالعه شرایط سیستم به صورت جدول ۸ تغییر خواهد کرد.

بررسی نتایج این مطالعه بر کاهش ۲۸۵۸/۰۴ مگاوات ساعت تلفات سالانه دلالت دارد که هزینه کاهش هر مگاوات تلفات برابر ۲۵۴/۵۱ دلار است. در مقایسه با نتایج مکان‌یابی بهینه DG، تلفات با کمک ESS به اندازه بیشتری کاهش پیدا کرده است، اما هزینه کاهش هر مگاوات ساعت نیز زیاد شده است. حضور ESS در شبکه همچنین موجب افزایش ظرفیت DGها از ۴۵۰ کیلوولت آمپر به ۸۵۰ کیلوولت آمپر شده است.

- [12] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generation systems for reduced losses," in *Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences*, vol. 4, 9 pp., Maui, US, 4-7 Jan. 2000.
- [13] K. A. Brekken, A. Yokochi, A. V. Jouanne, Z. Z. Yen, H. M. Hapke, and D. A. Halamaj, "Optimal energy storage sizing and control for wind power applications," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 69-77, Jan. 2011.
- [14] H. T. Le and T. Q. Nguyen, "Sizing energy storage systems for wind power firming: an analytical approach and a cost-benefit analysis," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 8 pp., Pittsburgh, US, 20-24 Jul. 2008.
- [15] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1815-1822, Nov. 2010.
- [16] H. L. Willis, "Analytical methods and rules of thumb for modeling DG distribution interaction," in *IEEE Proc. of the Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1643-1644, Jul. 2000.
- [17] International Energy Agency, Distributed Generation in Liberalized Electricity Market, 26 Jun. 2002.
- [18] EPRI-DoE Handbook of Energy Storage for Trans. and Distribution Applications, EPRI Product 1001834, Dec. 2003.
- [19] F. Diaz-Gonzalez, A. Sumpera, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafafila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154-2171, May 2012.
- [20] T. M. Masaud, K. Lee, and P. K. Sen, "An overview of energy storage technologies in electric power systems: what is the future?" in *Proc. North American Power Symp., NAPS*, 6 pp., 26-28 Sep. 2010.
- [21] A. Nourai, "Large-scale electricity storage technologies for energy management," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 310-315, 25-25 Jul. 2002.
- [22] K. C. Divya and J. Ostergaard, "Battery energy storage technology for power systems - an overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 511-520, Apr. 2009.
- [23] K. L. Huang, X. Li, S. Liu, N. Tan, and L. Chen, "Research progress of vanadium redox flow battery for energy storage in China," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 186-192, Feb. 2008.
- [24] P. Poonpun and W. T. Jewell, "Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 529-534, Jun. 2008.
- [25] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission network," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, May 1988.
- [26] R. Ranjan and D. Das, "Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 95-107, 2003.
- [27] T. Boehme, A. Robin Wallace, and G. P. Harrison, "Applying time series to power flow analysis in networks with high wind penetration," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 951-957, Aug. 2007.

**ناصر بیابانی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک در سال ۱۳۸۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۹۱ در دانشگاه بیرجند به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی شبکه توزیع.

**مریم رضانی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق - کنترل در سال ۱۳۷۷ در دانشگاه فردوسی مشهد و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند می‌باشد. ایشان در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به عنوان همکار تحقیقاتی در دانشگاه تگزاس A&M فعالیت داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، مطالعات احتمالاتی سیستم‌های قدرت، قابلیت اطمینان.

**حمید فلتی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند می‌باشد. ایشان در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به عنوان همکار تحقیقاتی در دانشگاه تگزاس A&M تگزاس فعالیت داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: طراحی و

تعداد واحد مجاز به نصب ESS در هر باس کاندید با هدف کاهش تلفات نمایش داده شده است.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با اشاره به مزایای فراوان منابع تولید پراکنده برای سیستم‌های قدرت، به موانع موجود برای افزایش ظرفیت این منابع در شبکه اشاره شد. ESS ها با ذخیره‌سازی انرژی در ساعات کم‌باری از افزایش ولتاژ باس‌ها و بازگشت غیر مجاز توان به شبکه بالادست جلوگیری کرده و موجب افزایش نفوذ DG ها در شبکه توزیع می‌شوند. نتایج مطالعات عددی با تأکید بر این امر، بیان‌گر کاهش بیشتر تلفات در صورت مکان‌یابی هم‌زمان DG و ESS نسبت به مکان‌یابی جداگانه آنهاست. ضمن این که مکان‌یابی جداگانه ESS ها نسبت به DG ها، علاوه بر پرهزینه‌تر بودن طرح، تلفات شبکه را نیز به میزان کمتری کاهش می‌دهند. با توجه به این که هزینه ESS در حال حاضر همچنان قابل توجه است، بهترین طرح برای کاهش تلفات، استفاده از DG ها است اما در آینده با کاهش هزینه‌های ESS شاهد حضور پررنگ‌تر این تجهیزات خواهیم بود.

لازم به ذکر است که در این مقاله اثر کاهش تلفات فیذر با نصب DG و ESS در تابع هدف منظور شده بود، در صورتی که چنانچه دیگر اثرات و فواید این تجهیزات چون کاهش خرید توان از شبکه بالادست در نظر گرفته شود، امکان افزایش بیشتر ظرفیت DG نیز وجود دارد. نویسندگان این مقاله در ادامه تحقیقات خود به مورد اخیر توجه نمودند.

## مراجع

- [1] W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and M. M. A. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1158-1165, May 2005.
- [2] A. Silvestri, S. Berizzi, and S. Buonanno, "Distributed generation planning using genetic algorithms," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electric Power Eng., PowerTech'99*, Budapest, Hungary, 29 Sep.-2 Aug. 1999.
- [3] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, Nov. 2004.
- [4] J. O. Kim, S. W. Nam, S. K. Park, and C. Singh, "Dispersed generation planning using improved hereford ranch algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 47, no. 1, pp. 47-55, Oct. 1998.
- [5] A. Silvestri, S. Berizzi, and S. Buonanno, "Distributed generation planning using genetic algorithms," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electric Power Eng., PowerTech'99*, Budapest, Hungary, 29 Sep.-2 Aug. 1999.
- [6] P. Phonrattanasak, "Optimal placement of DG using multiobjective particle swarm optimization," in *Proc. 2nd Int. Conf. Mech. and Elec. Technology*, pp. 342-346, Singapore, 10-12 Sep. 2010.
- [7] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, and G. Harrison, "Time-series-based maximization of distributed wind power generation integration," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 968-974, Sep. 2008.
- [8] G. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, and A. Robin Wallace, "Hybrid GA and OPF evaluation of network capacity for distributed generation connections," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 3, pp. 392-398, Mar. 2008.
- [9] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, and A. Robin Wallace, "Exploring the tradeoffs between incentives for distributed generation developers and DNOs," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 821-828, May 2007.
- [10] G. P. Harrison and A. Robin Wallace, "Maximising distributed generation capacity in deregulated markets," in *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf. and Expo.*, vol. 2, pp. 524-530, 7-12 Sep. 2003.
- [11] L. F. Ochoa, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 87-95, Feb. 2010.



بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال و توزیع، تولید پراکنده، قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و کاربرد روش‌های بهینه‌سازی چندمنظوره در مطالعات سیستم‌های قدرت.

Archive of SID